

INTRODUCCIÓN

A LA

CIENCIA DEL SUELO

INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DEL SUELO



DANIEL F. JARAMILLO J.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE CIENCIAS
MEDELLÍN**

2002

Dedico este trabajo a

CLARA PATRICIA

y a

MARÍA CAMILA

INTRODUCCIÓN

A LA

CIENCIA DEL SUELO

DANIEL F. JARAMILLO J.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE CIENCIAS

MEDELLÍN

2002

Dedico este trabajo a

CLARA PATRICIA

y a

MARÍA CAMILA

El autor

DANIEL FRANCISCO JARAMILLO JARAMILLO es Ingeniero Agrónomo de la universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Posee un título de Especialista en Fotointerpretación Aplicada a Estudios de Suelos, otorgado por el Centro Interamericano de Fotointerpretación (CIAF) de Bogotá y un título de Magister en Suelos y Aguas de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira.

En más de 20 años de experiencia profesional que posee, ha sido reconocedor de suelos en levantamientos llevados a cabo en la cuenca del río Bogotá, en varios sectores de la parte plana del Valle del Cauca, en alrededores del distrito de riegos El Juncal, en el Huila, en las áreas de influencia directa de proyectos hidroeléctricos de Antioquia como Porce II, Porce III y Riachón, así como de proyectos mineros en varios municipios de Antioquia como Amagá, Anzá, Campamento, La Pintada, Puerto Triunfo, Rionegro y Titiribí, así como en Marmato, departamento de Caldas.

Ha participado en grupos de investigación que han desarrollado trabajos de suelos en sectores del oriente antioqueño, del Magdalena medio y del páramo de Frontino, en Antioquia; en la Alta y Media Guajira y en el norte del departamento de Caldas.

Las áreas de investigación que más ha explorado hasta el momento son: “Evolución y Clasificación de Andisoles”, “Variabilidad Espacial de las propiedades de los suelos” e “Hidrofobicidad de suelos”. Ha sido profesor universitario de Ciencia del Suelo, Génesis y Clasificación de Suelos, Fotointerpretación edáfica y Fotogrametría, en pregrado y de Levantamiento de suelos, Taxonomía de Suelos, Clasificación de Tierras y Fotointerpretación, al nivel de Maestría. Ha publicado, aparte de más de una docena de artículos en revistas, otras dos obras académicas: “Andisoles del oriente antioqueño: Caracterización química y fertilidad” (1995), como autor único, y “El recurso suelo en Colombia: Distribución y evaluación” (1994), como autor principal. Actualmente se desempeña como Profesor Titular en la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, universidad a la cual ha estado vinculado desde 1984.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	<i>i</i>	2.1.2.1. Rocas clásicas	24
¿QUÉ SE ENTIENDE POR SUELO?	<i>v</i>	2.1.2.2. Rocas no clásicas	24
BIBLIOGRAFÍA	vii	2.1.3. Rocas metamórficas	25
EL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI) Y ALGUNAS EQUIVALENCIAS EN OTROS SISTEMAS, EN LA CIENCIA DEL SUELO	<i>ix</i>	2.1.4. Sedimentos no consolidados	26
1. ORGANIZACIÓN DEL SI	ix	2.2. EL COMPONENTE INORGÁNICO DEL MATERIAL PARENTAL	26
1.1. LAS UNIDADES	ix	2.2.1. Los minerales primarios	28
1.2. LOS MÚLTIPLOS Y SUBMÚLTIPLOS	x	2.2.1.1. Los silicatos	28
1.3. REGLAS DE USO	xi	2.2.1.2. Los óxidos	29
2. RELACIÓN CON OTROS SISTEMAS DE UNIDADES	xi	2.2.1.3. Los hidróxidos	30
BIBLIOGRAFÍA	xii	2.2.1.4. Los carbonatos	30
AUTOEVALUACIÓN	xiii	2.2.1.5. Los sulfatos	30
EVALUACIÓN	xiii	2.2.1.6. Los sulfuros	30
LOS ÓRDENES EN LA TAXONOMÍA DE SUELOS DEL USDA (SÍNTESIS)	<i>xv</i>	2.2.1.7. Los fosfatos	30
		2.2.2. Los minerales secundarios y otros componentes de la fracción fina del suelo	32
		2.2.2.1. Los filosilicatos secundarios	33
		2.2.2.1.1. Minerales 1:1	34
		2.2.2.1.2. Minerales 2:1	35
		2.2.2.1.3. Minerales 2:1:1	35
		2.2.2.1.4. Filosilicatos interestratificados	35
		2.2.2.2. Los aluminio - silicatos no cristalinos	36
		2.2.2.3. Los óxidos e hidróxidos de Fe y Al	36
		2.3. EFECTOS DEL MATERIAL PARENTAL SOBRE LOS SUELOS	37
		2.3.1. La textura del material litológico	39
		2.3.2. La composición mineralógica del material litológico	40
		3. LOS ORGANISMOS	45
		3.1. LA BIOTA DEL SUELO	47
		3.1.1. Clasificación	47
		3.1.1.1. Según el tamaño	48
		3.1.1.2. Según su hábitat en el suelo	48
		3.1.1.3. Según el tiempo de permanencia en el suelo	48
		3.1.2. La microbiota del suelo	48
		3.1.2.1. Bacterias	48
		3.1.2.1.1. Eubacterias	50
		3.1.2.1.2. Archaeabacterias	51
		3.1.2.2. Hongos	51
		3.1.2.3. Algas	52
		3.1.2.4. Protozoarios	52
		3.1.3. La meso y macrofauna del suelo	53
		3.1.3.1. Generalidades	53
		3.1.3.2. La lombriz de tierra	53
		3.1.3.3. Los artrópodos	54
		3.1.3.4. Nemátodos	55
		3.1.4. Efectos de la biota sobre el suelo	55
		3.1.4.1. Los microorganismos	55
		3.1.4.2. Los meso y macroorganismos	56
		3.2. EL HOMBRE	57
CAPÍTULO 1. LOS FACTORES DE FORMACIÓN DEL SUELO	9		
1. EL CLIMA	11		
1.1. LAS VARIABLES CLIMÁTICAS Y LA PEDOGÉNESIS	11		
1.2. CLASIFICACIÓN DEL CLIMA	13		
1.3. PROPIEDADES DEL SUELO AFECTADAS POR EL CLIMA	16		
2. EL MATERIAL PARENTAL	19		
2.1. EL ORIGEN DEL MATERIAL PARENTAL	19		
2.1.1. Rocas ígneas	20		
2.1.1.1. Rocas intrusivas o plutónicas	21		
2.1.1.2. Rocas extrusivas	21		
2.1.1.3. Rocas hipoabísales	21		
2.1.2. Rocas sedimentarias	24		

3.3. LA VEGETACIÓN	58	EVALUACIÓN	89
3.3.1. Generalidades	58		
3.3.2. Caracterización de la vegetación natural	60		
3.4. LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO	61	PARTE 2. LAS PROPIEDADES MACROMORFOLÓGICAS DEL SUELO	91
3.4.1. Tipos de materiales orgánicos del suelo	61		
3.4.2. Transformación de los materiales orgánicos	62		
3.4.3. El humus	63		
3.4.3.1. Tipos de humus	63		
3.4.3.2. Propiedades del humus	63		
3.4.4. Importancia de la materia orgánica en el suelo	64		
4. EL RELIEVE	65	CAPÍTULO 3. LA ESTRUCTURA DEL SUELO	97
4.1. TIPOS DE RELIEVES	65		
4.2. LA VERTIENTE	66		
4.3. CARACTERÍSTICAS DE LA VERTIENTE	67	1. FLOCULACIÓN	99
4.3.1. Forma de la vertiente	67	2. ORIGEN E IMPORTANCIA	100
4.3.2. Gradiente de la vertiente	67	3. PROPIEDADES DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO	103
4.3.3. Longitud de la vertiente	67	4. CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO	103
4.3.4. Orientación de las vertientes	68	4.1. EN EL CAMPO	103
4.4. EFECTOS DE LA VERTIENTE SOBRE EL SUELO	68	4.2. EN EL LABORATORIO	103
4.4.1. Sobre la erosión	68	4.3. INTERPRETACIÓN	107
4.4.2. Sobre las condiciones de drenaje	69	5. ESTABILIDAD ESTRUCTURAL	108
4.4.3. Otras relaciones con el relieve	69	5.1. CARACTERIZACIÓN DE LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL DEL SUELO	109
5. EL TIEMPO	71	5.1.1. Método de Yoder	109
BIBLIOGRAFÍA	75	5.1.2. Método de Henin	112
AUTOEVALUACIÓN	79	5.2. INTERPRETACIÓN	113
EVALUACIÓN	80	BIBLIOGRAFÍA	114
CAPÍTULO 2. LOS PROCESOS PEDOGENÉTICOS	81	AUTOEVALUACIÓN	115
1. LOS PROCESOS GLOBALES	83	EVALUACIÓN	116
2. LOS PROCESOS ESPECÍFICOS	84	CAPÍTULO 4. EL COLOR DEL SUELO	117
2.1. PROCESOS ESPECÍFICOS DE ADICIONES	84		
2.2. PROCESOS ESPECÍFICOS DE TRANSFORMACIONES	84	1. IMPORTANCIA	119
2.3. PROCESOS ESPECÍFICOS DE TRANSLOCACIONES	85	2. DETERMINACIÓN	120
2.4. PROCESOS ESPECÍFICOS DE PÉRDIDAS	87	2.1. DISEÑO DE LA TABLA DE COLORES MUNSELL	121
2.5. PROCESOS ESPECÍFICOS COMPLEJOS	87	2.1.1. El matiz (Hue)	121
2.5.1. Andolización	87	2.1.2. La claridad (Value)	121
2.5.2. Podzolización	88	2.1.3. La pureza (Chroma)	121
2.5.3. Ferralitización	88	2.1.4. La tabla de colores	122
BIBLIOGRAFÍA	88	2.2. DETERMINACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL COLOR DEL SUELO	122
AUTOEVALUACIÓN	89	2.3. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DETERMINACIÓN DEL COLOR	124
		3. PATRONES ESPECIALES DE COLOR EN EL SUELO	124
		BIBLIOGRAFÍA	126

AUTOEVALUACIÓN	126	
EVALUACIÓN	126	
CAPÍTULO 5. EL PERFIL DEL SUELO	127	
1. LOS HORIZONTES Y CAPAS MAESTROS DEL SUELO	129	
1.1. HORIZONTES Y CAPAS O	129	
1.2. HORIZONTES A	129	
1.3. HORIZONTE E	130	
1.4. HORIZONTES B	130	
1.5. HORIZONTES Y CAPAS C	130	
1.6. CAPAS R	130	
2. HORIZONTES COMBINADOS	130	
2.1. HORIZONTES TRANSICIONALES	133	
2.2. HORIZONTES MEZCLA DOS	133	
3. CARACTERÍSTICAS SUBORDINADAS DE LOS HORIZONTES Y CAPAS MAESTROS DEL SUELO	134	
4. SUBDIVISIONES VERTICALES	135	
5. DISCONTINUIDADES LITOLÓGICAS	136	
6. LAS SECUENCIAS DE HORIZONTES Y/O CAPAS	137	
7. DESCRIPCIÓN DEL PERFIL DEL SUELO	137	
BIBLIOGRAFÍA	147	
AUTOEVALUACIÓN	147	
EVALUACIÓN	148	
PARTE 3. LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO	149	
CAPÍTULO 6. EL MEDIO FÍSICO EDÁFICO	155	
1. COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA DEL SUELO	157	
2. RELACIONES BÁSICAS	159	
AUTOEVALUACIÓN	161	
EVALUACIÓN	161	
CAPÍTULO 7. LA TEXTURA DEL SUELO	163	
1. DEFINICIONES	165	
2. EVALUACIÓN DE LA TEXTURA DEL SUELO	166	
2.1. DETERMINACIÓN DE LA TEXTURA DEL SUELO POR SEDIMENTACIÓN	166	
2.1.1. Bases teóricas	166	
2.1.2. Determinación por el método del hidrómetro o de Bouyoucos	167	
2.1.2.1. Procedimiento	167	
2.1.2.2. Manejo de los resultados	170	
2.1.2.3. Limitaciones del método de Bouyoucos para determinar la textura del suelo	172	
2.2. EVALUACIÓN DE LA TEXTURA DEL SUELO EN EL CAMPO	172	
2.2.1. Propiedades del separado arena (A)	172	
2.2.2. Propiedades del separado limo (L)	173	
2.2.3. Propiedades del separado arcilla (Ar)	173	
2.2.4. Procedimiento	174	
2.2.5. Limitaciones del método del tacto para determinar la textura del suelo	174	
3. LA ARCILLA DISPERSA EN EL SUELO	175	
BIBLIOGRAFÍA	177	
AUTOEVALUACIÓN	178	
EVALUACIÓN	179	
CAPÍTULO 8. DENSIDAD Y POROSIDAD DEL SUELO	181	
1. DENSIDAD REAL (Dr)	183	
1.1. DETERMINACIÓN	184	
1.2. INTERPRETACIÓN	186	
2. DENSIDAD APARENTE	186	
2.1. DETERMINACIÓN	186	
2.1.1. Método del cilindro biselado	186	
2.1.2. Método de la cajuela	189	
2.2. INTERPRETACIÓN	190	
2.3. IMPORTANCIA DE LA Da	190	
3. POROSIDAD	192	
3.1. TIPOS DE POROSIDAD EN EL SUELO	192	
3.2. DETERMINACIÓN	192	
3.3. INTERPRETACIÓN	195	
BIBLIOGRAFÍA	198	
AUTOEVALUACIÓN	199	
EVALUACIÓN	199	

CAPÍTULO 9. LA FASE LÍQUIDA DEL SUELO	201	
1. CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO	203	1. ESTADOS DE CONSISTENCIA DEL SUELO 237
2. RETENCIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO	205	1.1. ESTADO COHERENTE 237
2.1. POTENCIAL GRAVITACIONAL (Ψ_g)	207	1.2. ESTADO DE FRIABILIDAD O DE FRAGILIDAD 238
2.2. POTENCIAL OSMÓTICO (Ψ_o)	207	1.2.1. Límite de Soltura (LS) 238
2.3. POTENCIAL MÁTRICO (Ψ_m)	208	1.2.2. Límite Inferior de Plasticidad (LIP) 239
2.3.1. Potencial de sobrecarga (Ψ_b)	208	1.3. ESTADO PLÁSTICO 239
2.3.2. Potencial de humedecimiento (Ψ_w)	208	1.4. ESTADO DE FLUIDEZ 239
2.4. POTENCIAL DE PRESIÓN DEL AIRE (Ψ_a)	209	2. COMPACTACIÓN 239
2.5. POTENCIAL DE PRESIÓN HIDROSTÁTICA (Ψ_p)	209	3. ENCOSTRAMIENTO SUPERFICIAL 240
2.6. MEDIDA DE LOS POTENCIALES DEL SUELO	213	4. CEMENTACIÓN 240
3. CONSTANTES DE HUMEDAD DEL SUELO	216	5. EXPANSIÓN Y CONTRACCIÓN 241
4. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO	216	6. EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA DEL SUELO 242
4.1. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA	216	6.1. RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN 242
4.2. DETERMINACIÓN DE LA RETENCIÓN DE HUMEDAD	219	6.2. RESISTENCIA A LA RUPTURA 243
4.2.1. Tensiómetros de mercurio	220	6.3. CAMBIOS DE ESTADO 246
4.2.2. Tensiómetros con vacuómetro	220	6.3.1. Determinación en el campo 246
5. LA CURVA DE RETENCIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO	220	6.3.2. Determinaciones en el laboratorio 246
6. MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO	222	6.3.2.1. Determinación del Límite Superior de Plasticidad 246
6.1. INFILTRACIÓN	224	6.3.2.2. Determinación del Límite Inferior de Plasticidad 248
6.1.1. Factores que afectan la infiltración	224	6.3.2.3. Determinación del Límite de Soltura 248
6.1.2. Determinación de la infiltración del suelo	224	6.4. EXPANSIÓN Y CONTRACCIÓN 249
6.2. LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DEL SUELO	228	7. INTERPRETACIÓN 250
6.2.1. Determinación de la conductividad hidráulica saturada	229	BIBLIOGRAFÍA 252
6.2.2. Interpretación de la conductividad hidráulica saturada	230	AUTOEVALUACIÓN 254
BIBLIOGRAFÍA	231	EVALUACIÓN 254
AUTOEVALUACIÓN	233	
EVALUACIÓN	233	
CAPÍTULO 10. LA CONSISTENCIA DEL SUELO	235	
1. ESTADOS DE CONSISTENCIA DEL SUELO	237	
1.1. ESTADO COHERENTE	237	
1.2. ESTADO DE FRIABILIDAD O DE FRAGILIDAD	238	
1.2.1. Límite de Soltura (LS)	238	
1.2.2. Límite Inferior de Plasticidad (LIP)	239	
1.3. ESTADO PLÁSTICO	239	
1.4. ESTADO DE FLUIDEZ	239	
2. COMPACTACIÓN	239	
3. ENCOSTRAMIENTO SUPERFICIAL	240	
4. CEMENTACIÓN	240	
5. EXPANSIÓN Y CONTRACCIÓN	241	
6. EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA DEL SUELO	242	
6.1. RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN	242	
6.2. RESISTENCIA A LA RUPTURA	243	
6.3. CAMBIOS DE ESTADO	246	
6.3.1. Determinación en el campo	246	
6.3.2. Determinaciones en el laboratorio	246	
6.3.2.1. Determinación del Límite Superior de Plasticidad	246	
6.3.2.2. Determinación del Límite Inferior de Plasticidad	248	
6.3.2.3. Determinación del Límite de Soltura	248	
6.4. EXPANSIÓN Y CONTRACCIÓN	249	
7. INTERPRETACIÓN	250	
BIBLIOGRAFÍA	252	
AUTOEVALUACIÓN	254	
EVALUACIÓN	254	
CAPÍTULO 11. MANEJO DEL MEDIO FÍSICO DEL SUELO	255	
1. DEGRADACIÓN FÍSICA DEL SUELO	257	
1.1. EL LABOREO DEL SUELO	257	
1.1.1. Objetivos del laboreo del suelo	257	
1.1.2. Principales operaciones de labranza del suelo	258	
1.1.2.1. Arada	258	
1.1.2.2. Rastrillada	258	
1.1.2.3. Subsolada	258	
1.1.2.4. Cultivada	258	
1.1.2.5. Otras labores mecanizadas	259	
1.1.3. Tipos de labranza	259	
1.1.3.1. Segundo el objetivo principal de la labranza	259	
1.1.3.1.1. Labranza primaria	259	
1.1.3.1.2. Labranza secundaria	261	

1.1.3.2. Según la intensidad o cantidad de labores que se hacen	261
1.1.3.2.1. Labranza convencional	261
1.1.3.2.2. Labranza reducida	261
1.1.3.2.3. Labranza mínima	261
1.1.3.2.4. Labranza cero	261
1.1.3.3. Según el volumen de suelo afectado con la labor	262
1.1.3.3.1. Labranza vertical	262
1.1.3.3.2. Labranza horizontal	262
1.1.4. Problemas ocasionados por la mala labranza	263
1.2. EL PASTOREO	270
1.2.1. Sistemas de pastoreo	270
1.2.1.1. Pastoreo continuo	270
1.2.1.2. Pastoreo alterno	270
1.2.1.3. Pastoreo en rotación	271
1.2.1.4. Pastoreo en fajas	271
1.2.1.5. Confinamiento	271
1.2.2. Efectos del pastoreo sobre el medio físico edáfico	271
1.3. EL RIEGO	272
1.3.1. Sistemas de riego	272
1.3.1.1. Riego superficial	272
1.3.1.1.1. Características	273
1.3.1.1.2. Ventajas	273
1.3.1.1.3. Desventajas	273
1.3.1.2. Riego por aspersión	273
1.3.1.2.1. Características	273
1.3.1.2.2. Ventajas	273
1.3.1.2.3. Desventajas	274
1.3.1.3. Riego localizado	274
1.3.1.3.1. Características	274
1.3.1.3.2. Ventajas	274
1.3.1.3.3. Desventajas	275
1.3.2. Efectos nocivos del riego en el suelo	275
1.4. EL DRENAJE	276
1.4.1. Efectos del mal drenaje	276
1.4.2. Beneficios del drenaje	277
1.5. EL USO DE LA TIERRA	277
2. RECUPERACIÓN DEL MEDIO FÍSICO EDÁFICO	282
2.1. ROTACIÓN DE CULTIVOS	283
2.2. USO DE ACONDICIONADORES FÍSICOS	284
2.2.1. Acondicionadores físicos naturales	285
2.2.2. Acondicionadores físicos sintéticos	286
BIBLIOGRAFÍA	291
AUTOEVALUACIÓN	293
EVALUACIÓN	293

PARTE 4. LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO

295

CAPÍTULO 12. PRINCIPIOS DE QUÍMICA Y COLOIDES DEL SUELO

301

1. CONCEPTOS BÁSICOS	303
2. SOLUCIONES	304
2.1. CONCENTRACIÓN DE UNA SOLUCIÓN	305
2.1.1. Porcentaje (%)	305
2.1.2. Molaridad (M)	305
2.1.3. Molalidad (m)	305
2.1.4 Normalidad (N)	305
2.1.5. Partes por millón (ppm) o por billón (ppb)	306
2.2. SOLVATACIÓN	306
3. EL ENLACE QUÍMICO	306
3.1. ENLACE IÓNICO	307
3.2. ENLACE COVALENTE	308
3.3. ENLACE DE van der WAALS	308
4. LOS COLOIDES DEL SUELO	308
4.1. LA CARGA PERMANENTE	309
4.2. LA CARGA VARIABLE	310
4.3. IMPORTANCIA DE LA CARGA DE LOS COLOIDES DEL SUELO	313
BIBLIOGRAFÍA	315
AUTOEVALUACIÓN	316
EVALUACIÓN	316

CAPÍTULO 13. EL INTERCAMBIO IÓNICO

317

1. FACTORES QUE CONTROLAN EL INTERCAMBIO IÓNICO	319
1.1. LAS PROPIEDADES DEL CAMBIADOR	319
1.2. LAS PROPIEDADES DEL IÓN	320
2. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO (CIC)	321
2.1. DETERMINACIÓN DE LA CIC DEL SUELO	324
2.1.1. Determinación de la CIC a pH 8.2	325
2.1.2. Determinación de la CIC a pH 7	327

2.1.3. Determinación de la CIC al pH del suelo	327	2.3. TIPOS DE ACIDEZ EN EL SUELO	356
2.1.4. Determinación de la CIC por colorimetría	328	2.3.1. Acidez activa	356
2.2. APLICACIONES DE LA CIC DEL SUELO	329	2.3.2. Acidez intercambiable	356
2.2.1. En la caracterización general de la carga del suelo	329	2.3.3. Acidez titulable o potencial	356
2.2.2. En la fertilidad de suelos	330	2.3.4. Acidez total	356
2.2.3. En la clasificación de suelos	331	2.4. GRUPOS Y PROPIEDADES DE SUELOS ÁCIDOS	357
3. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO ANIÓNICO (CIA)	332	2.4.1. Suelos minerales con pH < 4.5	357
4. ADSORCIÓN ESPECÍFICA O SELECTIVA	333	2.4.2. Suelos minerales con pH entre 4.5 y 5.5	357
5. LA DOBLE CAPA DIFUSA	334	2.4.3. Suelos minerales con pH entre 5.5 y 6.5	357
BIBLIOGRAFÍA	338	2.4.4. Suelos orgánicos	358
AUTOEVALUACIÓN	339	2.5. INTERPRETACIÓN DE LA REACCIÓN EN SUELOS ÁCIDOS Y NEUTROS	358
EVALUACIÓN	340	2.5.1. El pH	358
CAPÍTULO 14. LA REACCIÓN DEL SUELO	343	2.5.2. La acidez intercambiable	359
1. EL pH	345	2.6. MANEJO DE LOS SUELOS ÁCIDOS MINERALES	359
1.1. DETERMINACIÓN DEL pH DEL SUELO	345	2.6.1. Suelos con pH entre 5.5 y 6.5	359
1.1.1. Método potenciométrico	345	2.6.2. Suelos con pH < 5.5	360
1.1.2. Métodos colorimétricos	347	2.7. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA DE SUELOS ÁCIDOS	362
1.2. FACTORES QUE AFECTAN LA MEDIDA DEL pH	348	3. SUELOS BÁSICOS	363
1.2.1. Efecto de dilución	349	3.1. FUENTES DE ALCALINIDAD EN EL SUELO	363
1.2.2. Efecto de las sales	349	3.2. FORMACIÓN DE SUELOS BÁSICOS	363
1.2.3. Efecto del contenido de CO ₂	350	3.3. GRUPOS Y PROPIEDADES DE LOS SUELOS BÁSICOS	364
1.2.4. Variaciones estacionales	350	3.3.1. Suelos salinos	364
1.3. CALIFICACIÓN DEL pH DEL SUELO	351	3.3.2. Suelos sódicos	364
1.4. IMPORTANCIA DEL pH EN EL SUELO	352	3.3.3. Suelos salino - sódicos	365
1.4.1. En la disponibilidad de nutrientes	352	3.3.4. Otros suelos básicos	365
1.4.2. En la identificación del tipo de carga de los coloides	352	3.4. MANEJO DE LOS SUELOS BÁSICOS	366
1.4.3. En taxonomía de suelos	352	3.4.1. Suelos Salinos	366
1.4.4. Para detectar coloides inorgánicos no cristalinos	353	3.4.2. Suelos sódicos	367
1.5. CAPACIDAD BUFFER DEL SUELO	353	3.4.3. Suelos salino - sódicos	368
2. SUELOS ÁCIDOS	353	3.5. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA DE LOS SUELOS BÁSICOS	369
2.1. FUENTES DE ACIDEZ EN EL SUELO	354	BIBLIOGRAFÍA	371
2.1.1. Grupos ácidos de los coloides inorgánicos del suelo	354	AUTOEVALUACIÓN	373
2.1.2. Grupos ácidos de la materia orgánica	355	EVALUACIÓN	373
2.1.3. Ácidos solubles	355		
2.2. FORMACIÓN DE SUELOS ÁCIDOS	355		

PARTE 5. LAS PROPIEDADES BIO-ORGÁNICAS DEL SUELO 375

CAPÍTULO 15. LA BIOTA Y EL MANEJO DEL SUELO	381	7.1. CAMBIO DE COBERTURA 7.2. EL LABOREO DEL SUELO 7.3. EL USO DE AGROQUÍMICOS BIBLIOGRAFÍA AUOEVALUACIÓN	405 406 407 410 412
1. IMPORTANCIA DE LOS MESO Y MACROORGANISMOS	383		
2. ALGUNOS EFECTOS DEL MANEJO DEL SUELO SOBRE SU MESO Y MACROFAUNA	383		
3. IMPORTANCIA DE LOS MICROORGANISMOS	387		
4. LA RIZOSFERA	390		
4.1. GENERALIDADES	390		
4.2 PROPIEDADES	391		
4.3. INTERACCIONES RIZOSFERA-MICROORGANISMOS	392		
4.3.1. Asociaciones o interacciones neutras	393		
4.3.2. Interacciones nocivas	394		
4.3.3. Interacciones benéficas	394		
5. FIJACIÓN BIOLÓGICA DE NITRÓGENO	395		
5.1. FIJACIÓN DE NITRÓGENO EN FORMA LIBRE	395		
5.2. FIJACIÓN DE NITRÓGENO POR ASOCIACIÓN	396		
5.3. FIJACIÓN SIMBIÓTICA DE NITRÓGENO	397		
5.4. IMPORTANCIA DE LA FIJACIÓN BIOLÓGICA DE NITRÓGENO	398		
5.5. CONDICIONES QUE AFECTAN A LOS FIJADORES DE NITRÓGENO	399		
5.6. INOCULACIÓN DE SEMILLAS CON FIJADORES DE NITRÓGENO	400		
6. MICORRIZAS	401		
6.1. TIPOS DE MICORRIZAS	401		
6.1.1. Ectomicorrizas	401		
6.1.2. Endomicorrizas	401		
6.1.2.1. Endomicorrizas arbusculares (MVA)	402		
6.1.2.2. Micorrizas de orquídeas	402		
6.1.2.3. Micorrizas ericoides	402		
6.1.3. Ectendomicorrizas	403		
6.2. CONDICIONES QUE AFECTAN EL DESARROLLO DE LAS MICORRIZAS	403		
6.3. IMPORTANCIA DE LAS MICORRIZAS	403		
6.4. INOCULACIÓN CON MICORRIZAS	404		
6.4.1. Endomicorrizas	404		
6.4.2. Ectomicorrizas	404		
7. ALGUNOS EFECTOS DEL MANEJO DEL SUELO SOBRE SUS MICROORGANISMOS	405		
CAPÍTULO 16. LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO	415		
1. IMPORTANCIA DE LA MATERIA ORGÁNICA EN EL SUELO		1. IMPORTANCIA DE LA MATERIA ORGÁNICA EN EL SUELO	417
2. CONTENIDO Y DISTRIBUCIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA EN EL SUELO		2. CONTENIDO Y DISTRIBUCIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA EN EL SUELO	419
2.1. DISTRIBUCIÓN EN EL INTERIOR DEL SUELO		2.1. DISTRIBUCIÓN EN EL INTERIOR DEL SUELO	421
2.2. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL		2.2. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL	422
2.3. NIVELES CRÍTICOS		2.3. NIVELES CRÍTICOS	424
3. EVALUACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO		3. EVALUACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO	424
3.1. ANÁLISIS CUANTITATIVOS TOTALES		3.1. ANÁLISIS CUANTITATIVOS TOTALES	424
3.1.1. Calcinación		3.1.1. Calcinación	425
3.1.2. Método de Walkley y Black		3.1.2. Método de Walkley y Black	425
3.1.3. Oxidación con peróxido de hidrógeno		3.1.3. Oxidación con peróxido de hidrógeno	427
3.2. FRACCIONAMIENTO DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO		3.2. FRACCIONAMIENTO DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO	427
3.3. ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN CUALITATIVOS		3.3. ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN CUALITATIVOS	430
BIBLIOGRAFÍA		BIBLIOGRAFÍA	430
AUOEVALUACIÓN		AUOEVALUACIÓN	432
EVALUACIÓN		EVALUACIÓN	432
CAPÍTULO 17. ENMIENDAS ORGÁNICAS	433		
1. CARACTERIZACIÓN		1. CARACTERIZACIÓN	435
2. ABONOS ORGÁNICOS MÁS UTILIZADOS		2. ABONOS ORGÁNICOS MÁS UTILIZADOS	435
2.1. ESTÉRCOLES		2.1. ESTÉRCOLES	436
2.1.1. Ventajas		2.1.1. Ventajas	436
2.1.2. Desventajas		2.1.2. Desventajas	436
2.1.3. Manejo		2.1.3. Manejo	437
2.2. RESIDUOS DE COSECHA		2.2. RESIDUOS DE COSECHA	437
2.2.1. Ventajas		2.2.1. Ventajas	438
2.2.2. Desventajas		2.2.2. Desventajas	438
2.2.3. Manejo		2.2.3. Manejo	439
2.3. MULCH VEGETAL		2.3. MULCH VEGETAL	439
2.3.1. Efectos sobre el suelo		2.3.1. Efectos sobre el suelo	439
2.3.2. Inconvenientes		2.3.2. Inconvenientes	441

2.4. COMPOST	442
2.4.1. Formación de las pilas de compost	442
2.4.2. Beneficios del compostaje	443
2.4.3. Desventajas	443
2.4.4. Manejo	443
2.5 LOMBRICOMPUESTO	443
2.6. ABONOS VERDES	445
2.6.1. Características de las plantas a utilizar como abonos verdes	446
2.6.2. Ventajas	447
2.6.3. Desventajas	447
2.6.4. Manejo	447
2.6.5. Azolla	448
2.7. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	448
2.7.1. Ventajas	449
2.7.2. Desventajas	449
2.7.3. Manejo	450
2.8. LODOS DE AGUAS RESIDUALES URBANAS	451
2.8.1. Ventajas	452
2.8.2. Desventajas	452
2.8.3. Manejo	453
BIBLIOGRAFÍA	454
AUTOEVALUACIÓN	456
EVALUACIÓN	456
CAPÍTULO 18. SUELOS ORGÁNICOS	457
1. ORIGEN DE LOS SUELOS ORGÁNICOS	459
1.1. LAS TURBAS	459
1.1.1. Propiedades	459
1.1.2. Tipos	459
1.2 PEDOGÉNESIS	461
2. PROPIEDADES DE LOS SUELOS ORGÁNICOS	461
3. USO Y MANEJO DE LOS SUELOS ORGÁNICOS	463
4. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA DE LOS SUELOS ORGÁNICOS	464
5. DISTRIBUCIÓN DE LOS SUELOS ORGÁNICOS EN COLOMBIA	467
BIBLIOGRAFÍA	468
AUTOEVALUACIÓN	469
EVALUACIÓN	470

PARTE 6. EL ESTUDIO ESPACIAL DE LOS SUELOS 471

CAPÍTULO 19. TIPOS DE LEVANTAMIENTOS DE SUELOS 477

1. TIPOS DE LEVANTAMIENTOS DE SUELOS	479
1.1. LEVANTAMIENTOS EXPLORATORIOS	480
1.2. LEVANTAMIENTOS GENERALES	480
1.3. LEVANTAMIENTOS SEMIDETALLADOS	481
1.4. LEVANTAMIENTOS DETALLADOS	481
2. METODOLOGÍA PARA HACER LOS LEVANTAMIENTOS DE SUELOS	482
2.1. ETAPA PRELIMINAR DE OFICINA	482
2.1.1. Revisión de literatura	482
2.1.2. Fotointerpretación preliminar	482
2.1.3. Programación del trabajo de campo	483
2.2. ETAPA DE CAMPO	484
2.3. ETAPA FINAL DE OFICINA	484
BIBLIOGRAFÍA	485
AUTOEVALUACIÓN	486

CAPÍTULO 20. LA CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS 487

1. OBJETIVOS DE UN SISTEMA DE CLASIFICACIÓN	490
2. EL SISTEMA USDA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS	491
2.1. ATRIBUTOS	491
2.2. PRINCIPIOS BÁSICOS	491
2.3. EL SUELO QUE SE CLASIFICA	492
2.4. SUELO MINERAL Y SUELO ORGÁNICO	492
2.5. CARACTERÍSTICAS DIAGNÓSTICAS	494
2.5.1. Epipedones	494
2.5.1.1. Mólico	494
2.5.1.2. Melánico	494
2.5.1.3. Plágeno	495
2.5.1.4. Epipedones variantes del mólico	495
2.5.1.5. Epipedones orgánicos	495
2.5.1.6. Ócrico	495

2.5.2. Endopedones	496	1.3. ÁREAS DE MUESTREO O ÁREAS PILOTO	527
2.5.2.1. Endopedones iluviales	496	2. EL MAPA DE SUELOS	527
2.5.2.2. Endopedones de transformación	496	2.1. LA ESCALA DEL MAPA DE SUELOS	527
2.5.2.3. Endopedones mixtos	497	2.2. LAS UNIDADES CARTOGRAFÍCAS	
2.5.2.4. Otros endopedones	497	O DE MAPEO	531
2.5.3. El clima edáfico	498	2.2.1. Consociación	532
2.5.3.1. El régimen de temperatura del suelo	498	2.2.2. Asociación	532
2.5.3.2. El régimen de humedad del suelo	500	2.2.3. Complejo	532
2.5.3.2.1. Arídico y Tórrico (o Tórrido)	500	2.2.4. Disociación	532
2.5.3.2.2. Ústico	500	2.2.5. Inasociación	532
2.5.3.2.3. Údico	501	2.3. LAS UNIDADES TAXONÓMICAS	533
2.5.3.2.4. Ácuico	501	2.3.1. Taxadjunto	533
2.5.3.2.5. Xérico	501	2.3.2. Variante	533
2.5.4. Otras características diagnósticas	501	2.3.3. Conjunto	533
2.6. CATEGORÍAS	502	2.3.4. Fase	534
2.6.1. Las clases	502	2.3.5. Áreas misceláneas	534
2.6.2. Nomenclatura	503	2.4. EL CONTENIDO DEL MAPA DE SUELOS	534
2.6.2.1. Características	504	2.4.1. La Leyenda	534
2.6.2.2. Conformación de los nombres	504	2.4.2. Información complementaria	535
2.6.2.2.1. Orden	504	BIBLIOGRAFÍA	536
2.6.2.2.2. Suborden	505	AUTOEVALUACIÓN	537
2.6.2.2.3. Gran grupo	505	EVALUACIÓN	537
2.6.2.2.4. Subgrupo	507		
2.6.2.2.5. Familia	508		
2.6.2.2.6. Serie	510		
2.6.2.3. Reglas para el uso de la nomenclatura	511		
2.7. PROCEDIMIENTO PARA CLASIFICAR UN SUELO	511		
2.8. ALGUNOS PROBLEMAS EN LA CLASIFICACIÓN DE SUELOS	515	CAPÍTULO 22. EL INFORME DEL LEVANTAMIENTO DE SUELOS	539
3. EL SISTEMA FAO/UNESCO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS	515	1. LA MEMORIA TÉCNICA	541
4. EL SISTEMA BRASILERO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS	517	1.1. INTRODUCCIÓN	541
BIBLIOGRAFÍA	518	1.2. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA ZONA	541
AUTOEVALUACIÓN	520	1.3. DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES CARTOGRAFÍCAS	542
EVALUACIÓN	520	1.4. INTERPRETACIÓN DEL LEVANTAMIENTO	543
CAPÍTULO 21. CARTOGRAFÍA DE SUELOS	521	1.5. METODOLOGÍA	544
1. DELIMITACIÓN	523	1.6. GÉNESIS Y CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS	544
1.1. TIPOS DE OBSERVACIONES DE SUELOS	525	1.7. DESCRIPCIÓN DE LOS PERFILES MODALES	545
1.1.1. Calicatas	525	2. EL USO DE LOS INFORMES DE LEVANTAMIENTOS DE SUELOS	546
1.1.2. Detalladas	525	2.1. TIPOS DE USUARIOS	546
1.1.3. De comprobación	525	2.1.1. De bajos conocimientos en suelos	546
1.2. MAPEO DE SUELOS	526	2.1.2. Con conocimiento moderado en suelos	547
1.2.1. Mapeo en red	526	2.1.3. Personas especializadas en suelos	547
1.2.2. Mapeo en transectos	526	2.2. EXTRACCIÓN DE LA INFORMACIÓN	547
1.2.3. Mapeo libre	527	BIBLIOGRAFÍA	548
		AUTOEVALUACIÓN	549
		EVALUACIÓN	549

CAPÍTULO 23. VARIABILIDAD DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO	551	BIBLIOGRAFÍA	592
		AUTOEVALUACIÓN	593
		EVALUACIÓN	593
		ÍNDICE ALFABÉTICO	595
1. VARIABILIDAD DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO	553		
1.1. COMPONENTES DE LA VARIABILIDAD	553		
1.2. EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD	554		
1.2.1. Variabilidad aleatoria	554		
1.2.2. Variabilidad sistemática	556		
2. VARIABILIDAD ESPACIAL DE SUELOS	557		
2.1. GENERALIDADES	557		
2.2. EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL EN SUELOS	557		
2.2.1. Diseños anidados	557		
2.2.2. Análisis de semivariografía	560		
2.3. APLICACIONES	565		
2.3.1. Producción de mapas de isolíneas	565		
2.3.2. Muestreo de suelos	565		
2.3.3. Seleccionar el tamaño y la ubicación de unidades experimentales	567		
2.3.4. Interpretación de resultados de investigación	567		
2.3.5. Ayuda en el manejo de los suelos	568		
BIBLIOGRAFÍA	569		
AUTOEVALUACIÓN	572		
CAPÍTULO 24. LOS SUELOS DE COLOMBIA	573		
1. REGIONES NATURALES DE COLOMBIA	575		
1.1. AMAZONIA	577		
1.2. REGIÓN ANDINA	578		
1.3. ORINOQUIA	580		
1.4. LLANURA DEL CARIBE	581		
1.5. ANDÉN PACÍFICO	582		
1.6. ALTO Y MEDIO MAGDALENA	582		
1.7. ALTA Y MEDIA GUAJIRA	583		
1.8. VALLE DEL RÍO CAUCA	585		
1.9. ISLAS DEL CARIBE	585		
2. APTITUD DE USO AGROPECUARIO DE LOS SUELOS COLOMBIANOS	586		
3. LIMITANTES PARA EL USO AGROPECUARIO DE LOS SUELOS COLOMBIANOS	589		

INTRODUCCIÓN

E

ste texto pretende poner al alcance de los estudiantes universitarios de pregrado, principalmente de las áreas de las Ciencias Agropecuarias, los **elementos básicos** de los componentes de la Ciencia del Suelo que deben manejar, primero durante su trasegar por la Universidad y, luego, durante su ejercicio profesional. Es pues, fundamentalmente, un libro de texto para los estudiantes que se convierte después en un documento de consulta para temas generales relacionados con el manejo del suelo.

El libro se ha dividido en **seis partes** para la presentación de los contenidos:

- En la **primera parte** se analizan los factores (Capítulo 1) y los procesos (Capítulo 2) que contribuyen a formar el suelo.
- La **segunda parte** describe las propiedades macroscópicas primarias que adquiere el suelo durante su evolución, es decir, aquellas que se pueden observar a simple vista: La estructura (Capítulo 3), el color (Capítulo 4) y los horizontes (Capítulo 5).
- La **tercera parte** estudia las propiedades físicas del suelo: Textura (Capítulo 7), densidad y porosidad (Capítulo 8), la fase líquida (Capítulo 9), la consistencia (Capítulo 10) y termina con una síntesis acerca de las prácticas de manejo que se relacionan con dichas propiedades (Capítulo 11).
- La **cuarta parte** aborda las propiedades químicas del suelo: Los coloides y su carga (Capítulo 12), los fenómenos de intercambio iónico (Capítulo 13) y la reacción del suelo (Capítulo 14).
- La **quinta parte** se encarga del estudio de las características orgánicas y biológicas del suelo: La biota (Capítulo 15), la materia orgánica (Capítulo 16), las enmiendas orgánicas (Capítulo 17) y los suelos orgánicos (Capítulo 18).
- La **parte seis** se encarga de los temas relacionados con la espacialidad de los suelos y su representación: Los levantamientos de suelos (Capítulo 19), la clasificación taxonómica (Capítulo 20), la cartografía edáfica (Capítulo 21), los informes de los levantamientos de suelos (Capítulo 22) y la variabilidad de las propiedades edáficas (Capítulo 23), para terminar con el Capítulo 24 sobre los suelos de Colombia, destacando su distribución y sus principales características y limitantes para el uso agropecuario, por regiones naturales.

Aparte de los anteriores contenidos, el libro se inicia con la presentación del **Sistema Internacional de Unidades (SI)**, el cual es el sistema aceptado oficialmente por la comunidad

científica internacional dedicada al estudio de los suelos; con este tema se quiere poner en contacto al lector, de entrada, con las unidades que va a encontrar preferencialmente dentro del texto, facilitándole la comprensión de éste.

A lo largo del texto se exponen los conceptos que definen las diferentes propiedades tratadas; se establecen relaciones entre ellas; se discute su comportamiento en el suelo y bajo diferentes condiciones de entorno; se describen los métodos más utilizados para evaluarlas, tanto en campo (cuando es posible) como en laboratorio; se indican los valores críticos que pueden adquirir y que llegan a limitar la productividad del suelo y se dan algunas pautas generales para su manejo adecuado.

Se ha tratado, en lo posible, de ilustrar el documento con ejemplos de regiones colombianas, con el fin de que el usuario se motive a conocer el recurso suelo de nuestro país; así mismo, se ha tratado de referenciar los suelos **taxonómicamente**, para que se familiarice con esta valiosa herramienta de síntesis y divulgación del conocimiento.

Mucha información utilizada para ilustrar los temas tratados, se presenta sólo con el análisis pertinente para el tópico específico abordado, sin ampliarlo a otros posibles; ésto se ha hecho intencionalmente, con el propósito de dejarle al lector la tarea de realizar esos otros análisis, como parte del proceso de aprovechamiento del texto.

En algunas tablas se han resaltado, en color rojo, los valores o las situaciones críticas y, en color azul, los valores o situaciones adecuados o mejores de algunas de las variables analizadas, con el fin de llamar la atención acerca de ellos.

Cada uno de los capítulos concluye con la lista de la **bibliografía** que fue citada en él, seguida por una **autoevaluación**, es decir, un cuestionario relacionado directamente con la temática tratada en el capítulo y que le servirá al estudiante para fijar los conceptos claves del mismo, y por una **evaluación**, que es otro cuestionario que inducirá al estudiante a consultar bibliografía adicional, a desarrollar algunas actividades prácticas y/o a resolver problemas teóricos, lo que le ayudará a ampliar sus conocimientos y sus habilidades para manejar información.

Al terminar de **estudiar** este libro, el lector habrá adquirido un conocimiento básico acerca de los tópicos de suelos que con mayor frecuencia se manejan en actividades de producción agropecuaria y estará en capacidad de:

- **Entender cómo se desarrolla un suelo y los procesos que intervienen en su formación y que están afectando su desarrollo.**
- **Relacionar e interpretar las principales propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.**
- **Evaluar el estado en que se encuentran las propiedades del suelo con métodos adecuados y adaptados al suelo que se trata.**

- Ubicar los principales grupos de suelos en la geografía nacional y tener una idea de su calidad y posibilidades de uso.
- Entender la terminología que se utiliza en la taxonomía de suelos y extraer y/o estimar de ella muchas características y propiedades de los suelos que encuentre reportados con su clasificación.
- Profundizar en las diferentes áreas del conocimiento de la Ciencia del Suelo.

Entiéndase que este texto es, como lo indica su nombre, una **introducción** a las áreas básicas de la Ciencia del Suelo; no se debe pretender, entonces, que sirva para resolver problemas especiales de suelos. En él se encontrará una disertación general que pretende dar al lector una primera plataforma de aproximación al conocimiento de los suelos y que busca, de manera especial, despertar su interés y motivarlo a profundizar en el estudio de esta maravillosa interfase que llamamos **SUELLO**.

Para finalizar esta presentación debo agradecer la colaboración que me prestaron las siguientes personas: Las directivas de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín y el profesor Luis H. González S., director de la Escuela de Geociencias, por el apoyo logístico brindado para llevar a cabo este texto; al Doctor M. H. Jan Hendrickx, profesor del New Mexico Tech, por la revisión y corrección del capítulo relacionado con la fase líquida del suelo; a mis compañeros Francisco H. Orozco P., Evelio Gómez F., Raúl D. Zapata H., Luis N. Parra S., Luis A. Arias L. y Kenneth R. Cabrera T., profesores de la Escuela de Geociencias, por la revisión que hicieron de los temas de su especialidad y por sus aportes al mejoramiento del texto; a las profesoras de la Universidad de Antioquia Rubiela Carmona Q. y Luz E. Sánchez R. por la revisión de estilo y pedagógica que hicieron del libro.

A mi profesor y Maestro Francisco E. Herrón O., por la revisión minuciosa que hizo del texto final, por sus correcciones y, sobretodo, porque sus valiosos aportes y comentarios contribuyeron a aclarar y a mejorar muchos apartes de este libro, expreso mi reconocimiento de gratitud y admiración.

¿QUÉ SE ENTIENDE POR SUELO?



a definición del **suelo** ha tenido varios matices, según quien trate de hacerla y según la época en que la haga.

Como lo recuentan Hillel (1998), Buol et al (1997), Malagón et al (1995), Porta et al (1994) y Soil Survey Division Staff (SSDS, 1993), entre otros autores, el término suelo ha tenido acepciones verdaderamente simplistas como:

- El suelo es, desde el punto de vista del agricultor, el sitio para ubicar sus semillas y producir sus cosechas (Worthen, 1949).
- Para un geólogo podría ser el recubrimiento terroso que hay sobre un cuerpo rocoso.
- Para un constructor, el suelo es el sitio sobre el cual colocará sus estructuras o el sustrato que le suministrará algunos de los materiales que requiere para hacerlas.
- Para un ecólogo es uno de los componentes del ecosistema que estudia.
- Para un químico, es el laboratorio donde se producen reacciones entre las fases sólida, líquida y gaseosa.
- Un antropólogo o un arqueólogo podrán ver el suelo como un tipo de registro del pasado.

En los tiempos en que los pueblos empezaron a asentarse en un sitio y abandonaron su sistema nómada, el suelo adquirió valor en la medida en que se fue requiriendo para producir alimentos: en esta etapa el suelo se concebía como el sustrato indispensable para el suministro de nutrientes, de agua y de soporte para las plantas.

La concepción de suelo expuesta en el párrafo anterior empezó a cambiar hacia principios del siglo XIX, cuando el suelo empezó a mirarse en un contexto naturalista y a considerarse como un cuerpo natural, como aparece en las definiciones de Karl Sprengel (1837) y de Frank Albert Fallow (1862), citadas por Porta et al (1994).

Hacia finales del siglo XIX, Dokuchaev (1886), según trabajo de Vilenskii (1957), citado por Buol et al (1997), propuso que el término **suelo** se utilizara para definir “aquellos horizontes de la roca que diaria o casi diariamente cambian sus relaciones bajo la influencia conjunta del agua, el aire y varias formas de organismos vivos y muertos”. Además, para su época, Dokuchaev concibió el suelo como “un cuerpo natural independiente y evolutivo formado bajo la influencia de cinco factores”, de los cuales él consideraba que la vegetación era el más importante.

Según Malagón et al (1995), por la concepción expuesta en el párrafo anterior, Dokuchaev es considerado el gestor de la **Pedología**. Su pensamiento fue afianzado por Sibirtzev y por Glinka en Europa y por Marbut en Norteamérica, entre finales del siglo XIX y comienzos del XX.

Ante la variedad de acepciones utilizadas para un mismo término, algunos autores trataron de acuñar definiciones que precisaran la aplicación del mismo. Aparecieron entonces los conceptos de:

- **Pedología**, en donde se considera el suelo como un cuerpo natural cuyas propiedades interesan para establecer su origen y su clasificación, sin importar sus posibilidades de uso, y
- **Edafología**, en donde el suelo es tomado como el soporte para las plantas, es decir, se estudia desde un punto de vista netamente práctico, orientado a obtener los mejores rendimientos agropecuarios posibles. (Lyttleton y Buckman, 1944).

El glosario de términos de suelos de la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (1984) también acepta la diferenciación hecha en el párrafo anterior al establecer dos definiciones para el término suelo:

- Es el material no consolidado en la superficie de la tierra que sirve como medio natural para el crecimiento de las plantas terrestres, y
- Es el material mineral no consolidado en la superficie de la tierra que ha estado sometido a la influencia de factores genéticos y ambientales: Material parental, clima, macro y microorganismos y topografía, todos actuando durante un lapso de tiempo y generando un producto: el suelo, que difiere del material del cual se derivó en varias propiedades y características físicas, químicas, biológicas y morfológicas.

La concepción pedológica del suelo implica que éste forma un continuum en la superficie terrestre y que es susceptible de ser clasificado y cartografiado; estas propiedades las recoge el Soil Survey Staff (1975) en la siguiente definición: “El suelo es una colección de cuerpos naturales en la superficie terrestre, en algunos sitios modificados o aun hechos por el hombre, que contienen materia viva y que soportan o son capaces de soportar plantas creciendo al aire libre”. Esta definición ha sido revisada y reelaborada, dando origen a una nueva conceptualización que permite ampliar el dominio del término suelo: “El suelo es un cuerpo natural compuesto de sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases que ocurren en la superficie de la tierra, ocupa un espacio y se caracteriza o porque tiene horizontes o capas que se diferencian del material inicial como resultado de las adiciones, pérdidas, traslocaciones y transformaciones de energía y materia o porque es capaz de soportar plantas arraigadas en un ambiente natural” (SSS, 1998, 1999).

En la actualidad, por efecto de la influencia ambiental, de la sostenibilidad y de la sistémica, se han elaborado algunas definiciones un poco más holísticas del suelo:

- Para Jaramillo et al (1994) el suelo es aquella delgada capa, de pocos centímetros hasta algunos metros de espesor, de material terroso, no consolidado, que se forma en la interfase atmósfera – biosfera – litosfera. En ella interactúan elementos de la atmósfera e hidrosfera (aire, agua, temperatura, viento, etc.), de la litosfera (rocas, sedimentos) y de la biosfera y se realizan intercambios de materiales y energía entre lo inerte y lo vivo, produciéndose una enorme complejidad.

- Hillel (1998) considera el suelo como un cuerpo natural involucrado en interacciones dinámicas con la atmósfera que está encima y con los estratos que están debajo, que influye el clima y el ciclo hidrológico del planeta y que sirve como medio de crecimiento para una variada comunidad de organismos vivos. Además, él juega un papel ambiental preponderante como reactor bio-físico-químico que descompone materiales de desecho y recicla dentro de él nutrientes para la regeneración continua de la vida en la Tierra.
- Tarbuck y Lutgens (1999) consideran la Tierra como un sistema dentro del cual el suelo es una interfase donde interactúan diferentes partes de aquel: la litosfera, la atmósfera, la hidrosfera y la biosfera. Debido a esto, el suelo es dinámico y sensible a prácticamente todos los aspectos de su entorno. Estos autores hacen énfasis en un hecho fundamental que sustenta la razón de ser de la **Ciencia del Suelo: *El suelo no es simplemente el material producido por la meteorización que se ha acumulado en la superficie terrestre, es decir, el suelo no es producto de la meteorización.***

BIBLIOGRAFÍA

BUOL, S. W.; F. D. HOLE; R. J. McCRAKEN. and R. J. SOUTHARD. 1997. Soil Genesis and Classification. 4^a. Ed. Iowa State University Press. Iowa U. S. A. 527 p.

HILLEL, D. 1998. Environmental soil physics. Academic Press. San Diego. U.S.A. 771 p.

JARAMILLO, D. F.; L. N. PARRA y L. H. GONZÁLEZ. 1994. El recurso suelo en Colombia: Distribución y evaluación. Universidad Nacional de Colombia.. Medellín. 88 p.

LITTLETON, L. y H. BUCKMAN. 1944. Edafología: Naturaleza y propiedades del suelo. Acme Agency. Buenos Aires. Argentina. 479 p.

MALAGÓN, D.; C. PULIDO; R. LLINÁS y C. CHAMORRO. 1995. Suelos de Colombia: Origen, evolución, clasificación, distribución y uso. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá. 632 p.

PORTEA, J.; M. LÓPEZ – ACEVEDO y C. ROQUERO. 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi Prensa. Madrid. 807 p.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. (SSSA). 1984. Glossary of Soil Science terms. SSSA. Madison. 38 p.

SOIL SURVEY DIVISION STAFF (SSDS). 1993. Soil survey manual. Handbook No. 18. United States Department of Agriculture (USDA). Washington D. C. 437 p.

SOIL SURVEY STAFF. (SSS) 1999. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2^a. Ed. Agriculture Handbook Nº 436. Soil Survey Staff. Washington D. C. 869 p.

SOIL SURVEY STAFF. (SSS). 1998. Keys to Soil Taxonomy. 8^a. Ed. Soil Survey Staff. Washington D. C. 326 p.

SOIL SURVEY STAFF. (SSS) 1975. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. Agriculture Handbook Nº 436. USDA . Washington D. C. 754 p.

TARBUCK, E. y F. LUTGENS. 1999. Ciencias de la tierra: Una introducción a la Geología Física. 6^a. Ed. Prentice Hall Iberia S. R. L. Madrid. 572 p.

WORTHEN, E. L. 1949. Suelos agrícolas: Su conservación y fertilización. U.T.E.H.A. México. 463 p.

EL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI) Y ALGUNAS EQUIVALENCIAS EN OTROS SISTEMAS, EN LA CIENCIA DEL SUELO

E

n muchos países se ha adoptado el Sistema Internacional de Unidades (SI) como el sistema oficial de unidades de medida. En Colombia ha sucedido igual como lo confirma la norma NTC 1000, citada por la Facultad de Agronomía (1985) y ratificada por la NTC 1486 (ICONTEC, 1996).

Sin embargo, por costumbre o tradición, a través del tiempo se han utilizado otros sistemas de unidades de medida, incluso regionales, que se encuentran con cierta frecuencia en algunas publicaciones o que son utilizados prioritariamente por las personas, en su trajín diario.

En esta parte se exponen las unidades del SI más utilizadas en la ciencia del suelo, con base en los trabajos de Thien y Oster (1981) y de Vorst et al (1981), así como las principales equivalencias que tienen en otros sistemas de unidades de medida.

1. ORGANIZACIÓN DEL SI

En el SI se establecen las definiciones y las normas para nombrar y simbolizar las unidades de medida de cualesquiera de las propiedades susceptibles de ser cuantificadas. Para lograrlo, se definen tres grupos de unidades: **Básicas, Derivadas y Suplementarias**.

1.1. LAS UNIDADES

Se han definido siete unidades **básicas**, con el criterio de que son cualidades **dimensionalmente independientes**; se presentan en la Tabla SI.1; las unidades **derivadas** son combinaciones algebraicas de las unidades básicas y algunas de ellas se aprecian en la Tabla SI.2; sólo se han definido dos unidades suplementarias, que no encajan en ninguna de las categorías anteriores; estas últimas unidades se han definido para caracterizar las medidas de ángulos: El radián, para ángulos planos y el estereoradián, para ángulos sólidos.

1.2. LOS MÚLTIPLOS Y SUBMÚLTIPLOS

Estos elementos son factores multiplicadores que dan la posibilidad de adecuar los valores de una propiedad que se mide a un rango práctico que facilite su manejo. Ellos se identifican con unas partículas que se le anteponen al nombre de la unidad base de la propiedad, llamadas **prefijos**: por ejemplo, se puede generar un múltiplo equivalente a 1000 veces la unidad base de la longitud (metro), diciendo que 1000 m son iguales a 1 km; también se genera un submúltiplo que sea equivalente a la centésima parte de un metro, al decir que 1m es igual a 100 cm. Los múltiplos y submúltiplos más adecuados son aquellos que colocan los valores numéricos en el rango comprendido entre 0.1 y 1000; en la Tabla SI.3 se presentan algunos de los prefijos que se usan para conformar los múltiplos y submúltiplos más frecuentemente utilizados.

TABLA SI.1. Unidades básicas del SI. (Tomadas de Thien y Oster, 1981).

PROPIEDAD	UNIDAD	SÍMBOLO
Longitud	metro	m
Masa	kilogramo	kg
Tiempo	segundo	s
Corriente eléctrica	amperio	A
Temperatura termodinámica	grado kelvin	K
Cantidad de sustancia	mol	mol
Intensidad luminosa	candela	cd

TABLA SI.2. Algunas unidades derivadas del SI. (Tomadas de Thien y Oster, 1981).

PROPIEDAD	UNIDAD	SÍMBOLO
Área	metro cuadrado	m^2
Volumen	metro cúbico	m^3
Velocidad	metro por segundo	m s^{-1}
Aceleración	metro por segundo cuadrado	m s^{-2}
Densidad	kilogramo por metro cúbico	kg m^{-3}
Concentración	mol por metro cúbico	mol m^{-3}
Volumen específico	metro cúbico por kilogramo	$\text{m}^3 \text{ kg}^{-1}$

TABLA SI.3. Múltiplos y submúltiplos frecuentes en el SI. (Tomados de Thien y Oster, 1981).

FACTOR MULTIPLICADOR	PREFIJO	SÍMBOLO
10^{12}	tera	T
10^9	giga	G
10^6	mega	M
10^3	kilo	k
10^{-1}	deci	d
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	milí	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p

1.3. REGLAS DE USO

Para la nomenclatura de las unidades del SI se han definido unas pocas reglas que deben tenerse en cuenta para no desvirtuar el objetivo de uniformizar la comunicación que él persigue; ellas son:

- Con los símbolos de las unidades no se usan plurales: 50 km y **no** 50 kms.
- A continuación de un símbolo no se coloca punto, salvo cuando coincide con el fin de un párrafo.
- Los decimales se separan de los enteros con **punto**.
- Solamente los símbolos de nombres de unidades derivados de nombres propios, o los de los múltiplos definidos así en la Tabla SI.3, se escriben con mayúscula, todos los demás van en **minúscula**.

2. RELACIÓN CON OTROS SISTEMAS DE UNIDADES

El SI se relaciona con una gran cantidad de unidades de medida de otros sistemas; los nombres de unidades de uso común en aquellos sistemas, así como los símbolos que las identifican y los factores de conversión necesarios para llevarlas al SI, se presentan en la Tabla SI.4.

Las unidades del SI de uso más corriente y sus equivalencias se presentan a continuación:

- 1 km = 1000 m
- 1 m = $10^6 \mu\text{m}$ = 100 cm
- 1 mm = 1000 μm
- 1 km^2 = 100 ha
- 1 ha = 10000 m^2
- 1 m^3 = 1000 L
- 1 L = 1000 mL = 1000 cm^3
- 1 kg = 1000 g
- 1 h = 60 min = 3600 s
- 1 mm = 1 L m^{-2} (como lámina de agua o precipitación)
- 1 g m^{-2} = 10 kg ha^{-1}

En la práctica, cuando no se requiere mucha precisión en los resultados, se utilizan algunas aproximaciones como:

- 1 yarda = 90 cm
- 1 vara = 80 cm
- 1 ft = 30 cm
- 1 in = 2.5 cm
- 1 acre = 4000 m^2
- 1 galón = 4 L
- 1 atm = 1 bar
- 1 ton = 1 t = 1000 kg = 2000 lb

TABLA SI.4. Unidades del SI y unidades equivalentes en otros sistemas. (Tomadas, parcialmente, de Thien y Oster, 1981 y de Vorst et al, 1981).

PROPIEDAD	UNIDADES SI	SÍMBOLO SI	OTRAS UNIDADES	SÍMBOLO	FACTOR DE CONVERSIÓN*
LONGITUD	Metro	m	Pie	ft	0.304
	Centímetro	cm	Pulgada	in	2.54
	Micrómetro	μm	Angstron	Å	100
	Nanómetro	nm	Micrón	μ	1
ÁREA	Metro cuadrado	m²	Pie cuadrado	ft²	9.25x10 ⁻²
			Cuadra	Cuadra	1.56x10 ⁻⁴
	Hectárea	ha	Acre	Acre	0.405
	Centímetro cuadrado	cm²	Cuadra	Cuadra	0.64
VOLUMEN	Metro cúbico	m³	Pie cúbico	ft³	2.81x10 ⁻²
	Centímetro cúbico	cm³	Pulgada cúbica	in³	16.39
	Litro	L	Galón	gal	3.78
MASA	Tonelada	t	Tonelada (U.S.)	ton	0.907
	Kilogramo	kg	Tonelada (U.S.)	ton	907
	Megagramo	Mg	Tonelada (U.S.)	ton	0.907
	Gramo	g	Libra	lb	454
PRESIÓN			Onza	oz	28.4
	Megapascal	MPa	Atmósfera	atm	0.101
			Bar	bar	0.1
	Pascal	Pa	Libras por pulgada cuadrada	PSI (lb in⁻²)	6.9x10 ⁻³
DENSIDAD	Megagramo por metro cúbico	Mg m⁻³	Gramos por centímetro cúbico	g cm⁻³	1
CONDUTTIVIDAD ELÉCTRICA	Decisiemens por metro	dS m⁻¹	Milimhos por centímetro	mmho cm⁻¹	1
CONCENTRACIÓN	Gramos Por kilogramo	g kg⁻¹	Porcentaje	%	10
	Miligramos Por kilogramo	mg kg⁻¹	Partes por millón	ppm	1
	Centimol (+/-) Por kilogramo	cmol (+/-) kg⁻¹	Miliequivalentes por 100 gramos	meq 100 g⁻¹	1
	Segundo	s	Minutos	min	60
CAUDAL	Litros por segundo	L s⁻¹	Galones por minuto	gal min⁻¹	6.3x10 ⁻²
	Metros cúbicos por hora	m³ h⁻¹	Galones por minuto	gal min⁻¹	0.227

*Multiplicar por este factor para convertir “otras unidades” a sus equivalentes en el SI.

BIBLIOGRAFÍA

FACULTAD DE AGRONOMÍA. 1985. Normas para la preparación y presentación de anteproyectos, proyectos, tesis y trabajos de grado. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 100 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). 1996. Norma Técnica Colombiana NTC 1486. ICONTEC. Santafé de Bogotá. 38 p.

THIEN, S. J. y J. D. OSTER. 1981. The International System of Units and its particular application to soil chemistry. *Journal of Agronomic Education*. 10: 62-70.

VORST, J. J., L. E. SCHWEITZER y V. L. LECHTENBERG. 1981. International System of Units (SI): Application to crop science. *Journal of Agronomic Education*. 10: 70-72.

AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Qué son unidades derivadas en el SI?. Dé 4 ejemplos.
2. ¿Qué son los múltiplos y submúltiplos en un sistema de unidades de medida?. ¿Cómo se nombran?.
3. Diga 4 reglas que deban tenerse en cuenta para nombrar las unidades en el SI.

EVALUACIÓN

1. ¿Cuántas t tiene un Tg?. (R: 10^6 t).
2. ¿Cuántas t tiene un pg?. (R: 10^{-18} t).
3. ¿A cuántos acres equivale 1 km²? (R: 250 acres).

LOS ÓRDENES EN LA TAXONOMÍA DE SUELOS DEL USDA (SÍNTESIS)

En Colombia se utiliza el Sistema Taxonómico Norteamericano¹ para clasificar los suelos. Este sistema está diseñado de manera que el suelo puede ser clasificado en seis categorías diferentes, seleccionando la adecuada de acuerdo con los fines que se persigan con su estudio. Como se mencionó en la Introducción, en este texto se tratará, en lo posible, de suministrar la clasificación de los suelos que se utilicen para ilustrar alguna situación comentada en él.

En el Capítulo 20 se hará una presentación completa del sistema de clasificación mencionado pero, para que el lector tenga una idea aproximada de los tipos de suelos que va encontrando a través del texto, se hará aquí una síntesis de las características más frecuentes que poseen los órdenes de suelos considerados en el sistema indicando, además, la manera de identificarlos en el nombre dado al suelo. Los órdenes son:

GELISOLES: Son suelos que presentan condiciones de congelamiento durante períodos largos de tiempo y que tienen o no hielo. Presentan alta variabilidad en sus propiedades. El nombre de los suelos que pertenecen a este orden termina en **EL**.

HISTOSOLES: Son suelos típicamente orgánicos, aunque pueden tener algunos horizontes delgados de materiales minerales. La nomenclatura de estos suelos termina en **IST**.

ESPODOSOLES: Suelos que presentan un horizonte oscuro de acumulación de materia orgánica y aluminio, con o sin hierro, ubicado por debajo de un horizonte más claro que ha aportado aquellos materiales. Son suelos ácidos (ver numeral 2 del Capítulo 14) y la terminación de su nomenclatura es **OD**.

ANDISOLES: Suelos con alta fijación de fosfatos y baja densidad, derivados de materiales volcánicos; normalmente son ácidos y su nomenclatura termina en **AND**.

¹ SOIL SURVEY STAFF. 1999. Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2^a. Ed. United States Department of Agriculture (USDA). Washington D. C. 869 p.

OXISOLES: Suelos muy evolucionados, típicos de ambientes tropicales. Casi no tienen minerales diferentes al cuarzo en su fracción gruesa y en la fracción arcilla predominan los óxidos de Fe y de Al; son ácidos y se identifican por la terminación **OX**.

VERTISOLES: Son suelos arcillosos que se agrietan fuertemente cuando se secan. Su reacción se encuentra entre ligeramente ácida a fuertemente alcalina y sus nombres terminan en la partícula **ERT**.

ARIDISOLES: Son suelos que se presentan en climas muy secos. Su nomenclatura termina en **ID**.

ULTISOLES: Suelos muy evolucionados que presentan un horizonte que ha acumulado arcilla que se ha movilizado desde las partes más superficiales del suelo. Las arcillas acumuladas son de baja calidad por lo que el suelo es ácido y poco fértil. Su nombre termina en **ULT**.

MOLLISOLES: Son suelos que presentan adecuadas propiedades físico-químicas en la zona de raíces. Se identifican por la presencia de la terminación **OLL** en su nombre.

ALFISOLES: En estos suelos también se ha formado un horizonte de acumulación de arcilla que se ha movido desde la parte superior del suelo pero, a diferencia del Ultisol, en este orden las arcillas acumuladas son de mejor calidad por lo que se presenta una saturación de bases alta. Su terminación en la nomenclatura es **ALF**.

INCEPTISOLES: Son suelos que no cumplen los requisitos para ubicarse en alguno de los órdenes anteriores pero que presentan evidencias de evolución incipiente que los ha llevado a desarrollar varios horizontes con estructura de suelo. Su nomenclatura termina en **EPT**.

ENTISOLES: Son los suelos que presentan menor grado de evolución. Por lo general sólo se observa organización de suelo en la parte superior del mismo, por efecto de la materia orgánica y de la actividad biológica presentes en ella. Este orden, junto con el de los Inceptisoles, presenta la mayor variabilidad en sus propiedades. Su terminación es **ENT**.

Para ampliar lo relacionado con la clasificación de los suelos, el lector debe remitirse al Capítulo 20 de este texto.

LA CIENCIA DEL SUELO

- ❖ *LA GÉNESIS DE LOS SUELOS*
- ❖ *LAS PROPIEDADES MACROMORFOLÓGICAS DEL SUELO*
- ❖ *LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO*
- ❖ *LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO*
- ❖ *LAS PROPIEDADES BIO - ORGÁNICAS DEL SUELO*
- ❖ *EL ESTUDIO ESPACIAL DE LOS SUELOS*

LA GÉNESIS DE LOS SUELOS

PARTE 1

LA GÉNESIS DE LOS SUELOS

LOS FACTORES DE FORMACIÓN DEL SUELO

- ❖ El clima
- ❖ El material parental
- ❖ Los organismos
- ❖ El relieve
- ❖ El tiempo

LOS PROCESOS PEDOGENÉTICOS

- ❖ Los procesos globales
- ❖ Los procesos específicos

L

a Génesis de los suelos o **Pedogénesis** es aquella rama de la ciencia del suelo que estudia los **procesos** que le han dado a éste las características y propiedades que posee y los **factores** que han controlado el accionar de dichos procesos. Trata de establecer el origen del suelo y, en una fase más avanzada, de prever los cambios que sufrirá si varían las condiciones bajo las cuales está evolucionando.

De acuerdo con la definición de suelo que proponen Jaramillo et al (1994)¹, para poder establecer y entender la evolución del suelo se requieren ciertas interacciones con otras ciencias como la química, la física, la biología, la geología, la geomorfología, la climatología, la hidrología, la mineralogía, entre las más frecuentes. Éstas proporcionan los conocimientos básicos acerca de los procesos y factores que intervienen en el desarrollo del suelo.

¹ JARAMILLO, D. F.; L. N. PARRA y L. H. GONZÁLEZ. 1994. El recurso suelo en Colombia: Distribución y Evaluación. Universidad Nacional de Colombia. Instituto de Ciencias Naturales y Ecología – ICNE – . Medellín. 88 p.

LOS FACTORES DE FORMACIÓN DEL SUELO

CAPÍTULO 1

CONTENIDO

- ❖ El clima
 - Las variables climáticas y la pedogénesis
 - Clasificación del clima
 - Propiedades del suelo afectadas por el clima
- ❖ El material parental
 - El origen del material parental
 - Rocas ígneas
 - Rocas sedimentarias
 - Rocas metamórficas
 - Sedimentos no consolidados
 - El componente inorgánico del material parental
 - Los minerales primarios
 - Los minerales secundarios y otros componentes de la fracción fina del suelo
 - Efectos del material parental sobre los suelos
 - La textura del material litológico
 - La composición mineralógica del material litológico
- ❖ Los organismos
 - La biota del suelo
 - Clasificación
 - La microbiota del suelo
 - La meso y macrofauna del suelo
 - Efectos de la biota sobre el suelo
 - El hombre
 - La vegetación
 - Generalidades
 - Caracterización de la vegetación natural

- La materia orgánica del suelo
 - Tipos de materia orgánica del suelo
 - Transformación de los materiales orgánicos
 - El humus
 - Importancia de la materia orgánica en el suelo

❖ El relieve

- Tipos de relieves
- La vertiente
- Características de la vertiente
 - Forma de la vertiente
 - Gradiente de la vertiente
 - Longitud de la vertiente
 - Orientación de la vertiente
- Efectos de la vertiente sobre el suelo
 - Sobre la erosión
 - Sobre las condiciones de drenaje
 - Otras relaciones con el relieve

❖ El tiempo

OBJETIVOS

- ❖ Conocer los factores que controlan el desarrollo del suelo
- ❖ Conocer cómo se presentan los diferentes factores de formación de suelos en Colombia
- ❖ Conocer algunos sistemas de clasificación de los factores de formación utilizados comúnmente en Colombia
- ❖ Aprender a reconocer el efecto de los factores de formación en el suelo mediante la observación de algunas de sus propiedades fundamentales

E

n la década del 40, Jenny definió los factores que intervienen en la formación del suelo, mediante el siguiente modelo, sencillo sólo en su presentación:

$$S = f(C, MP, O, R, t) \quad [1.1]$$

Donde: S : Desarrollo del suelo.

C : Clima.

MP : Material parental.

O : Organismos.

R : Relieve.

t : Tiempo.

Según el modelo planteado, el desarrollo del suelo es función de la acción de un clima y sus organismos asociados sobre un material parental, bajo el control de un relieve, durante un determinado período de tiempo.

Los factores incluidos en la Ecuación 1.1 son los **Factores de Formación del Suelo** y son los que controlan el accionar de los procesos pedogenéticos, tanto en su tipo como en su intensidad, como se verá más adelante; a continuación se analizan los factores de formación desde el punto de vista del efecto que ejercen en la evolución del suelo.

1. EL CLIMA

1.1. LAS VARIABLES CLIMÁTICAS Y LA PEDOGÉNESIS

Los componentes climáticos básicos que mayor incidencia tienen en la evolución del suelo son: La **precipitación (P)** y la **temperatura (T)**; el **viento**, en la medida que condicione procesos de evaporación de agua desde la superficie del suelo, también juega un papel fundamental en la pedogénesis.

Aparte de los anteriores componentes básicos, hay un componente, derivado de ellos, que es quizás más decisivo en la evolución del suelo y es la **evapotranspiración potencial (ETP)**. Ésta determina la cantidad de agua necesaria para suplir las necesidades de las plantas y de la evaporación características de la zona que se estudia. Cuando se sustrae este consumo del aporte de agua que hace la precipitación ($P - ETP$), la cantidad que queda es la cantidad de agua disponible para realizar alguna actividad en el suelo. La evapotranspiración depende de la temperatura y mientras mayor sea ésta, mayor es la evapotranspiración. En la Figura 1.1 se ilustra la importancia de dicho componente climático.

Se observa en la Figura 1.1 que, a pesar de que ambas regiones tienen cantidades similares de precipitación al año, 1099 mm en Zipaquirá y 1122 mm en Flandes, presentan diferencias importantes

en sus correspondientes ETP anuales estimadas: 614 y 1648 mm respectivamente; si se hace la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial ($P - ETP$) para cada región, se obtiene que en Zipaquirá hay un exceso de agua aportada por la precipitación de 485 mm, mientras que en Flandes hay un déficit de agua de 526 mm al año; incluso, obsérvese que el déficit de agua se presenta en la región que tiene mayor precipitación.

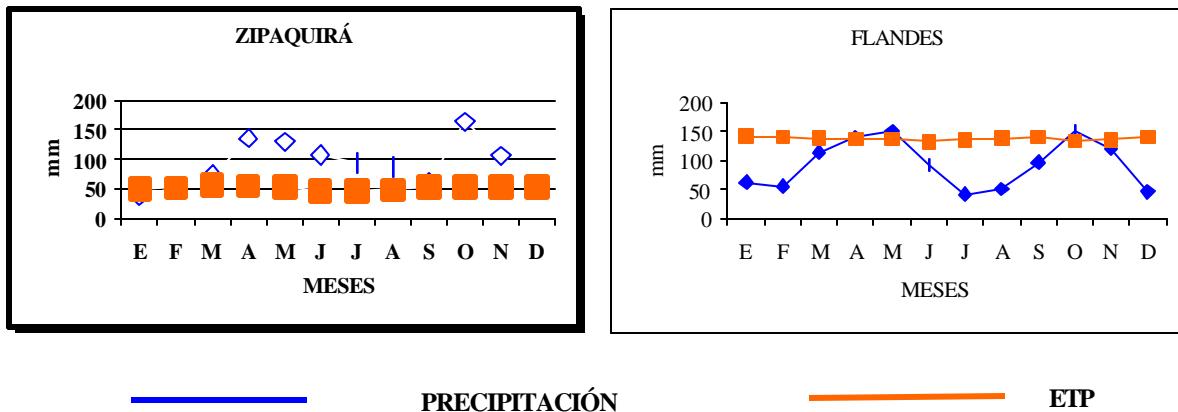


FIGURA 1.1. Comportamiento de la precipitación y la evapotranspiración potencial (ETP) en dos regiones de clima contrastante de Colombia: Zipaquirá (Cundinamarca, 3000 msnm) y Flandes (Tolima, 286 msnm). (ETP mensual = $T^{\circ}\text{C} \times 4.91$, según Holdridge, 1979). Con base en datos de Forero et al (1981).

Las diferencias anotadas en el párrafo anterior se deben al comportamiento diferente de la ETP en cada una de las regiones, afectada ampliamente por la temperatura; estas condiciones cambian todas las relaciones hídricas del suelo.

De acuerdo con los resultados de la Figura 1.1, en los suelos de Zipaquirá hay una mayor cantidad de agua interactuando con ellos durante más tiempo y, por tanto, es de esperarse que tengan menor contenido de bases y condiciones más ácidas, que los de la otra región, debido a que el exceso de humedad produce un lavado intenso de sustancias que no se produce en Flandes, porque allí todo el tiempo hay déficit de agua en los suelos.

Las relaciones hídricas, expuestas anteriormente, se ven afectadas por la **distribución** con la cual se presente la precipitación a través del año; son diferentes los efectos de las precipitaciones abundantes, pero concentradas en pocos meses a los de cantidades similares de lluvia anual, repartidas en pequeñas cantidades todos los meses. En la Figura 1.1 se observa que, aunque la distribución de la precipitación en ambas regiones es bimodal (dos períodos muy húmedos y dos menos húmedos), el primer período húmedo en Zipaquirá es mucho más extenso que en Flandes, lo que genera una mayor actividad hídrica en los suelos de la primera región.

Pedogenéticamente, condiciones contrastantes de humedad y sequía favorecen procesos de **translocaciones** en el suelo, en tanto que condiciones de humedad permanente, sin saturación, favorecen **transformaciones y pérdidas** (ver Capítulo 2); además, las posibilidades de uso del suelo cambian, con lo cual se afectan procesos relacionados con la parte orgánica y biótica del mismo.

En Colombia se presentan variadas condiciones de precipitación que incluyen desde áreas casi desérticas, como el norte de la península de la Guajira, hasta las zonas pluviales de la región del Pacífico: Mesa et al (1997) documentan que, en los alrededores de Quibdó, la precipitación media anual llega a los 14000 mm; en la Figura 1.2 se presenta la distribución de las condiciones de humedad ambiental en Colombia, generalizadas del mapa de **zonas de vida** de Holdridge, presentado por Malagón et al (1995).

Con respecto a la temperatura ambiental o del aire, se ha establecido una relación inversa entre la temperatura y la **altitud** de un sitio específico; sin embargo, en Colombia las temperaturas son disimétricas entre las diferentes cordilleras y entre las diferentes vertientes de la misma cordillera, como lo demuestran los trabajos de Flórez (s.f.) y de Flórez, citado por García (s.f.). Flórez (s.f.), por ejemplo, encontró en la cordillera occidental un gradiente térmico de 0.6 °C por cada 100 m de altitud, para la vertiente oriental y de 0.65 °C por cada 100 m, para la vertiente occidental. Ésto significa que la vertiente oriental de esta cordillera es más caliente que la occidental.

RECORDAR

- La ETP es un buen estimador de la cantidad de agua disponible para la pedogénesis; depende de la temperatura: $A >$ temperatura $>$ ETP.
- La distribución de la precipitación genera diferencias climáticas importantes.
- $A >$ altitud $<$ temperatura pero los gradientes son diferentes según la vertiente que se analice.
- La mayor parte del territorio colombiano está en el piso cálido y es húmedo.
- La zona más seca de Colombia: Alta y media Guajira.
- La zona más húmeda de Colombia: Centro del departamento del Chocó.

1.2. CLASIFICACIÓN DEL CLIMA

En Colombia ha tenido gran difusión y uso el sistema de clasificación del clima mediante las **Zonas de Vida** propuesto por Holdridge (Holdridge, 1979). La unidad natural climática básica de su sistema de clasificación la denomina **Zona de Vida** y es un área que tiene iguales condiciones de **biotemperatura** (rango de temperatura en el cual hay crecimiento vegetal; se encuentra entre 0 y 30 °C) promedia anual, **precipitación** promedia anual y **condición de humedad**, dada por la ETP; en cada zona de vida se producen asociaciones vegetales con características fisionómicas muy particulares que obedecen al control que ejercen los factores climáticos sobre ellas.

Como se mencionó, uno de los componentes de la zona de vida es la biotemperatura, la cual está controlada por la altura sobre el nivel del mar, es decir, por los **pisos altitudinales**. La relación entre estos dos parámetros se presenta la Tabla 1.1.

El nombre de la **zona de vida** está conformado por la condición de humedad (letras minúsculas en el símbolo), seguido por el piso altitudinal (letras mayúsculas en el símbolo); Espinal (1991) describe para Colombia 23 zonas de vida, las cuales se resumen en la Tabla 1.2 con su respectivo rango de precipitación.

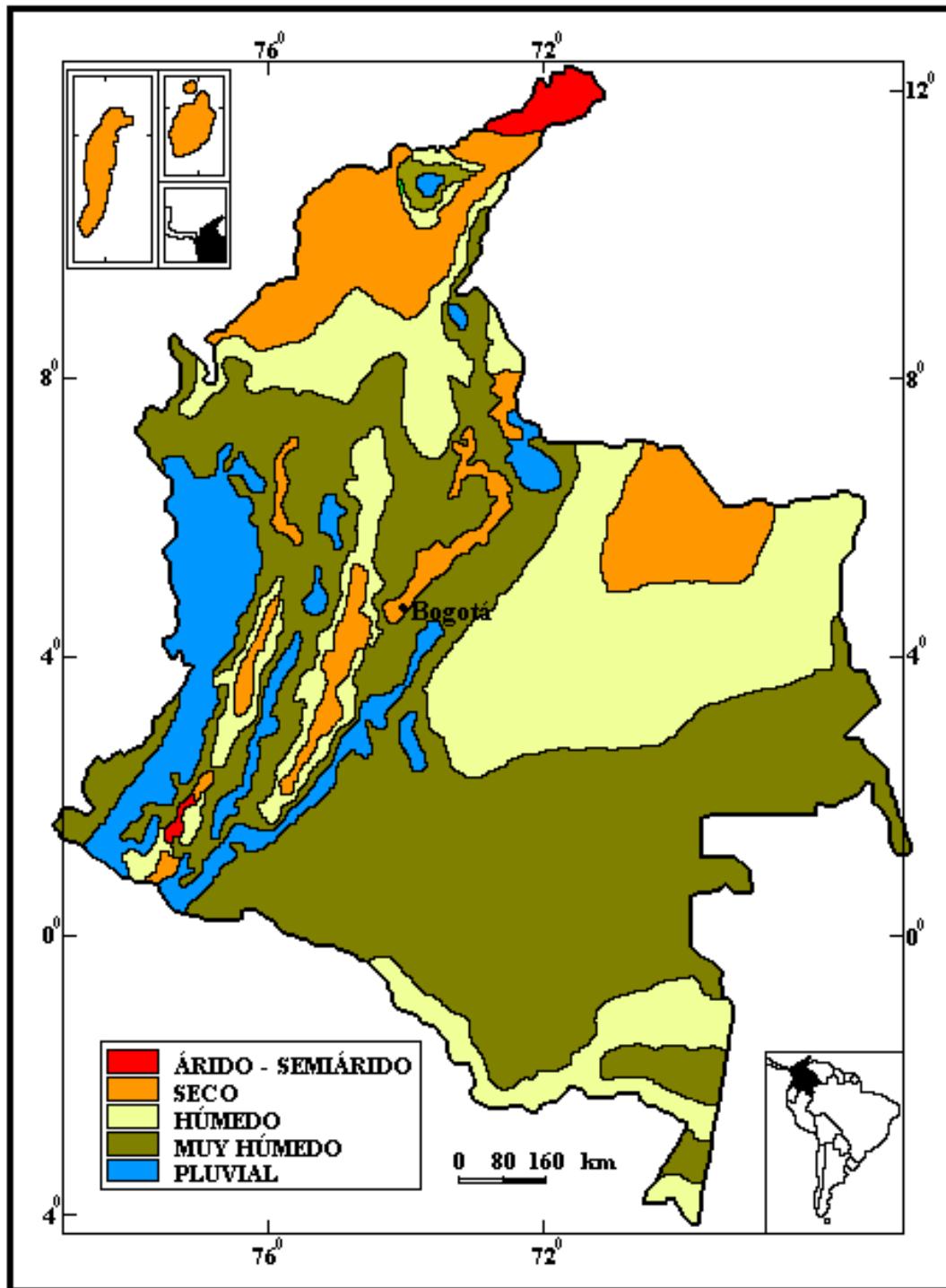


FIGURA 1.2. Distribución de las condiciones de humedad en Colombia (Generalizadas a partir del mapa de zonas de vida presentado por Malagón et al, 1995).

TABLA 1.1. Pisos altitudinales climáticos y su temperatura característica en el sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge. (Tomados de Espinal, 1991).

PISO ALTITUDINAL	ALTITUD (msnm)	BIOTEMPERATURA (°C)
Tropical	0 - 1000	> 24
Premontano	1000 - 2000	18 - 24
Montano bajo	2000 - 3000	12 - 18
Montano	3000 - 4000	6 - 12
Subalpino	4000 - 4500	3 - 6
Alpino	4500 - 4800	1.5 - 3
Nival	> 4800	< 1.5

TABLA 1.2. Zonas de vida de Colombia, según Holdridge, tomadas de Espinal (1991).

ZONA DE VIDA		PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL (mm)
NOMBRE	SÍMBOLO	
Matorral desértico tropical	md - T	125 - 250
Monte espinoso tropical	me - T	250 - 500
Bosque muy seco tropical	bms - T	500 - 1000
Bosque seco tropical	bs - T	1000 - 2000
Bosque húmedo tropical	bh - T	2000 - 4000
Bosque muy húmedo tropical	bmh - T	4000 - 8000
Bosque pluvial tropical	bp - T	> 8000
Monte espinoso premontano	me - PM	250 - 500
Bosque seco premontano	bs - PM	500 - 1000
Bosque húmedo premontano	bh - PM	1000 - 2000
Bosque muy húmedo premontano	bmh - PM	2000 - 4000
Bosque pluvial premontano	bp - PM	> 4000
Bosque seco montano bajo	bs - MB	500 - 1000
Bosque húmedo montano bajo	bh - MB	1000 - 2000
Bosque muy húmedo montano bajo	bmh - MB	2000 - 4000
Bosque pluvial montano bajo	bp - MB	> 4000
Bosque húmedo montano	bh - M	500 - 1000
Bosque muy húmedo montano	bmh - M	1000 - 2000
Bosque pluvial montano	bp - M	> 2000
Páramo subalpino	p - SA	> 500
Páramo pluvial subalpino	pp - SA	> 500
Tundra pluvial alpina	tp - A	> 500
Nival	N	-

Aparte del sistema de clasificación de zonas de vida, García (s.f.) ha propuesto establecer cinco pisos bioclimáticos para Colombia; se basa en observaciones de clima y vegetación hechas por él y por Flórez (s.f.) y Salamanca (s.f.) en varios transectos realizados en las cordilleras colombianas. Estos autores encontraron variaciones en los límites de los pisos climáticos propuestos en las diferentes vertientes de las cordilleras, como se muestra en la Figura 1.3.

Forero et al (1981) hicieron una clasificación climática en la cuenca del río Bogotá que fue bastante satisfactoria, sobre todo porque se relacionó muy bien con la distribución y grado de evolución de los suelos; en este ensayo se utilizaron los criterios de piso altitudinal e **índice de humedad** (medida de la condición de humedad ambiental) para caracterizar la unidad climática, teniendo en cuenta los valores que se exponen en la Tabla 1.3.

En la propuesta de Forero et al (1981) el índice de humedad corresponde al índice de humedad de Thornthwaite, el cual se calcula con la siguiente relación:

$$IH = \frac{(100 \times E) - (60 \times D)}{ETP} \quad [1.2]$$

donde: IH : Índice de humedad.

E : Exceso de humedad anual, de acuerdo con el balance hídrico.

D : Déficit de humedad anual, de acuerdo con el balance hídrico.

ETP : Evapotranspiración potencial total anual.

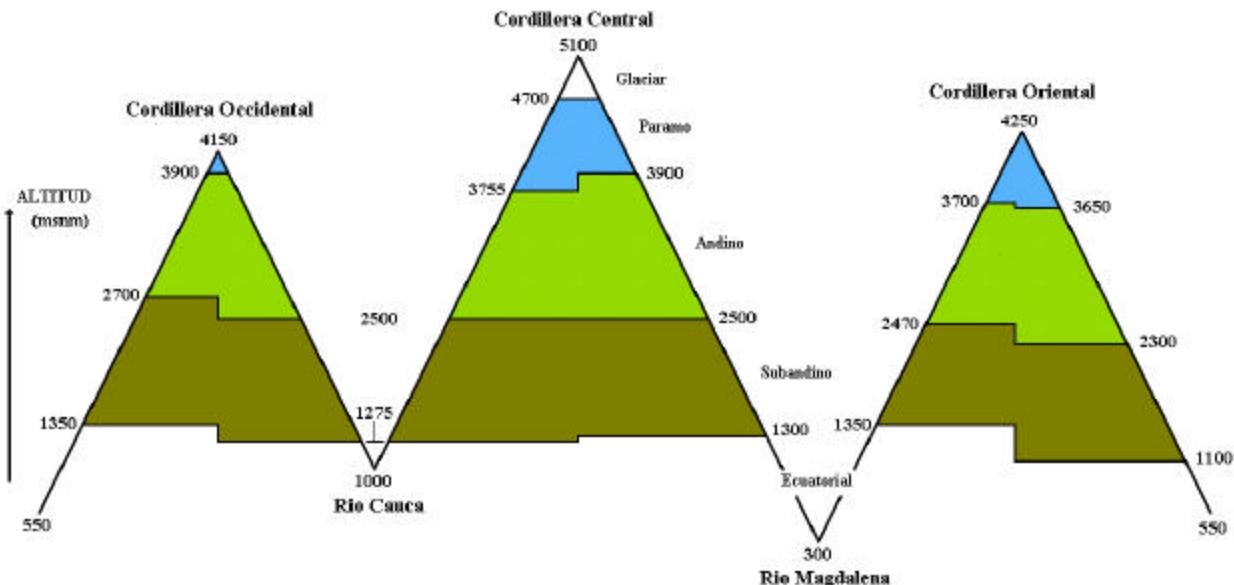


FIGURA 1.3. Límites de los pisos altitudinales en las diferentes vertientes de las cordilleras colombianas en tres transectos en el centro del país (simplificado de Salamanca, s.f.).

En Colombia, según estudios del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 1985), la mayor parte del territorio está ubicada en el piso altitudinal cálido, como puede apreciarse en la Tabla 1.4. Además, el IGAC está trabajando en el ajuste de una propuesta de clasificación climática, muy similar a la de zonas de vida de Holdridge (Malagón et al, 1995).

1.3. PROPIEDADES DEL SUELO AFECTADAS POR EL CLIMA

Con base en la revisión que realizó Mejía (1981), acerca del efecto del clima sobre las propiedades de los suelos, se elaboraron las gráficas que se exponen en la Figura 1.4; en éstas pueden apreciarse las tendencias generales que presentan algunas de las propiedades edáficas que más se relacionan con el clima.

TABLA 1.3. Parámetros utilizados para caracterizar las condiciones climáticas en la cuenca del río Bogotá, según Forero et al (1981).

PISO ALTITUDINAL (msnm)		ÍNDICE DE HUMEDAD	
NOMBRE	RANGO DE ALTITUD	NOMBRE	RANGO DE VALOR
Cálido	0 - 1000	Muy húmedo	> 100
Templado	1000 - 2000	Húmedo	20 a 100
Frío	2000 - 3000	Subhúmedo	5 a 20
Subpáramo	3000 - 3500	Subhúmedo seco	-5 a 5
Páramo	3500 - 4800	Semiárido	-20 a -5
		Árido	-40 a -20
		Muy árido	< -40

TABLA 1.4. Extensión de los pisos climáticos en Colombia, según el IGAC (1985).

PISO ALTITUDINAL	ALTITUD msnm	ÁREA	
		ha	%
Cálido	0 – 1000	93 257 025	81.7
Medio	1000 – 2000	10 365 550	9.1
Frío	2000 – 3000	7 576 350	6.6
Muy frío	3000 – 4000	2 788 100	2.4
Nival	>4000	187 775	0.2
		114 174 800	100

De las gráficas de la Figura 1.4, se establece que al aumentar la precipitación se incrementan los contenidos de materia orgánica (MO) y de partículas de tamaño arcilla en el suelo, así como la profundidad a la cual se acumulan los carbonatos y los valores de las pérdidas de sílice del mismo. Además, los valores de los contenidos de bases, de aluminio y de hidrógeno, el grado de agregación y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (ver Capítulo 13) cambian radicalmente su comportamiento, después de ciertos valores de precipitación, debido a que empieza a generarse un exceso de agua en el suelo que incrementa la lixiviación de bases, la acumulación de iones ácidos y la formación de arcillas de baja actividad (ver página 37).

Con respecto a la influencia de la temperatura, los contenidos de materia orgánica y de nitrógeno disminuyen drásticamente al incrementarse aquella, situación que explica, en parte, los bajos contenidos de materia orgánica presentes en los suelos de clima cálido y los altos de aquellos ubicados en climas fríos. No sobra aclarar, sin embargo, que los comportamientos descritos anteriormente se manifiestan siempre y cuando los demás factores de formación se presenten en condiciones similares, dejando variable solamente el clima.

En la Tabla 1.5 se ilustran algunos de los efectos que tienen los cambios en las condiciones climáticas sobre algunas propiedades del horizonte superficial de dos Alfisoles derivados de arcillolitas de una misma Formación geológica en Antioquia.

Los resultados de la Tabla 1.5 evidencian el intenso proceso de lixiviación que ha sufrido el suelo del clima más húmedo, el cual puede comprobarse por el bajo valor del **pH** (ver Capítulo 14), el menor contenido de **bases** y por la presencia de **aluminio intercambiable** que hay en él. También se presenta una alteración fuerte en la mineralogía de la fracción arcilla del suelo de clima húmedo, ya que no presenta **propiedades verticales** (ver numeral 2.5.4 del Capítulo 20); ésto implica que ha tenido una fuerte transformación de los filosilicatos que los ha llevado, posiblemente, hasta formar minerales de tipo 1:1 (ver numeral 2.2.2 de este capítulo).

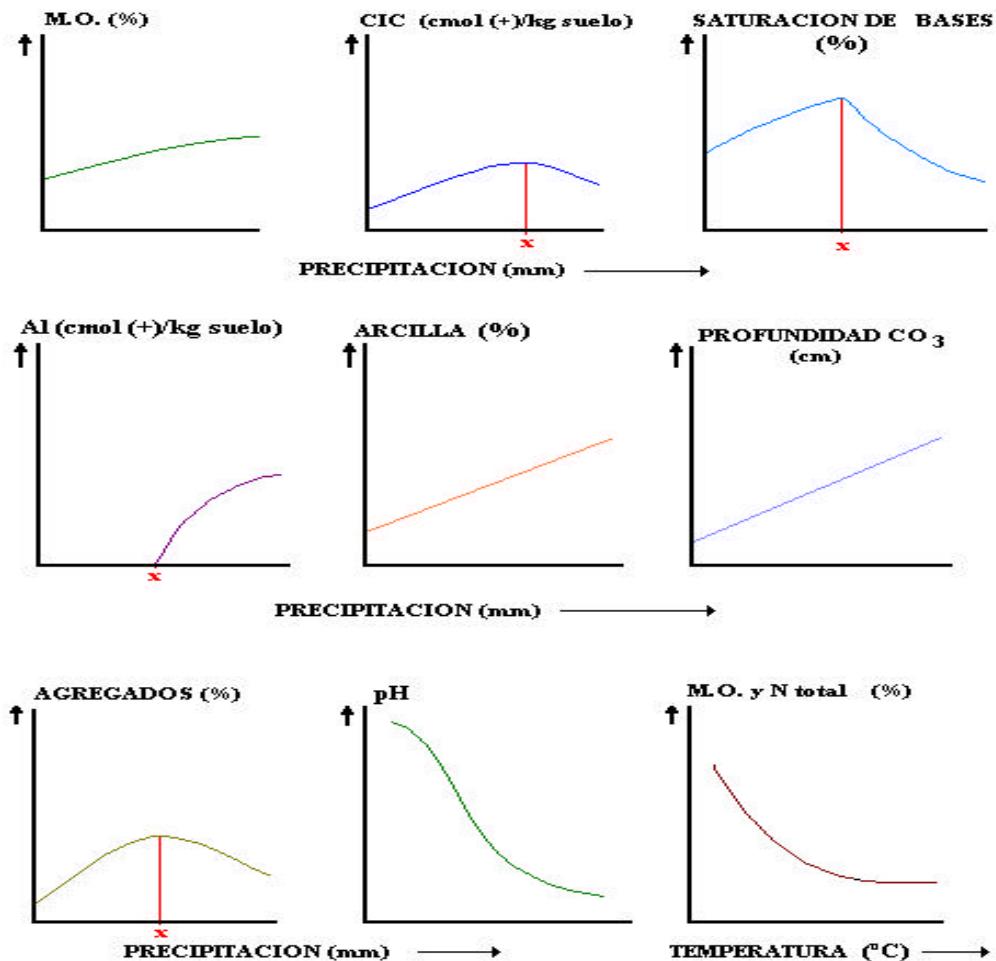


FIGURA 1.4. Algunas relaciones básicas generales entre el clima y propiedades seleccionadas del suelo. (Con base en información de Mejía, 1981).

TABLA 1.5. Algunas propiedades del horizonte superficial de dos Alfisoles derivados de arcillolitas de la Formación Amagá, en dos climas diferentes y con pendiente entre 7 y 12%. Resultados de Jaramillo (1997a, b).

Zona de vida (msnm)	Arcilla (%)	pH Agua	[cmol (+) kg ⁻¹ suelo]				Clasificación taxonómica según SSS* (1994)
			Al	Ca	Mg	K	
bs-T (600)	42	6.2	0.0	10.3	7.6	0.31	Vertic Haplustalf
bmh-PM (1600)	40	4.5	5.6	5.1	3.8	0.27	Typic Hapludalf

* Soil Survey Staff (ver Capítulo 20).

Debido a que en Colombia predominan las condiciones de clima cálido y húmedo, es de esperarse que la mayor parte de los suelos del país estén caracterizados por poseer contenidos importantes de arcillas de baja actividad, medios a bajos contenidos de materia orgánica, bajos contenidos de bases y valores bajos de CIC y de pH.

2. EL MATERIAL PARENTAL

El material parental del suelo está compuesto por aquellos materiales que le dan origen, ya sean **saprolitos** (algunos de los productos de la alteración de las rocas) o **sedimentos no consolidados**, de cualquier procedencia y composición; en esta parte del texto no se tendrán en cuenta los materiales parentales de origen orgánico puesto que los más abundantes son los inorgánicos.

La identificación del material parental del suelo debe hacerse, en lo posible, en el campo pues en algunos mapas geológicos, por problemas de escala, tanto cartográfica como del detalle de trabajo, no se representan algunos depósitos sedimentarios superficiales y de poco espesor que son propiamente el material parental de los suelos de la región que se estudia; en éstos casos se comete el error de tomar como material parental del suelo el material litológico subyacente, situación que puede llevar a graves errores de trabajo e interpretación.

2.1. EL ORIGEN DEL MATERIAL PARENTAL

Como se mencionó, los materiales parentales del suelo pueden provenir de las rocas de la corteza terrestre; estas rocas se originan mediante los procesos globales que se esquematizan en la Figura 1.5 y muestran la génesis y las interrelaciones entre ellas en un ciclo teórico de las rocas.

En el gráfico de la figura mencionada en el párrafo anterior, se observa que inicialmente se tiene un **magma**, es decir, un material fundido en el cual están presentes los elementos que luego van a formar los diferentes minerales que harán parte fundamental de las rocas **Ígneas**.

Una vez formadas las rocas ígneas, ellas pueden ser sometidas a dos procesos fundamentales: **Erosión** o **Metamorfismo** (altas presiones y/o temperaturas). Con el primero se llegan a producir depósitos de sedimentos y con el segundo se forman, en consecuencia, las rocas **Metamórficas**; éstas también

pueden sufrir procesos de erosión, con la consiguiente formación de sedimentos; todos los sedimentos pueden ser sometidos a **Diagénesis** o **Litificación** (compactación, cementación, etc.) y dar origen a las rocas **Sedimentarias**, que también estarán sujetas a procesos de metamorfismo o de erosión, produciéndose los resultados ya descritos.

Los sedimentos también pueden sufrir procesos de erosión; se reciclan en nuevos depósitos hasta llegar a tener una situación estable que les permite formar las rocas sedimentarias correspondientes. Finalmente, todas las rocas pueden ser sometidas a procesos que las llevan nuevamente a fundirse a grandes profundidades y a retornar al estado de magma.

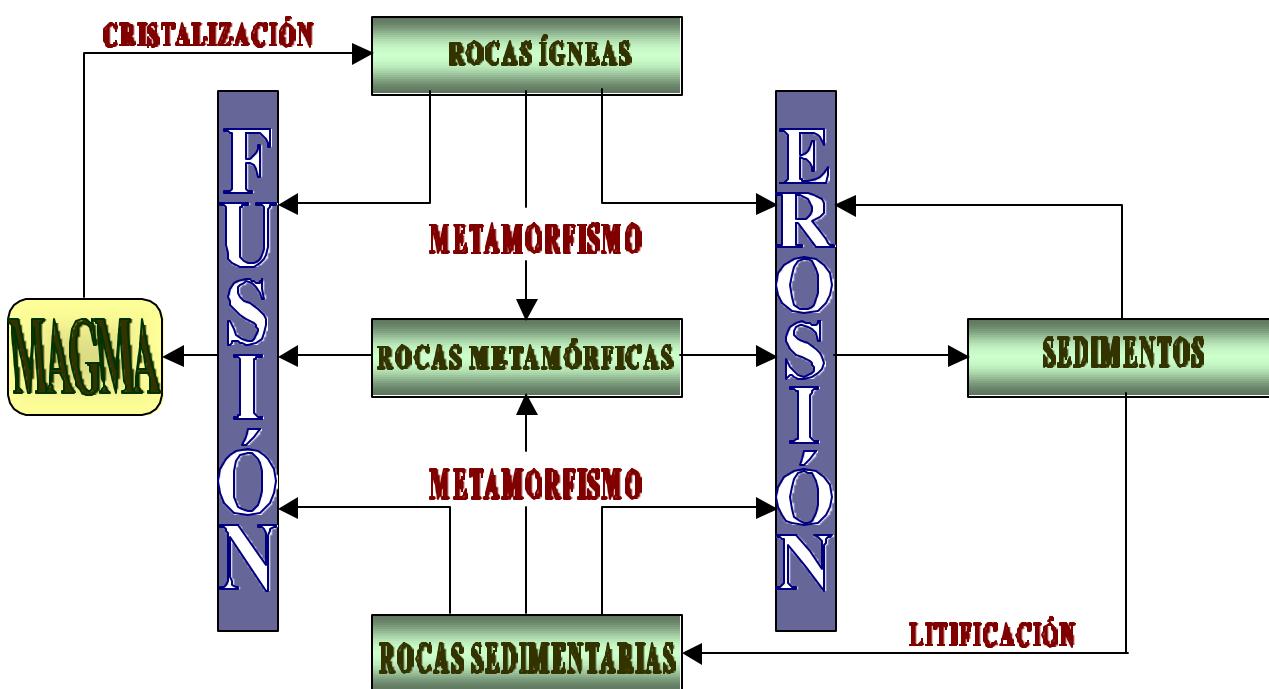


FIGURA 1.5. El ciclo de las rocas.

Como se ha descrito anteriormente, los materiales parentales del suelo pueden provenir de materiales que originalmente estaban consolidados, es decir, de rocas; éstas, desde el punto de vista de su origen se clasifican en tres grandes grupos generales: rocas **Ígneas**, rocas **Sedimentarias** y rocas **Metamórficas**. Además, pueden provenir de materiales no consolidados, es decir, de los **Sedimentos**. Las principales características de estos grupos se exponen a continuación.

2.1.1. Rocas ígneas

Estas rocas son aquellas que se forman por la dinámica de un magma, la cual se expresa en dos procesos fundamentales: **enfriamiento** del magma y/o **fragmentación**. Las condiciones bajo las cuales se produce el enfriamiento determinan la **textura de la roca**, o sea, el tipo, el tamaño, la forma, el

arreglo espacial y el grado de cristalinidad de sus componentes. La fragmentación del magma comprende, según Cashman et al (2000), aquellos procesos que lo transforman de un líquido con burbujas de gas dispersas en él en un gas con gotas líquidas dispersas en él o en partículas sólidas aisladas; es un fenómeno particularmente importante cuando se presentan erupciones volcánicas, sean **magmáticas** o secas, en las cuales el magma sólo tiene gases disueltos o **freatomagmáticas** o húmedas que corresponden según Marrissey et al (2000) a la interacción de un magma o de una lava con una masa de agua externa. La composición original del magma y su dinámica determinan la composición química de las rocas que se originen de él.

El magma original del cual se forman las rocas ígneas puede solidificarse bajo diferentes condiciones de profundidad en la corteza terrestre y, por consiguiente, bajo diferentes condiciones de presión y temperatura; estas condiciones controlan el grado de desarrollo de los cristales que conforman la roca y pueden producir tres subtipos generales de ellas.

2.1.1.1. Rocas intrusivas o plutónicas

Son aquellas rocas ígneas que se derivan de un magma solidificado a grandes profundidades y altas temperaturas (Grove, 2000); esta condición favorece el mantenimiento de un magma relativamente fluido durante largos períodos de tiempo, con cambios de temperatura muy graduales durante el proceso de enfriamiento; por esta razón, los minerales que se van formando desarrollan una masa de cristales grandes y bien definidos que ocupan todo el espacio disponible y dan origen a una roca de textura granular relativamente gruesa o **fanerítica** (Tarbuck y Lutgens, 1999). Ejemplos de rocas de esta naturaleza son: el granito, la cuarzodiorita y el gabro, comunes en nuestro medio.

Este grupo de rocas es especialmente abundante en la parte media y norte de la cordillera central colombiana, en la Sierra Nevada de Santa Marta, en las serranías del norte de la cordillera occidental y en los afloramientos del escudo guayanés, en los límites con Venezuela.

2.1.1.2. Rocas extrusivas

También llamadas **efusivas** o **volcánicas**, se pueden desarrollar a partir de un magma que se solidifica en la superficie terrestre (lavas). Este enfriamiento es rápido, por lo cual no hay tiempo para que se formen cristales grandes desarrollándose una textura conocida como **afanítica**, es decir, de cristales no observables a simple vista (Tarbuck y Lutgens, 1999); son dominantes en las áreas cordilleranas del sur de Colombia y en las serranías del pacífico chocoano.

Al grupo de las extrusivas pertenecen rocas como la riolita, la andesita y el basalto; se presentan también algunas rocas formadas, principalmente, por **vidrio volcánico** (material sin estructura interna), las cuales, debido a su enfriamiento extremadamente rápido, no forman cristales y por tanto desarrollan una textura **vítreas**. Los principales ejemplos de este grupo de rocas son la obsidiana y la pumita (piedra pómez).

También se forman rocas efusivas por la litificación de materiales que componen depósitos piroclásticos y son llamadas **rocas piroclásticas**. Cashman et al (2000) definen **piroclasto** como todo fragmento sólido que es expulsado por los volcanes durante sus erupciones. Los depósitos piroclásticos se originan por la acumulación de los productos de la fragmentación de un magma o de la acción directa de un magma sobre las rocas preexistentes en las estructuras volcánicas. Estas rocas se clasifican teniendo en cuenta el tamaño de las partículas o piroclastos que las forman y, según Fisher y Schminke (1984), reciben los nombres que se dan en la Tabla 1.6.

2.1.1.3. Rocas hipoabisales

Son rocas formadas a partir de magmas que se solidifican en condiciones intermedias de profundidad entre los dos grupos anteriores. Algunos minerales son grandes y bien definidos y se llaman **fenocristales**, mientras que otros no alcanzan tal desarrollo; por esto, la roca adquiere una textura en la cual se ven los fenocristales embebidos en una masa de textura afanítica o vítreo, llamada matriz; esta textura se llama **porfídica** y las rocas que la presentan se llaman **pórfidos** (Tarbuck y Lutgens, 1999).

TABLA 1.6. Clasificación de algunas rocas piroclásticas, según Fisher y Schminke (1984).

ROCA	NOMBRE DE LAS PARTÍCULAS INDIVIDUALES	TAMAÑO DE LOS PIROCLASTOS (mm)*
Aglomerado o Brecha volcánicos	Bombas y bloques	Mayor de 64
Roca de lapilli	Lapilli	64 – 2
Toba	Ceniza	Menor de 2

* Tomados de Wolff y Sumner (2000).

Según Rogers y Hawkesworth (2000) la clasificación de las rocas ígneas se basa en dos criterios fundamentales: la **composición mineralógica** y la **composición química**. En la composición mineralógica se tienen en cuenta el contenido de cuarzo, el contenido de feldespato y el tipo de plagioclasa. Por ejemplo, un basalto o un gabro presentan una mineralogía dominada por piroxeno y plagioclasa, con algo de olivino y anfibol; en una andesita o una diorita predomina ampliamente la plagioclasa y tiene, además, anfíboles, piroxeno y feldespato alcalino; en los granitos y las riolitas son abundantes el cuarzo, la plagioclasa y el feldespato alcalino, con algo de mica y anfíboles.

Con respecto a la composición química se tienen en cuenta los contenidos elementos **mayores** y **menores**, expresados porcentaje en peso de sus óxidos y los elementos **traza**, que se expresan como partes por millón (ver numeral 2.1.5 del Capítulo 12) del elemento solo.

Los elementos mayores son aquellos cuyos óxidos se presentan con una abundancia de más del 1% por peso, siendo los más frecuentes SiO_2 , Al_2O_3 , FeO , Fe_2O_3 , CaO , MgO y Na_2O ; los elementos menores se caracterizan porque sus óxidos representan entre 1 y 0.1% por peso y son frecuentes K_2O , TiO_2 , MnO y P_2O_5 ; en los elementos traza los óxidos aportan menos del 0.1% por peso a la composición y son importantes elementos como V, Cr, Ni, Rb, Sr, Zr, Ba, entre otros.

Debido a que la composición de las rocas es muy variable, con fines de clasificación se han diseñado gráficos especiales llamados **diagramas de variación** que relacionan la abundancia que presentan determinados óxidos en la roca; en ellos se establecen rangos de variación que utilizan para definir grupos de composición que caracterizan las diferentes rocas. Rogers y Hawkesworth (2000) dicen que un gráfico muy utilizado para clasificar rocas ígneas es el diagrama que relaciona la abundancia de SiO_2 contra el contenido total de álcalis, representado por la suma $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$. Del diagrama presentado por los autores citados se establece, por ejemplo, que un basalto o un gabro tienen entre ~45 y ~52% de SiO_2 y menos de 5% de $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ y que una andesita o una diorita tienen entre ~56 y ~63% de SiO_2 y entre ~5.5 y ~7% de $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$.

Nótese que en los ejemplos que se han dado en los párrafos anteriores se hace mención a dos rocas de nombre diferente pero que tienen las mismas características composicionales. Ésto se debe a que, como se mencionó al inicio de este aparte, un magma puede solidificar bajo diferentes condiciones, produciendo rocas de diferente textura. Lo anterior implica entonces que hay una roca con textura fannerítica (intrusiva) que tiene una roca equivalente en composición pero con textura afanítica (extrusiva); éste es el caso del gabro (intrusiva) y del basalto (extrusiva), por ejemplo.

Desde un punto de vista práctico, con el fin de definir el material parental del suelo en el campo, las rocas ígneas se clasifican como se muestra en la Tabla 1.7, excluyendo las piroclásticas y las hipoabisales.

TABLA 1.7. Clasificación de campo de las rocas ígneas. (Simplificada de una adaptación no publicada de Parra, L. N., profesor Universidad Nacional de Colombia, Medellín).

CONTENIDO DE CUARZO (%)*	ROCAS INTRUSIVAS	ROCAS EXTRUSIVAS
0 a 20	Sienitoides, Gabroides o Dioritoides**	Traquitoides, Andesitoides o Basaltoides**
20 a 60	Granitoides	Riolitoides o Dacitoides**

* Respecto al contenido de minerales claros. ** El nombre depende de la cantidad y tipo de plagioclasa presente.

En las clasificaciones más detalladas se encuentran, en el grupo de las **sienitoides** todos los tipos de sienitas y monzonitas; en las **gabroides** o **dioritoides** se ubican la anortosita, la diorita, el gabro, la cuarzodiorita y todas las variantes de ellas; en las **granitoides** están los granitos, la granodiorita y la tonalita.

En las rocas volcánicas, las **traquitoides** comprenden todas las traquitas y las latitas; las andesitas y los basaltos se ubican en el grupo de las **andesitoides** o **basaltoides**; las riolitas en las **riolitoides** y las dacitas en las **dacitoides**.

Frecuentemente se han utilizado otros criterios diferentes a los de clasificación expuestos anteriormente para hacer agrupaciones prácticas de las rocas ígneas y uno de los más utilizados ha sido la coloración de ellas; la coloración de la roca depende de la proporción en que se encuentren minerales de diferente color y para agruparlos se han definido dos clases de minerales: **félscicos** o claros y **máficos** u oscuros.

Según Tarbuck y Lutgens (1999) las rocas ígneas se han agrupado (no clasificado) por dichos criterios como sigue:

- **Rocas félasicas o graníticas.** También llamadas **ácidas**, son aquellas en las cuales predominan los minerales claros. Presentan menos de 15% de máficos y sus minerales dominantes son cuarzo, ortoclasa y plagioclasa, aunque pueden tener piroxenos, anfíboles y biotita. Ejemplos: granito, dacita, riolita.
- **Rocas intermedias o andesíticas.** Rocas compuestas principalmente por ortoclasa y plagioclasa, que pueden presentar piroxenos, anfíboles y biotita; la cantidad de máficos puede variar entre 15 y 40%. Ejemplos: andesita, diorita, sienita.
- **Rocas máficas o basálticas o básicas.** Son rocas que presentan más de 40% de minerales máficos y están compuestas principalmente por plagioclasa cárlica y piroxeno, con olivino y anfíboles. Ejemplos: basalto, gabro.
- **Rocas ultramáficas o ultrabásicas.** Rocas compuestas casi que exclusivamente por minerales oscuros, principalmente piroxenos, olivino y/o anfíboles, con algo de plagioclasa cárlica. Representantes de este grupo son la duníta (olivino casi exclusivamente) y la peridotita (piroxeno, olivino y anfíbol).

2.1.2. Rocas sedimentarias

Estas rocas se forman por litificación de sedimentos no consolidados que pueden ser producto de la acumulación de fragmentos de rocas preexistentes erosionadas o de la precipitación de compuestos químicos y/o de restos orgánicos; para su clasificación se tiene en cuenta la textura y, en algunos casos, su composición; con respecto a la textura se definen dos grandes grupos:

2.1.2.1. Rocas clásticas

Aquellas formadas por consolidación de fragmentos de rocas y/o minerales preexistentes. En este caso la formación rocosa se presenta **estratificada**, es decir, formando capas que indican diferentes épocas y/o condiciones de sedimentación. Para establecer el tipo específico de roca se tiene en cuenta el tamaño de los **clastos** o fragmentos que componen su matriz, siendo las principales las que se resumen en la Tabla 1.8.

TABLA 1.8. Clasificación de las rocas sedimentarias clásticas (tomada de Tarbuck y Lutgens, 1999).

SEDIMENTO INICIAL		NOMBRE DE LA ROCA	
TAMAÑO (mm)	NOMBRE		
Mayor a 2	Grava Redondeada	Conglomerado	
	Grava Angulosa	Brecha sedimentaria	
2 a 0.05	Arenas	Areniscas	Cuarzoarenita (Predomina el cuarzo)
			Arcosa (Cuarzo y abundante feldespato)
			Grauvaca (Cuarzo, feldespato y arcilla)
0.05 a 0.002	Limo	Limolita	
Menor a 0.002	Arcilla	Arcillolita, Lutita*	

* Generalmente es una mezcla de arcilla y limo; también se conoce como Shale.

2.1.2.2. Rocas no clásticas

Son aquellas que se forman por precipitación de productos químicos: **Rocas sedimentarias químicas**, o por acumulación de residuos de organismos: **Rocas sedimentarias orgánicas**. En este grupo de rocas se tiene como criterio de clasificación su composición o el tipo de organismo, como lo muestra la Tabla 1.9.

TABLA 1.9. Clasificación de las rocas sedimentarias no clásticas (tomada de Tarbuck y Lutgens, 1999).

TIPO DE ROCA	COMPONENTES	NOMBRE DE LA ROCA
QUÍMICAS	CaCO ₃ (calcita)	Caliza
	(Ca, Mg) (CO ₃) ₂ (dolomita)	Dolomía (dolomita)
	SiO ₂ (sílice)	Sílex (Chert)
	NaCl (halita)	Roca de Sal
	CaSO ₄ .2H ₂ O (yeso)	Yeso
ORGÁNICAS	Restos vegetales	Carbón
	Conchas de organismos marinos cementadas	Coquina
	Diatomeas	Diatomita
	Radiolarios	Radiolarita

Entre los grupos de rocas, las sedimentarias son las que mayor área superficial ocupan en Colombia, como puede apreciarse en la Figura 1.6. Se presentan en algunas zonas de la amazonia, la orinoquia, la cordillera oriental, serranías del litoral pacífico y del caribe y en la alta Guajira.

2.1.3. Rocas metamórficas

Estas rocas se originan a partir de rocas preexistentes, cuando son sometidas a altas presiones y/o temperaturas, así como a la acción de fluidos químicamente activos, produciéndose cambios químicos y/o estructurales en los minerales de las rocas originales; estos cambios producen un reordenamiento y/o segregación de los minerales en las rocas, que puede expresarse en una orientación paralela de los mismos o **foliación**, la cual puede manifestarse de tres formas, según Tarbuck y Lutgens (1999):

- **Pizarrosidad:** Son capas paralelas, delgadas y planas formadas por microcristales de micas. Los planos de foliación no son apreciables a simple vista.
- **Esquistosidad:** Son láminas delgadas formadas por la orientación de minerales de tamaño mayor que en la pizarrosidad y que le dan a la roca un aspecto escamoso.
- **Neisosidad:** Es un bandeamiento de la roca originado por la segregación de minerales en el cual cada banda tiene una composición mineralógica definida y diferente de la adyacente.

En las rocas que originalmente eran monomineralógicas, el metamorfismo produce un reordenamiento de los minerales que no conlleva a foliación y, por tanto, la roca metamórfica producida tiene una apariencia **masiva**.

Para la clasificación de las rocas metamórficas se tiene en cuenta, fundamentalmente, la presencia o ausencia de foliación. Si ésta se presenta, la roca toma el nombre objetivado del tipo de foliación

correspondiente, así: si hay pizarrosidad, la roca se denomina **pizarra**. Si hay esquistosidad se llama **esquisto** y si hay neisosidad, se nombra **neis** (o también gneis).

Desde el punto de vista del establecimiento del material parental del suelo, en el campo, en la Tabla 1.10 se presentan los nombres de las principales rocas metamórficas; en las rocas granulares no se involucra el grado de metamorfismo que ha sufrido la roca original; las pizarras y filitas son de grano fino; la filita presenta lustre sedoso por neoformación de cloritas y micas según Besoain (1985).

Para hacer más específica la clasificación de las rocas metamórficas puede expresarse su composición mineralógica; por ejemplo, un esquisto, con abundante cantidad de micas, será un esquisto micáceo; con respecto a las rocas no foliadas, la clasificación se establece, generalmente, con base en su composición mineralógica.

TABLA 1.10. Clasificación general de las rocas metamórficas. (Tomada de Tarbuck y Lutgens, 1999).

TIPO DE ROCA	GRADO DE METAMORFISMO		
	Bajo	Medio	Alto
Rocas foliadas	Pizarra, Filita	Esquisto	Neis, Anfibolita, Serpentinita
Rocas granulares o no foliadas			Cuarcita (compuesta casi exclusivamente por cuarzo)
			Mármol (compuesta por cristales de calcita)

Las rocas metamórficas se presentan en Colombia, generalmente, formando complejos con rocas ígneas, en el centro y norte de la cordillera central y norte de la oriental; ocupan un área importante en el sur de esta misma cordillera oriental.

2.1.4. Sedimentos no consolidados

Los sedimentos no consolidados, como materiales parentales de los suelos, son los más importantes en Colombia, debido al área que ocupan. Cubren amplias zonas planas y bajas en el país, dedicadas a la explotación agropecuaria más intensiva (valles del Cauca y Magdalena y costa caribe); además, recubren casi toda la amazonia y la orinoquia, buena parte del litoral pacífico y casi todas las vertientes de las cordilleras; el criterio de clasificación más utilizado para estos materiales es el tamaño de los fragmentos que los componen y, de acuerdo a este criterio, se clasifican, según el Soil Survey Division Staff (SSDS) (1993), como se muestra en la Tabla 1.11.

TABLA 1.11. Clasificación de las partículas y fragmentos líticos que componen los sedimentos no consolidados según el SSDS (1993).

FRAGMENTO O PARTÍCULA	TAMAÑO (mm)
Bloque	> 600
Piedra	600 – 250
Grava	250 – 75
Gravilla	75 – 2
Arena muy gruesa	2 – 1
Arena gruesa	1 – 0.5
Arena media	0.5 – 0.25
Arena fina	0.25 – 0.1

Arena muy fina	0.1 – 0.05
Limo	0.05 – 0.002
Arcilla	< 0.002

También, se consideran como sedimentos no consolidados los materiales **piroclásticos** sueltos, los cuales se clasifican de acuerdo con su tamaño, como se presentó en la Tabla 1.6. Se presentan importantes recubrimientos de ceniza volcánica en la cordillera central y en las vertientes interiores de las cordilleras oriental y occidental.

Los sedimentos no consolidados también se pueden clasificar con base en su origen, el cual implica el agente que transportó los materiales; da una idea del tamaño de los sedimentos acumulados y de la homogeneidad granulométrica del depósito originado; según estos criterios los diferentes sedimentos pueden clasificarse como se muestra en la Tabla 1.12. En la Figura 1.6 se presenta la distribución de los grupos principales de rocas y de los sedimentos no consolidados en Colombia.

2.2. EL COMPONENTE INORGÁNICO DEL MATERIAL PARENTAL

Los principales componentes inorgánicos de los materiales parentales del suelo, tratados anteriormente, son los minerales; un **mineral** es un sólido natural inorgánico que presenta una estructura interna ordenada y una composición química definida (Tarbuck y Lutgens, 1999).

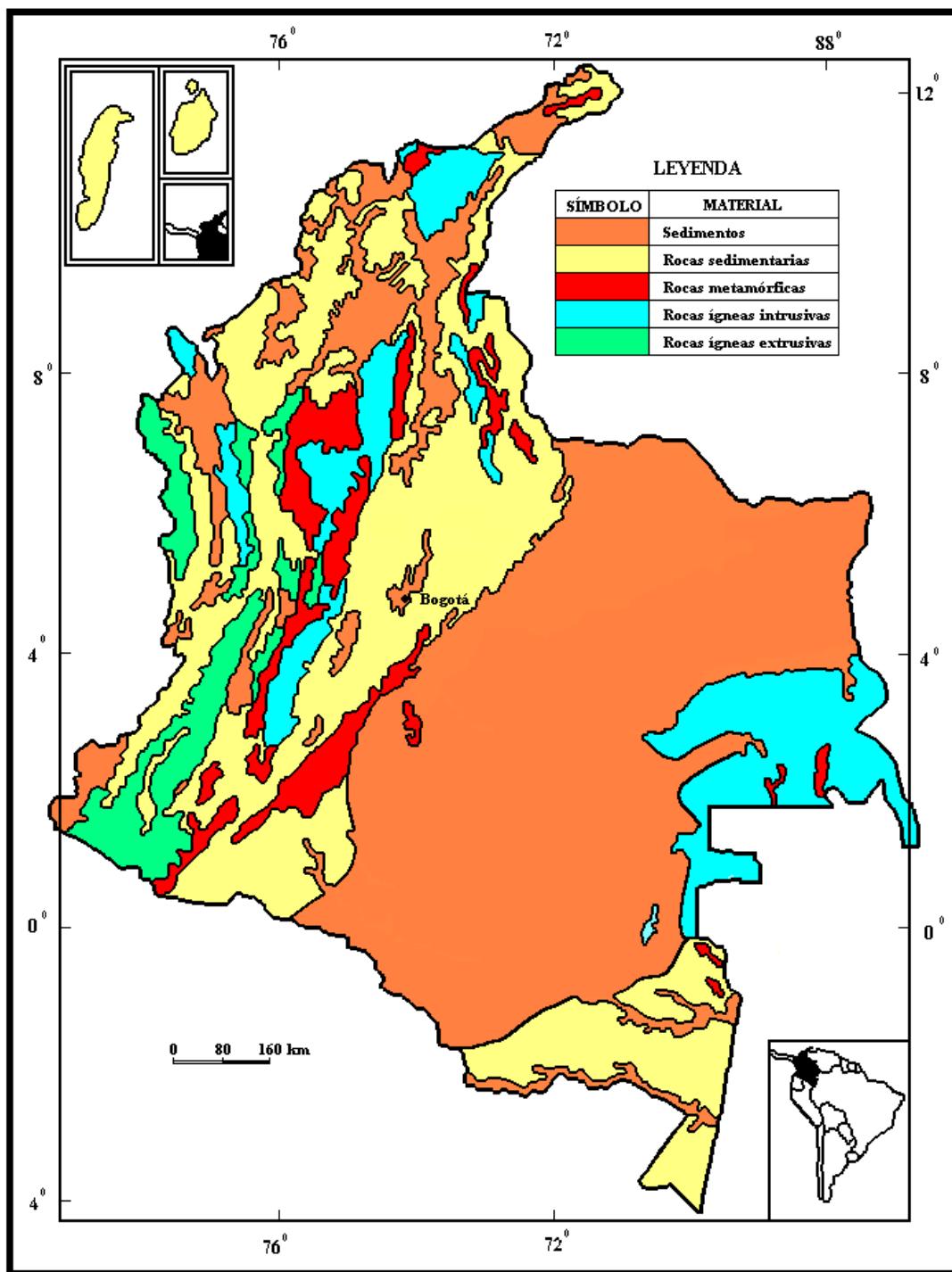


FIGURA 1.6. Distribución generalizada de los grupos de rocas y de sedimentos no consolidados en Colombia
 (Adaptado de INGEOMINAS, 1976: Mapa Geológico de Colombia y de Malagón et al, 1995).

El mineral está compuesto por un arreglo tridimensional de átomos y/o iones que se repite en intervalos regulares, el cual recibe el nombre de **cristal**; el menor arreglo tridimensional completo de un cristal se

conoce como **celda unitaria**. Los minerales originales de las rocas se conocen como **minerales primarios** y cuando éstos se alteran pueden formar otros minerales llamados **minerales secundarios**.

TABLA 1.12. Origen y algunas características de depósitos sedimentarios importantes como material parental del suelo en Colombia.

AGENTE DE TRANSPORTE	TIPO DE DEPÓSITO	SORTEAMIENTO*	GRANULO-METRÍA**	GEOFORMAS ASOCIADAS***
Agua	LACUSTRE	Muy bueno	Fina	Planicie lacustre, cubetas, basines.
	ALUVIAL	Bueno	Variable	Abanico aluvial, llanura aluvial de río meandrífico.
		Malo	Mezclada	Terrazas y llanura aluvial de río trenzado.
	MARINO	Bueno	Gruesa	Playas, barras, flechas.
Agua y gravedad	TORRENCIAL	Malo	Mezclada	Flujos, coladas, lahares, abanico torrencial.
Gravedad y agua	COLUVIAL	Bueno	Variable	Coluvios, conos de detritos.
Viento	EÓLICO	Bueno	Gruesa	Dunas, mantos de arena.
			Variable	Mantos de ceniza y lapilli.

* Se refiere a la homogeneidad en el tamaño del sedimento: Bueno = Homométrico, Malo = Heterométrico.

** Se dice **variable** cuando el tamaño de los sedimentos no es homogéneo en todo el depósito, sino que varía según la posición dentro de él.

*** Para las definiciones de los términos utilizados puede verse Villota (1991).

2.2.1. Los minerales primarios

Son aquellos minerales que se cristalizaron bajo las condiciones de formación de las rocas y que, por lo tanto, son parte de ellas; estos minerales pueden estar presentes en el suelo, si éste no ha evolucionado lo suficiente o si han sido muy resistentes a la acción de los procesos de alteración de la roca y el suelo; cuando se presentan en el suelo constituyen la mayor parte de las partículas del tamaño de arena y limo (entre 0.002 y 2 mm) de él.

Los principales grupos de minerales primarios corresponden a **silicatos**, aunque también se presentan óxidos, hidróxidos, carbonatos, sulfatos, sulfuros y fosfatos; las principales características de este tipo de minerales se resumen a continuación.

2.2.1.1. Los silicatos

Son minerales cuya composición química se deriva del ácido silícico H_4SiO_4 y cuya unidad estructural básica es un **tetraedro** de sílice (SiO_4)⁴⁻ que posee en el centro un átomo de silicio y en los vértices cuatro átomos de oxígeno (ver Figura 1.7); según Besoain (1985), de la manera como se van disponiendo estos tetraedros en la estructura cristalina del mineral, se producen varios subgrupos de silicatos, así:

- **Nesosilicatos.** Los tetraedros se presentan en forma independiente sin compartir oxígenos con otros tetraedros; la unión entre ellos se hace a través de cationes divalentes. Ejemplo: Olivino, $(\text{Mg}, \text{Fe})_2 \text{SiO}_4$
- **Sorosilicatos.** Los tetraedros se unen por pares compartiendo un átomo de oxígeno. Ejemplo: Epidota, $\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe})_3\text{OH SiO}_4 \text{Si}_2\text{O}_7$.
- **Ciclosilicatos.** Agrupación de tetraedros formando anillos. Dos oxígenos de cada tetraedro están compartidos. Ejemplo: Berilo, $\text{Be}_3\text{Al}_2 \text{Si}_6\text{O}_{18}$
- **Inosilicatos.** Los tetraedros se unen formando cadenas, las cuales pueden ser:
 - *Sencillas*. Ejemplo: Piroxenos como el Diópsido, $\text{CaMg Si}_2\text{O}_6$.
 - *Dobles*. Ejemplo: Anfíboles como la Hornblenda, $(\text{OH})_2\text{Ca}_2\text{Na}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_5\text{Al}_2 \text{Si}_6\text{O}_{22}$.
- **Filosilicatos.** Son silicatos laminares que presentan una estructura especial organizada con base en hojas de tetraedros de sílice y de octaedros de alúmina (ver Figura 1.7). La estructura básica de los tetraedros se describió anteriormente; estas unidades se unen entre sí por los vértices compartiendo 3 de sus 4 oxígenos. Los octaedros son unidades en las cuales un catión central como Al, Mg o Fe está rodeado por 6 oxígenos o por 6 OH, los que se unen entre sí compartiendo aristas. A su vez, compartiendo sus oxígenos apicales, los tetraedros se acoplan a los octaedros para formar las capas que definen los filosilicatos; en el numeral 2.2.2.1. de este capítulo se detallan estas configuraciones. Ejemplo: Micas como la Moscovita (también Muscovita), $\text{K}(\text{Al}_2) \text{AlSi}_3\text{O}_{10} (\text{OH})_2$.
- **Tectosilicatos.** Los tetraedros se unen en estructuras que crecen en las tres dimensiones, compartiendo con otros tetraedros sus 4 vértices. Este grupo de minerales es el más abundante en la corteza terrestre. Ejemplo: Feldespato como la Ortosa u Ortoclasa, KAlSi_3O_8 . A este grupo pertenece también el cuarzo, SiO_2 .

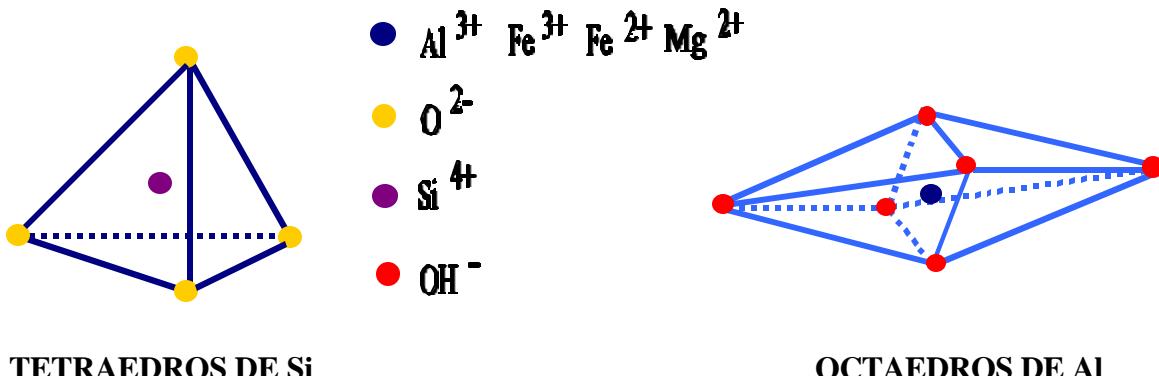


FIGURA 1.7. Representación esquemática de las unidades estructurales básicas de los filosilicatos.

2.2.1.2. Los óxidos

Son minerales muy abundantes en rocas ígneas y metamórficas; muy frecuentes son:

- Magnetita, Fe_3O_4 .
- Corindón, Al_2O_3 .

- Ilmenita, FeTiO_3 .
- Pirolusita, MnO_2 .

2.2.1.3. Los oxihidróxidos

Son minerales que provienen de óxidos en los cuales parte o todo el oxígeno ha sido reemplazado por OH; son comunes:

- Diáspora, AlO(OH) .
- Brucita, Mg(OH)_2 .

2.2.1.4. Los carbonatos

Son minerales cuya composición química corresponde a sales derivadas del ácido carbónico, H_2CO_3 . Son comunes la Calcita: CaCO_3 y la Dolomita: $(\text{Ca}, \text{Mg})(\text{CO}_3)_2$. La calcita presenta efervescencia con ácido clorhídrico (HCl) diluido y frío.

2.2.1.5. Los sulfatos

Son sales que incluyen el radical SO_4^{2-} en su estructura como la Anhidrita: CaSO_4 y el Yeso: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

2.2.1.6. Los sulfuros

Son sales derivadas del ácido sulfhídrico, H_2S , como la Calcopirita: CuFeS_2 , la Pirlita: FeS_2 y la Galena: PbS .

2.2.1.7. Los fosfatos

Son sales derivadas del ácido fosfórico, H_3PO_4 ; un representante importante de los fosfatos es el grupo de los apatitos: $\text{Ca}_5(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})(\text{PO}_4)_3$.

La relación que puede presentarse entre los minerales primarios y las rocas que con mayor frecuencia los contienen puede verse en la Tabla 1.13, según Trujillo (1980) y Medenbach y Sussieck - Fornefeld (1983). Sin embargo, debe tenerse en cuenta, que los minerales contenidos en las rocas no necesariamente pasan al suelo que se desarrolle de ellas; algunos de esos minerales, debido a las propiedades particulares de cada uno de ellos, pueden desaparecer durante las primeras etapas de la formación del suelo.

No todos los minerales primarios se alteran con la misma facilidad. Ésto depende, fuertemente, de las condiciones en que se formaron y de las condiciones ambientales a las cuales se encuentran expuestos. Esta respuesta diferencial a la alteración implica que, durante la formación y evolución del suelo, los minerales primarios menos resistentes desaparecen del sistema, transformándose en secundarios o en especies iónicas, mientras que los más resistentes pasan a formar parte integral del suelo, acumulándose,

con mayor frecuencia, en las fracciones de tamaño mayor del mismo, es decir, en la **arena** y el **limo** (ver Capítulo 7).

Teniendo en cuenta lo expuesto en el párrafo anterior, en relación con la alteración diferencial de los minerales primarios, si se comparan dos suelos desarrollados del mismo material parental, se puede decir que ha evolucionado más el que presente menor variedad de minerales primarios, menor contenido de arena y limo y mayor cantidad de minerales primarios resistentes a la alteración.

TABLA 1.13. Principales minerales primarios del suelo y las rocas que los contienen. (Adaptado de Trujillo, 1980 y de Medenbach y Sussieck - Fornefeld, 1983).

MINERALES	TIPO DE ROCA
Olivinos (Forsterita, Fayalita)	Ígneas máficas y ultramáficas
Piroxenos (Augita, Diópsido, Hiperstena)	Ígneas máficas y ultramáficas y metamórficas de grado medio y alto
Anfíboles (Hornblenda, Actinolita)	Metamórficas de grado bajo y medio
Micas (Moscovita, Biotita)	Metamórficas y algunas rocas ígneas félsicas
Feldespato (Ortoclasa, Albita, Anortita)	Ígneas, metamórficas y sedimentarias
Cuarzo	Ígneas félsicas, sedimentarias clásticas
Carbonatos (Calcita, Dolomita)	Sedimentarias y algunas metamórficas
Yeso	Sedimentarias
Corindón	Ígneas y metamórficas
Hematita	Sedimentarias y metamórficas
Magnetita	Casi todas las rocas ígneas
Hidróxidos	Metamórficas

Se han establecido series de alteración de acuerdo con la facilidad con la cual se alteran los minerales primarios; en ellas se ordenan los minerales de acuerdo con su resistencia a la transformación; un ejemplo de estas series es la que propone Corey, citado por Malagón et al (1995), quien ordena los minerales de menor a mayor grado de resistencia a la alteración como sigue:

Olivino < Augita < Hornblenda < Biotita < Oligoclasa < Albita < Ortoclasa < Magnetita < Cuarzo

En la serie anterior no se incluyen, obviamente, todos los minerales; sólo están considerados aquellos que son importantes en los suelos; el orden establecido se da bajo condiciones oxidantes del medio.

De acuerdo con la información recopilada por el IGAC (Malagón et al, 1995), en Colombia, el mineral más abundante en la composición de las arenas de los suelos del país, es el **cuarzo**; le siguen, en orden de abundancia, los feldespatos, los anfíboles y las micas. Además de éstos, en algunas áreas con influencia de ceniza volcánica, se presentan contenidos importantes de vidrio volcánico en el suelo.

Para concluir esta parte relacionada con los minerales primarios, puede ser conveniente realizar un sencillo ejercicio de observación al microscopio. Éste permite comprobar la presencia de los minerales en el suelo y observar si cambia la composición mineralógica de las arenas entre los diferentes horizontes de un suelo y entre éstos y su material parental. El procedimiento consiste en:

- Se toma una muestra suficiente de los horizontes A, B y C de un perfil de suelo, así como del material parental sin alterar, teniendo en cuenta la profundidad a la cual son tomadas las muestras dentro del suelo; se llevan al laboratorio.
- Se secan las muestras al aire, se muelen y se ciernen por 2 tamices: primero por uno de 0.5 mm de abertura y el material que pase este tamiz, cernirlo por otro de 0.25 mm de abertura; se recoge el material que quede retenido en este último para obtener la fracción de suelo con tamaños entre 0.25 y 0.5 mm de diámetro equivalente.
- Se observan macroscópicamente algunas características del material seleccionado, como color, forma de las unidades individuales que lo componen, presencia de cristales, etc.; se establecen las diferencias entre las muestras observadas.
- Se seca una parte de la muestra al horno a 105 °C, durante 36 horas. Luego se pesan 100 g de cada muestra y se someten a los siguientes tratamientos:
 - Se lava la muestra del horizonte A (el más oscuro), con H₂O₂, adicionándole pequeñas cantidades a la vez y hasta que se suspenda la efervescencia, para eliminarle la materia orgánica; luego lavar con ácido clorhídrico y/o nítrico y agua corriente abundante, frotando con los dedos el material hasta observar que la mayor parte de él se encuentra en forma de cristales individuales.
 - Se someten las demás muestras a lavado, si no tienen contenidos significativos de materia orgánica, con ácido clorhídrico y/o nítrico y agua corriente, como se hizo con la muestra del horizonte A.
 - Se debe tener cuidado de no perder muestra, en el proceso de limpieza, arrastrada por el agua; para esto, el lavado se debe hacer sobre el tamiz de 0.25 mm, sin frotar la muestra en la malla de éste.
- Se recoge el material que queda retenido en el tamiz después de los lavados y se seca al horno a 105 °C durante 24 horas.
- Se pesa el material seco y se establece el porcentaje de pérdida de material, con respecto al material de partida.
- Se toma una pequeña submuestra de cada muestra, al azar, y se observa en un estereomicroscopio. Establecer las proporciones relativas (en porcentaje) del tipo de minerales presentes, agrupándolos por rasgos morfológicos destacados como el color (por ejemplo, minerales oscuros, minerales claros transparentes y minerales claros opacos).
- Se repite el procedimiento del punto anterior con otras dos submuestras y se promedian los valores obtenidos.
- Se comparan los resultados para todos los horizontes muestreados y para el material parental, analizando la distribución de los grupos de minerales en las diferentes muestras con respecto a su ubicación en el suelo y discutiéndolas con base en la meteorización y la pedogénesis.

2.2.2. Los minerales secundarios y otros componentes de la fracción fina del suelo

Este grupo comprende aquellos minerales producidos por la alteración de los minerales primarios o de las rocas; en los suelos se presentan esencialmente en la fracción del tamaño de la **arcilla** (partículas

con diámetro menor de 0.002 mm y propiedades coloidales) aunque en esta fracción también pueden encontrarse algunos minerales primarios.

Los principales minerales secundarios de dicha fracción arcillosa del suelo corresponden a **filosilicatos** y a **óxidos** e **hidróxidos** de **hierro** y **aluminio**, aunque en algunos grupos de suelos son importantes otros componentes como los aluminosilicatos y/o los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio no cristalinos (conocidos también como “**amorfos**”).

2.2.2.1. Los filosilicatos secundarios

Son, básicamente, silicatos hidratados de aluminio, magnesio, hierro y otras bases; tienen estructura laminar compuesta por el agrupamiento de hojas de tetraedros de sílice y de octaedros de Al o de Mg, como se mencionó anteriormente. Durante la formación de estas unidades básicas puede presentarse reemplazamiento del Si^{4+} por Al^{3+} en los tetraedros o del Al^{3+} por iones de tamaño semejante, comúnmente por Fe^{2+} y Mg^{2+} , produciéndose el fenómeno conocido como “**sustitución isomórfica**”, de grandes implicaciones en la actividad química del mineral, como se verá más adelante.

Debido a que la estructura de los filosilicatos secundarios es tan especial, se han definido algunos términos útiles para describirla adecuadamente, los cuales se dan a continuación, tomados de Besoain (1985):

- **Plano:** Superficie plana compuesta por un conjunto de átomos que tiene el espesor de uno de ellos. Ejemplo: Plano basal de átomos de oxígeno en una hoja de tetraedros.
- **Hoja:** También llamada lámina, es el conjunto de tetraedros o de octaedros unidos entre sí.
- **Capa:** Es el conjunto formado por la unión de hojas. Su crecimiento horizontal se da por la repetición de celdas unitarias.
- **Capa unitaria:** Es la capa que tiene el menor número de hojas que representa un filosilicato dado.
- **Entrecapa:** Comprende los materiales que se encuentran situados entre las capas que conforman el cristal; pueden ser iones, agua, moléculas orgánicas, hojas, etc.
- **Cristal:** Es la unidad formada por el conjunto de capas apiladas en el sentido del eje c.
- **Eje c:** También distancia c, es la distancia que hay entre un cierto plano de la capa unitaria y su correspondiente en la capa unitaria siguiente. Esta medida es característica de cada especie mineral.

En la Figura 1.8 se hace una representación esquemática que ayuda a visualizar los componentes definidos anteriormente.

La AIPEA (Association International Pour l'Etude des Argiles), citada por Besoain (1985), agrupa los filosilicatos, a un nivel general de clasificación, con base en la manera como están dispuestas las hojas de tetraedros y de octaedros en las capas unitarias y definen tres **tipos** de minerales: 1:1, 2:1 y 2:1:1. Estos tipos, a su vez, son subdivididos en **grupos** teniendo en cuenta la carga por celda unitaria que presenta el mineral; los grupos se separan en **subgrupos**, dependiendo de la relación de cationes que se encuentran en la hoja octaédrica y, finalmente, en los subgrupos define las **especies** minerales con base en diferencias en el grado de ordenamiento de las capas, en la disposición de los aluminios en los

octaedros, en el tamaño de la celda unitaria, en el tipo de iones que intervienen en la sustitución isomórfica y en la composición química. En la Tabla 1.14 se presenta un resumen del sistema de clasificación mencionado, incluyendo sólo lo relacionado con los minerales secundarios, tomado de Besoain (1985).

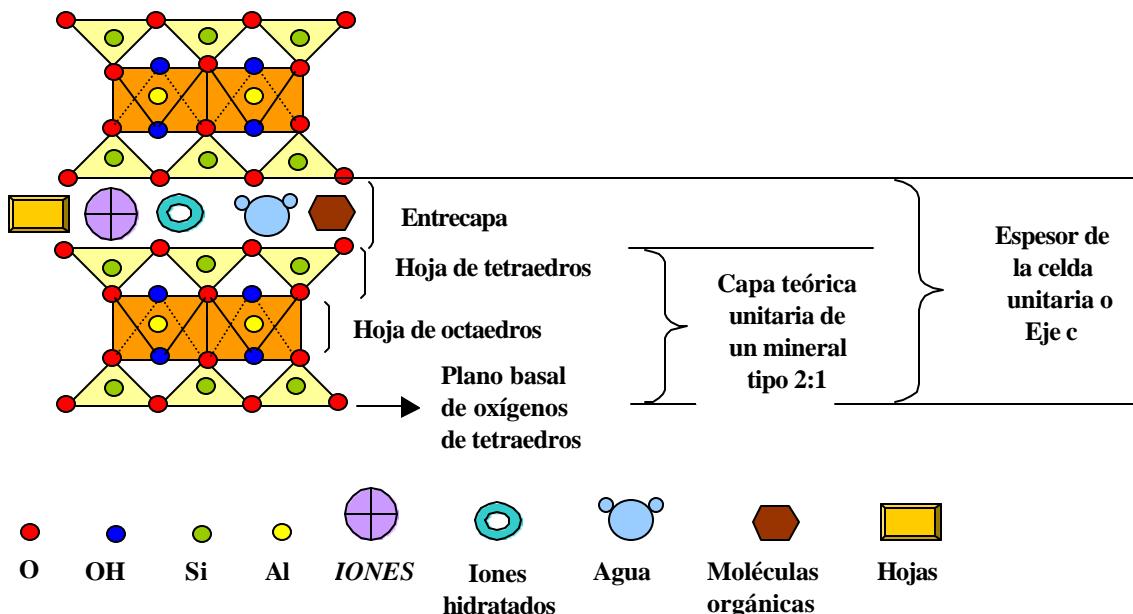


FIGURA 1.8. Representación esquemática de algunos conceptos relacionados con la estructura cristalina de los filosilicatos (No se representa ningún mineral en especial).

TABLA 1.14. Clasificación simplificada de filosilicatos secundarios, según la AIPEA (resumida de Besoain, 1985).

TIPO	GRUPO*	SUBGRUPO**	ESPECIES
1:1	Kanditas ($x \sim 0$)	Caolinitas ($n \sim 2$)	Caolinita, Haloisita
	Esmectitas ($x \sim 0.25 - 0.6$)	Montmorillonitas ($n \sim 2$) Saponitas ($n \sim 3$)	Montmorillonita, Beidelita Sauconita
2:1	Vermiculitas ($x \sim 0.6 - 0.9$)	Vermiculita dioctaédrica ($n \sim 2$) Vermiculita trioctaédrica ($n \sim 3$)	Vermiculita alumínica Vermiculita trioctaédrica
	Illitas ($x \sim 1$)	Illita dioctaédrica ($n \sim 2$)	Illita o mica hidratada
2:1:1	Cloritas (x variable)	Clorita dioctaédrica ($4 < n < 5$) Clorita trioctaédrica ($5 < n < 6$)	Clorita alumínica Clorita magnésica

* x: Carga por celda unitaria. El grupo de las illitas no está incluido en el cuadro original de Besoain, por estar en revisión; se incluye aquí a partir de las discusiones hechas en el texto por el autor citado. Según Bohn et al (1993) a la illita hoy se le da el nombre genérico de Mica Hidratada.

** n: Número de cationes en la hoja octaédrica: 2 implica dioctaédrica y 3 trioctaédrica.

2.2.2.1.1. Minerales 1:1

Presentan una estructura conformada por una lámina de tetraedros unida a una lámina de octaedros, compartiendo los oxígenos de los tetraedros. En esta configuración se forma una estructura rígida, por

lo cual éstas arcillas son bastante estables en el suelo; su principal característica radica en que la sustitución isomórfica que presentan es muy baja y por tanto su actividad físico-química también lo es. A este grupo pertenecen especies minerales comunes en suelos tropicales muy evolucionados como la **Caolinita** y la **Haloisita** (Besoain, 1985).

2.2.2.1.2. Minerales 2:1

Formadas por la unión de dos láminas de tetraedros con una lámina de octaedros intercalada entre ellas. En estas arcillas la sustitución isomórfica es elevada y por tanto presentan gran actividad físico-química en el suelo; la estructura básica de estas arcillas está definida por el conjunto que resulta de unir dos paquetes de capas unitarias entre sí, por medio de otras unidades laminares o por medio de iones hidratados o de moléculas de agua (ver Figura 1.8); estas variaciones en la composición del espacio interlaminar y en el tipo de sustitución isomórfica son las que definen los diferentes tipos de arcillas 2:1, así como sus propiedades físico-química. Algunas de las arcillas más conocidas de este grupo son la **Montmorillonita**, la **Vermiculita** y la **Illita**.

La carga que se genera por la sustitución isomórfica en estas arcillas es balanceada por cationes ubicados en el interior de los cristales o por fuera de la unidad estructural. La magnitud de la carga que se neutraliza con cationes que se ubican por fuera de la unidad estructural se define como **carga de capa**; el valor de esta carga, según Bohn et al (1993), facilita, dificulta o impide que moléculas polares o iones entren en el espacio interlaminar del mineral y lo expandan o no; si la carga de capa es baja, el mineral es muy **expansivo** y si es alta, el mineral es **no expansivo**.

En la lámina de octaedros, debido al efecto de la cantidad de cargas acumuladas de los aniones colocados en los vértices, por cada tres octaedros, se producen 6 cargas negativas, las cuales deben ser neutralizadas por seis cargas positivas; esta situación plantea dos posibilidades de neutralización: Una con 2 cationes de 3 cargas positivas cada uno, ocupándose 2 de cada 3 octaedros y la otra con 3 cationes de 2 cargas positivas cada uno, ocupándose 3 de cada 3 octaedros; esta ocupación de los octaedros por cationes tri o divalentes genera los filosilicatos **dioctaédricos** y **trioctaédricos**, respectivamente (Bohn et al, 1993).

2.2.2.1.3. Minerales 2:1:1

Presentan una estructura conformada por dos láminas de tetraedros y dos de octaedros, intercaladas entre sí; generalmente, la lámina externa de octaedros corresponde a una lámina de **brucita** $[Mg_3(OH)_6]$, cargada positivamente; en ella los iones Al^{3+} han sido reemplazados por Mg^{2+} y corresponden a una lámina trioctaédrica; la presencia de esta lámina de brucita le quita posibilidades de expansibilidad a estos minerales y, aunque presentan alta sustitución isomórfica, aquella capa también le reduce la actividad; el principal representante de este grupo es la **Clorita** (Bohn et al, 1993).

2.2.2.1.4. Filosilicatos interestratificados

Según Besoain (1985) son minerales cuyos cristales están compuestos por celdas o por capas unitarias de dos o más tipos de filosilicatos. La **interestratificación** es la intercalación regular o aleatoria de unidades estructurales de diferentes minerales a lo largo del eje c y es particularmente importante entre silicatos de capa 2:1 ó 2:1:1.

Las interestratificaciones pueden ser binarias, terciarias y hasta cuaternarias; pueden ser entre filosilicatos secundarios del mismo tipo como en el interestratificado montmorillonita – vermiculita, (minerales 2:1) o de tipos diferentes como en los casos caolinita – montmorillonita (1:1 – 2:1) o montmorillonita – vermiculita – clorita (2:1 – 2:1 – 2:1:1). Además, se pueden presentar interestratificaciones entre minerales primarios y secundarios como en el caso de biotita – vermiculita. Es frecuente nombrar los minerales interestratificados con el tipo de capa de los minerales que se están intercalando; por ejemplo, mineral interestratificado 2:1: en este caso, todos los minerales interestratificados son del tipo 2:1.

2.2.2.2. Los alumino - silicatos no cristalinos

En este grupo de materiales no hay un ordenamiento definido de los tetraedros y octaedros lo que hace que no presenten espectro a los Rayos X; esta característica les da una gran actividad en el suelo. El principal ejemplo de estos materiales lo constituyen los componentes de la serie del **alofán** o **alofano**: alofano A, alofano B y alofano AB. Estos componentes son el producto de la alteración de varios minerales de las rocas volcánicas y de los piroclastos.

En la Figura 1.9 se presenta un resumen de los principales silicatos del suelo y en la Tabla 1.15 se expone la distribución aproximada de los materiales inorgánicos dominantes en la fracción arcilla de los suelos en las regiones naturales de Colombia, resumida de Marulanda y Pulido (1984).

TABLA 1.15. Distribución general de los principales materiales inorgánicos de la fracción arcilla en las regiones naturales de Colombia. (Adaptada de Marulanda y Pulido, 1984).

REGIÓN	SUBREGIÓN	MATERIALES
Amazonia	Llanos	Caolinita, intergrados* con/sin mica, gibsita o cuarzo
	Saliente del Vaupés	Caolinita
	Piedemonte	Caolinita, mica, intergrados
Orinoquia	Mal drenada	Caolinita, intergrados, mica
	Piedemonte	Caolinita, mica, intergrados
	Altillanura	Caolinita, intergrados, cuarzo con/sin gibsita
Cordilleras	Sector central	Alofana, gibsita, haloisita, caolinita
	Sector oriental	Caolinita, mica, cuarzo, alofana
	Sierra Nevada de Santa Marta	Caolinita, gibsita con/sin intergrados
Valles interandinos (Cauca y Magdalena)		Montmorillonita, vermiculita, mica, caolinita
		Montmorillonita, caolinita, mica, vermiculita
		Micas, Montmorillonita, vermiculita
Andén Pacífico	Piedemontes y valles	Caolinita, mica, cuarzo
	Litoral	Caolinita, mica

* En este caso son materiales complejos cuyas características son intermedias entre vermiculita y clorita; también son llamados intergrados 2:1-2:1:1 o intergrados 2:1-2:2.

2.2.2.3. Los óxidos e hidróxidos de Fe y Al

Estos materiales, llamados también con el nombre genérico de **sesquióxidos de Fe y Al**, son muy comunes en suelos tropicales. Son los responsables, en gran parte, de los colores rojizos dominantes en estos suelos; se presentan en formas cristalinas y no cristalinas y su característica más importante es tener una muy baja actividad físico-química en los suelos; a este grupo pertenecen la **Gibsita**: $\text{Al}(\text{OH})_3$; la **Hematita**: Fe_2O_3 ; la **Goetita**: (FeOOH) , la **Ferrihidrita**: $\text{Fe}_5\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ y la **Manganita** (MnOOH), entre los más comunes citados por Besoain (1985).

Los minerales secundarios que corresponden a las arcillas 1:1 y a los sesquióxidos de Fe y de Al presentan cantidades insignificantes de sustitución isomórfica, característica que los hace tener muy poca actividad de intercambio iónico, razón por la cual se les ha dado el nombre genérico de **arcillas LAC** (Low Activity Clay) o **arcillas de baja actividad** (Moermann, 1984).

RECORDAR

- El material parental más frecuente para los suelos de Colombia corresponde a sedimentos no consolidados.
- El material parental que produce los suelos de mejor calidad en Colombia corresponde a los sedimentos no consolidados, principalmente aluviales.
- Los minerales primarios son los que componen las rocas y, en el suelo, componen las fracciones arena y limo.
- Los minerales secundarios se producen por alteración de los primarios y, en el suelo, componen la fracción arcilla.
- Los minerales más abundantes en el suelo corresponden al grupo de los silicatos y, dentro de éstos, los filosilicatos y los tectosilicatos.
- Las estructuras básicas de los filosilicatos son tetraedros de Si y octaedros de Al.
- El silicato más resistente a la alteración es el cuarzo y es el más abundante en las arenas de los suelos de Colombia.
- En los suelos de Colombia predominan las arcillas LAC; sólo en la llanura Caribe y en los valles interandinos predominan las arcillas 2:1 expansivas y las 2:1:1 y en la zona andina central predomina el alofano.

2.3. EFECTOS DEL MATERIAL PARENTAL SOBRE LOS SUELOS

Si se considera que el suelo se desarrolla controlado por varios factores y procesos, a partir de un material parental (roca o sedimentos), existe una relación entre muchas de las propiedades y cualidades de ese suelo y las características del material de partida.

Los materiales de partida de los suelos, cuando son expuestos a las condiciones ambientales superficiales, son sometidos a diferentes procesos de alteración (**meteorización**) como consecuencia

del cambio de condiciones con respecto a aquellas bajo las cuales se formaron. Se produce un fraccionamiento y una disgregación de los minerales primarios, así como la transformación de algunos de ellos en minerales secundarios; se origina entonces un material terroso, suelto que conserva muchos rasgos del material original: **saprolito** (verdadero material parental del suelo). Estos productos de la alteración de los materiales originales quedan expuestos a los procesos de formación del suelo (**pedogénesis**), los cuales, actuando a través del tiempo con diferentes características e intensidades, llegan a confeccionar la gran variedad de suelos que se encuentran en la naturaleza (ver Figura 1.10).

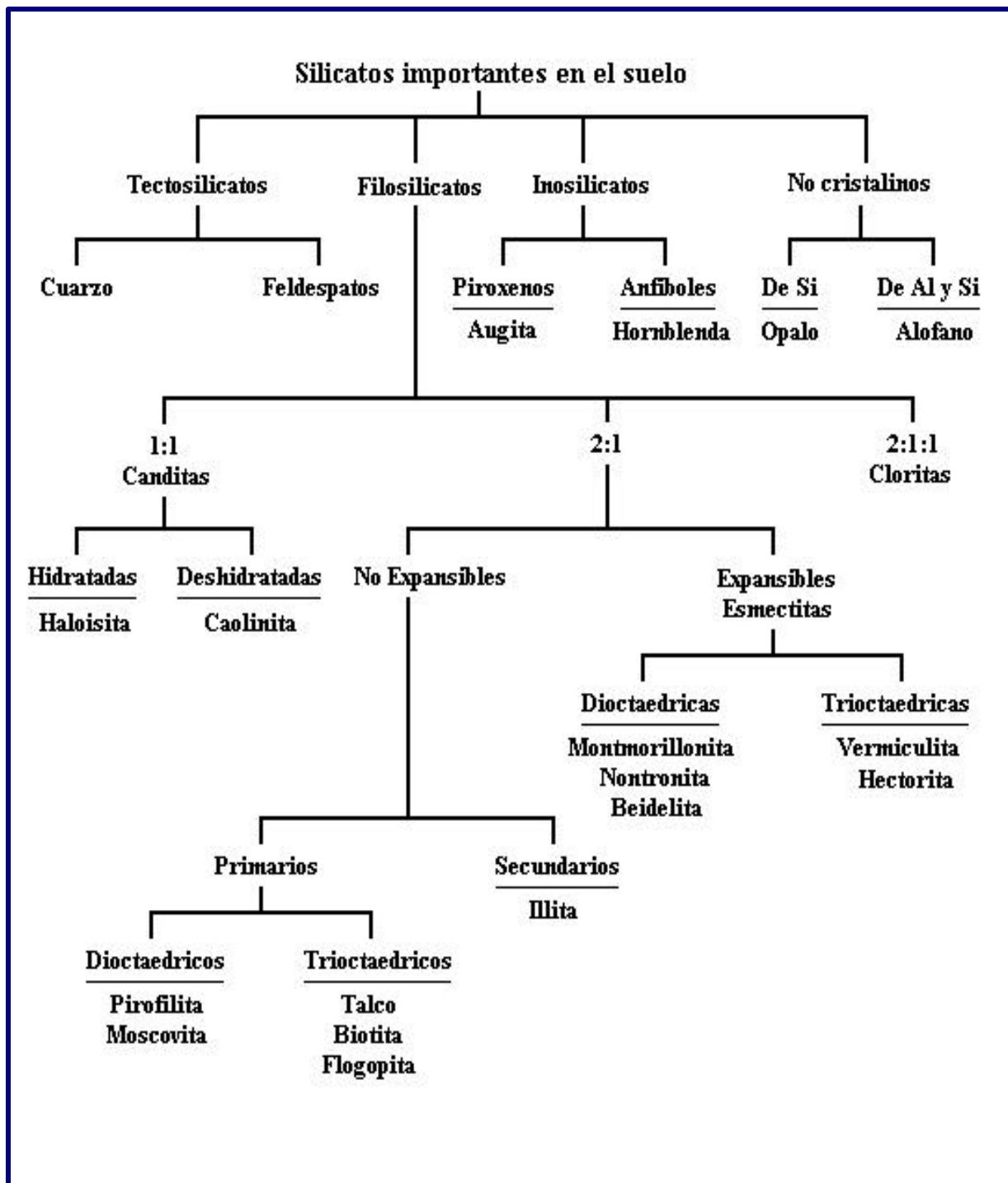


FIGURA 1.9. Silicatos importantes en los suelos.



FIGURA 1.10. Representación esquemática del proceso general de formación de un suelo.

Desde el punto de vista de la formación de suelos, la textura del material litológico y su composición mineralógica, juegan un papel fundamental en el proceso.

2.3.1. La textura del material litológico

Entendida como el tamaño, la forma, el arreglo y el grado de cristalinidad que presentan los minerales que componen la roca, la textura tiene gran influencia en la resistencia de las rocas al desgaste, lo cual interviene en la cantidad y el destino de los productos de alteración de la misma; estas propiedades de la roca condicionan, en buena medida, la cantidad y la calidad de los saprolitos (materiales parentales) que se derivan de ella y, por ende, las posibilidades de desarrollo del suelo.

Los efectos más notables que puede producir la textura de la roca se manifiestan en:

- Fenómenos de **erosión** acelerada en rocas de grano fino poco consolidadas. Debido a la baja permeabilidad, que induce una gran cantidad de agua de escorrentía, hay desprendimiento y transporte de materiales; se puede limitar la acumulación de los productos de la meteorización suelo.
- Acumulación de saprolitos pobres en bases, desarrollados de rocas de texturas gruesas como arenisca cuarcítica, algunos conglomerados o rocas ígneas intrusivas ácidas, que facilitan el **lavado** de iones de la roca, debido a la alta permeabilidad que pueden tener. Se generan suelos de baja calidad nutricional.
- Acumulación de minerales y de nutrientes en el suelo desarrollado de rocas de baja permeabilidad, ya que ésto reduce la **percolación** profunda en ellas.
- Formación de suelos con baja capacidad de **retención de agua** para las plantas, debido al desarrollo de espacios vacíos amplios y abundantes y a la escasez de materiales finos, cuando se derivan de saprolitos de rocas de texturas gruesas (areniscas cuarcíticas, algunos

conglomerados, etc.); cuando esos suelos provienen de materiales de grano fino (saprolitos de arcillolitas, de lutitas o de esquistos, o de sedimentos lacustres arcillosos, etc.) pueden presentar condiciones de **mal drenaje**, déficit de aireación, presencia de algunos compuestos tóxicos a las plantas, etc.

- Procesos de erosión selectiva por tamaño de las partículas, se dan con facilidad cuando los suelos se derivan de depósitos sedimentarios no consolidados, con granulometría heterogénea; por lo tanto se presenta una **pedregosidad** relativamente alta, que dificulta el manejo de aguas y la mecanización y limita el uso de ciertas plantas que no toleran esta situación.

De los casos enunciados anteriormente, se observa que muchas de las cualidades físicas de los suelos dependen, en gran parte, de la textura que presentaban los materiales originales, incidiendo grandemente en el comportamiento hídrico del suelo, su resistencia a la erosión, su facilidad de laboreo y, en buena parte, su fertilidad.

Debe aclararse, que no necesariamente se van a presentar las características de suelos descritas anteriormente, pues los otros factores de formación pueden contrarrestar en parte el efecto del material parental; por ejemplo, a partir de una arenisca con cementante calcáreo, se puede obtener un saprolito con alto contenido de bases, si las condiciones climáticas de la zona son secas, pero si son húmedas, el saprolito es pobre en bases, puesto que en esa condición climática los productos de la solubilización del cementante son lavados.

2.3.2. La composición mineralógica del material litológico

La composición mineralógica de las rocas permite establecer que minerales puede heredar el suelo de ellas y cuales minerales secundarios son susceptibles de formarse en él; este aspecto está muy relacionado con la **fertilidad natural** del mismo, ya que los minerales primarios componen la reserva de nutrientes que posee el suelo, como se verá más adelante.

Los minerales que pueden pasar al suelo desde la roca están controlados, en parte, por sus condiciones de formación, las cuales determinan su resistencia a la alteración, al quedar expuestos a las condiciones ambientales superficiales; mientras más contrastantes sean las condiciones de formación y las de la superficie, más inestable es el mineral y, por lo tanto, más fácilmente es degradado y hasta eliminado del medio.

Con relación a los silicatos, en términos generales, se puede decir que en la medida en que sea más compleja su estructura cristalina, más resistente es el mineral a la alteración; esto implica que la hornblenda, por ejemplo, que tiene una estructura en cadena doble, es más resistente a la meteorización que el olivino, el cual no forma ninguna estructura con los tetraedros que lo componen. Esta resistencia es comparable, obviamente, bajo las mismas condiciones ambientales para los minerales tratados.

Entre todos los silicatos comunes en el suelo, el **cuarzo** es el más resistente a la meteorización, debido a que presenta una estructura de tectosilicato y a que no presenta bases o elementos oxidables en su composición química.

Lo expresado anteriormente con relación al cuarzo, implica que este mineral tiene mayores posibilidades de pasar al suelo y de permanecer más tiempo en él, que los demás silicatos primarios; además, si el material parental tiene alto contenido de cuarzo, el suelo derivado de aquel es arenoso, con bajo contenido de nutrientes, baja capacidad de retención de agua, drenaje rápido y poco desarrollo estructural: será un suelo pobre en posibilidades para el desarrollo vegetal.

Los minerales primarios son los precursores de los minerales secundarios. Éste es otro aspecto importante de la composición de la roca, es decir, que la **composición de la fracción arcilla** del suelo tendrá mucha dependencia de los minerales primarios presentes en el material parental; a este respecto se sabe, por ejemplo, que las rocas ígneas intrusivas ácidas producen frecuentemente, como resultado de su alteración en climas húmedos, cantidades apreciables de caolinita, haloisita y cuarzo.

Fieldes y Swindale, citados por Mejía (1980b) ilustran la relación que hay entre los minerales primarios y secundarios. Muestran algunos productos de la meteorización de ciertos minerales primarios, como se plantea en la Tabla. 1.16.

TABLA 1.16. Algunos productos posibles de la meteorización de minerales primarios, según Fieldes y Swindale, citados por Mejía (1980b).

MINERALES PRIMARIOS	PRODUCTOS INTERMEDIOS	PRODUCTOS FINALES
Olivino, Piroxenos, Anfíboles	Óxidos hidratados no cristalinos de Al, Si, Fe, Ti	Óxidos cristalinos de Fe y Al o Caolinita
Vidrio volcánico básico, Zeolitas	Óxidos hidratados de Fe, Al, Si; (Alofano o Glibsita)	Caolinita y/o Montmorillonita
Micas	Illita; (Montmorillonita o Vermiculita)	Caolinita
Feldespato, Vidrio volcánico ácido	Óxidos hidratados no cristalinos de Al, Si; (Alofano)	Caolinita
Cuarzo	Silicatos no cristalinos; (Calcedonia)	Formas secundarias de cuarzo

Los resultados de González (1983) ilustran el comportamiento de los minerales de la cuarzodiorita del batolito antioqueño, cuando se meteoriza bajo condiciones de clima cálido muy húmedo; este autor encontró que el cuarzo fue el único mineral primario que persistió durante todo el proceso de meteorización de la roca y estuvo presente en el suelo, incluso en el horizonte superficial.

El autor citado, en el párrafo anterior, encontró que ninguno de los otros minerales primarios dominantes en la roca (Plagioclasa, Biotita y Hornblenda) alcanzó a llegar al suelo en su forma original; la hornblenda no alcanzó a llegar ni al **saprolito**, aunque se presentó poco alterada en el **gruss** (material producido por la meteorización incipiente de rocas granulares que se caracteriza por ser muy friable y por conservar los minerales originales de la roca en un estado de alteración relativamente bajo; aunque da la apariencia de roca, es muy deleznable y se desmorona fácilmente; es parte del saprolito). Los feldespatos y la biotita se presentaron alterados en el gruss y muy transformados en el saprolito y no alcanzaron a llegar a los horizontes B del suelo.

En el trabajo anterior, también, se estudió la composición mineralógica de la arcilla. Se encontró que esta fracción, dominada por caolinita y gibsita, con algo de hidromica (illita), es producto de la intensa meteorización química que se da en la zona y de la alta **lixiviación** de los productos solubles originados por la alteración de los minerales primarios.

La composición química del material parental que origina el suelo define, en buena medida, los **nutrientes** y otros elementos que pueden pasar a él. En relación con el suministro de nutrientes por los minerales primarios, Malagón (1977) encontró, en varias regiones de Colombia, que la presencia de feldespatos, ferromagnesianos, micas y vidrio volcánico estaba asociada con el suministro de Si, Al, Ca, Mg, K, Na, Cu, Zn, Fe y Mn al suelo. Mejía (1980a, b) hace un resumen del aporte de nutrientes que pueden hacer al suelo gran cantidad de minerales; algunos se presentan en la Tabla 1.17, en la que se observa que buena parte de los elementos esenciales en la nutrición vegetal, tienen como fuente natural en el suelo los minerales primarios.

TABLA 1.17. Aporte de nutrientes al suelo por parte de algunos minerales primarios. (Adaptado de Mejía, 1980a, b).

MINERAL	APORTE AL SUELO
Feldespatos	K, Na, Ca, Ar*
Anfíboles	Ca, Na, Mg, Fe
Piroxenos	Ca, Mg, Fe
Micas	K, Mg, Na, Fe, Ar
Óxidos de hierro	Fe, Ar
Olivino	Fe, Mg
Carbonatos	Ca, Mg
Sulfuros	S, Ca
Fosfatos	P, Ca

* El símbolo Ar se utiliza para indicar que los minerales producen también, normalmente, minerales de arcilla.

Otro ejemplo del efecto que tiene la composición del material parental sobre el suelo lo proporciona Birkeland (1980); este autor presenta los resultados de los análisis de óxidos totales practicados a muestras de saprolitos de andesita, con 4 grados diferentes de meteorización y calcula algunos índices para establecer el avance en el cambio de la composición química de los saprolitos, a medida que se incrementa su grado de alteración; algunos de los resultados obtenidos por el autor citado, se presentan en la Tabla 1.18.

TABLA 1.18. Comportamiento de algunos índices de meteorización en saprolitos con diferente grado de alteración de andesita olivínica de California. (Tomados de Birkeland, 1980).

ÍNDICES	ROCA FRESCA	SAPROLITOS (Incrementa grado de meteorización de 1 a 4)			
		1	2	3	4
Si / Al*	5.4	2.88	2.15	2.03	2.04
Bases / Al**	3.72	3.44	0.25	0.11	0.09

* $\text{Si} / \text{Al} = \text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$

** $\text{Bases} / \text{Al} = (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}) / \text{Al}_2\text{O}_3$

En la tabla anterior se aprecia cómo, a medida que avanza el grado de meteorización en el material parental, el valor de las relaciones establecidas disminuye; esto muestra que en el proceso de

meteorización, las **bases**, que son muy solubles, y el Si se van lavando del material, afectando la calidad del suelo que se formará, posteriormente, a partir de él.

El efecto que tiene la composición del material parental sobre el contenido de ciertos nutrientes en el suelo, también se aprecia en la Tabla 1.19. Ésta muestra el aporte de **calcio** que hace el mármol, en comparación con las otras rocas y, por consiguiente, sobre el **pH** del suelo derivado de él; se observa, además, la gran cantidad de arcilla que posee el suelo derivado del esquisto micáceo, en comparación con los otros suelos: Se evidencia el efecto que tiene la **mineralogía** del material parental sobre el contenido de coloides inorgánicos del suelo.

TABLA 1.19. Algunas propiedades químicas del horizonte superficial de varios suelos desarrollados a partir de diferentes materiales parentales en clima cálido (< 500 msnm) húmedo (bmh-PM), en el municipio de Puerto Triunfo (Antioquia). (Resultados sin publicar de Jaramillo, D. F., 1996).

Material Parental	(%)		pH Agua	[cmol (+) kg ⁻¹ suelo]				Clasificación taxonómica según SSS** (1994)
	MO*	Arcilla		Al	Ca	Mg	K	
Esquisto micáceo	2.6	44	4.7	2.2	0.5	0.1	0.06	Typic Dystropept
Esquisto pizarroso	2.9	28	4.0	2.3	0.1	0.1	0.05	Typic Kanhapludult
Mármol con cuarcita	2.2	20	5.6	0.0	2.7	0.2	0.06	Typic Dystropept

* Materia orgánica.

** Soil Survey Staff.

Mejía (1991) también demuestra como la composición de las rocas puede influir en procesos de **contaminación** de suelos, debido a que la meteorización libera **elementos tóxicos** de ellas; presenta resultados de análisis de suelos derivados de diferentes materiales parentales de Escocia, donde se pueden apreciar las cantidades relativamente altas de Ba, Cr, Mn, Rb, Ni, Sr, V y Zr que se han acumulado en ellos.

En áreas de Cundinamarca, Boyacá, Santanderes y Huila (Colombia) se han hecho estudios que han permitido detectar problemas de acumulación tóxica de **selenio** en suelos derivados de lutitas de la Formación Villeta, así como de sus sedimentos (Benavides y Silva, 1965).

En las Tablas 1.20, 1.21 y 1.22 pueden observarse otros ejemplos del efecto del material parental sobre algunas propiedades de los suelos relacionadas con su fertilidad. En la Tabla 1.20 se observa que son notorias las diferencias que se presentan entre el pH, el contenido de magnesio y de arcilla, así como en la saturación de bases de los suelos, relacionadas probablemente con diferencias en **mineralogía** entre los materiales parentales; estas diferencias mineralógicas las evidencian los valores de la **CIC de la arcilla**, los cuales muestran las altas capacidades de almacenamiento de nutrientes que tienen los suelos derivados de neis, en comparación con los otros dos suelos.

En la Tabla 1.21 se observa el efecto de la edad y la composición de los diferentes materiales parentales sobre los suelos que se están formando bajo unas mismas condiciones climáticas; es notable la pobreza nutricional que posee el suelo desarrollado en el flujo de lodo, cuyo material parental corresponde a los productos finos de la meteorización intensa sufrida antiguamente por la anfibolita, la cual perdió buena parte de sus bases por aquellos procesos.

TABLA 1.20. Algunas propiedades químicas y contenido de arcilla del horizonte superficial de tres suelos Typic Dystropepts derivados de diferentes materiales parentales, en clima transicional entre cálido y medio (900 - 1200 msnm) húmedo (bmh-PM), en laderas con pendientes entre 60 y 70% del municipio de Campamento (Antioquia). Datos de González y Jaramillo (1986) sin publicar.

Material Parental	pH		MO (%)	[cmol (+) kg ⁻¹ suelo]				Arcilla (%)	Saturación de Bases (%)	
	Agua	KCl		Ca	Mg	K	CIC			
Esquisto	5.8	4.1	2.0	1.0	0.4	0.08	18.38	47.93	30	8.16
Neis	6.0	4.3	4.0	5.4	2.4	0.15	26.14	90.70	20	26.14
Serpentinita	6.6	5.3	3.4	1.6	5.8	0.09	30.78	47.96	50	30.78

* CIC de la arcilla (Ar), en cmol (+) kg⁻¹ de Ar. Todas las CIC a pH 7.0 (ver Capítulo 13).

TABLA 1.21. Algunas propiedades químicas y contenido de arcilla del horizonte superficial de varios suelos derivados de diferentes materiales sedimentarios no consolidados, en clima medio (1465 msnm) húmedo (bh-PM), en el municipio de Medellín (Antioquia).

Tipo de Sedimento	(%)		pH Agua	[cmol (+) kg ⁻¹ suelo]				Clasificación taxonómica según SSS (1994)
	MO	Arcilla		Ca	Mg	K	CICE ³	
Coluvial*	5.2	34	6.3	8.4	4.8	0.12	13.5	Typic Eutropepts
Diluvial**	5.8	50	4.6	1.3	0.8	0.10	3.9	Humic Hapludults
Aluvial grueso ¹	4.6	8	6.3	3.3	3.8	0.12	7.3	Typic Tropofluvents
Aluvial fino ²	4.4	41	7.0	11.4	2.1	1.46	14.4	Typic Hapludalfs

* Recubrimiento coluvial delgado de anfibolita sobre anfibolita: pendiente < 10%.

** Flujo de lodo antiguo de saprolito de anfibolita; pendiente < 7%.

¹ En terraza baja del río Medellín; pendiente < 3%.

² En terraza baja de una quebrada afluente del río Medellín; pendiente < 3%; los resultados para este suelo son de Jaramillo y González (1986), para los demás de Jaramillo, D. F.(1992), todos sin publicar.

³ CIC efectiva (ver Capítulo 13).

TABLA 1.22. Algunas propiedades del horizonte superficial, tipos de horizontes y espesor del solum de suelos derivados de dos rocas sedimentarias en clima cálido seco (bs-T), con pendiente entre 7 y 12%, en el municipio de La Pintada (600 – 800 msnm) (Antioquia). (Tomados de Jaramillo, 1997a).

Tipo de roca	(%)		pH Agua	[cmol (+) kg ⁻¹ suelo]				Tipo de Horizontes	Espesor del Solum (cm)
	MO	Arcilla		Ca	Mg	K	CICE		
Arcillolita*	4.5	42	6.2	10.3	7.6	0.31	18.2	Ap-A-Bt ₁ -Bt ₂	> 100
Arenisca**	6.9	34	5.4	7.0	5.8	0.27	13.8	Ap-R ó Ap-Cr	< 20

* Vertic Haplustalfs (SSS, 1994).

** Lithic Ustorthents (SSS, 1994).

En contraste con su baja calidad química, el suelo desarrollado en el flujo de lodo (Tabla 1.21) es el que presenta mejores características físicas, como aireación, friabilidad y drenaje, pues es el que tiene el mejor desarrollo estructural entre ellos; además, en este suelo, también, se presenta el mayor desarrollo del **solum** (es la parte del suelo compuesta por los horizontes genéticos del mismo: Horizontes A y B) y la mejor expresión de las características morfológicas de los horizontes.

Las diferencias en los contenidos de nutrientes, que se observan entre los dos suelos de la Tabla 1.22, obedecen a las diferencias en porosidad y permeabilidad que se generan en ellos, debido a la diferencia de **granulometría** que heredan de sus correspondientes materiales parentales; también, se observa que el suelo derivado de la arcillolita tiene mejores condiciones nutricionales para el crecimiento vegetal que

el suelo desarrollado de la arenisca, que es cuarcítica, el cual es más susceptible a la **lixiviación** (ver Capítulo 2).

En el suelo derivado de la arcillolita (Tabla 1.22) se aprecia un mayor desarrollo del solum, tanto en espesor como en variedad de **horizontes genéticos**, situación relacionada con las diferencias en granulometría que presentan las rocas. Ésto genera diferencias en **superficie específica** en ellas y por tanto en la intensidad con que pueden actuar los procesos de meteorización y pedogenéticos. La granulometría fina facilita la alteración de mayor volumen de material y por tanto en la arcillolita se puede desarrollar un suelo más espeso. Aparte de lo anterior, la **mineralogía** de la arenisca tampoco facilita la meteorización, debido a su alto contenido de cuarzo.

En las tres últimas tablas es importante notar que cuando los suelos están en el mismo clima, los contenidos de materia orgánica de ellos no varían apreciablemente, a pesar de presentarse cambios importantes en los materiales parentales u otros factores. Así se confirma, como ya se dijo antes, que esta propiedad del suelo está más controlada por el clima que por los otros factores de formación pedológicos.

RECORDAR

- **La cantidad y tipo de minerales presentes en el material parental controlan buena parte de la calidad nutricional del suelo.**
- **Las bases son los elementos más solubles que contienen los minerales y, por tanto, son eliminadas del medio rápidamente, al avanzar la meteorización.**
- **Un mismo tipo de roca puede producir diferentes tipos de suelos, pues puede producir diferentes tipos de saprolitos, dependiendo de las condiciones ambientales bajo las cuales se esté meteorizando.**
- **EL MATERIAL PARENTAL DE LOS SUELOS LO COMPONEN: EL SAPROLITO DE LAS ROCAS O LOS SEDIMENTOS NO CONSOLIDADOS.**
- **LA METEORIZACIÓN PRODUCE SAPROLITOS Y LA PEDOGÉNESIS PRODUCE SUELOS.**

3. LOS ORGANISMOS

Un **organismo** es el conjunto de órganos que componen un ser vivo. Su unidad básica es la **célula** y en ella se llevan a cabo procesos químicos que configuran su **metabolismo**, para los que toma elementos nutricionales y energía del ambiente; el metabolismo es, según Brock y Madigan (1991), el resultado conjunto de las reacciones catabólicas y anabólicas que se producen en la célula.

Para mantener la organización celular, se producen constantemente rupturas de compuestos químicos a otros más simples, para liberar parte de la energía concentrada en ellos (**catabolismo**) y poder así

construir nuevas estructuras en la célula (**anabolismo**). Como el anabolismo desemboca en la síntesis bioquímica de nuevos materiales, el proceso es llamado frecuentemente **biosíntesis**.

De acuerdo con la organización celular, los organismos han sido agrupados tradicionalmente en dos grandes categorías: **Prokariotes** (que carecen de verdadero núcleo) y **Eucariotes** (que tienen núcleo verdadero); las diferencias fundamentales entre éstos dos grupos son:

Prokariotes	Eucariotes
Sin membrana nuclear	Con membrana nuclear
Tienen una molécula simple de DNA	Tienen varias moléculas de DNA
No tienen división mitótica	Sí tienen división mitótica
Todas las bacterias	Todos los otros organismos

Con los avances de la Biología Molecular, mediante el estudio de los ácidos nucleicos se ha modificado la agrupación de los organismos expuesta anteriormente. Los **ácidos nucleicos** son el ácido desoxirribonucleico (**DNA**) y el ácido ribonucleico (**RNA**) y son polímeros de nucleótidos (polinucleótidos); cada nucleótido está compuesto por tres unidades: Un azúcar de 5 carbonos, una molécula de fosfato y una base nitrogenada (Brock y Madigan, 1991).

Los ácidos nucleicos son polímeros largos en los cuales los nucleótidos están enlazados covalentemente en una secuencia definida; la parte variable de la secuencia la componen las bases, pues la unión azúcar – fosfato siempre es la misma; la secuencia de bases representa la información genética necesaria para reproducir una copia idéntica del organismo.

Hay 3 tipos de RNA: **Mensajero**, **Transmisor** y **Ribosómico**, cada uno con funciones específicas en la célula. La comparación de la secuencia de las bases en el RNA ribosómico se utiliza para determinar la relación genética que hay entre organismos (Brock y Madigan, 1991).

Con base en los análisis secuenciales del RNA ribosómico se encontró que los organismos agrupados originalmente en los prokariotes presentaban 2 líneas diferentes de relación genética, por lo cual fueron divididos en 2 nuevos grupos: **Eubacterias** y **Archaeobacterias**; quedan entonces tres grandes grupos de organismos: Los dos que acaban de mencionarse y los Eucariotes. Las Archaeobacterias son los organismos más primitivos conocidos y filogenéticamente son más afines con los Eucariotes que con las Eubacterias (Brock y Madigan, 1991).

Los organismos disponen de tres fuentes de **energía**: La luz, compuestos químicos inorgánicos y compuestos químicos orgánicos; la fuente que utilice cada organismo define grupos diferentes de ellos:

- **Fotótrofos**: Utilizan la luz como fuente de energía.
- **Litótrofos**: Obtienen energía de la oxidación de compuestos inorgánicos.
- **Organótrofos**: Obtienen energía de la oxidación de compuestos orgánicos.

El metabolismo de compuestos orgánicos es la fuente de energía de todos los animales y de una amplia mayoría de microorganismos.

De acuerdo con la fuente de **carbono** que utilizan, los organismos se agrupan en:

- **Autótrofos:** Son aquellos que utilizan el CO₂ como fuente de carbono.
- **Heterótrofos:** Son aquellos que utilizan compuestos orgánicos preformados para obtener el carbono que requieren.

También se presentan diferencias importantes entre los organismos, debidas a la posibilidad que tienen de subsistir con o sin **oxígeno** en el medio, lo cual permite agruparlos, como lo expone Burbano (1989), en:

- **Aeróbicos:** Son aquellos que requieren de la presencia de oxígeno para poder crecer.
- **Anaeróbicos:** Son aquellos que son inhibidos en su desarrollo o que mueren en presencia de oxígeno.
- **Microaerófilos:** Son aeróbicos obligados, pero que crecen mejor a bajas tensiones de oxígeno.
- **Anaeróbicos facultativos:** Son activos bajo condiciones aeróbicas o anaeróbicas.

En los organismos, los **hábitos alimenticios** también generan diferencias entre ellos. Se pueden definir los siguientes grupos más generales:

- **Herbívoros:** Se alimentan de tejidos vegetales.
- **Sapróvoros:** Se alimentan de materia orgánica en descomposición.
- **Predadores:** Se alimentan de otros animales, ingiriéndolos.
- **Parásitos:** Se alimentan de otros organismos vivos sin causarles la muerte en forma rápida.

En el suelo se presenta gran cantidad y variedad de los organismos conocidos, que constituyen su parte viva; los organismos que mayor influencia tienen sobre el desarrollo del suelo son los **vegetales**, ya que controlan el aporte de materia orgánica al mismo, tanto en lo relacionado con la cantidad, como con la calidad o tipo de materiales adicionados. Este material es uno de los más importantes del suelo por el efecto que tiene en buena parte de sus propiedades.

3.1. LA BIOTA DEL SUELO

La biota del suelo la compone el conjunto de la fauna y la flora que viven en él; la gran mayoría de los organismos del suelo vive en las capas superficiales del **litter** (residuos vegetales frescos), donde las condiciones de humedad, temperatura, ventilación y luminosidad, así como el espacio disponible, satisfacen sus necesidades.

3.1.1. Clasificación

Los organismos del suelo se pueden clasificar de acuerdo con varios criterios como puede verse a continuación.

3.1.1.1. Según el tamaño

Este es el sistema de clasificación más común. Porta et al (1994) definen las siguientes categorías:

- **Microorganismos**, aquellos que presentan tamaño menor a 200 μm .
- **Mesoorganismos**, los que presentan tamaños entre 200 μm y 6 mm.
- **Macroorganismos**, los que poseen tamaños mayores a 6 mm.

3.1.1.2. Según su hábitat en el suelo

Parisi (1979) considera dos grupos de organismos: **Hidrobios**, aquellos que viven en el agua del suelo, como bacterias, algas, protozoarios, nemátodos y buena parte de los oligoquetos, y **Atmobiros**, aquellos que se han adaptado a vivir en la atmósfera hipógea del suelo como hongos, artrópodos, moluscos y vertebrados.

3.1.1.3. Según el tiempo de permanencia en el suelo

A este respecto Parisi (1979) agrupa los organismos en tres categorías:

- **Edafobios**, aquellos que cumplen todo su ciclo biológico en el suelo.
- **Edafófilos**, aquellos que no tienen que cumplir obligatoriamente todo su ciclo biológico en el suelo, pero que prefieren el ambiente de éste para vivir.
- **Edafóxenos**, organismos que se pueden encontrar casualmente en el suelo, pero que no presentan ninguna adaptación especial para vivir en él.

3.1.2. La microbiota del suelo

En este grupo se incluyen organismos microscópicos, tanto vegetales (**microflora**) como animales (**microfauna**); a la microflora pertenecen las bacterias (eubacterias y archaebacterias), los hongos y las algas, en tanto que a la microfauna pertenecen los protozoarios.

La microbiota del suelo se establece, preferencialmente, en la **rizosfera**: región del suelo bajo la influencia inmediata de la raíz, la cual se caracteriza por tener alta cantidad de carbono disponible (ver Capítulo 15). En ella la cantidad de microorganismos disminuye al aumentar la distancia a partir de la superficie de la raíz de las plantas y al aumentar la profundidad en el suelo (Paul y Clark, 1989; Pritchett, 1991).

A continuación se describen los principales grupos de microorganismos del suelo y sus características más sobresalientes.

3.1.2.1. Bacterias

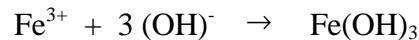
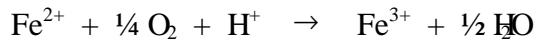
Son los microorganismos más numerosos y más pequeños del suelo; la mayoría son **heterótrofos** y son organismos importantes en los procesos de descomposición de la materia orgánica y en el reciclaje de

energía y de nutrientes como N, P, S, Fe y Mn; el tipo más importante, desde el punto de vista de los suelos, es el de las Eubacterias.

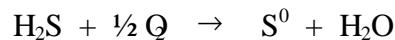
Algunas bacterias son capaces de utilizar el nitrógeno atmosférico, el cual puede pasar a la planta cuando ellas mueren, contribuyendo a su nutrición nitrogenada; este proceso de fijación de nitrógeno, por la importancia que tiene en el manejo biológico del suelo, se ampliará más adelante, en el Capítulo 15. Dentro del grupo de las bacterias también se presentan especies que producen antibióticos y toxinas para otros organismos del suelo, así como patógenos de animales y vegetales.

Un género de bacteria litotrófica, notable por su actividad oxidante es el *Thiobacillus*; puede intervenir en reacciones como las siguientes, según Brock y Madigan (1991):

- Oxidar Fe^{2+} a Fe^{3+} , en medio ácido:



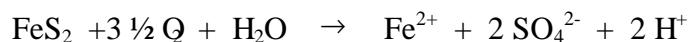
- Si en el medio, el ácido dominante es el sulfúrico, el Fe^{3+} no puede precipitar como hidróxido. Se forma un complejo mineral sulfatado llamado **jarosita** $[\text{HFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]$ (Brock y Madigan, 1991).
- Oxidar el ácido sulfídrico:



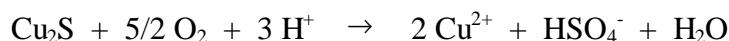
- Oxidar el azufre elemental:



- Oxidar la piritita:



- Oxidar cobre:



Las bacterias no sólo intervienen en procesos de oxidación; también hay bacterias capaces de reducir Fe^{3+} a Fe^{2+} , Mn^{4+} a Mn^{2+} y sulfato a ácido sulfídrico.

Todas las transformaciones que se mencionaron anteriormente, producen cambios en las condiciones nutricionales y mineralógicas del medio; estos cambios condicionan su evolución y el tipo de organismos mayores que pueden establecerse en él.

Las condiciones ambientales que más favorecen el desarrollo de las eubacterias en el suelo son:

- **Humedad:** Que el suelo se encuentre con un contenido de agua entre 50 y 75% de su capacidad de campo o que el agua esté retenida a tensiones entre 3 y 0.05 Mpa (Paul y Clark, 1989; Burbano, 1989; Pritchett, 1991).
- **Temperatura:** Que esté entre 25 y 35°C; muy pocas eubacterias se encuentran a temperaturas menores de 15°C o mayores de 45°C (Brock y Madigan, 1991; Pritchett, 1991).
- **pH:** Cercano a la neutralidad o débilmente alcalino. Pritchett (1991) sostiene que las condiciones de acidez en el suelo inhiben un buen número de bacterias y otros microorganismos.
- La materia orgánica es indispensable para el suministro de carbono.

Brock y Madigan (1991) discuten ampliamente la clasificación de las bacterias, mostrando la agrupación que se ha hecho de ellas, con base en los estudios secuenciales de su RNA ribosómico; de dicha discusión se resume lo siguiente.

3.1.2.1.1. Eubacterias

Se presentan en 11 grupos de afinidad genética así:

- **Proteobacterias:** Bacterias fototróficas púrpura; se presenta una gran cantidad de géneros importantes en el suelo como: *Rhizobium*, *Nitrobacter*, *Beijerinckia*, *Pseudomonas*, *Nitrosomonas*, *Thiobacillus*, *Azotobacter*, *Desulfovibrio*, *Bradyrhizobium*, *Agrobacterium*, *Dexia*.
- **Bacterias verdes del azufre:** Fototróficas, sin géneros importantes en el suelo.
- **Bacterias verdes no sulfúricas:** Fototróficas, sin géneros importantes en el suelo.
- **Cyanobacterias:** Antes algas verde – azules; fototróficas; géneros importantes en el suelo: *Anabaena*, *Nostoc*, *Calothrix*.
- **Planctomyces / Pirella:** Sin géneros importantes en el suelo.
- **Espiroquetas:** Sin géneros importantes en el suelo.
- **Bacteroides / Flavobacterium:** Sin géneros importantes en el suelo.
- **Clamidia:** Parásitos obligados; sin géneros importantes en el suelo.
- **Deinococcus / Thermus:** Sin géneros importantes en el suelo.
- **Eubacterias Gram positivas:** Géneros importantes en el suelo: *Clostridium* y *Bacillus*. Además, a este grupo pertenecen los Actinomicetos que son bacterias filamentosas comunes en suelos neutros a alcalinos, bien drenados. Géneros importantes de Actinomicetos son: *Anthrobacter*, *Nocardia*, *Streptomyces* (productoras de antibióticos), *Frankia* (importante por su capacidad de asociarse con especies forestales y fijar nitrógeno).
- **Thermotoga / Thermosiphon:** Sin géneros importantes en el suelo.

Los actinomicetos son organismos muy activos en la descomposición de celulosa y de otros compuestos orgánicos más resistentes y complejos del suelo, por lo cual son importantes en la **humificación** de la materia orgánica; son aerobios.

Algunas cianobacterias como *Nostoc* tienen la capacidad de formar asociaciones simbióticas con algunos hongos, llamadas **líquenes**, muy eficientes en la utilización del nitrógeno atmosférico.

3.1.2.1.2. Archaebacterias

Son organismos que prosperan en condiciones ambientales extremas; se presentan en 4 grupos así:

- **Metanógenas**: Relacionadas con el metabolismo del metano; sin géneros importantes en el suelo.
- **Halófitas**: De ambientes extremadamente salinos; sin géneros importantes en el suelo.
- **Extremadamente termofílicas**: De ambientes con temperaturas altas extremas; sin géneros importantes en el suelo.
- **Thermoplasma**: De condiciones ambientales excepcionales: Temperatura óptima: 55°C, pH óptimo: 2; sin géneros importantes en el suelo.

3.1.2.2. Hongos

Son organismos que participan activamente en la descomposición del **litter** en los suelos ácidos y en la **humificación** en ellos; son **heterótrofos** y muy eficientes en la descomposición de compuestos resistentes a las bacterias, como celulosa, hemicelulosa, lignina, grasas y almidones (Pritchett, 1991).

Aparte de lo anterior, los hongos juegan un importante papel en la nutrición de las plantas, porque forman asociaciones con sus raíces llamadas **micorrizas** (ver Capítulo 15). Cochran et al (1994) sostienen que por lo menos en el 85% de las plantas se presentan asociaciones micorrícicas; además, compiten activamente con la planta por nitratos y amonio. El micelio de algunos de ellos puede causar **hidrofobicidad** en el suelo. Son abundantes las especies **fitopatógenas**.

Ambientalmente, Burbano (1989) establece que las condiciones que favorecen el desarrollo de los hongos son:

- Humedad: No resisten condiciones de sequía ni de saturación.
- Temperatura: Entre 25 y 35 °C.
- pH: Ligeramente ácido a neutro; Pritchett (1991) sostiene que se adaptan mejor que los otros microorganismos a suelos ácidos.
- Requieren sustratos carbonáceos oxidables.

Brock y Madigan (1991) resumen la clasificación de los hongos en los siguientes grupos:

- **Ascomycetes**: Género común: *Saccharomyces*.
- **Basidiomycetes**: Llamados **setas**; aquí se encuentran géneros importantes de hongos formadores de **ectomicorrizas** como: *Amanita*, *Agaricus*; *Boletus*.
- **Zygomycetes**: Llamados mohos del pan; los géneros *Mucor* y *Rhizopus* son frecuentes.
- **Oomycetes**: Llamados mohos del agua; sin géneros importantes en el suelo.

- **Deuteromycetes:** Conocidos como hongos imperfectos; se presentan muchos géneros en el suelo, algunos endomicorrícos, como: *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Trichoderma*, *Rhizoctonia*, *Botrytis*, entre otros.

3.1.2.3. Algas

Son organismos **fotoautótrofos** importantes en el proceso de colonización del material parental. Ellas inician el proceso de formación de suelo. Además, en suelos ya formados, son una fuente importante de materia orgánica (Burbano, 1989).

Las condiciones ambientales óptimas para su desarrollo son:

- Humedad: Debe estar entre 60 y 80 % de la capacidad de campo del suelo, aunque soportan bien la inundación.
- Temperatura: Se han encontrado en el rango extremo comprendido entre - 11.5 y 87 °C.
- pH: Entre 5.5 y 8.5, aunque hay variaciones importantes entre los diferentes grupos; así, las verdes se adaptan bien a suelos ácidos; las verde-azules a suelos neutros ó alcalinos y prácticamente no se presentan en suelos con $\text{pH} < 5.2$ y las diatomeas prefieren suelos neutros y alcalinos. En términos generales las algas no se presentan en suelos con $\text{pH} < 5.0$.
- Sustrato orgánico: No lo requieren para su desarrollo.
- Luz: Es indispensable para que puedan realizar la fotosíntesis.
- Sales: Resisten altas concentraciones en el medio.

Brock y Madigan (1991) mencionan 6 grupos de estos organismos:

- **Chlorophyta:** Llamadas **algas verdes**; los géneros *Chlamydomonas*, *Chlorella* y *Ulothrix* son comunes en suelos ácidos.
- **Chrysophyta:** Conocidas como **diatomeas**, en suelos neutros a alcalinos son comunes los géneros *Navicula* y *Pinnularia*.
- Los grupos Euglenophyta, Phaeophyta o algas pardas, Pyrrophyta o dinoflagelados y Rhodophyta o algas rojas, no presentan géneros importantes en el suelo.

3.1.2.4. Protozoarios

Son animales que digieren partículas de materia orgánica no soluble, transformándola en soluble. Además, controlan poblaciones de microorganismos en el suelo, ya que se alimentan de bacterias y de algas (Burbano, 1989; Pritchett, 1991).

Las condiciones ambientales más adecuadas para su desarrollo, según Burbano (1989) son:

- Humedad: Requieren suelo húmedo a saturado.
- Temperatura: Próxima a los 30 °C.
- pH: Entre 3.5 y 9.7, con un rango óptimo comprendido entre 6 y 8.

- La adición de materia orgánica fresca incrementa sus poblaciones.

Brock y Madigan (1991) referencian 4 grupos de estos organismos:

- **Mastigophora:** Son flagelados y en el suelo se presentan géneros importantes como *Euglena* y *Monas*.
- **Sarcodina:** Es el grupo de las **amebas** con los géneros *Amoeba* y *Entamoeba* como importantes en el suelo.
- **Ciliophora:** Son ciliados; algunos géneros comunes en el suelo son: *Paramecium*, *Colpoda*, *Pleuronema* y *Vorticella*.
- **Sporozoa:** Todos son **parásitos**; en el suelo se encuentra con frecuencia el género *Plasmodium*.

3.1.3. La meso y macrofauna del suelo

3.1.3.1. Generalidades

Los principales grupos de animales que pertenecen a este componente biótico del suelo son los **anélidos** y los **artrópodos**; los primeros se refieren a las lombrices de tierra y los segundos a aquellos animales que presentan un esqueleto externo endurecido que recubre todo su cuerpo, como una coraza y que son articulados. Los principales representantes de los artrópodos son los insectos, los arácnidos, los miriápodos y los crustáceos; otros grupos que se destacan son los **nemátodos** (algunos pocos, por su tamaño, se ubican dentro de los microorganismos), los **moluscos** y algunos **vertebrados** roedores y mamíferos pequeños.

La mayoría de los animales de la meso y macrofauna del suelo, a excepción de los anélidos, viven en la capa superficial del mismo. Allí se acumulan los residuos orgánicos frescos que llegan al suelo y que les suministran condiciones adecuadas de humedad, temperatura y ventilación.

Los organismos que integran la meso y macrobiota del suelo desempeñan un papel fundamental en la fragmentación, transformación y translocación de materiales orgánicos en él. Además, aportan considerables cantidades de biomasa al suelo y mejoran algunas de sus propiedades físicas; también, en estos grupos de organismos se presentan algunos animales que son herbívoros y que pueden convertirse en plagas para las plantas, así como otros que son parásitos o predadores.

3.1.3.2. La lombriz de tierra

Este animal pertenece al Phylum **Anélido** que quiere decir cuerpo anillado y a la clase **Oligochaeta** que significa que poseen pocas quetas o cerdas que salen de los anillos; es un animal vermiforme (con forma de gusano), con su cuerpo anillado y con pocas cerdas que salen de los anillos; es de sangre fría, por lo cual requiere de humedad para regular su temperatura.

Parisi (1979) y Porta et al (1994) reportan que las lombrices de tierra se agrupan en dos familias fundamentales: La **Enchytridae** y la **Lumbricidae**. A la primera corresponden las lombrices pequeñas

y a la segunda, las más grandes; desde el punto de vista de su aporte al suelo, las lombrices más importantes son las de la familia Lumbricidae: en esta familia se pueden diferenciar dos grupos por el hábitat que ocupan en el suelo: Las **epígeas**, que viven en la superficie del suelo, y las **endógeas**, que viven en el interior del mismo.

Las lombrices son **sapróvoras** y requieren para su alimentación abundante materia orgánica, con baja relación C/N y bajo contenido de lignina, según Cochran et al (1994); según Porta et al (1994), también requieren sustratos con buen contenido de carbonato de calcio.

De acuerdo con varios trabajos citados por Escobar (1997), las condiciones que favorecen el desarrollo de la lombriz de tierra son:

- El pH óptimo entre 5.5 y 6.5, aunque pueden crecer en un rango entre 4.5 y 8.
- La temperatura óptima varía entre 15 y 25°C.
- La humedad: Indispensable para mantener su cuerpo frío y húmedo; toleran saturación del suelo, pero con presencia de oxígeno.

Chamorro (1990) encontró, en suelos del páramo de Sumapaz (Cundinamarca), que el 80% de las lombrices se ubicaban en los primeros 20 cm del suelo y la densidad de población la correlacionó en forma significativa e inversa con el contenido de **aluminio intercambiable** y directa con la **CIC** y con el contenido de carbono orgánico de aquel.

Algunos géneros importantes de lombrices de tierra son *Lumbricus*, *Eisenia*, *Rhinodrilus* y *Martiodrilus*.

3.1.3.3. Los artrópodos

En los artrópodos, los órdenes que se presentan con más frecuencia en los suelos son: Díptera (moscas), Coleóptera (cucarrones o escarabajos), Collémbola, Arachnida (arañas), Himenóptera (hormigas), Isóptera (termitas), Diplópoda (milpies) y Quilópoda (ciempiés); en los moluscos los principales son Helicoidea (caracoles) y Limacoidea (babosas) (Pritchett, 1991; Cochran et al, 1994).

En todos los suelos no se presenta la misma cantidad y tipo de fauna. Ésta depende de las condiciones ambientales en las cuales se encuentra el suelo, así como de algunas de las propiedades de éste y de su manejo.

El IGAC (1986), en suelos de los Llanos orientales de Colombia, encontró que las lombrices se presentaban en abundancia en suelos que tuvieran alto contenido de materia orgánica, buena humedad y buena aireación; las hormigas preferían los suelos con alto contenido de arena y las termitas con alto contenido de arcilla.

En Oxisoles y Ultisoles bien drenados de la Orinoquia, el IGAC (1986) encontró que la cantidad de los organismos dominantes de la meso y macrofauna decrecía en el siguiente orden: hormigas > termitas > arañas > cucarrones, mientras que cuando los Oxisoles estuvieron mal drenados, el orden de

decrecimiento fue hormigas > cucarrones > arañas. Chamorro et al (1986), también observaron que en éstos Oxisoles mal drenados, la variedad en la meso y macrofauna del suelo es menor que cuando tienen buen drenaje.

Se realizaron dos trabajos en condiciones climáticas extremas: Uno en Entisoles e Inceptisoles de Arauca (Colombia), donde Zuluaga et al (1995) encontraron la siguiente secuencia decreciente en la abundancia relativa de organismos en el horizonte superficial del suelo en sabana natural: Collémbola (71.6%) > Acarina (12.6%) > Hymenóptera (3.77%) > Coleóptera (3.35%) > Díptera (2.45%); el otro, en contraste, en Andisoles e Histosoles de páramos en los alrededores de la Sabana de Bogotá, en bosque alto andino, Chamorro (1989) encontró la siguiente secuencia: Díptera (> 50%) > Arachnida (20%) > Coleóptera > Orthóptera > Collémbola.

En los resultados expuestos en el párrafo anterior puede haber algún efecto del tipo de suelo y de la cobertura pero, obviamente, no todas las diferencias presentadas las explican estos factores. Las relaciones entre estos organismos, con el uso y con el manejo del suelo, se tratarán en el Capítulo 15.

3.1.3.4. Nemátodos

Son los animales pluricelulares más pequeños del suelo. Por su tamaño, durante sus desplazamientos, no alcanzan a generar en él mayores disturbios.

Los nemátodos tienen un importante efecto sobre la descomposición de la materia orgánica del suelo y sobre los ciclos de los nutrientes en el mismo, aunque también hay una buena cantidad de ellos que son parásitos y predadores de animales, así como fitopatógenos.

Según Porta et al (1994), el desarrollo de la mayoría de estos animales se ve favorecido en los suelos de texturas medias a gruesas y no prosperan bien en suelos con bajo contenido de humedad; Madrigal y Duque (1972) citan algunos trabajos en los cuales se estableció que temperaturas mayores de 40°C causaban la muerte a la mayoría de estos animales y que la temperatura óptima estaba entre 30 y 37°C y el pH entre 4 y 8.

Algunos géneros frecuentes en el suelo son:

- **Sedentarios:** Son aquellos que en alguna etapa de su vida pierden su capacidad de locomoción como *Meloidogyne*, *Heterodera*.
- **Migratorios:** Tienen capacidad de traslocación toda la vida como *Pratylenchus*, *Tylenchorhynchus*, *Radopholus*.
- **Predadores de otros nemátodos:** A éstos corresponden algunas especies de los géneros *Tryphila*, *Mononchus*, *Dorylaimus*, *Seinura*.
- **Trasmisores de virus a plantas:** A éstos pertenecen algunas especies de los géneros *Trichodorus*, *Longidorus*, *Xiphinema*.

3.1.4. Efectos de la biota sobre el suelo

Los organismos vivos del suelo cumplen variados papeles en la evolución y en las características del mismo. Además, participan activamente en su ecología y en sus posibilidades de uso.

3.1.4.1. Los microorganismos

Los microorganismos del suelo realizan una gran cantidad de actividades en él. Intervienen en varios procesos y reacciones que se dan en el mismo, relacionados con su génesis. Ellos:

- Aportan materia orgánica al suelo: La biomasa microbial puede representar alrededor del 5% de la materia orgánica total del suelo, con la ventaja de que es el tipo de material que más rápidamente se incorpora al mismo (CAB International, 1993). Cadena et al (1998) estimaron aportes de biomasa microbial de hasta $608.28 \text{ mg de C g}^{-1}$ de suelo, en un Oxic Dystropepts de Santander de Quilichao (departamento del Cauca), con base en parcelas experimentales sometidas a labranza reducida.
- Forman y estabilizan estructura en el suelo, especialmente los hongos con su micelio; los exudados y metabolitos microbiológicos son cementantes bastante eficientes.
- Intervienen en los procesos de transformación de la materia orgánica del suelo, por ejemplo cuando producen las enzimas necesarias para que se produzcan algunas reacciones, como Amilasas para hidrolizar almidón o Celulasas, para hidrolizar celulosa, producidas por algunas bacterias, hongos y actinomicetos. También la producción de Fenolasa para oxidar la lignina, por parte de algunos hongos (Burbano, 1989).
- Algunos Basidiomycetes utilizan la lignina o la celulosa como fuentes de energía y de carbono. Se convierten en importantes agentes de transformación de la madera en bosques (Brock y Madigan, 1991).
- Pueden producir transformaciones en el suelo que causan pérdidas de elementos o de compuestos en el mismo; en este sentido, son ampliamente conocidos los procesos de desnitrificación, los cuales producen transformaciones de nitratos o nitritos, a nitrógeno molecular (N_2) o a óxido de nitrógeno, los cuales se pierden por volatilización; este proceso lo hacen bacterias de los géneros *Agrobacterium*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Thiobacillus*, entre otras (Munévar, 1991).
- Ejercen control sobre las poblaciones de microorganismos en el suelo, ya que, por ejemplo, muchos protozoarios se alimentan de bacterias y algas, manteniendo el equilibrio microbiológico del suelo; además, algunos hongos como *Penicillium* y algunos Actinomicetos, como *Streptomyces*, producen antibióticos y participan con estos mecanismos en el control mencionado (Burbano, 1989).
- Algunos microorganismos del suelo tienen la capacidad de alterar algunos minerales como biotita, muscovita e illita, contribuyendo así a la meteorización del mismo.

3.1.4.2. Los meso y macroorganismos

La fauna del suelo cumple un papel fundamental en la **transformación y translocación** de la materia orgánica, así como en la trituración y adecuación de ella, para que los microorganismos puedan llevar a cabo en forma fácil y rápida su mineralización y/o su humificación.

Romero y Chamorro (1991) trabajaron con lombrices de tierra y diferentes sustratos. Encontraron que, con una mezcla de banano, café, naranja, papaya y granadilla, 4091 individuos transformaron 4453.8 g de material en un año. También, Arango y Dávila (1991) encontraron que 5 kg de lombrices *Eisenia foetida* (lombriz roja californiana) descompusieron 270 kg de pulpa de café con 85% de humedad, en 80 días. Estos resultados muestran la magnitud de las transformaciones que pueden llevar a cabo estos organismos.

Aparte de lo anterior, un efecto importante que tienen estos organismos sobre el suelo es el aporte de abundantes cantidades de biomasa que incrementa notablemente la cantidad y variedad de la materia orgánica en él; en la Tabla 1.23 se presentan algunos valores de densidad de individuos (meso y macrofauna) del suelo, así como de la cantidad de biomasa que producen, bajo diferentes condiciones climáticas, de suelo y de uso del suelo.

TABLA 1.23. Producción de biomasa (promedio de 7 muestreos realizados durante 8 meses) por algunos meso y macroorganismos en suelos colombianos.

SUELO	REGION	USO DEL SUELO	INDIVIDUOS POR m ²	BIOMASA* (g m ⁻²)	REFERENCIA
Andisol	Páramo Chisacá	Ninguno	18307	1636.03	Zerda y Chamorro (1990)
Andisol	Páramo Chisacá	Papa, Kikuyo	13234	748.03	Idem anterior
Inceptisol	Páramo Chingaza	Ninguno	8932	535.76	Infante y Chamorro (1990)
Inceptisol	Páramo Chingaza	Papa, Kikuyo	-	588.42	Idem anterior

* Como peso húmedo de la fauna encontrada.

La fauna del suelo lleva a cabo otras acciones como son:

- Mejorar la agregación y, consecuentemente, la aireación y la infiltración, sobre todo aquellos individuos de mayor tamaño, debido a su desplazamiento en el suelo.
- Transportar materiales orgánicos al interior del suelo: Lombrices, hormigas, termitas.
- Transportar materiales desde el interior hacia la superficie del suelo, generando un intenso reciclaje de elementos en los sólidos acarreados: Hormigas, lombrices.
- Mantener en equilibrio las poblaciones de otros organismos: Predadores como algunos ciempiés, arañas, escorpiones, coleópteros y colémbolos.

RECORDAR

- La biota del suelo la componen micro, meso y macroorganismos, animales y vegetales.
- Los organismos más abundantes son los micro, compuestos por bacterias, hongos, algas y protozoarios. La mayoría de ellos son heterótrofos y aeróbicos.
- Los grupos de bacterias más importantes en el suelo son: Proteobacterias, Cianobacterias y Eubacterias Gram positivas; prefieren suelos con buena fertilidad.
- Los grupos de hongos más importantes en el suelo son: Basidiomycetes y Deuteromycetes; prosperan mejor que las bacterias en suelos ácidos.
- Los microorganismos aportan y transforman materia orgánica, tienen parte activa en el ciclo geoquímico de muchos elementos y transforman algunos minerales.

- Los meso y macroorganismos más importantes del suelo son: Anélidos (lombrices), artrópodos (insectos, arácnidos, miriápodos y crustáceos) y nemátodos (gusanos).
- Los meso y macroorganismos aportan, transforman y translocan materia orgánica; reciclan nutrientes y mejoran el espacio poroso.

3.2. EL HOMBRE

Un organismo que tiene enorme ingerencia en el suelo es el hombre, puesto que utiliza este recurso de variadas formas y para muchos fines; los efectos más sobresalientes que tienen algunas de las actividades antrópicas sobre el suelo se resumen en la Tabla 1.24.

TABLA 1.24. Algunas actividades antrópicas y sus efectos en el suelo.

ACTIVIDAD	EFFECTO SOBRE EL SUELO
La fertilización	Mejora productividad, aumenta producción de biomasa y población de microorganismos, incrementa el aporte de materia orgánica; en exceso puede producir el efecto contrario al causar toxicidades y/o contaminación.
El abonado orgánico	Produce los mismos efectos que la fertilización. Además, mejora la estructura del suelo con todo lo que esto implica en las condiciones hídricas y mecánicas de él.
El encalamiento	Mejora la nutrición vegetal y el ambiente para los microorganismos aunque es posible que se alteren las relaciones poblacionales entre grupos; puede mejorar la estructura y alterar las características del intercambio iónico de bases.
El riego	Cambia el comportamiento hídrico; incrementa la velocidad de procesos como solubilización, hidratación e hidrólisis, aumentando la alteración de minerales y de materia orgánica; si se hace bien mejora productividad; mal hecho puede producir salinidad o sodicidad y el consecuente deterioro físico y químico; también puede producir erosión.
El drenaje	Aumenta la aireación y por tanto acelera procesos de mineralización de materia orgánica y alteración de ciertos minerales; favorece la estructuración; en exceso, en ciertos suelos, puede causar dificultades para el humedecimiento posterior.
La mecanización	Mejora la aireación con todos sus beneficios, hecha adecuadamente; aumenta las posibilidades de la planta para explorar el suelo con el consiguiente aporte de materia orgánica y el reciclaje de nutrientes; si se hace inadecuadamente, se deteriora la estructura y se puede llegar a compactar el suelo; además, se pueden generar problemas de erosión.
El uso irracional (Tipo y/o intensidad de uso no adecuados a las posibilidades del suelo).	Genera deterioro severo en sus propiedades, lo que se refleja en una pérdida de productividad y de cobertura vegetal, aumentando la susceptibilidad a la erosión; la aplicación intensiva de insumos a un suelo con baja productividad puede generar problemas de contaminación, tanto del suelo mismo, como de otros recursos como el agua.
Las construcciones	Eliminan el suelo completamente, casi siempre.

3.3. LA VEGETACIÓN

3.3.1. Generalidades

Como ya se mencionó, la vegetación está conformada por los organismos que mayor influencia tienen sobre el desarrollo del suelo. Éstos controlan el aporte de materia orgánica en él, tanto en lo relacionado con la cantidad, como con la calidad o tipo de materiales adicionados.

El contenido de materia orgánica de un suelo, en un momento dado, depende del aporte de materiales orgánicos que se haga a dicho suelo, así como de la velocidad con la cual éstos se descomponen; la cantidad de materia orgánica que se aporta al suelo es bastante variable y depende sensiblemente del tipo de cobertura vegetal, como se aprecia en la Tabla 1.25.

Los resultados obtenidos por Arias, citado por Young (1994), ilustran la variabilidad que se presenta en la velocidad de descomposición de residuos orgánicos en relación con su procedencia, como se ve en la Tabla 1.26. En este caso, la **vida media** es el tiempo que tarda una determinada cantidad el material en perder la mitad de su peso.

TABLA 1.25. Aporte de residuos vegetales al suelo, por parte de diferentes coberturas, como materia seca en t ha⁻¹ año⁻¹ o por cosecha, según el caso. (Según varios autores citados por Burbano, 1989).

COBERTURA VEGETAL	MATERIA SECA ACUMULADA (t ha ⁻¹)	
Bosque Tropical Húmedo	Brasil Venezuela Colombia	7.3 4.6 12.0
Sorgo		2 - 8
Maíz		1 - 6
Arroz		4
Maní		2.5 - 3.5
Algodón	1.5 - 4.0	

TABLA 1.26. Vida media de hojas de especies forestales útiles en agroforestería en el piso premontano de Colombia, según Arias, citado por Young (1994).

ESPECIE	VIDA MEDIA (días)
<i>Albizia carbonaria</i>	60
<i>Gliricidia sepium</i>	80
<i>Sesbania grandiflora</i>	80
<i>Erythrina sp.</i>	120
<i>Cajanus cajan</i>	120
<i>Cassia grandis</i>	180

Pritchett (1991) reporta que la hojarasca producida en los bosques caducifolios se descompone relativamente rápido y que se transforma en un humus enriquecido, en tanto que la hojarasca aportada por los bosques de coníferas es bastante resistente a la descomposición y fuertemente ácida, lo que estimula el proceso de **podzolización** en el suelo (ver Capítulo 2).

Zinke, citado por Birkeland (1980) encontró que en suelos arenosos de dunas de California, bajo cobertura de *Pinus contorta* de 45 años de edad, se presentaban diferencias de pH de 1.5 y más

entre el suelo por debajo del árbol y el suelo muestreado en áreas sin vegetación. El mismo autor encontró también que el contenido de nitrógeno en el horizonte superficial del suelo bajo los árboles era casi el doble del contenido en el suelo por fuera de la influencia de aquellos.

Birkeland (1980) expone un caso extremo de influencia de la vegetación sobre la pedogénesis observado en Nueva Zelanda, donde observó que en los sitios bajo la influencia de *Podocarpus* sp. y de *Agathis australis* era el único lugar en el cual se presentaban Espodosoles; estos suelos, así como los procesos de podzolización, desaparecían donde terminaba la influencia de los árboles mencionados.

Estudios tan específicos, como los citados anteriormente, son escasos en Colombia; puede mencionarse el de Cortés et al (1990) en Andisoles de la Sabana de Bogotá, en el cual se encontró que las coníferas y los eucaliptos causaban deterioro estructural en el suelo, debido a que inducían cambios drásticos en su comportamiento hidrológico.

En suelos del oriente antioqueño y del altiplano de Popayán, Moreno (1987) encontró que los valores de los contenidos de Mg y K fueron significativamente menores en Andisoles bajo plantaciones de *Pinus patula*, en comparación con los mismos suelos bajo pastos; la CICE y el Al también fueron menores en Andisoles bajo *P. patula*, comparados con los valores obtenidos en aquellos suelos bajo bosque natural. El pH de los Andisoles bajo *P. patula* fue significativamente menor que el pH que se presentó en los Andisoles bajo bosque natural y bajo pastos.

3.3.2. Caracterización de la vegetación natural

Para definir la vegetación natural de una zona, con el objetivo de identificar este factor de formación del suelo, puede recurrirse a la propuesta de “Formaciones vegetales de Colombia” de Cuatrecasas, expuesta por Malagón et al (1995). Esta propuesta se resume a continuación:

- **Selva basal:** Ubicada entre 0 y 1000 msnm. Tiene una temperatura media anual que oscila entre 23 y 30 °C y una precipitación total anual mayor a 1800 mm. Presenta árboles siempre verdes de hasta 40 m de altura y 1 m de diámetro, sostenidos por raíces tabulares o zancos. El sotobosque lo componen hierbas gigantes y arbustos grandes. Son numerosos los bejucos leñosos, las palmas y las epífitas.
- **Selva subandina:** Entre 1000 y 2400 msnm. Presenta temperaturas promedias anuales entre 16 y 23 °C y precipitaciones regularmente distribuidas mayores a 1000 mm; la fisonomía del bosque es muy similar a la de la selva basal, aunque disminuye la presencia de árboles con raíces tabulares y la altitud más frecuente de estas plantas fluctúa entre 15 y 30 m; también disminuye la cantidad de palmas grandes, lianas y epífitas leñosas; se empiezan a presentar árboles con hojas pequeñas (micrófilas).
- **Selva andina:** También llamada “Bosque andino”. Forma una banda entre los 2400 y los 3800 msnm que permanece húmeda debido a la alta nubosidad y niebla y a las bajas temperaturas medias anuales que varían entre 6 y 15 °C. Presenta una precipitación total anual que oscila alrededor de 1000 mm; con el ascenso disminuyen los árboles y predominan las micrófilas y nanófilas; hay gran exuberancia de epífitas, principalmente Bromeliaceae y orquídeas, además de musgos y líquenes.
- **Páramo:** Amplias regiones desarboladas en las partes altas de las cordilleras que van desde el bosque andino hasta las nieves perpetuas (4700 msnm). Presentan condiciones meteorológicas

muy contrastantes y drásticas con temperaturas medias anuales que varían entre 2 y 12 °C, en términos generales. La vegetación dominante corresponde a Poaceas mezcladas con arbustos pequeños de hojas coriáceas y plantas cespitosas, almohadilladas y arrosetadas.

- **Sabana:** Llanuras cubiertas por vegetación baja, principalmente Poaceas y algunos arbustos y árboles muy esparcidos. Se presentan en regiones bajas y cálidas, donde la estación seca es más o menos larga.
- **Formaciones xerófitas:** Características de zonas muy secas, donde dominan los árboles pequeños y los arbustos achaparrados de hojas coriáceas y cutícula gruesa. Son abundantes las plantas espinosas y las cactáceas de gran tamaño y densidad; las gramíneas que se presentan generalmente se marchitan en la época seca.
- **Manglares:** Son asociaciones de arbustos o árboles perennifolios y halófitos, que forman una selva densa de gran altura en las áreas costeras tropicales y cerca a los estuarios de los ríos.
- **Formaciones de márgenes de ríos:** Compuestas por vegetación heliófila, comprenden principalmente gramíneas monoespecíficas de tallos rastreros y estoloníferas; en etapas intermedias de colonización se encuentran cañabrava, sauces y platanillos y, cuando la colonización es avanzada, hay presencia de árboles grandes con muy poca variedad de especies.

La cobertura vegetal natural puede haber sido reemplazada por algún tipo de uso comercial. En este caso, se describen el tipo y la intensidad del uso que se está haciendo de la tierra. El tipo de uso se describe nombrando el tipo de explotación que se tiene en el suelo. Si dicho uso es agropecuario, debe aclararse el tipo específico de uso, por ejemplo, pastos mejorados, pastos naturales, cultivo de algodón, cultivo de papa, etc.

Con respecto a la intensidad con la cual se hace la explotación detectada, ésta define el mayor o menor grado de manipulación y, por tanto, de alteración que se está haciendo en el suelo. Puede describirse como **intensiva, semi-intensiva o extensiva**; en el orden en que están expuestos los términos anteriores, decrece la intensidad de uso. Una mayor intensidad de uso implica una mayor probabilidad de deterioro para el suelo y, por tanto, debe estar acompañada de un mayor número de prácticas de manejo preventivo contra aquella posibilidad.

3.4. LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

Todos los residuos de origen vegetal y animal que llegan al suelo conforman la materia orgánica del mismo; la principal fuente de ella son los residuos vegetales, los cuales aportan energía y alimento a los organismos del suelo, al tiempo que son la materia prima para la formación de los coloides orgánicos (**humus**) que se acumulan en el suelo.

3.4.1. Tipos de materia orgánica del suelo

Los materiales orgánicos que se encuentran en el suelo se agrupan de acuerdo con su grado de transformación, como se muestra en la Tabla 1.27, elaborada con base en información tomada de Burbano (1989).

TABLA 1.27. Principales grupos de materiales orgánicos del suelo (No hay ninguna correspondencia horizontal).

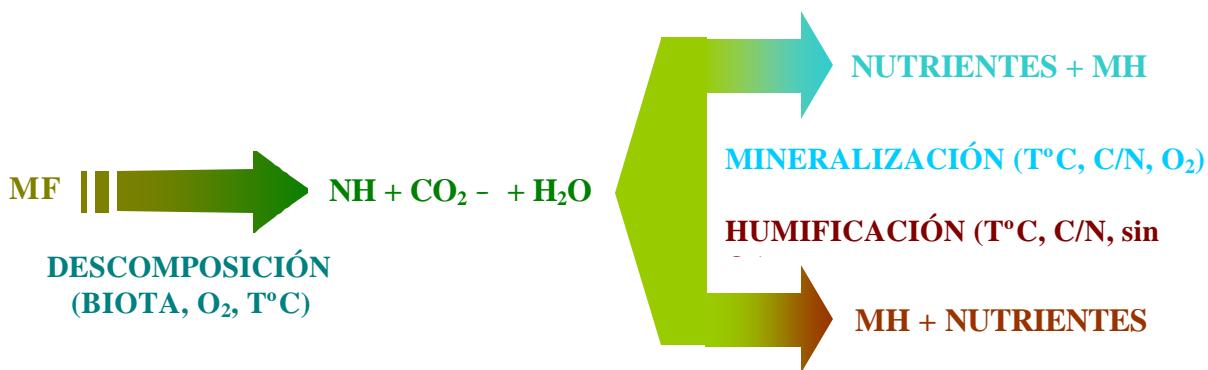
Materia orgánica fresca (MF) {Órganos}	Materia orgánica no húmica (MNH) {Compuestos químicos simples}	Materia orgánica húmica (MH) {Coloides orgánicos}
Hojas	Celulosa (15-60 %)	Ácido fulvico
Tallos	Hemicelulosa (10-30 %)	Ácido himatomelánico
Raíces	Lignina (5-30 %)	Ácido húmico
Flores	Azúcares, aminoácidos y ácidos alifáticos (5-30 %)	Humina
Frutos	Grasas, aceites, ceras, resinas y otros pigmentos (1-8 %)	
	Proteínas (1-15 %)	

Según Motta et al (1990), los compuestos húmicos, generalmente, representan entre 50 y 85% de la materia orgánica total del suelo; para fines prácticos, la MF y la MNH se consideran como un solo grupo de materiales.

La materia orgánica húmica se puede separar de las otras fracciones por densimetría en agua destilada, colocando 5 g de suelo, tamizado a 2 mm, en 100 mL de agua; la materia orgánica fresca y la materia orgánica no húmica (MF + MNH), flotan en el agua, mientras que la materia orgánica húmica (MH), se va al fondo del recipiente; por decantación se recuperan las dos fracciones separadas, se secan, se pesan y se establece en porcentaje que representa cada una en la muestra. Otros métodos más precisos para realizar la separación y cuantificación de los materiales anteriores, como la densimetría en bromoformo, pueden verse en Motta et al (1990).

3 4.2. Transformación de los materiales orgánicos

En general, los principales procesos que se presentan con la materia orgánica en el suelo se pueden esquematizar como sigue:



El proceso de **mineralización** consiste en la transformación de compuestos orgánicos a compuestos inorgánicos y es eminentemente **microbiológico**. Son de gran importancia para la nutrición de la planta las transformaciones del N y del S que llevan estos nutrientes a formas fácilmente aprovechables por ella. Orozco (1999) define la mineralización del N como “la transformación del N contenido en compuestos orgánicos, hasta su liberación al suelo como NH₃”.

La **humificación** consiste, según Kumada (1987), en un conjunto de procesos que transforman la materia orgánica en compuestos que tienen una alta capacidad de absorción de la luz visible y unos altos contenidos de grupos orgánicos carbonilo y carboxilo.

Durante las reacciones de **descomposición** de los restos orgánicos se produce una oxidación rápida y violenta (entendida exotérmicamente) de éstos con una consecuente liberación de elementos nutritivos para la planta, principalmente NH_3 , NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , además de agua y CO_2 .

Después de que pasa esta primera etapa de alteración y, dependiendo de las condiciones ambientales y de la calidad de la materia orgánica aportada, el proceso de transformación tiene dos posibles vías: Una, la mineralización, con un aporte intenso de nutrientes y un bajo aporte de materiales susceptibles de ser humificados y otra, la humificación, con un aporte pobre de nutrientes, pero con un alto suministro de materiales disponibles para la polimerización y acumulación en el suelo como humus.

Las condiciones de alta aireación, es decir, el buen suministro de oxígeno, así como las altas temperaturas (dentro del rango mesotérmico), el buen contenido de humedad, la adecuada fertilidad del suelo y los residuos orgánicos poco lignificados, es decir, con relación C/N baja (ver Capítulo 16) favorecen los procesos de **mineralización** y reducen drásticamente la acumulación de materia orgánica en el suelo; situaciones en las cuales se presenta déficit de oxígeno, baja temperatura, materiales leñosos (relación C/N alta) y exceso de humedad (deficiente aireación), favorecen los procesos de **humificación** y de acumulación de la materia orgánica en el suelo.

Cabe aclarar, que los procesos de descomposición, mineralización y humificación, normalmente, se presentan simultáneamente en el suelo; simplemente, se afirma que el suelo está sometido a procesos de humificación, por ejemplo, cuando los procesos que sufre la materia orgánica, del mismo, la llevan a producir preferencialmente humus en lugar de compuestos inorgánicos; salvo casos muy especiales, como condiciones climáticas desérticas, por ejemplo, permiten el desarrollo de mineralización, casi exclusivamente.

Como se ha mencionado en diferentes apartes anteriores, la **materia orgánica fresca** (MF) es un componente importante para suministrarle alimentación y energía a la meso y macrofauna del suelo. La **materia orgánica no húmica** (MNH) es la principal fuente de energía y de carbono para los microorganismos del suelo. Sin embargo, desde el punto de vista físico-químico, es la **materia orgánica húmica o humus** (MH) la fracción orgánica más importante del suelo pues, al adquirir ésta propiedades coloidales le trasmite al suelo propiedades únicas, razón por la cual a continuación se tratará este componente con más detalle.

3.4.3. El humus

Es el conjunto de compuestos orgánicos amorfos, poliméricos, de alto peso molecular y de color amarillo hasta gris oscuro o casi negro, que se acumulan en el suelo como consecuencia de su resistencia a la transformación. Se diferencian y agrupan de acuerdo con su solubilidad, peso molecular y grado de polimerización, según varios autores citados por Burbano (1989), como se muestra a continuación:

3.4.3.1. Tipos de humus

- **Ácidos Fúlvicos:** Son compuestos de bajo peso molecular, alta acidez (entre 900 y 1400 meq/100g), bajo grado de polimerización, solubles en álcali y en ácido.
- **Ácidos Húmicos:** Son compuestos de alto peso molecular, baja acidez (entre 500 y 870 meq/100g), alto grado de polimerización, solubles en álcali, pero precipitan en medio ácido; presentan una fracción soluble en etanol que se conoce como **Ácidos Himatomelánicos**.
- **Huminas:** Se refieren a la fracción del humus más resistente a la descomposición que no es soluble, ni en ácido, ni en álcali; Paul y Clark (1989) sugieren que está compuesta por mezclas de ácidos fúlvicos y húmicos con otros componentes no solubles provenientes de plantas y microorganismos, como celulosa, lignina, paredes celulares y carbón.

3.4.3.2. Propiedades del humus

Desde el punto de vista químico, es un material ácido con: Alta CIC (ver Capítulo 13), en su mayor parte variable; alta capacidad buffer (ver Capítulo 14) y alta acción quelatante, que le permite formar complejos bastante estables con los elementos metálicos presentes en el suelo.

Físicamente, por ser un material coloidal, presenta una alta superficie específica (ver Capítulo 12); es amorfo; tiene colores oscuros; presenta baja adhesividad y baja plasticidad (ver Capítulo 10) y tiene una alta capacidad de retención de humedad; su densidad aparente (ver Capítulo 8) es baja.

Kumada (1987) muestra como, a medida que avanza el proceso de humificación, se incrementan los contenidos de carbono y de oxígeno en el humus y decrecen los de hidrógeno y de nitrógeno; además, la intensidad del color oscuro se hace mayor y va adquiriendo una organización definida (estructura) en los estados más avanzados de evolución.

3.4.4. Importancia de la materia orgánica en el suelo

La materia orgánica, en todas sus diferentes formas, tiene efectos marcados en casi todas las propiedades del suelo; entre los que más se relacionan con la evolución del mismo pueden destacarse:

- **Color:** La acumulación de humus, en el suelo, le transmite su color oscuro; este color aumenta la absorción de radiación y facilita su calentamiento, mejorando la eficiencia de los procesos químicos que actúan en dicho suelo, así como el establecimiento y desarrollo de organismos en él.
- **Humedad:** Al aumentar el contenido de humus, se incrementa la cantidad de agua que puede almacenar el suelo, sobre todo si es un suelo arenoso; además, mejora, notablemente, las relaciones hídricas del suelo, al mejorar la infiltración y reducir las pérdidas de agua por evaporación; todo lo anterior contribuye a aumentar la actividad química y biológica del suelo y por tanto su evolución.
- **Estructura:** La acumulación de humus en el suelo favorece la formación de agregados esférico-irregulares relativamente grandes y estables. Con ésto se mejoran la aireación, la porosidad, la

permeabilidad, la velocidad de infiltración, el drenaje y el desarrollo radicular; además, se reducen la susceptibilidad del suelo a la erosión y la densidad aparente.

- **CIC:** Su valor se incrementa en el suelo al aumentar el contenido de materia orgánica, debido a que la humificación incrementa el número de grupos carboxilo (-COOH) y fenólicos (-OH) que pueden disociarse, adquiriendo cargas negativas. Al incrementarse la CIC del suelo, se reducen y hasta evitan las pérdidas por lixiviación.
- **pH:** Su valor puede disminuir al aumentar el contenido de humus, si el suelo tiene baja capacidad amortiguadora del poder acidificante que tenga el humus, ya que este está compuesto por ácidos orgánicos principalmente; así mismo, la dissociación de grupos funcionales de la materia orgánica libera H⁺; al reducirse el pH, a ciertos valores, también se produce solubilización de Al³⁺, el cual contribuye a aumentar la acidez del suelo.
- **Disolución de minerales:** Algunos compuestos húmicos son capaces de disolver filosilicatos como biotita, muscovita, illita, caolinita.
- **Compuestos órgano-minerales:** El humus puede unirse a coloides inorgánicos, formando complejos órgano-minerales de diferente grado de estabilidad; los materiales involucrados en los complejos tienen una menor tasa de alteración que aquella que tendrían, si estuvieran independientes en el suelo.
- **Microorganismos:** La acumulación en el suelo de ciertos tipos de compuestos orgánicos, como lípidos principalmente, llega a ser tóxica para algunos de los microorganismos del suelo y afecta aquellos procesos en los cuales intervienen (Nikonova y Tsiplionkov, 1989).
- **Hidrofobicidad:** Algunos tipos de humus, al acumularse en el suelo, le imprimen a éste características hidrofóbicas, alterando sus relaciones hídricas (varios autores citados por DeBano, 1981).

RECORDAR

- **El hombre, como organismo, puede ser agente de formación de suelos, aunque, con mucha frecuencia, en lugar de eso, lo deteriora.**
- **La vegetación es el organismo que mayor incidencia tiene en el desarrollo del suelo.**
- **La vegetación es la principal fuente de materia orgánica para el suelo y el tipo de vegetación controla la cantidad y calidad de materia orgánica que se acumula en él.**
- **El tipo de materia orgánica que más interesa en el suelo es la materia orgánica húmica, debido a que su estado coloidal le proporciona gran actividad físico-química.**
- **La materia orgánica evoluciona, en el suelo, en dos direcciones: Mineralización o Humificación; la aireación y la humedad controlan estos procesos.**
- **La humificación enriquece el suelo en materia orgánica, la mineralización no.**
- **El humus lo componen: Ácidos fulvicos, ácidos húmicos y huminas.**
- **El humus le trasmite al suelo colores oscuros, alta capacidad de almacenar agua, estabilidad estructural, alta CIC, bajo pH y, en algunos casos, hidrofobicidad.**

4. EL RELIEVE

El relieve puede considerarse, de una manera simple, como el conjunto de formas que se presentan en la superficie de la tierra. Su estudio compete a la **Geomorfología** e implica establecer las relaciones que se den entre las formas de la superficie terrestre (**geoformas**), los materiales asociados a dichas formas y el efecto que tienen sobre ellas y los procesos que les han dado origen y que las han remodelado a través del tiempo.

4.1. TIPOS DE RELIEVES

De acuerdo con Arias (2001)¹, las formas y la dinámica del relieve se definen en un entorno donde confluyen influencias climáticas y geológicas y la intensidad con la cual han actuado estas influencias es utilizada, frecuentemente, para clasificar los tipos de relieve.

En la clasificación de los tipos de relieve se presentan diversas escalas espaciales de aplicación: hay desde relieves globales y de escala continental o **megarrelieve** como la cadena montañosa de los Andes suramericanos, hasta relieves regionales o **macrorrelieve**, como serían las áreas colinadas del altiplano del oriente antioqueño; relieves locales o **mesorrelieve**, como en el valle aluvial de un río pequeño; **microrrelieve** como en un complejo de orillares o **nanorrelieve** en un hormiguero.

En los megarrelieves hay una fuerte influencia de fuerzas y de procesos geológicos. En los macrorrelieves las geoformas pueden expresar la influencia de la litología y/o de las estructuras geológicas, generando un **relieve estructural**. Cuando los tipos de relieves están asociados a entornos ambientales se presentan las **zonas morfoclimáticas**, pudiéndose hablar de relieve glacial, relieve periglacial, relieve de sabanas, etc.

En las escalas espaciales menores, y más relacionadas con la variabilidad y evolución de los suelos, las geoformas reflejan el efecto de los procesos generados por lo que llama Villota (1991) los **agentes modeladores del relieve**, quien los define como aquellos elementos móviles que son capaces de desprender, transportar y depositar materiales en la superficie del terreno. Los agentes son: agua corriente y lluvia, gravedad, viento, hielo, oleaje y algunos organismos y los procesos son meteorización, remoción, transporte y depositación.

Donde los procesos de remoción, con o sin meteorización, son dominantes, se generan relieves **denudativos o erosionales** y donde predomina la depositación, se forman relieves de **acumulación o deposicionales**.

Cabe aclarar que un relieve actual puede estar sometido a unos procesos de alteración, que no necesariamente son los mismos que lo originaron; por ejemplo, el relieve desarrollado en un abanico aluvial que, en su origen es deposicional, hoy puede estar siendo sometido a procesos de erosión que lo están desgastando y convirtiendo en un relieve erosional.

¹ Arias, A. (2001). Profesor Universidad Nacional de Colombia. Medellín. Comunicación personal.

4.2. LA VERTIENTE

Arias (2001)¹ define una vertiente como aquella porción de territorio limitada por una divisoria de aguas en su parte superior y por un canal aluvial o por una llanura aluvial en su parte inferior. En términos generales, a lo largo de una vertiente se pueden diferenciar sectores que son sometidos a procesos diferentes de desarrollo del suelo. En las partes bajas de ella, se favorecen los procesos de **acumulación** de materiales (partículas sólidas, iones, compuestos químicos, agua), en tanto que en las partes intermedias y altas predominan los procesos de **denudación** y **pérdidas**. Los relieves deposicionales se desarrollan, principalmente, en las zonas bajas del terreno, mientras que en las altas se generan relieves erosionales; obviamente, este comportamiento general tiene gran cantidad de variaciones locales y puntuales, debidas a controles ejercidos por el grado, forma, longitud e irregularidad de la vertiente estudiada, así como por parte del tipo de materiales subsuperficiales que la componen.

A propósito del control que ejerce el material litológico sobre el relieve, Jaramillo (1997a) observó, en una zona seca del municipio de La Pintada (Antioquia), que las partes más sobresalientes y escarpadas del relieve, con vertientes rectas y uniformes, se desarrollaban en estratos de areniscas cuarcíticas, en tanto que las partes bajas, con vertientes onduladas e irregulares, están configuradas en arcillolitas; ambos tipos de rocas forman parte de un mismo paquete de rocas sedimentarias inclinadas que, al quedar expuestas a los agentes modeladores del relieve, respondieron en forma diferencial a ellos de acuerdo con su mineralogía, composición química y demás propiedades petrográficas y geomecánicas.

4.3. CARACTERÍSTICAS DE LA VERTIENTE

Los tipos de vertiente se diferencian teniendo en cuenta los siguientes atributos básicos: forma, gradiente y longitud.

4.3.1. Forma de la vertiente

La forma de la vertiente se define con el aspecto que toma el perfil topográfico que se presente a lo largo de la máxima inclinación de ella. Se describen tres formas básicas: **rectilínea**, **cóncava** y **convexa**. Esta característica está muy relacionada con procesos de **erosión – sedimentación** y con condiciones de **drenaje** en los suelos. Con mucha frecuencia, el perfil de una vertiente es una combinación de varias de las formas básicas descritas.

4.3.2. Gradiente de la vertiente

¹ Arias, A. (2001). Profesor Universidad Nacional de Colombia. Medellín. Comunicación personal.

El gradiente es la inclinación que presenta la superficie del terreno con respecto a un plano imaginario horizontal; generalmente, se expresa en porcentaje. En Colombia son de uso amplio los rangos de inclinación que se presentan en la Tabla 1.28 para calificar el gradiente de las vertientes.

TABLA 1.28. Clasificación del relieve de acuerdo con el gradiente de las pendientes y la morfología del terreno, según el IGAC (Modificada parcialmente en los nombres de Mosquera, 1986).

FORMA DEL TERRENO	NOMBRE DEL RELIEVE	GRADIENTE (%)
Plano horizontal o subhorizontal	Plano horizontal	< 1
	Plano subhorizontal o casi plano	1 – 3
Plano inclinado	Ligeramente inclinado	3 – 7
	Inclinado	7 – 12
Ondulado (con ondulaciones cortas)	Fuertemente inclinado	12 – 25
	Ligeramente ondulado	3 – 7
Quebrado (con diferentes forma, inclinación y longitud de pendiente)	Ondulado	7 – 12
	Fuertemente ondulado	12 – 25
Escarpado (inclinación fuerte y larga, diferencias de nivel apreciables)	Ligeramente quebrado	7 – 12
	Quebrado	12 – 25
	Fuertemente quebrado	25 – 50
Escarpado (inclinación fuerte y larga, diferencias de nivel apreciables)	Escarpado	50 – 75
	Muy escarpado	> 75

4.3.3. Longitud de la vertiente

Esta propiedad controla, en buena medida, la **escorrentía** y la **erosión hídrica** acelerada del suelo; para su descripción se utilizan términos relativos como ‘**larga**’ o ‘**corta**’ para una determinada unidad fisiográfica; lo anterior implica que una vertiente considerada como larga en una determinada localidad, no necesariamente también es larga en otra localidad diferente. Aquellas vertientes más largas generarán mayor escorrentía y tendrán más altas probabilidades de producir erosión que las más cortas, bajo las mismas condiciones climáticas y litológicas.

4.3.4. Orientación de las vertientes

El SSDS (1993) recomienda incluir esta característica en la descripción de las vertientes, definiéndola como la posición que presenta la superficie del terreno con respecto a la posición del norte, por lo cual se describe como un ángulo de hasta 360°, con respecto a dicho norte. La importancia de definir esta orientación radica en que ella puede controlar la exposición de la vertiente a diferentes condiciones climáticas como cantidad de horas de luz al día o vientos, por ejemplo; el efecto de ésta propiedad es muy significativo en zonas con estaciones.

4.4. EFECTOS DE LA VERTIENTE SOBRE EL SUELO

4.4.1. Sobre la erosión

Tanto el **gradiente** como la **longitud** de la vertiente influyen sobre las pérdidas de suelo por efecto de la **escorrentía**, como puede verse en la Tabla 1.29; entre mayor sean la longitud y el gradiente, mayor es la pérdida de suelo, ya que el agua de escorrentía adquiere mayor velocidad y energía y el tiempo de contacto del agua con el suelo es menor. Se reduce así la posibilidad de que el agua se infiltre en él.

TABLA 1.29. Efecto de algunas características de la vertiente sobre la erosión hídrica de un suelo de coluvios en Chinchiná (Colombia); resultados promedios de 8 años; precipitación promedia anual de 2701 mm. (Con base en resultados de Federacafé, 1975).

EFECTO DEL GRADIENTE		EFECTO DE LA LONGITUD	
GRADIENTE (%)	PÉRDIDA DE SUELO (t ha ⁻¹)	LONGITUD (m)	PÉRDIDA DE SUELO (t ha ⁻¹)
23	119	5	152
43	327	10	207
		20	306

El SSDS (1993) establece el posible comportamiento de la escorrentía superficial del agua, teniendo en cuenta el gradiente de la vertiente y la **conductividad hidráulica saturada** (K_{sat} , ver Capítulo 9) del suelo como se muestra en la Tabla 1.30.

TABLA 1.30. Comportamiento de la escorrentía superficial en terrenos de diferentes clases de conductividad hidráulica saturada del suelo, con base en el gradiente de la vertiente, según el SSDS (1993).

GRADIENTE (%)	CLASES DE K_{sat}					
	Muy alta	Alta	Mod. alta	Mod. baja	Baja	Muy baja
< 1	Despreciable	Despreciable	Despreciable	Baja	Media	Alta
1 – 5	Despreciable	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
5 – 20	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta	Muy alta
> 20	Baja	Media	Alta	Muy alta	Muy alta	Muy alta
Cóncava	Despreciable	Despreciable	Despreciable	Despreciable	Despreciable	Despreciable

4.4.2. Sobre las condiciones de drenaje

La **forma** de la vertiente tiene un gran efecto sobre la posibilidad que tiene el suelo de evacuar los excesos de agua que recibe. Las áreas que presentan superficies cóncavas no podrán remover aquellos excesos por escurrimiento superficial, debiéndose producir la eliminación de ellos a través del suelo o mediante la evaporación desde su superficie.

En las áreas planas, el escurrimiento superficial del agua es lento o no se presenta. Queda el suelo sometido a **encharcamientos** y a largos períodos de saturación con agua, que pueden imprimirlle características como colores grises, moteos, poco desarrollo estructural, pH relativamente alto (casi neutro) y contenidos altos de bases; también pueden presentarse problemas de toxicidad, con algunos elementos que se tornan muy solubles en condiciones reductoras, como el Fe y el Mn o con otros, que en esas condiciones forman compuestos tóxicos, como el azufre.

4.4.3. Otras relaciones con el relieve

Otro aspecto que se debe considerar en el análisis del relieve es la posición en que se encuentra el suelo en aquel. Los suelos que se ubican en las partes más bajas del relieve son los que reciben los materiales que se están perdiendo en las partes altas por lo que presentan un proceso permanente de **enriquecimiento**.

En los suelos de las partes bajas entonces, se puede retardar el **desarrollo del perfil** pedogenético si el aporte de materiales es permanente y de magnitudes considerables. Además, en esas condiciones es más probable que se presenten **suelos enterrados** (ver Capítulo 5) o suelos con intercalaciones de capas que generen **contrastes granulométricos** en el interior del suelo.

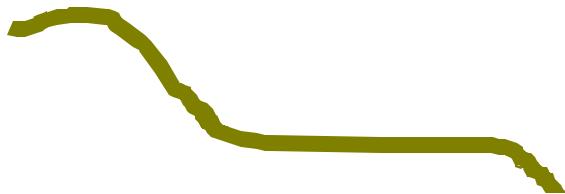
Al contrario, en las posiciones altas del relieve es más probable la remoción de material alterado por procesos de erosión, lo que dificulta el desarrollo de suelos espesos y favorece la presencia de **suelos superficiales**, frecuentemente limitados en sus posibilidades de uso por la presencia de material lítico cercano a la superficie del terreno. También en estas condiciones y con la conjugación de otras circunstancias, como climas secos por ejemplo, es más probable encontrar **suelos decapitados**, es decir, que han perdido sus horizontes superficiales.

En condiciones de climas secos, además, el material erosionado en las partes altas se acumula en las depresiones, formándose depósitos espesos de materiales terrosos que ofrecen mejores posibilidades al desarrollo de la vegetación y al aporte de materia orgánica al suelo, debido a que tienen un mejor medio para el enraizamiento y una mayor capacidad de acumulación de agua que las áreas que ocupan las posiciones más altas.

El relieve explica también, parcialmente, por qué los suelos de los valles aluviales son normalmente de mejor **fertilidad** que los suelos de los paisajes altos adyacentes. En los suelos del valle, el nivel freático se encuentra mucho más cerca de la superficie que en los otros paisajes lo que impide que la lixiviación sea tan intensa en ellos como en las áreas vecinas por lo que conservan por más tiempo sus nutrientes.

González (1983) concluyó en sus análisis mineralógicos de arcillas de suelos derivados de cuarzodioritas del batolito antioqueño, que cuando el suelo se presentaba ubicado en áreas altas del relieve, con buenas condiciones de drenaje, se formaba gibsita a partir de la plagioclasa, mientras que en las partes bajas de las vertientes, con mal drenaje, se presentaba un aporte lateral de sílice que no permitía la formación de gibsita, sino de caolinita, a partir de las mismas plagioclasas.

Los resultados que se presentan en la Figura 1.11 muestran las variaciones de algunas propiedades de los suelos desarrollados en dos niveles de terraza diferentes.



Paisaje	Colinas en rocas sedimentarias	Terraza alta	Terraza baja
Régimen de humedad	Ústico	Ústico	Ácuico
Nivel freático		No se encontró en 3 m.	Presente a 120 cm.
Coluviación	No	Si	No
Gleización	No	No	Si
Lixiviación	Si	Si	No
Propiedades en el horizonte A			
Color (ver Capítulo 4)		5YR 3/1	2.5Y 4/2
pH		5.3	7.7
Ca [cmol (+) kg ⁻¹ suelo]		7.8	14.9
Mg [cmol (+) kg ⁻¹ suelo]		2.6	5.0
K [cmol (+) kg ⁻¹ suelo]		0.19	0.18

FIGURA 1.11. Algunas características y propiedades de suelos desarrollados sobre terrazas aluviales del río Poblano, en cercanías de La Pintada (Antioquia), relacionadas con la posición en el paisaje de los mismos. (Con base en resultados de Jaramillo, 1997a).

Al nivel de meso y microrrelieves, se pueden presentar diferencias importantes en las características de los materiales parentales, como resultado de la acción de procesos como selección granulométrica. En una llanura aluvial de un río típicamente meándrico, por ejemplo, la granulometría del dique es más gruesa que la del basín y la de éste más que la de una cubeta de decantación. Estas diferencias, debidas a diferente posición dentro del relieve, se manifiestan en variaciones en las condiciones de drenaje, en la susceptibilidad a la erosión, en la textura, en la disponibilidad de agua, etc., que finalmente van a definir suelos distintos en cada posición.

Aparte de las relaciones anteriores, las diferencias que se presenten entre suelos ubicados en diferentes posiciones dentro de un relieve específico, pueden estar reflejando diferencias de **edad** entre los mismos. Algo de las diferencias mostradas en la Figura 1.11 puede explicarse por diferencia de edad entre las geoformas analizadas. Arias et al (2000) encontraron diferencias pedogenéticas muy drásticas entre suelos desarrollados en diferentes posiciones en el relieve, originadas por diferencias en las edades de las unidades de relieve que definieron.

RECORDAR

- **La vertiente es la unidad básica del análisis del relieve.**
- **En la parte baja de la vertiente tienden a desarrollarse suelos más espesos que en el resto de ella.**

- Los elementos forma, gradiente, longitud y exposición de la vertiente, caracterizan el relieve.
- El relieve interviene activamente en la erosión y en la condición de drenaje del suelo.

5. EL TIEMPO

El proceso de formación del suelo sobrepasa en mucho el tiempo que define una generación humana; la edad del suelo se limita al tiempo durante el cual han actuado los procesos pedogenéticos en él.

Para definir la edad del suelo se debe tener claro que hay otras edades que se relacionan con ella como son:

- La edad de las rocas que corresponde a la edad del período durante el cual ellas se formaron y que es del o anterior al terciario (ver Tabla 1.31) y mucho mayor que la del suelo.
- La edad del material parental: si éste es el saprolito de una roca, su edad es mucho menor que la de la roca original; si es un sedimento, su edad corresponde a la edad del depósito y generalmente es posterior al período terciario; en cualesquiera de los dos casos, la edad del suelo es menor o, a lo sumo, teóricamente, igual a la del material parental.
- La edad del relieve: la geoforma en la cual se está desarrollando el suelo, en general, tiene una mayor edad que la del suelo, aunque según criterio de Porta et al (1994) que ubican el tiempo cero de la pedogénesis en el momento en el cual se formó la superficie geomorfológica sobre la que está evolucionando ese suelo, suelo y geoforma tendrán la misma edad. A criterio del autor de este texto, se pueden tener geoformas más jóvenes que los suelos que hay en ellas, como por ejemplo en el caso de procesos de degradación que actúan en un determinado relieve afectando los suelos que ya están en él y que están produciendo nuevas geoformas sobre ellos: el carcavamiento en colinas o en partes distales de abanicos aluviales grandes produce cambios en el relieve que son sobreimpuestos a los suelos que ya estaban ahí.

De acuerdo con lo anterior, no se puede esperar “ver” la formación de un suelo, aunque tampoco es correcto, en el caso de suelos desarrollados a partir de rocas, darles la **edad geológica** (ver Tabla 1.31) que presenta el material litológico a partir del cual se ha formado; Buol et al (1997) establecen que muy pocos suelos son anteriores al **Pleistoceno**; se ubican, entonces, la mayoría de ellos, en el **Cuaternario**, período que ha sido dividido en dos Épocas: **Holoceno**, que corresponde a los últimos 10 000 años y es el tiempo en que se han desarrollado las civilizaciones humanas actuales y, **Pleistoceno**, la cual se extiende hasta 1 600 000 de años, según la Sociedad Geológica Americana, citada por Tarbuck y Lutgens (1999).

TABLA 1.31. El tiempo geológico.

ERA	PERÍODO	EDAD (años antes de hoy)*	ACONTECIMIENTOS RELACIONADOS CON LA VIDA**
	CUATERNARIO	1 600 000	Desarrollo del hombre, extinción de grandes mamíferos

CENOZOICO	TERCIARIO	66 400 000	Desarrollo de los mamíferos, aparición del hombre
	CRETÁCEO	144 000 000	Extinción de los dinosaurios, desarrollo de las fanerógamas
MESOZOICO	JURÁSICO	208 000 000	Apogeo de los dinosaurios, aparición de las aves
	TRIÁSICO	245 000 000	Aparición de los dinosaurios y de los mamíferos, expansión de cicadas y coníferas
	PÉRMICO	286 000 000	Desarrollo de los reptiles, expansión de los insectos y los anfibios, abundancia de coníferas, extinción de los trilobites
	CARBONÍFERO	360 000 000	Aparición de los reptiles, expansión de los tiburones, apogeo de los crinoideos, abundancia de insectos y de plantas esporíferas productoras de carbón
PALEOZOICO	DEVÓNICO	408 000 000	Aparecen los anfibios, desarrollo de los primeros bosques, abundancia de corales
	SILÚRICO	438 000 000	Aparecen las plantas y los animales terrestres, desarrollo de los peces
	ORDOVÍCICO	505 000 000	Expansión de los moluscos, apogeo de los trilobites, sólo vida en el mar
	CÁMBRICO	570 000 000	Predominio de los trilobites, abundancia de invertebrados marinos
PRECÁMBRICO		El tiempo desciende hasta más de 4 600 000 000 de años	Poco conocidos

* Edad según la Sociedad Geológica Americana, citada por Tarbuck y Lutgens (1999). Para efectos de edad geológica, “hoy” corresponde al año de 1950¹.

** Información resumida de Strahler (1979).

Desde el punto de vista de la pedogénesis, como ya se mencionó, el tiempo que interesa es el que corresponde al período cuaternario; Villota (1997) reporta una clasificación del tiempo geomorfológico para el período cuaternario, elaborada con base en trabajos de Van Der Hammen (1976) y de Van Eysinga (1975), la cual se reproduce parcialmente en la Tabla 1.32.

TABLA 1.32. Clasificación del tiempo en el Cuaternario y principios del Terciario, para fines geomorfológicos. (Tomada parcialmente de Villota, 1997).

PERÍODO	ÉPOCA	EDAD (años)	TÉRMINO FISIOGRÁFICO DE EDAD RELATIVA
CUATERNARIO	Neoboreal	600	ACTUAL
	Holoceno superior	2 600	SUBACTUAL
	Holoceno medio	7 100	RECIENTE
	Holoceno inferior	9 400	SUBRECIENTE
	Tardiglacial	11 500	
	Pleistoceno superior	12 000 – 730 000	ANTIGUO
	Pleistoceno inferior	730 000 – 1 800 000	

¹ Parra, L. N. Profesor Universidad Nacional de Colombia. Medellín. Comunicación personal.

El tiempo requerido por los diferentes rasgos pedológicos para manifestarse es muy variable y depende del rasgo específico que se trate; por ejemplo, Buol et al (1997) reportan que la formación del solum de un Oxisol con 1 m de espesor, en África, puede gastar 75000 años, en cambio, el endurecimiento de arcilla para formar laterita, después de su exposición al aire, demanda sólo alrededor de 35 años.

Pedológicamente, **edad** y **grado de evolución** no tienen en mismo significado: No necesariamente aquel suelo que tiene más edad (años), tiene más desarrollo o, en otro escenario, no necesariamente los suelos derivados de dos materiales parentales que tengan la misma edad, deben tener el mismo grado de evolución pedogenética.

Lo expuesto en el párrafo anterior se ilustra con los suelos observados por Jaramillo (1997a) en los alrededores del municipio de La Pintada (Antioquia), desarrollados a partir de estratos de rocas sedimentarias. Tanto la arenisca como la arcillolita forman estratos contiguos dentro de la misma Formación Amagá; estos estratos fueron plegados y luego colocados en la superficie del terreno, uno al lado del otro, lo que implica que tienen la misma edad, partiendo desde el momento en que empezaron a meteorizarse y, luego de esto, a formar suelos. Sin embargo, los suelos derivados de la arenisca sólo desarrollaron, en el tiempo de evolución que llevan, un perfil de suelo Ap – C que lo caracterizó como Entisol, mientras que los suelos derivados de la arcillolita, en el mismo lapso de tiempo, generaron un perfil Ap – A – Bt1 – Bt2, caracterizado como un Alfisol, con un grado de evolución muchísimo mayor que el del Entisol.

Las diferencias anotadas en los suelos del párrafo anterior obedecen a un control importante ejercido por la composición del material parental sobre los procesos pedogenéticos, como se discutió en la página 45, analizando los resultados expuestos en la Tabla 1.22, y no a diferencias en edad entre dichos materiales ni entre el tiempo que llevan sometidos a procesos de evolución en la superficie del terreno.

En muchas ocasiones no se conoce la edad exacta del suelo que se estudia, pero puede establecerse una secuencia temporal de suelos con apoyo de la geomorfología. Ésta ayuda a la realización de interpretaciones acerca del efecto que ha tenido el tiempo sobre su desarrollo y sus propiedades; un ejemplo de esta posibilidad se presenta en la Tabla 1.33.

TABLA 1.33. Algunas propiedades químicas del horizonte superficial de varios suelos desarrollados en una cronosecuencia de terrazas aluviales del río Cauca, en clima cálido (80 - 130 msnm) húmedo (bh-T), en el municipio de Tarazá (Antioquia). Con base en resultados de Jaramillo (1996).

Nivel de Terraza	MO (%)	pH Aqua	[cmol (+) kg ⁻¹ suelo]					Clasificación taxonómica según SSS (1994)
			Al	Ca	Mg	K	Na	
Alta	3.5	4.8	1.8	1.1	0.6	0.09	0.03	Typic Paleudult
Media	3.3	4.7	1.6	1.3	0.6	0.23	0.04	Typic Dystropept
Baja	4.1	6.5	0.0	10.8	4.5	0.18	0.13	Tropic Fluvaquent

En la Tabla 1.33 es notoria la diferencia que hay entre los suelos de la terraza baja (más reciente) y los de las otras dos terrazas, con respecto a sus posibilidades nutricionales para las plantas, originadas, en buena parte, por la diferencia en el tiempo que han estado expuestos a las condiciones ambientales.

La diferencia en tiempo, también ha generado importantes diferencias en el grado de evolución de los suelos de la tabla anterior. En éstos fue notable la variación en la intensidad con la cual han actuado los procesos de enrojecimiento del subsuelo. En la terraza baja, los subsuelos presentaron colores con **hue** 10YR y con **value** y **chroma** variable, pero dominado por el rango entre pardo y pardo amarillento. En la terraza media, los colores estuvieron en el **matiz** 7.5YR y los values y chromas correspondieron a la categoría pardo fuerte. En la terraza alta, los hue del subsuelo variaron entre 5YR y 2.5YR, desde rojo amarillento hasta rojo (Jaramillo, 1996).

Las variaciones de color, expuestas anteriormente, están mostrando el desarrollo de un proceso creciente de **ferruginación**, en el sentido en que aumenta la edad de las terrazas, iniciándose con procesos de **marronización** en las bajas; en este caso específico, no toda la intensidad de la ferruginación de los suelos de la terraza alta se debe exclusivamente a su mayor edad; hay que tener en cuenta que la posición que ella ocupa en el paisaje mejora sustancialmente el drenaje y la aireación del suelo y favorece la oxidación intensa del hierro; esta situación no se presenta en la terraza baja, en la cual hay evidencias de **gleización** (ver Capítulo 2).

La interpretación del enrojecimiento del color del suelo, como consecuencia de la evolución, debe hacerse con precaución pues, aunque en condiciones normales de oxidación, al avanzar el desarrollo del suelo, éste se va enrojeciendo, también es cierto que el color rojo no es exclusivo de suelos altamente evolucionados; si los óxidos de Fe se encuentran bien distribuidos en el suelo o como películas recubriendo otros sólidos, pequeñas cantidades de ellos pueden imprimirlle al suelo colores bastante rojos; en éste caso, el color rojo está acompañado por valores altos de pH, de bases y de minerales primarios meteorizables, que no se presentan cuando el color rojo esté mostrando un alto grado de evolución en el suelo.

La discusión de los párrafos anteriores y los resultados expuestos en la Tabla 1.33 muestran un aspecto práctico relacionado con la evolución del suelo: a medida que éste aumenta su evolución, aumenta la remoción de nutrientes en él y la formación de minerales de baja actividad, con lo que se reduce su calidad como medio nutritivo para las plantas, es decir, **a mayor evolución, menor fertilidad**.

RECORDAR

- **El tiempo, para la pedogénesis, abarca el período Cuaternario (1 600 000 años atrás).**
- **Para el cuaternario se ha establecido una cronología relativa, de lo menos a lo más viejo, así: Actual, subactual, reciente, subreciente, antiguo y muy antiguo.**
- **Edad (años) y grado de evolución de los suelos no tienen el mismo significado.**

- Al incrementar el grado de evolución, el suelo reduce su fertilidad, aumenta el tono rojo, presenta mejor desarrollo del perfil y de la estructura y disminuye el contenido de minerales meteorizables.

Los factores de formación del suelo, tratados en este capítulo, se presentaron de una forma independiente. Ésto no implica que así funcionen en la realidad; esta presentación facilita la asimilación de los conceptos, pero no refleja el comportamiento de ellos en la naturaleza.

En cualquier suelo actúan todos los factores de formación simultáneamente. Siempre es posible definirle a un suelo un clima, un material parental, un relieve, unos organismos y un tiempo y no es posible encontrar uno al que le falte alguno de los factores de formación. Ellos ejercen los controles que les corresponden e interactúan entre sí para lograr el objetivo final que es el suelo. También es cierto que muchas veces no es tan evidente la acción que está ejerciendo un determinado factor sobre un suelo específico y que alguno de los factores tenga un mayor control sobre el desarrollo del suelo, con respecto a los demás.

RECORDAR

- LOS FACTORES DE FORMACIÓN DEL SUELO SON: CLIMA – MATERIAL PARENTAL – ORGANISMOS – RELIEVE – TIEMPO
- LOS FACTORES DE FORMACIÓN DEL SUELO CONTROLAN EL TIPO DE PROCESOS INVOLUCRADOS EN EL DESARROLLO DEL SUELO Y LA INTENSIDAD CON QUE ELLOS ACTÚAN
- LOS CINCO FACTORES DE FORMACIÓN DEL SUELO ACTÚAN SIMULTÁNEAMENTE EN ÉL, AUNQUE PUEDEN HABER ALGUNOS QUE LO HAGAN MÁS INTENSAMENTE QUE LOS DEMÁS

BIBLIOGRAFÍA

- ARANGO, L. G. y M. T. DÁVILA. 1991. Descomposición de la pulpa de café por medio de la lombriz roja californiana. Avances Técnicos Cenicafé No. 161. Cenicafé. Chinchiná. 4 p.
- ARIAS, L. A.; L. H. GONZÁLEZ y G. ARIAS. 2000. Evolución del suelo y el relieve en el altiplano de Santa Rosa de Osos (Antioquia). En: Programa y resúmenes X Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. J. C. Pérez editor. Medellín. pp: 92-93.
- BENAVIDES, S. T. y F. SILVA. 1965. Seleniosis. 2^a. Ed. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá. 151 p.
- BESOAIN, E. 1985. Mineralogía de arcillas de suelos. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José, Costa Rica. 1205 p.

BIRKELAND, P. W. 1980. Pedology, Weathering and Geomorphological Research. Oxford University Press Inc. New York. 285 p.

BOHN, H. L.; B. L. McNEAL y G. A. O'CONNOR. 1993. Química del suelo. Editorial Limusa S. A. México. 370 p.

BROCK, T. D. and M. T. MADIGAN. 1991. Biology of microorganisms. 6^a. Ed. Prentice Hall International Inc. U.S.A. 874 p.

BUOL, S. W.; F. D. HOLE; R. J. McCRAKEN. and R. J. SOUTHARD. 1997. Soil Genesis and Classification. 4^a. Ed. Iowa State University Press. Iowa U. S. A. 527 p.

BURBANO, H. 1989. El Suelo: Una visión sobre sus componentes biorgánicos. Universidad de Nariño. Pasto. 447 p.

CAB INTERNATIONAL. 1993. Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods. 2^a. Ed. CAB International. U. K. 221 p.

CADENA, S.; J. CASTILLO; K. SAMANN y R. MADRIÑÁN. 1998. Estimación de la biomasa microbiana en suelos de ladera bajo diferentes sistemas de manejo. *Acta Agronómica* 48(3-4): 37-42.

CASHMAN, K. V.; B. STURTEVANT; P. PAPALE and O. NAVON. 2000. Magmatic fragmentation. In: Encyclopedia of volcanoes. Sigurdsson, H. et al editors. Academic Press. San Diego. pp: 421-430.

CHAMORRO, C. 1990. Las lombrices de tierra (macrofauna) en correlación con las características químicas del páramo de Sumapaz. En: Biología de suelos. Investigaciones Subdirección Agrológico. Vol. 2 Nº. 1. IGAC - Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. pp: 21-45.

CHAMORRO, C. 1989. Efecto del uso del suelo sobre la composición edafofaunística de los páramos que circundan la ciudad de Bogotá. *Suelos Ecuatoriales* 19(1): 48-62.

CHAMORRO, C.; G. AMAT; E. CASTILLO y L. SOTO. 1986. La macrofauna de los suelos bajo condiciones de quemadas, zurales y drenajes en la región de Marandúa (Vichada, Colombia). En: Diagnóstico geográfico nororiente del Vichada. Vol. 5.2: Suelos. IGAC. Bogotá. pp: 93-150.

COCHRAN, V. L.; S. D. SPARROW and E. B. SPARROW. 1994. Residue effects on soil micro and macroorganisms. In: Managing Agricultural Residues. Unger P. W. editor. Lewis Publishers. USA. pp: 163-184.

CORTÉS, A.; C. CHAMORRO y A. VEGA. 1990. Cambios en el suelo por la implantación de praderas, coníferas y eucaliptos en un área aledaña al embalse del Neusa (Páramo de Guerrero). En: Biología del suelo. Investigaciones Subdirección Agrológico. Vol. 2 Nº. 1. IGAC - Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. pp: 101-114.

DEBANO, L. F. 1981. Water repellent soils: A state of the art. General Technical Report PSW-46 Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. United States Department of Agriculture (USDA). Berkeley. California. 21 p.

ESCOBAR, A. 1997. Dinámica de la lombriz de tierra en suelos de ladera de bs-T en función del tiempo de protección. Tesis Ingeniería Agronómica. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Medellín. 134 p.

ESPINAL, S. 1991. Apuntes ecológicos. Editorial Lealon. Medellín. 152 p.

FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA (FEDERACAFÉ). 1975. Manual de conservación de suelos de ladera. Cenicafé. Chinchiná. 267 p.

- FISHER, R. V. and H. U. SCHMINCKE. 1984. Pyroclastic rocks. Springer Verlag. Berlín. 471 p.
- FLÓREZ, A. s. f. Transecto Tatamá, Cordillera Occidental: Aspectos Climatológicos y Geomorfológicos. Análisis Geográficos N. 3. IGAC. Bogotá. 86 p.
- FORERO, M. C.; J. PÉREZ; S. GAONA y D. F. JARAMILLO. 1981. Metodología para la delimitación de áreas homogéneas. Proyecto OPSA – CIAF. Centro Interamericano de Fotointerpretación (CIAF). Bogotá. 267 p.
- GARCÍA, R. s. f. Características pluviotérmicas y sus variaciones por la altitud: Un aporte para el análisis de los pisos bioclimáticos en Colombia. En: Fundamentos para la definición de pisos bioclimáticos. Análisis Geográficos No. 11. IGAC. Bogotá. pp: 15-52.
- GONZÁLEZ, B. M. 1983. Meteorización química en la parte occidental de las cuencas de los ríos Guatapé y San Carlos. Tesis (Ingeniero Geólogo). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Medellín. 94 p.
- GONZÁLEZ, L. H. y D. F. JARAMILLO. 1986. Estudio general de Geomorfología y Suelos y detallado de Uso de la Tierra en la explotación de asbestos de Minera Las Brisas S. A., municipio de Campamento, Antioquia. Informe interno inédito. Medellín. 69 p.
- GROVE, T. 2000. Origin of magmas. In: Encyclopedia of volcanoes. Sigurdsson, H. et al editors. Academic Press. San Diego. pp: 133-147.
- HOLDRIDGE, L. R. 1979. Ecología basada en zonas de vida. IICA. San José. 216 p.
- INFANTE, J. y C. CHAMORRO. 1990. Influencia del uso del suelo sobre la mesofauna edáfica en el páramo de Chingaza (Cundinamarca, Colombia). En: Biología de Suelos. Investigaciones Subdirección Agrológico. Vol. 2 Nº. 1. IGAC - Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. pp: 115-150.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC). 1986. Acción pedobiológica de la mesofauna en algunos suelos de la Orinoquia. En: Diagnóstico geográfico nororiente del Vichada. Vol. 5.2: Suelos. IGAC. Bogotá. pp: 60-92.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC). 1985. Zonificación agroecológica de Colombia. IGAC. Bogotá. 53 p.
- JARAMILLO, D. F. 1997a. Relación fisiografía – suelos en las áreas colinadas bajas de la zona comprendida entre La Pintada y el río Poblano (Antioquia). Revista ICNE 6 (2): 43-51.
- JARAMILLO, D. F. 1997b. Relación fisiografía – suelos en los alrededores de la cabecera municipal de Amagá, suroeste antioqueño. Revista ICNE 6 (2): 53-61.
- JARAMILLO, D. F. 1996. Estudio de una cronosecuencia de suelos en el bajo cauca (Antioquia). Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín. 49 (1-2): 53-64.
- KUMADA, K. 1987. Chemistry of soil organic matter. Japan Scientific Societies Press. Elsevier. Tokyo. 241 p.
- MADRIGAL, C. y C. DUQUE. 1972. Notas sobre fitonematología. Seminario Agronomía. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Medellín. 124 p.
- MALAGÓN, D. 1977. Mineralogía de algunos suelos colombianos. Suelos Ecuatoriales 8 (1): 316-321.
- MALAGÓN, D.; C. PULIDO; R. LLINÁS y C. CHAMORRO. 1995. Suelos de Colombia: Origen, evolución, clasificación, distribución y uso. IGAC. Bogotá. 632 p.

- MARRISSEY, M.; B. ZIMANOWSKI; K. WOHLETZ and R. BUETTNER. 2000. Phreatomagmatic fragmentation. In: Encyclopedia of volcanoes. Sigurdsson, H. et al editors. Academic Press. San Diego. pp: 431-445.
- MARULANDA, J. y C. PULIDO. 1984. Mineralogía de arcillas de algunos suelos colombianos. Suelos Ecuatoriales 14 (1): 118-125.
- MEDENBACH, O. y C. S. SUSSIECK - FORNEFELD. 1983. Minerales. Editorial Blume. Barcelona. 287 p.
- MEJÍA, L. 1991. Utilidad e importancia del análisis químico total en el estudio de la génesis, composición y contaminación de los suelos. En: Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y agua para riego. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá. pp: 67-96.
- MEJÍA, L. 1981. La relación clima – suelo: I. Influencia del clima en la formación y características de los suelos. CIAF. Bogotá. 46 p.
- MEJÍA, L. 1980a. Conceptos básicos comunes a la Pedología y Geomorfología. CIAF. Bogotá. 278 p.
- MEJÍA, L. 1980b. La mineralogía del suelo y sus relaciones con la fertilidad. En: Fertilidad de suelos: Diagnóstico y control. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá. pp: 29-84.
- MESA, O.; G. POVEDA y L. F. CARVAJAL. 1997. Introducción al clima de Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Medellín. 390 p.
- MOORMANN, F. R. 1984. Classification of Alfisols and Ultisols with low activity clay. In: Proceedings of a Symposium on Low Activity Clay (LAC). Soil SMSS Technical Monograph N° 14. Las Vegas. pp: 1-12.
- MORENO, F. 1987. Comparación de algunas propiedades de suelos volcánicos bajo bosques naturales, potreros y plantaciones forestales. Tesis (Ingeniero Forestal). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Agronomía. Medellín. 186 p.
- MOSQUERA, L. 1986. Clasificación de las tierras por su capacidad de uso. IGAC. Bogotá. 37 p.
- MOTTA, B. et al. 1990. Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos. 5^a. Ed. IGAC. Bogotá. 502 p.
- MUNEVAR, F. 1991. Conceptos sobre la materia orgánica y el nitrógeno del suelo, relacionados con la interpretación de análisis químicos. En: Fundamentos para la Interpretación de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas para riego. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá. pp. 227-244.
- NIKONOVA, S. I. y V. P. TSIPLIONKOV. 1989. Los lípidos en la materia orgánica de los suelos. Ciencias de la Agricultura 37-38: 136-147.
- OROZCO, F. H. 1999. Biología del nitrógeno. Conceptos básicos sobre sus transformaciones biológicas. Tomo I. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín. 231 p.
- PARISI, V. 1979. Biología y ecología del suelo. Editorial Blume. Barcelona. 169 p.
- PAUL, E. A. and F. E. CLARK. 1989. Soil microbiology and biochemistry. Academic Press Inc. Londres. 275 p.
- PORTA, J.; M. LÓPEZ – ACEVEDO y C. ROQUERO. 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi Prensa. Madrid. 807 p.
- PRITCHETT, W. L. 1991. Suelos forestales: Propiedades, conservación y mejoramiento. Editorial Limusa. México. 634 p.

- ROGERS, N. and CH. HAWKESWORTH. 2000. Composition of magmas. In: Encyclopedia of volcanoes. Sigurdsson, H. et al editors. Academic Press. San Diego. pp: 115-131.
- ROMERO, M. y C. CHAMORRO. 1991. Utilización de *Eisenia fetida* en labores agrícolas. Suelos Ecuatoriales 21 (2): 155-163.
- SALAMANCA, S. s. f. Distribución altitudinal de la vegetación en los Andes centrales de Colombia. En: Fundamentos para la definición de pisos bioclimáticos. Análisis Geográficos Nº. 11. IGAC. Bogotá. pp: 53-84.
- SOIL SURVEY STAFF (SSS). 1994. Keys to soil taxonomy . 6^a. Ed. USDA. Washington D. C. 306 p.
- SOIL SURVEY DIVISION STAFF (SSDS). 1993. Soil survey manual. Handbook No. 18. USDA. Washington D. C. 437 p.
- STRAHLER, A. 1979. Geografía física. 4^a. Ed. Editorial Omega S. A. Barcelona. 767 p.
- TARBUCK, E. y F. LUTGENS. 1999. Ciencias de la tierra: Una introducción a la Geología Física. 6^a. Ed. Prentice Hall Iberia S. R. L. Madrid. 572 p.
- TRUJILLO, G. 1980. Curso de mineralogía general. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 186 p.
- VILLOTA, H. 1997. Una nueva aproximación a la clasificación fisiográfica del terreno 1997. Revista CIAF 15: 83-115.
- VILLOTA, H. 1991. Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de las tierras. IGAC. Santafé de Bogotá. 212 p.
- WOLFF, J. A. and J. M. SUMNER. 2000. Lava fountains and their products. In: Encyclopedia of volcanoes. Sigurdsson, H. et al editors. Academic Press. San Diego. pp: 321-329.
- YOUNG, A. 1994. Agroforestry for soil conservation. CAB International. BPC Wheatons Ltd. U. K. 276 p.
- ZERDA, M. y C. CHAMORRO. 1990. Influencia del uso del suelo sobre la mesofauna edáfica en el páramo de Chizacá (Cundinamarca, Colombia). En: Biología de Suelos. Investigaciones Subdirección Agrológico. Vol. 2 Nº. 1. IGAC - Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. pp: 47-60.
- ZULUAGA, D. et al. 1995. Componente bioedáfico de los suelos del área de Caño Limón (Arauca - Colombia). Suelos Ecuatoriales 25: 109-111.

AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Cuáles son los factores de formación del suelo?.
2. ¿Por qué la evapotranspiración es una de las variables climáticas más importantes en la relación clima – suelo?.
3. En Colombia ¿cuál es la condición de humedad climática que predomina?.
4. ¿Cómo se define textura en rocas ígneas?. ¿Cuáles son las texturas que se presentan en esas rocas y cómo se identifican?. Dé un ejemplo de roca para cada textura descrita.
5. ¿Cómo se diferencia una roca sedimentaria de un sedimento?.
6. ¿Qué es foliación en rocas metamórficas?. ¿Cuáles tipos de foliación hay?.
7. ¿Cuál es la diferencia entre un mineral primario y uno secundario?.
8. ¿Cuáles son los minerales primarios más comunes en los suelos?.
9. En los suelos colombianos ¿cuál grupo de filosilicatos secundarios predomina?.

10. ¿Por qué es importante el cuarzo en el estudio del suelo?.
11. ¿Cuál es el material parental que ocupa mayor área en Colombia?.
12. ¿Cuál es el grupo de microorganismos más abundante en el suelo?. ¿Cuáles son las condiciones ambientales que más lo favorecen?.
13. En un suelo de clima frío húmedo, ácido, con alto contenido de materia orgánica poco descompuesta y bajo en bases, ¿cuál grupo de microorganismos será dominante? ¿Por qué?.
14. ¿Cuál es el macroorganismo más importante de la fauna del suelo?..
15. Diga 10 efectos que tenga la biota sobre el suelo.
16. ¿La acción del hombre sobre el suelo siempre es nociva?. Explique.
17. De los componentes orgánicos que posee el suelo, ¿cuál es el más importante y por qué?.
18. ¿Qué se entiende por mineralización de la materia orgánica?. ¿Y por humificación?.
19. ¿Qué es el humus del suelo?.
20. Diga 3 factores que causen pérdidas de materia orgánica en el suelo.
21. Diga 5 propiedades del suelo que se relacionen directamente con la materia orgánica del mismo.
22. ¿Cómo se relaciona el relieve con las condiciones de drenaje del suelo?. ¿Y con la erosión?.
23. ¿Qué es una vertiente y cómo se relaciona con el desarrollo del suelo?.
24. ¿Cuál es el período de edad geológica más importante en la pedogénesis?.
25. ¿Qué relación general puede establecerse entre la evolución del suelo y su fertilidad?.¿Por qué?.
26. ¿Hay alguna diferencia entre edad y evolución del suelo?. ¿Cuál?.

EVALUACIÓN

1. En el informe de un levantamiento de suelos de alguna región, buscar las características de dos suelos derivados del mismo material parental, ubicados en diferentes condiciones climáticas y con el mismo tipo de relieve; hacer una comparación de los suelos encontrados y tratar de establecer cuáles de las propiedades evaluadas han sido más controladas por cada uno de los factores de formación del suelo; las respuestas deben ser sustentadas adecuadamente. Discuta sus apreciaciones en grupos de compañeros, pueden haber alternativas que usted no consideró.
2. Defina 5 diferencias que usted esperaría encontrar entre dos suelos derivados del mismo material parental, uno ubicado en clima frío húmedo y el otro en clima frío seco.

LOS PROCESOS PEDOGENÉTICOS

CAPÍTULO 2

CONTENIDO

- ❖ Los procesos globales
- ❖ Los procesos específicos
 - De adiciones
 - De transformaciones
 - De translocaciones
 - De pérdidas
 - Complejos
 - Andolización
 - Podzolización
 - Ferralitización

OBJETIVOS

- ❖ Conocer los procesos más importantes de la pedogénesis
- ❖ Conocer el efecto que producen, en el suelo, los procesos pedogenéticos
- ❖ Aprender a identificar la acción de algunos procesos en el suelo, mediante la observación de los rasgos morfológicos que dejan en él
- ❖ Conocer los procesos pedogenéticos que predominan en la evolución de la mayoría de los suelos agrupados en la categoría de orden taxonómico

E

l proceso que es pedogenético por excelencia es el de la **estructuración** ya que es el que le da la identidad al suelo y lo diferencia de un saprolito o de un depósito sedimentario. La formación de estructura implica aglutinar las partículas individuales que componen los sólidos del suelo en unas unidades complejas y mantenerlas unidas a través del tiempo, definiendo así la configuración física del suelo. A pesar de ser tan importante este proceso, su tratamiento no se hará en este capítulo; él será discutido con cierta amplitud en el Capítulo 3.

Durante el desarrollo del suelo se realizan una serie de procesos que le van imprimiendo las características y propiedades que lo caracterizan. Estos procesos se llaman pedogenéticos porque definen directamente las características y propiedades que diferenciarán los distintos suelos. El tipo de procesos, así como la intensidad con la cual ellos actúan, es controlado por los factores de formación que se discutieron en el capítulo anterior.

Los procesos pedogenéticos se pueden estudiar en varios niveles de detalle; por esta razón se establecen dos grupos fundamentales de procesos: Globales y Específicos.

1. LOS PROCESOS GLOBALES

En esta categoría se agrupan los procesos de acuerdo con el efecto que producen en el suelo, como lo muestra la Figura 2.1; los procesos resultantes se denominan: Adiciones, Transformaciones, Translocaciones y Pérdidas.



FIGURA 2.1. Los procesos pedogenéticos globales. (Modificado de Birkeland, 1980).

Las **adiciones** comprenden todos aquellos procesos que le aportan algo al suelo, es decir, las entradas que tiene el mismo; las **transformaciones** comprenden los procesos que implican cambios en las formas originales de cualesquiera de los componentes del suelo. Todos los movimientos de materiales que se producen dentro del suelo, siempre y cuando no se desplacen fuera del mismo se consideran **translocaciones**; la extracción o remoción definitiva de cualquier componente del suelo se considera una **pérdida**.

2. LOS PROCESOS ESPECÍFICOS

Como su nombre lo implica, son procesos que tienen unos efectos muy especiales en el suelo; en la literatura se encuentran definidos gran cantidad de estos procesos (Porta et al, 1994; Buol et al, 1997, Bockheim y Gennadiyev, 2000, son algunos ejemplos). En este documento sólo se tratarán algunos de los más frecuentes e importantes en los suelos de Colombia, agrupados según las categorías generales a las cuales pertenecen, de acuerdo a lo expuesto en el numeral anterior; las definiciones se tomarán principalmente de Bockheim y Gennadiyev (2000), Buol et al (1997), Malagón et al (1995) y de Porta et al (1994). Durante el desarrollo de este tema se hará mención frecuente de términos taxonómicos por lo que se recomienda que para su comprensión el lector se remita al Capítulo 20 de este texto.

2.1. PROCESOS ESPECÍFICOS DE ADICIONES

- **Littering:** Es la acumulación de materiales orgánicos en la superficie del suelo, principalmente vegetales; este proceso es el responsable de la formación de las capas de hojarasca que con frecuencia se observan en los suelos que se están desarrollando bajo la cobertura de los bosques, las cuales se identifican como **horizontes** o **capas O** (ver Capítulo 5) y que pueden llegar a ser **epipedones hísticos** (ver Capítulo 20).
- **Cumulización:** Conocida también como **acreción**, es la adición de partículas minerales a la superficie del suelo, sin importar el agente que las haya transportado. Son frecuentes los aportes de materiales aluviales, producto de los desbordamientos de los ríos, así como los de piroclastos provenientes de la actividad volcánica; la coluviaión también es un proceso geomorfológico que aporta buenas cantidades de materiales a la acumulación en los suelos aledaños a las áreas más pendientes y desprotegidas de los paisajes.

2.2. PROCESOS ESPECÍFICOS DE TRANSFORMACIONES

- **Humificación:** Se refiere a la transformación de los materiales orgánicos frescos en **humus**; este proceso es el responsable, en buena medida, de la acumulación de materia orgánica en el suelo y del color oscuro de la parte superficial de éste. Promueve la formación de **horizontes A** (ver Capítulo 5) en el suelo, que pueden llegar a formar, desde el punto de vista taxonómico, los epipedones más comunes como el **mólico** (característico de los Mollisoles), el **úmbrico**, el **antrópico**, el **melánico** o el **órico** (ver Capítulo 20).
- **Mineralización:** Se refiere a la transformación de ciertos elementos de compuestos orgánicos a compuestos inorgánicos; este proceso depende, en gran parte, de los microorganismos del suelo y, contrario al anterior, genera pérdidas netas de materia orgánica en él.

- **Gleización o gleyzación:** Hace referencia a la formación de compuestos ferrosos, debido a la presencia de condiciones reductoras en el medio. Este proceso genera **colores grises** y/o **moteos** en el suelo y pone de manifiesto la presencia de condiciones de **mal drenaje** o de **niveles freáticos** fluctuantes en el suelo. Es característico de los suelos que se encuentran en condiciones de régimen ácuico.
- **Rubefacción o rubificación:** Se refiere a la deshidratación progresiva de sesquióxidos de hierro; es el responsable del **enrojecimiento** del suelo; cuando los óxidos de hierro que se forman se unen con materia orgánica, el color del suelo es pardo y el proceso se llama **marronización** o **braunificación**; en los últimos estados de oxidación del hierro, el color del suelo es rojo y el proceso se define como **ferruginación**. El proceso de rubefacción es frecuente en los **horizontes B cámbicos** (característicos de los Inceptisoles) y, cuando se presenta como ferruginación, puede estar definiendo un **horizonte B óxico** (diagnóstico de los Oxisoles) (ver Capítulo 20).
- **Endurecimiento: ¿Adensamiento?**: Es la disminución de la cantidad de poros del suelo, por efecto de la compactación, del colapso de la estructura, de la cementación o del relleno de algunos poros con partículas finas u otros materiales sólidos.
- **Esponjamiento** (Loosening, en inglés): También puede traducirse como **aflojamiento**?; se refiere al incremento en el espacio vacío del suelo, por efecto de la actividad de las plantas, los animales y/o del hombre, así como por efecto de la alternancia de congelamiento y descongelamiento o de otros procesos físicos; también puede presentarse por la remoción de materiales por lixiviación.

2.3. PROCESOS ESPECÍFICOS DE TRANSLOCACIONES

- **Eluviación:** Es el movimiento de salida de algún material de una porción del suelo; esta porción del suelo se presenta empobrecida en el material que está aportando, con respecto a la porción del suelo que lo está recibiendo y que se encuentra ubicada por debajo de aquella dentro del suelo. Este proceso genera un **horizonte E** (ver Capítulo 5) que, cuando está muy avanzada la salida de materiales coloidales de él, se decolora, dando lugar a un horizonte diagnóstico **álbico** (todos los álbicos son E, pero no todos los E son álbicos). Los horizontes álbicos son frecuentes en los Espodosoles (ver Capítulo 20).
- **Iluviación:** Se refiere a la entrada de algún material a una porción del suelo; esta porción del suelo presenta un enriquecimiento en el material que recibe, con respecto al contenido que presenta el resto del suelo en él. Este proceso genera horizontes B; si la acumulación es de arcilla, se generan horizontes **argílico**, **nátrico** o **kándico**, frecuentes en Alfisoles, en Aridisoles y en Ultisoles; si lo que se está acumulando es materia orgánica, con o sin Fe, se pueden formar horizontes **espódico** (característico de los Espodosoles), **plácico**, **sómbrico** o **ágrico** (ver Capítulo 20).
- **Desalinización, Salinización:** Son procesos de salida y acumulación, respectivamente, de sales solubles en una porción del suelo. En la parte del suelo donde se están acumulando las sales, se puede generar un horizonte **sálico**. Son procesos frecuentes en Aridisoles, así como en Mollisoles y Alfisoles de climas secos (ver Capítulo 20).

- **Decalcificación, Calcificación:** Se refieren a la salida y acumulación, respectivamente, de carbonato de calcio en una porción del suelo. En la porción donde se acumula el carbonato, se puede llegar a formar un horizonte **cálcico** y, si además, dicho horizonte se cementa, se convierte en un horizonte **petrocálcico**. El proceso de calcificación se detecta, en campo, adicionando HCl al material del suelo: si se presenta efervescencia, ese suelo tiene carbonato de calcio libre acumulado. Son procesos importantes en los Mollisoles y Alfisoles de clima seco, así como en los Aridisoles (ver Capítulo 20).
- **Desalcalinización, Alcalinización:** Se refieren a la salida y acumulación, respectivamente, de iones Na^+ de los sitios de intercambio en alguna porción del suelo. Si la acumulación de sodio se está produciendo en un horizonte argílico, se puede alcanzar a formar un horizonte **nátrico**. Frecuentes en Alfisoles, Vertisoles y Mollisoles de climas secos, además de los Aridisoles (ver Capítulo 20).
- **Lessivage:** Definido como **argiluviación** por Bockheim y Gennadiyev (2000), es la migración mecánica de pequeñas partículas de arcilla, dentro del solum. Este proceso puede participar en la formación de horizontes como argílico o nátrico (en Alfisoles, Ultisoles, Mollisoles y Aridisoles) (ver Capítulo 20) y tiene mucha importancia en suelos con arcillas expansivas (Vertisoles) ya que, el agrietamiento que se produce en ellos, genera vías expeditas para el movimiento de sólidos en seco.
- **Edafoturbación o Pedoturbación:** Es la mezcla que se hace de los materiales de alguna parte del solum; dependiendo del agente causal de la mezcla se establecen varios nombres para el proceso. Los más frecuentes son: La **Argiloturbación** es la mezcla producida por la acción de las arcillas; se presenta cuando hay arcillas expansivas y produce las propiedades vérticas (Vertisoles); es equivalente al proceso de **vertización** definido por Bockheim y Gennadiyev (2000); la **Bioturbación** es producida por la fauna del suelo y es importante en Mollisoles; la **Crioturbación**, por el congelamiento y descongelamiento del agua presente, especialmente, en los Gelisoles; la **Antroturbación**: se propone en este documento como equivalente al proceso que Bockheim y Gennadiyev (2000) identifican como **antrosolización** para referirse a la mezcla de materiales que realiza el hombre; por ejemplo, mezclas de horizontes por mecanización, mezclas de suelo con abonos orgánicos, fertilizantes o enmiendas químicas, etc. Este proceso puede formar horizontes plágénos o antrópicos, importantes en los Inceptisoles y Entisoles (ver Capítulo 20).
- **Melanización:** Es la acumulación de materiales orgánicos de color oscuro, en alguna porción del suelo, generalmente recubriendo sus partículas o sus agregados minerales y oscureciendo el horizonte en que se produce; en algunas ocasiones es un proceso de iluviaión de humus. Es un proceso de estabilización de materia orgánica, en complejos órgano-minerales, que puede llevar a la formación de epipedones **melánicos** en Andisoles, de mólicos en Mollisoles o de úmbricos en Inceptisoles y otros órdenes (ver Capítulo 20).
- **Leucinización:** Es la remoción de materiales orgánicos de color oscuro, de alguna porción del suelo, imponiéndole un color claro a la misma; en algunas ocasiones puede ser un proceso de translocación de materiales orgánicos oscuros dentro del suelo o una

pérdida definitiva de ellos del solum. También puede presentarse por la transformación de materiales orgánicos oscuros a otros de colores claros.

- **Desilicación:** Es la remoción de sílice de alguna porción del suelo; es un proceso común en suelos de ambientes húmedos y con altas temperaturas. Favorece la acumulación de sesquióxidos de Fe (**ferritización**) o de Al (**alitización**) o de ambos (**ferralización**). Estos procesos son muy importantes en los Oxisoles y Ultisoles, así como en Inceptisoles distróficos (ver Capítulo 20).
- **Resilicación o silicificación:** Es la adición de Si a las estructuras de las arcillas, en alguna porción del suelo, transformándolas en nuevas especies. En el caso de que el Si cemente el horizonte en el que se está acumulando se produce un **duriapán** (ver Capítulo 20).

2.4. PROCESOS ESPECÍFICOS DE PÉRDIDAS

- **Erosión:** Es el retiro de materiales sólidos del suelo por cualquier agente y mecanismo. En Colombia, el principal agente de erosión es el agua, sobretodo la de lluvia (**erosión pluvial**), la cual actúa mediante dos mecanismos fundamentales: **Disgregación** de partículas de suelo por el golpe de las gotas y **arrastre** de esas partículas por las aguas de **escorrentía** (aguas que corren sobre la superficie del terreno). Este proceso es especialmente eficiente en zonas que presentan climas secos, debido a que el desarrollo de la vegetación es restringido y, por tanto, la cobertura del suelo es deficiente; cuando se presentan las lluvias, hay una gran área de suelo descubierto expuesto a la acción directa de la lluvia.
- **Lixiviación:** Es llamado también **Lavado** y se refiere a la eliminación de materiales del suelo en solución. Este proceso es el responsable de la evacuación de las bases de los suelos que se desarrollan en zonas con climas muy húmedos, donde la precipitación es mayor que la evapotranspiración, con lo cual queda un excedente de agua que se mueve a través del suelo, lavándolo. En Colombia es un proceso muy activo en los suelos de la amazonia y la orinoquia, donde ha contribuido a generar los Oxisoles y Ultisoles, así como los Inceptisoles desaturados que hay en aquellas regiones; también se manifiesta en los Inceptisoles y Andisoles de las cordilleras y en los suelos de la costa pacífica (ver Capítulos 20 y 24).

2.5. PROCESOS ESPECÍFICOS COMPLEJOS

Se agrupan en esta categoría algunos procesos que producen, en su conjunto, perfiles de suelos especiales y que involucran varios procesos específicos simples de los descritos en los numerales anteriores.

2.5.1. Andolización

Es el responsable de la formación de los Andisoles (ver Capítulo 20); se presenta una alteración no muy intensa de los materiales parentales cuyos productos forman nuevos materiales (síntesis) inorgánicos no cristalinos; por otro lado, se presenta una humificación importante de los residuos orgánicos que se adicionan al suelo; generalmente, hay lixiviación de bases.

Los compuestos húmicos, que se forman en el suelo, se complejan con aluminio y/o con hierro y se pueden estabilizar con parte de los compuestos inorgánicos no cristalinos. A medida que aumenta la evolución, se puede presentar una melanización intensa (Shoji et al, 1993).

2.5.2. Podzolización

Es la formación de Espodosoles (ver Capítulo 20); se inicia con la alteración del material parental que libera aluminio y/o hierro y con la humificación de los materiales orgánicos presentes; hay una lixiviación intensa de bases y una alta acidificación del medio que favorece la quelatación del aluminio y del hierro por los compuestos orgánicos y los procesos de eluviación – iluviaión de aquellos quelatos.

En el horizonte espódico se presentan procesos de rubefacción, de marronización o, incluso de melanización, dependiendo de la composición de los materiales que se estén acumulando en él. En el horizonte eluvial se presenta acumulación de sílice y leucinización.

2.5.3. Ferralitización

También llamado **laterización**, es un proceso de lixiviación intensa de bases y de sílice que genera acumulación de Fe como óxido férrico; la formación de estos compuestos conlleva procesos secuenciales de rubefacción, marronización y ferruginación, con algo de humificación en el horizonte superficial del suelo. Los procesos descritos son característicos de climas tropicales (cálido húmedo) y llevan a la formación de Oxisoles (ver Capítulo 20).

RECORDAR

- Los procesos pedogenéticos producen adiciones, transformaciones, translocaciones y/o pérdidas.
- En ambientes tropicales son determinantes la mineralización, la lixiviación y la desilicación, en el desarrollo de los suelos.
- En Colombia, los procesos complejos de andolización y de ferralitización, así como los de eluviación – iluviaión, afectan amplias áreas.

BIBLIOGRAFÍA

BIRKELAND, P. W. 1980. Pedology, Weathering and Geomorphological Research. Oxford University Press Inc. New York. 285 p.

BOCKHEIM, J. G. and A. N. GENNADIYEV. 2000. The role of soil-forming proceses in the definition of taxa in Soil Taxonomy and World Soil Reference Base. Geoderma 95: 53-72.

BUOL, S. W.; F. D. HOLE; R. J. McCRAKEN. and R. J. SOUTHARD. 1997. Soil Genesis and Classification. 4^a. Ed. Iowa State University Press. Iowa U. S. A. 527 p.

MALAGÓN, D.; C. PULIDO; R. LLINÁS y C. CHAMORRO. 1995. Suelos de Colombia: Origen, evolución, clasificación, distribución y uso. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá. 632 p.

PORTE, J.; M. LÓPEZ – ACEVEDO y C. ROQUERO. 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi Prensa. Madrid. 807 p.

SHOJI, S.; R. DAHLGREN and M. NANZYO. 1993. Genesis of volcanic ash soils. In: Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization. Developments in Soil Science 21. Elsevier. Amsterdam. pp: 37-71.

AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Cuáles son los procesos pedogenéticos globales?.
2. Defina los siguientes procesos específicos: Littering, humificación, mineralización, gleización, eluviación, iluviación, melanización, erosión, lixiviación.
3. Mencione por lo menos 4 procesos pedogenéticos específicos cuyo efecto se manifieste en el color del suelo. ¿Cuáles son los colores que produce cada uno?.
4. ¿Bajo qué condiciones ambientales es importante el proceso de erosión pluvial?. ¿Porqué es así?.
5. Diga 2 procesos específicos complejos que afecten suelos importantes en Colombia.
6. Diga 3 procesos pedogenéticos específicos importantes en suelos que se estén desarrollando bajo condiciones tropicales.
7. Diga 3 procesos específicos frecuentes en los siguientes taxa de suelos: Andisol, Alfisol, Espodosol, Oxisol, Ultisol.
8. Diga 2 procesos específicos que produzcan cambios físicos en el suelo, diferentes, obviamente, al color.

EVALUACIÓN

Establezca, para los suelos analizados en la evaluación del Capítulo 1, una lista, lo más completa posible, de los procesos pedogenéticos específicos que han intervenido en su desarrollo, indicando las evidencias que encontró para identificarlos; como allá, es más productivo el ejercicio si se hace en grupo.

*LAS PROPIEDADES
MACROMORFOLÓGICAS
DEL SUELO*

PARTE 2

LAS PROPIEDADES MACROMORFOLÓGICAS DEL SUELO

LA ESTRUCTURA DEL SUELO

- ❖ Floculación
- ❖ Origen e importancia de la estructura del suelo
- ❖ Propiedades de la estructura del suelo
- ❖ Caracterización de la estructura del suelo
- ❖ Estabilidad estructural

EL COLOR DEL SUELO

- ❖ Importancia
- ❖ Determinación
- ❖ Patrones especiales de color en el suelo

EL PERFIL DEL SUELO

- ❖ Los horizontes y capas maestros del suelo
- ❖ Horizontes combinados
- ❖ Características subordinadas de los horizontes y capas maestros del suelo
- ❖ Subdivisiones verticales
- ❖ Discontinuidades litológicas
- ❖ Las secuencias de horizontes o capas
- ❖ Descripción del perfil del suelo

L

a acción de los procesos pedogenéticos va produciendo efectos especiales sobre la porción del suelo en que actúan, imprimiéndole algunos rasgos característicos que van diferenciando estas porciones del resto del suelo. Algunos procesos actúan sobre todo el solum, produciendo un suelo homogéneo en todo su espesor.

A medida que la evolución del suelo avanza, las partículas sólidas de él se unen entre sí de diversas formas, generando unidades de mayor tamaño llamadas **agregados, unidades estructurales o peds**. El arreglo que se produce con estos sólidos es lo que se denomina **estructura del suelo**.

La mayoría de los procesos pedogenéticos produce en el suelo colores específicos. Ésta es la característica más visible de su acción; lo anterior hace que este rasgo morfológico sea uno de los más utilizados para empezar a aproximarse al análisis de la génesis de un suelo.

Cuando los procesos pedogenéticos actúan sobre porciones específicas del suelo, el resultado final es la diferenciación de porciones dentro de él, es decir, su **horizonación** o formación de horizontes; cuando todo el suelo es sometido a los mismos procesos, el resultado es la **haploidización**, es decir, no formación de horizontes.

El efecto más común en los suelos es la horizonación, la cual va siendo mejor definida en la medida en que avanza la evolución del suelo; la haploidización es el efecto dominante en los suelos que poseen alta cantidad de arcillas expansibles, debido a que la argiloturbación está mezclando permanentemente todo el suelo, impidiendo la formación de horizontes; este efecto es el responsable de la formación de los Vertisoles.

Un caso especial de haploidización puede tenerse por debajo del horizonte superficial en Oxisoles muy evolucionados, debido a la intensa meteorización de minerales primarios, a la síntesis y acumulación de sesquióxidos de Fe y Al y a la falta de procesos de eluvión – iluvión en ellos; estas condiciones van definiendo un solum con espesos horizontes rojos, en el cual es difícil establecer separaciones.

LA ESTRUCTURA DEL SUELO

CAPÍTULO 3

CONTENIDO

- ❖ Floculación
- ❖ Origen e importancia de la estructura del suelo
- ❖ Propiedades de la estructura del suelo
- ❖ Caracterización de la estructura del suelo
 - En el campo
 - En el laboratorio
 - Interpretación
- ❖ Estabilidad estructural
 - Caracterización
 - Método de Yoder
 - Método de Henin
 - Interpretación

OBJETIVOS

- ❖ Conocer la forma como se organizan los sólidos del suelo
- ❖ Apreciar la importancia de la estructura en el funcionamiento y desarrollo del suelo
- ❖ Conocer la estabilidad de la estructura del suelo y los principales métodos para evaluarla
- ❖ Aprender a utilizar racionalmente el suelo, desde el punto de vista de su estructura

L

as partículas sólidas del suelo se unen entre sí de diversas formas, generando unidades de mayor tamaño llamadas **agregados, unidades estructurales o peds**. El arreglo que se produce con estos sólidos se denomina **estructura del suelo**.

1. FLOCULACIÓN

Es el proceso mediante el cual se unen las partículas sólidas del suelo entre sí, obedeciendo a diferentes mecanismos físico-químicos. Esta es realizada, generalmente, por fuerzas electrostáticas entre aquellas partículas y otros elementos del suelo como el agua o los cationes; esta unión no es permanente en el tiempo y puede desaparecer fácilmente, al cambiar las condiciones que la producen. También se puede producir mecánicamente, mediante la acción de raíz de plantas o de hifas de hongos (Baver et al, 1973); este último tipo se ha llamado, algunas veces, **bioestructura**.

En el suelo este fenómeno se presenta muy influenciado por la presencia de cationes polivalentes (Ca^{2+} , Al^{3+} , etc.), los cuales actúan como puente entre las partículas sólidas cargadas negativamente o entre moléculas de agua unidas a las partículas. A igual concentración de iones, el de mayor carga domina el proceso y su efecto es más rápido y produce flóculos más grandes, entre mayor sea la carga.

Un problema práctico inherente a la floculación es que puede alterar la determinación de la textura del suelo al impedir que se mantenga la dispersión del suelo durante todo el tiempo que dura el análisis, debido a que partículas de determinados tamaños se unen entre sí, formando pseudo-agregados de tamaños mayores que, obedeciendo a la ley de Stokes, sedimentan con una velocidad mayor que aquella a la cual lo harían las partículas individuales.

Para observar el fenómeno de la floculación, puede desarrollarse el siguiente ejercicio:

- Se preparan soluciones 1 N de los cationes Al^{3+} , Ca^{2+} , K^+ y Na^+ , a partir de cloruros.
- Se colocan 5 muestras de 50 g de un mismo suelo, previamente dispersadas (ver Numeral 2.1.2 del Capítulo 7), en sendos cilindros de 1000 mL y se completa el volumen de éstos con agua corriente; se deja sedimentar la suspensión por 2 horas y se hace una lectura con el **hidrómetro** al cabo de este tiempo (L_0).
- Se adiciona lenta y suavemente la cantidad de solución requerida para agregar 20 meq del catión correspondiente al respectivo cilindro, sin agitar la suspensión; se deja uno de los cilindros como testigo, sin adicionarle ningún catión.
- A partir del momento en que se adicionen las soluciones se hacen lecturas con el hidrómetro a los 2, 5, 10, 20 y 30 minutos.
- Se debe observar durante todo el proceso la cantidad de material precipitado y el tamaño de los flóculos formados.
- Los resultados se registran en un formulario como el que se presenta en la Figura 3.1 y se analizan desde el punto de vista de la carga de los cationes.

TRATAMIENTO	TIEMPO (min) PARA LAS LECTURAS CON EL HIDRÓMETRO					
	0 (L_0)	2	5	10	20	30
TESTIGO						
Al^{3+}						
Ca^{2+}						
K^+						
Na^+						

FIGURA 3.1. Formulario para el registro de lecturas hechas con el hidrómetro durante el proceso de floculación del suelo.

2. ORIGEN E IMPORTANCIA DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO

Para que se consolide una unidad estructural o ped, se requiere que haya inicialmente floculación. Para que los flóculos se mantengan unidos y estables frente a las condiciones adversas del medio, se requiere que las partículas que ya están unidas sean cementadas entre sí. Esta acción la realizan los coloides del suelo (arcillas, humus, óxidos de hierro y de aluminio); los mecanismos propuestos por Emerson para explicar la agregación de las partículas del suelo los analiza Hillel (1998) y con base en esta discusión se presenta la Figura 3.2.

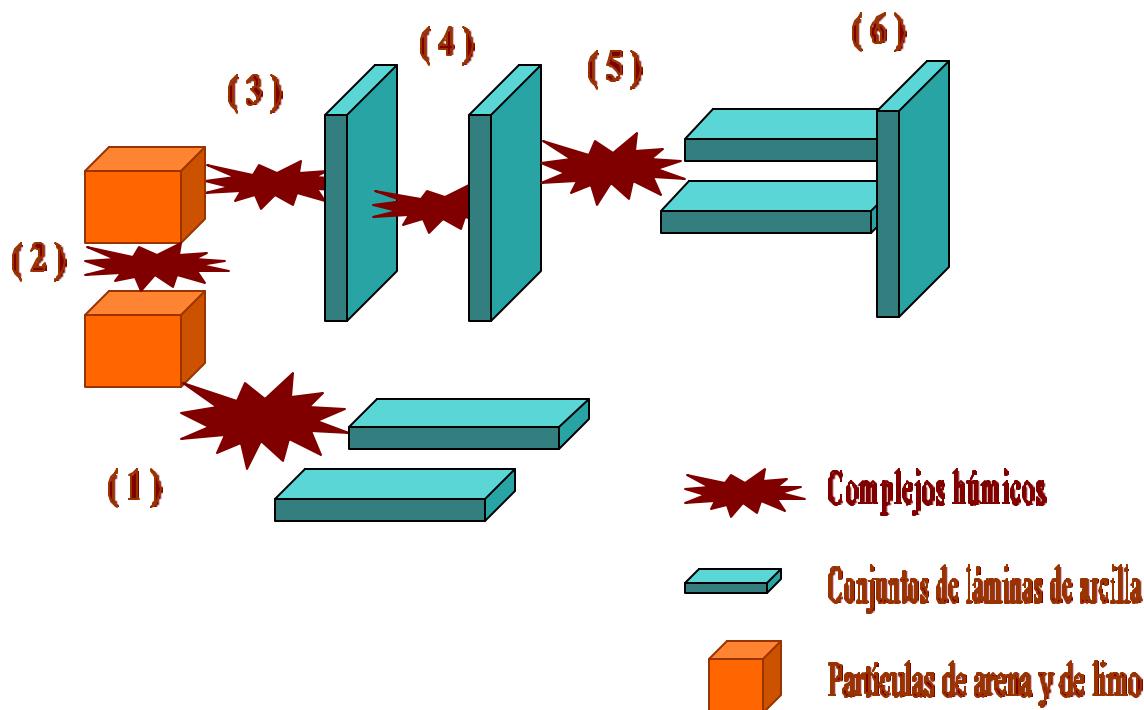


FIGURA 3.2. Mecanismos de unión entre partículas del suelo para formar agregados estructurales. (Elaborada con base en discusión de Hillel, 1998).

En el esquema de la Figura 3.2, las partículas de arena y de limo, mediante la acumulación de complejos húmicos entre las superficies de los granos, pueden unirse entre sí (2) o entre ellas y conjuntos de láminas de arcilla, bien sea por sus bordes (1) o por sus caras (3). A su vez, los

conjuntos de láminas de arcilla pueden unirse entre sí, ayudados por los complejos húmicos colocados entre las caras de las láminas (4) o entre las caras de un conjunto y los bordes de otro (5). Finalmente, las arcillas pueden unirse entre sí, sin intervención de los complejos húmicos, obedeciendo a fuerzas de atracción electrostáticas entre los bordes positivos y las caras negativas de los conjuntos de laminillas (6), mecanismo, este último, determinante en la agregación de suelos ácidos, según Emerson y Dettman, citados por Baver et al (1973).

En el desarrollo de la estructura del suelo intervienen varios agentes como:

- **Los macro y microorganismos**, tanto animales como vegetales, los cuales ejercen una agrupación de partículas mecánicamente por medio de sus hifas o de las raicillas. Estos organismos, luego, ayudan a cementar las partículas entre sí, con sus exudados o con los productos de su descomposición. Como se ha mencionado anteriormente, ésta es la **bioestructura** y es frecuente en los horizontes superficiales de suelos desarrollados bajo praderas de gramíneas cuyas raíces ocupan densa y completamente esa porción del suelo. También se consideran como bioestructura los pseudoagregados formados por los excrementos de las lombrices; cabe destacar que estas unidades son de corta duración pues su estabilidad es muy baja.
- Los ciclos de **humedecimiento y secamiento** son indispensables para que se produzca la deshidratación progresiva de los coloides y la cementación final de los agregados.
- **La compresión, los iones, las sales y los coloides** ejercen efectos mecánicos y químicos sobre las partículas del suelo, uniéndolas y cementándolas.
- **El manejo del suelo.** Es un factor de especial importancia, sobretodo en lo relacionado con la conservación de la estructura del suelo; sus efectos se tratarán más ampliamente en apartes posteriores.

La estructura del suelo es una de sus principales propiedades, ya que el arreglo que presente la fase sólida está determinando el espacio que queda disponible para las otras dos fases de éste: la líquida y la gaseosa; puede decirse que esta propiedad es la que controla las interrelaciones entre las diferentes fases físicas del suelo y la dinámica de líquidos y gases en él, ya que tiene una influencia directa en propiedades como porosidad, densidad aparente, régimen hídrico, régimen térmico, permeabilidad, aireación, distribución de la materia orgánica, entre otras; por lo anterior, no es casual que se estime la degradación de un suelo de acuerdo con el grado de deterioro de su estructura.

La estructura puede mitigar los efectos nocivos que puede tener la textura en el medio físico del suelo; así por ejemplo, un suelo bien estructurado puede reducir, y hasta eliminar, los problemas de mal drenaje, baja permeabilidad y poca aireación inducidos por el empaquetamiento fuertemente ajustado de los separados que se presenta en un suelo de textura fina.

Otro aspecto que hace importante esta propiedad es la estrecha relación que hay entre su desarrollo y la **génesis del suelo**, como se puede ver en la Figura 3.3; la presencia de estructura en el suelo y su grado de desarrollo son evidencia de su evolución. Éste es un aspecto que no puede olvidarse, cuando se va a someter un suelo a prácticas intensivas de manejo, pues la destrucción o deterioro grave de ella es relativamente fácil de occasionar, pero su recuperación es mucho más difícil y lenta.

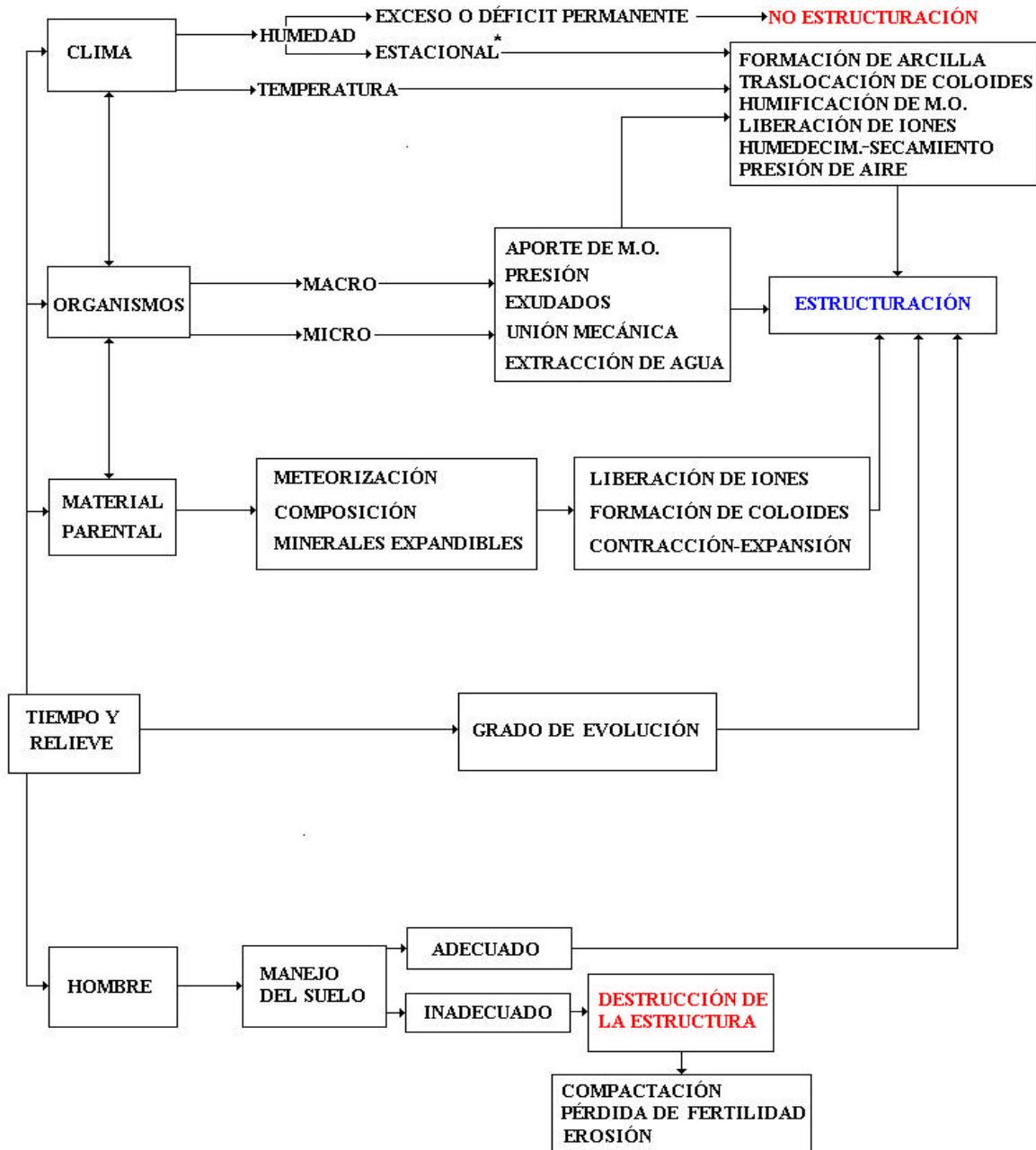


FIGURA 3.3. Representación esquemática generalizada del desarrollo de la estructura del suelo y de su carácter genético. (* En Andisoles, bajo uso intensivo, este comportamiento deteriora la estructura).

3. PROPIEDADES DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO

La agregación de las partículas individuales del suelo produce unas unidades que se definen según su forma o **tipo**, su tamaño o **clase** y la claridad en su definición o la resistencia a ser destruidas, es decir, el **grado de desarrollo**; la definición de estas características de la estructura se presenta en la Tabla 3.1; para aquellos suelos que no presentan estructura, se utilizan los términos **masiva** o **suelta**, en el caso en que las partículas del suelo estén todas unidas formando una fase continua o que estén completamente separadas unas de otras, respectivamente.

Aparte de los tipos de estructura, definidos en la tabla mencionada anteriormente, algunos autores han propuesto otros para ciertos suelos en particular, como la estructura **Pseudopiramidal** propuesta para subsuelos en cenizas volcánicas por González (1984) o los **agregados cuneiformes**, es decir, en forma de cuña, para caracterizar Vertisoles (ICOMERT, citado por Comerma, 1987).

4. CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO

4.1. EN EL CAMPO

El proceso de caracterización de la estructura del suelo en el campo consiste en describir los tres parámetros que la califican, es decir: el tipo, la clase y el grado de desarrollo que presente. Esta labor se hace siguiendo las especificaciones establecidas en la Tabla 3.1; la calificación de estos parámetros para un suelo describe aquellos agregados que son dominantes en él. En la Figura 3.4 se ilustran algunos de los tipos de estructura del suelo.

El grado de la estructura se estima observando la nitidez con que están definidos los peds, como unidades, así como la resistencia que ofrecen a ser separados cuando se someten a presión entre los dedos pulgar e índice; para caracterizar esta propiedad se usan términos relativos como **débil**, **moderada** y **fuerte**, para indicar la menor o mayor resistencia que ofrece el ped a su destrucción.

4.2. EN EL LABORATORIO

Aunque para la mayoría de los fines prácticos, la definición de la estructura en el campo provee suficiente información, en el laboratorio puede someterse una muestra del suelo a un análisis que amplíe este conocimiento.

Lo más común es hacer un análisis de distribución de tamaños de agregados haciéndole un tamizado que permita separar los agregados que componen el suelo en varios grupos por tamaño y establecer el porcentaje que corresponde a cada grupo. Este procedimiento es especialmente útil cuando se quieren comparar y evaluar diferentes prácticas de manejo en su efecto sobre el suelo o cuando se desea conocer el grado de deterioro físico del suelo que han producido dichas prácticas al ser utilizadas durante períodos de tiempo relativamente largos. También, según Kemper y Chepil (1965), este análisis es adecuado para estimar la susceptibilidad del suelo a la erosión eólica.

TABLA 3.1. Caracterización del tipo y de la clase de estructura del suelo. (Traducido de Soil Survey Division Staff, SSDS, 1993).

CLASE (Tamaño de los agregados (mm))	Laminiforme Orientación en un plano horizontal	TIPO (Forma y disposición de los agregados)					
		Prismas		Poliedros		Esferoides	
		Sin redondeamiento en partes superiores	Con redondeamiento en partes superiores	Vértices angulosos	Vértices redondeados	Muy poco porosos	Porosos
		LAMINAR	PRISMÁTICA	COLUMNAR	BLOQUES ANGULARES	BLOQUES SUBANGULARES	GRANULAR
MUY FINA	< 1	< 10	< 10	< 5	< 5	< 1	< 1
FINA	1 a 2	10 a 20	10 a 20	5 a 10	5 a 10	1 a 2	1 a 2
MEDIA	2 a 5	20 a 50	20 a 50	10 a 20	10 a 20	2 a 5	2 a 5
GRUESA	5 a 10	50 a 100	50 a 100	20 a 50	20 a 50	5 a 10	
MUY GRUESA	> 10	> 100	> 100	> 50	> 50	> 10	



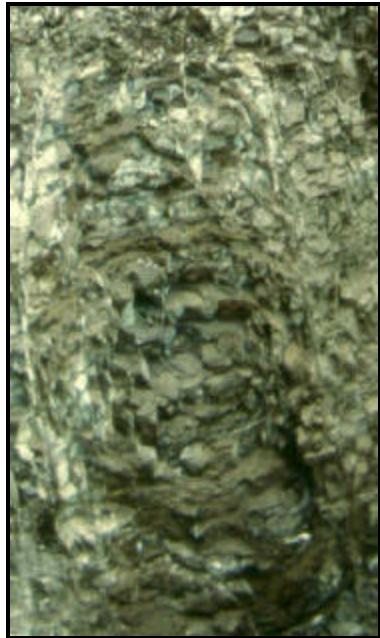
a. Bloques



b. Prismática



c. Columnar



d. Laminar



e. Bioestructura (raíz)



f. Bioestructura (lombriz)

FIGURA 3.4. Algunos tipos de estructura que se presentan en el suelo.

- Se toma una muestra de aproximadamente 200 g de suelo en el campo, húmeda, pero no mojada.
- Se seca la muestra a temperatura ambiente durante 3 ó 4 días; puede requerirse más tiempo si se tomó muy húmeda o si el suelo es rico en materia orgánica y/o en arcilla.
- Se toman unos 120 g de suelo seco al aire y se criban a través de un tamiz de 10 mm o más de tamaño de abertura. El tamaño del tamiz se selecciona teniendo en cuenta el tamaño de los agregados mayores del suelo (no los tamaños excepcionales).
- Se recoge el material que pasa a través del tamiz seleccionado y se cierne a través de un conjunto de tamices con aberturas de 5 - 2 - 1 - 0.5 - 0.25 y 0.1 mm de diámetro equivalente, haciendo movimientos helicoidales con ellos (no necesariamente todos a la vez) durante 5 minutos con cada tamiz; tener la precaución de ajustar bien, tanto los tamices, como la tapa y el fondo, para evitar pérdidas de material.
- Se recupera el material retenido en cada tamiz, se seca al horno durante 24 a 36 horas a 105°C, se pesa seco al horno y se calcula el porcentaje de agregados en cada tamiz con respecto al peso total de la muestra utilizada.
- Los resultados se pueden consignar en un formulario como el que se presenta en la Figura 3.5.
- Análisis de los resultados. Una manera interesante de hacerlo consiste en elaborar una gráfica de adición porcentual de tamaño medio de agregados vs porcentaje acumulado de agregados de un determinado tamaño promedio, la cual permite observar que tan homogénea es la distribución de los agregados del suelo; en la Figura 3.6 se presenta un ejemplo de dicha gráfica.
- Se establecen algunos índices de estabilidad, con los datos de la determinación anterior, como los que se verán más adelante, los cuales pueden ser muy útiles para hacer comparaciones.

ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	RANGO DE TAMAÑO DE AGREGADOS (mm)	TAMAÑO PROMEDIO DE AGREGADOS (mm)	PESO DEL MATERIAL RETENIDO SECO AL HORNO (g)	CANTIDAD DE MATERIAL RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULATIVO DE MATERIAL (%)
5	10 – 5	7.5			
2	5 – 2	3.5			
1	2 – 1	1.5			
0.5	1 - 0.5	0.75			
0.25	0.5 - 0.25	0.375			
0.1	0.25 - 0.1	0.175			
FONDO	0.1 – 0	0.05			100

FIGURA 3.5. Formulario para registrar los resultados del análisis de la distribución de los agregados del suelo.

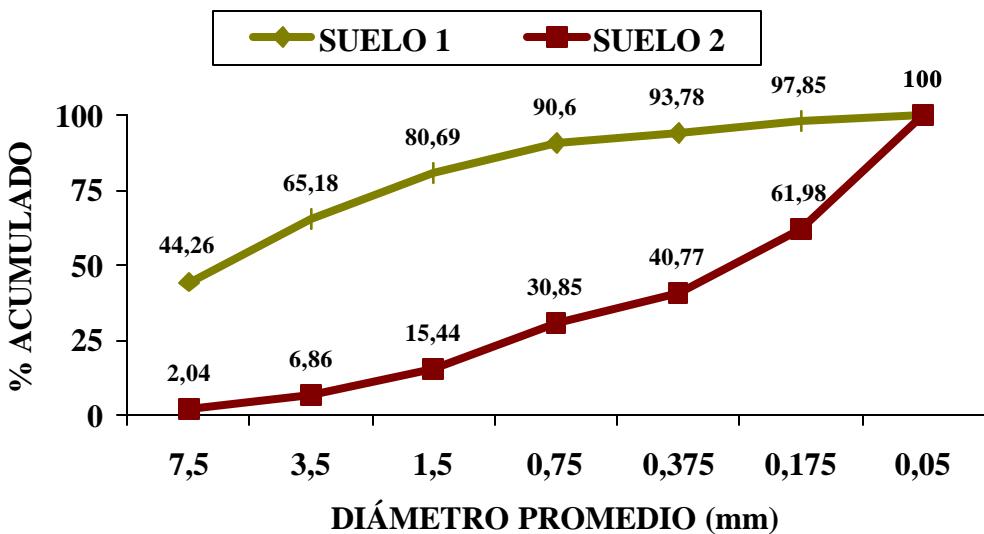


FIGURA 3.6. Distribución acumulativa de los tamaños de los agregados del horizonte A de dos Andisoles de la cuenca hidrográfica de Piedras Blancas (oriente antioqueño), tamizados en seco y bajo cobertura de *Cupressus lusitanica* (suelo 1) y de *Pinus patula* (suelo 2). (Resultados de Jaramillo, D. F., 1997, sin publicar).

En la Figura 3.6 se aprecia que tan diferente puede ser la distribución de agregados, aun en suelos muy similares; nótese que, mientras en el suelo 1 tienen una gran importancia los agregados de tamaños grandes: el 90 % de los agregados tienen diámetro mayor a 0.75 mm, en el suelo 2 esos agregados sólo alcanzan a ser el 30 % del total y, en cambio, tiene casi 40 % de los agregados con diámetro menor a 0.25 mm, que son poco deseables ya que no contribuyen a la aireación del suelo.

4.3. INTERPRETACIÓN

La estructura del suelo, en lo relacionado con el tipo y la clase, tiene un gran valor en los aspectos genéticos del suelo; es así como se observan los siguientes patrones estructurales, con cierta frecuencia, en relación con algunos grupos de suelos:

- Las estructuras **esferoidales** (migajosa y granular) se encuentran asociadas a horizontes con alto contenido de materia orgánica (horizontes A mólicos, úmbricos y melánicos, principalmente) y/o desarrollados bajo cobertura de gramíneas.
- Las estructuras en **bloques** se presentan en horizontes con altos contenidos de arcilla (argílicos en Alfisoles) y/o altos contenidos de óxidos de hierro y aluminio (kándicos y/o argílicos en Ultisoles, así como horizontes óxicos).
- Las estructuras **prismáticas** se asocian a horizontes o suelos poco evolucionados (horizontes B de Inceptisoles, normalmente cámbicos).
- Las estructuras **columnares** están asociadas a horizontes con altos contenidos de sodio intercambiable (nátricos).
- La estructura **laminar** también implica poca evolución pedogenética y se asocia normalmente con horizontes C de suelos desarrollados a partir de sedimentos, rocas sedimentarias y algunas rocas metamórficas.

- La estructura **cuneiforme** se relaciona con la presencia de altas cantidades de arcillas expansivas, sobre todo cuando las cuñas presentan estrías, lo cual está relacionado con procesos alternos de expansión y contracción debidos a cambios de humedad en el medio; como se mencionó antes, esta estructura es característica de los Vertisoles y de los intergrados vérticos.
- La falta de estructura puede estar relacionada con un bajo grado de evolución del suelo, con la presencia de materiales parentales muy recientes y/o muy pobres en minerales meteorizables o en coloides (arenas cuarcíticas) o con materiales ubicados bajo unas condiciones ambientales desfavorables, como inundaciones prolongadas, por ejemplo.
- Los peds grandes implican menor grado de evolución, en las estructuras poliedrinas, o mayor contenido de cementantes orgánicos, en las esferoidales.
- La presencia de horizontes con estructura **masiva** puede estar determinada por prácticas inadecuadas de manejo; en este sentido es bueno recalcar que uno de los síntomas más claros de deterioro en los suelos es la ausencia o degradación de su estructura. Estos criterios están ampliamente demostrados en trabajos de física de suelos, como los publicados por Simon - Sylvestre (1978), Boels (1982), Boekel (1982), entre otros.

En lo relacionado con la definición de la estructura en el laboratorio, un aspecto importante a observar es el tamaño de agregados que se presenta como predominante en el suelo; los tamaños muy pequeños, posiblemente, no proveen un espacio de macroporos lo suficientemente grande como para asegurar un buen drenaje y una adecuada aireación en el suelo; este tipo de agregados también puede estar mostrando un deterioro estructural en el suelo; una dominancia de tamaños grandes puede estar reflejando un poco desarrollo estructural del suelo y por tanto una susceptibilidad relativamente alta a la erosión.

También se debe evaluar la homogeneidad o heterogeneidad con que se presentan los diferentes grupos de tamaños de agregados; es deseable que un alto porcentaje de ellos corresponda a un rango de tamaños relativamente grandes, de modo que se tenga un espacio macroporoso adecuado en el suelo.

5. ESTABILIDAD ESTRUCTURAL

Aunque la formación de la estructura es un proceso fundamental en el suelo, su persistencia frente a agentes perturbadores del medio es indispensable para tener un medio físico edáfico adecuado; la estabilidad estructural es la que define en gran medida, la intensidad y el tipo de uso y manejo y, desde el punto de vista del manejo intensivo del suelo, ésta es una de las propiedades que mejor deben conocerse, ya que es la que más determina su resistencia al deterioro y a la erosión.

Los principales agentes que perturban la estructura son las gotas de lluvia, la mecanización, la presencia de ciertos cationes como el sodio, las condiciones inadecuadas de humedad y el déficit de coloides en el suelo, entre otros.

La estabilidad estructural de un suelo está controlada por los mismos factores que contribuyen a la estructuración (ver Figura 3.3), pudiéndose destacar que, a mayor contenido de arcilla y de materia orgánica, hay mayor estabilidad (Ingelmo y Cuadrado, 1986); a menor laboreo y mayor

población microbiana, mayor estabilidad (Utomo y Dexter, 1982), a mayores revestimientos de los peds con óxidos de hierro y aluminio, mayor estabilidad (Sánchez, 1981).

5.1. CARACTERIZACIÓN DE LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL DEL SUELO

Para cuantificar la estabilidad estructural del suelo se han diseñado varios métodos, orientados principalmente a medir la resistencia de los agregados frente a la acción del agua; de ellos, el más confiable es el que utiliza simuladores de lluvia, aunque por las dificultades de manejo que tiene no ha sido estandarizado para trabajos de rutina; para tener una medida aproximada de dicha resistencia se utilizan métodos de tamizado en húmedo de una muestra de suelo como el de Yoder y el de Henin.

5.1.1. Método de Yoder

Consiste en someter una muestra de suelo, sin disturbar, a agitación en agua por un determinado tiempo; la muestra se coloca en un juego de tamices de diferentes diámetros de perforación y, al final del proceso, se establece el porcentaje de agregados de los diferentes tamaños que quedan sin destruir; los tamaños de los agregados que se tomen para hacer las interpretaciones varían según las aplicaciones que se vayan a hacer. Esta determinación se desarrolla de la siguiente manera:

- Se toma una muestra de suelo sin disturbar de unos 120 g, se criba en un tamiz con abertura de 10 mm y la parte de la muestra que pasa a través del tamiz se recoge; se toma una submuestra del material que pasa a través del tamiz y se le determina el contenido de humedad gravimétrica que posee [W (%)], utilizando para ello el procedimiento descrito en el numeral 4.1 del Capítulo 9 y con la Fórmula [9.7]. Con esta información se hace la corrección de humedad para establecer el peso seco de la muestra tomada para hacer el análisis, de la manera como se muestra en el ejemplo del numeral 3 del Capítulo 7.
- Se ensambla un juego de tamices de 5 - 2 - 1 - 0.5 - 0.25 y 0.1 mm de tamaño de abertura; se pesa todo el material que pasó por el tamiz de 10 mm y que está disponible para el análisis y se coloca sobre el primer tamiz del tandem, humedeciéndolo con un atomizador y luego dejándolo que se sature lentamente, por capilaridad, durante unos 15 minutos, para evitar la explosión de agregados por presión de aire atrapado en los poros.
- Se coloca el juego de tamices con la muestra saturada en el equipo de Yoder, sumergiéndolos dentro del agua en el recipiente cilíndrico, hasta que los hilos del tamiz superior queden a ras con el nivel del agua, cuando el aparato se encuentre en su punto más alto de funcionamiento.
- Se pone a funcionar el equipo por 30 minutos, a un ritmo de 2 ciclos por segundo, al cabo de los cuales se retiran los tamices, se dejan escurrir por 5 minutos, se traslada su contenido a recipientes adecuados y se ponen a secar en horno a 105°C, durante 24 a 36 horas, para luego pesar los agregados secos que quedaron retenidos en cada uno de los tamices.
- Se calcula la cantidad de agregados que quedaron en cada tamiz en porcentaje, con respecto a la cantidad inicial de muestra utilizada, con la relación [3.1].

- Con la información recogida se pueden calcular varios índices que sirven para caracterizar la estabilidad de la estructura del suelo analizado, como el diámetro ponderado medio (**DPM**), el diámetro geométrico medio (**DGM**), el índice de estructura (**IE**), la suma de agregados extremos (**AE**) y/o el contenido de agregados finos, es decir, menores a 0.5 mm de diámetro (**AF**), para los cuales se presentan las respectivas fórmulas a continuación.
- Otra forma de presentar los resultados de los análisis de estabilidad estructural del suelo consiste en realizar una curva de adición porcentual entre el diámetro promedio del rango correspondiente vs el contenido de agregados acumulado, en porcentaje, en ese tamaño (Ver Figura 3.6). En esta gráfica se puede establecer, por interpolación, el diámetro que le corresponde al 50 % de los agregados acumulados en la prueba, valor que se conoce como diámetro medio estimado (**DME**).
- Los formatos que se presentan en las Figuras 3.7 y 3.8 pueden ser utilizados para registrar los resultados obtenidos en esta determinación.

Para llevar a cabo los cálculos propuestos en la metodología anterior se utilizan las fórmulas que se dan a continuación:

$$\% \text{ Retenido en el tamiz} = \frac{\text{Peso suelo retenido en el tamiz}}{\text{Pss}} \quad [3.1]$$

Donde: Pss: Peso de la muestra seca al horno.

Para calcular el DPM y el DGM Kemper y Chepil (1965) proponen las Fórmulas [3.2] y [3.3] y para el IE, González (1987) reporta la Fórmula [3.4].

$$DPM = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \frac{w_i}{100} \quad [3.2]$$

Donde: DPM: Diámetro Ponderado Medio.

\bar{x}_i : Diámetro promedio de la fracción de tamaño correspondiente.

w_i : Porcentaje por peso de la respectiva fracción de agregados de un determinado rango de tamaño (debe trabajarse dividido por 100).

$$DGM = \text{antilog} \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \log_{10} \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad [3.3]$$

Donde: DGM: Diámetro Geométrico Medio.

\bar{x}_i y w_i tienen el mismo significado que en DPM.

$$IE = \frac{W_2 + W_3 + W_4 + \dots}{W_1 + W_n} \times 100$$

[3.4]

Donde: IE: Índice de Estructura.

W₁: % de agregados estables con diámetro > 2 mm.

W_n: % de agregados estables con diámetro < 0.25 mm.

W₂, W₃, W₄, ...: % de agregados estables en cada uno de los rangos de tamaño utilizados en la determinación, comprendidos entre 2 y 0.25 mm de diámetro.

PESO DE LA MUESTRA INICIAL SECA AL AIRE (g)	SUBMUESTRA PARA HUMEDAD GRAVIMÉTRICA			PESO DE LA MUESTRA INICIAL SECA AL HORNO (g)
	Psh (g)	Pss (g)	W (%)	

FIGURA 3.7. Formulario para el registro de los resultados del cálculo de la humedad gravimétrica de muestras para análisis de estabilidad estructural; ver Capítulo 7, página 176 y Capítulo 9, numeral 4.1.

RANGO DE DIÁMETRO DE AGREGADOS (mm)	\bar{x}_i (mm)	Log ₁₀ \bar{x}_i	Peso seco del material retenido (g)	Cantidad de material retenido (%) (1)	Wi [(1) / 100]	$\bar{x}_i \times Wi$ (mm)	Log ₁₀ $\bar{x}_i \times Wi$ (mm)
10 - 5							
5 - 2	3.5	0.5441	82.21	74.74	0.7474	2.62	0.4067
2 - 1	1.5	0.1761	12.07	10.97	0.1097	0.16	0.0193
1 - 0.5	0.75	-0.1249	7.80	7.09	0.0709	0.053	-0.0089
0.5 - 0.25	0.375	-0.4260	2.75	2.50	0.0250	0.0094	-0.0107
0.25 - 0.1	0.175	-0.7570	2.64	2.40	0.0240	0.0042	-0.0182
0.1 - 0	0.05	-1.3010	2.53	2.30	0.0230	0.0012	-0.0299
Σ						2.8878	0.3583
ÍNDICES							
IE (%)			25.88				
AF [< 0.5 mm] (%)			7.2				
AE [$(> 2$ mm + < 0.25 mm)] (%)			79.44				
DPM (mm)					2.8878		
DGM (mm)							2.2819

FIGURA 3.8. Formulario para registrar los resultados de la determinación de la estabilidad estructural de suelos, por el método de Yoder. (Se incluye un ejemplo).

El índice de estructura (IE) también puede utilizarse para expresar la proporción en que se encuentra alguno de los grupos de agregados con respecto a otro grupo o rango específico de tamaño. Por ejemplo, con los resultados de la Figura 3.8, se pueden establecer las siguientes relaciones entre grupos de agregados:

$$IE = \frac{(10.97 + 7.09 + 2.5)\%}{(74.74 + 4.7)\%} = \frac{20.56}{79.44} = \frac{1}{79.44 / 20.56} = \frac{1}{3.86} \approx 1:4$$

Lo anterior indica que por cada agregado de tamaño intermedio que hay en el suelo se encuentran 4 agregados de tamaños extremos. Se puede hacer más específica la relación anterior estableciendo la relación de los agregados intermedios con los de tamaño extremo, individualmente, con lo que se establece el grupo dominante así:

$$\frac{20.56\%}{74.74\%} = \frac{1}{3.64} \approx 1:4 \quad \text{y} \quad \frac{20.56\%}{4.7\%} = \frac{1}{0.2286} \approx \frac{1}{0.2} \approx \frac{5}{1} = 5:1$$

Las relaciones anteriores indican que por cada agregado intermedio se tienen aproximadamente 4 agregados mayores de 2 mm de diámetro, mientras que, hay 5 agregados de tamaño intermedio por cada agregado con diámetro menor a 0.25 mm.

Una manera sencilla de evaluar la estabilidad que tienen los agregados del suelo al agua consiste en tamizar simultáneamente dos muestras del mismo suelo, una en seco y la otra en agua y comparar, después del secado, los contenidos de agregados que se obtienen en cada rango de tamaño: Entre menores sean las diferencias, mayor es la estabilidad, siempre que el suelo esté estructurado, obviamente.

5.1.2. Método de Henin

Con este método se establece el grado de inestabilidad de la estructura del suelo al ser sometido a agitación en agua. Se diferencia del anterior porque trata de estimar el efecto que tiene el aire que queda atrapado dentro del suelo, en la destrucción de agregados, al ser humedecido para la determinación (efecto de estallido), así como la interferencia que puede ejercer la materia orgánica en aquella. El **índice de inestabilidad (Is)** de la agregación del suelo se determina mediante el siguiente procedimiento descrito por Henin et al (1972):

- Se tamiza una muestra de unos 200 g de suelo disturbado por malla de 2 mm; se toman tres submuestras de 5 g cada una y se colocan en sendos vasos de 250 mL.
- A uno de los vasos se le agregan 5 mL de alcohol etílico, a otro 5 mL de benceno y el tercero se llena con agua; se dejan reposar 5 minutos; al cabo de este tiempo se llenan los dos primeros vasos con agua y se dejan reposar todos otros 30 minutos.
- Se trasvasan los contenidos de cada vaso a erlenmeyers de 750 mL y se les agrega agua hasta completar 300 mL, se tapan y se agitan, volteándolos 20 veces.
- Se toma el primer erlenmeyer y se transfiere su contenido a un tamiz de malla de 0.2 mm y de 10 cm de diámetro, colocado dentro de una cápsula de porcelana de 1 L; se le imprime al conjunto un movimiento helicoidal haciendo 20 desplazamientos, a razón de 1 vuelta/segundo; se retira el tamiz, se deja escurrir, se transfieren los agregados a cápsulas para humedad, se secan en horno a 105°C durante 24 a 36 horas y se halla el peso de los agregados.
- Se repite el procedimiento anterior con los otros dos erlenmeyer y se hace por triplicado cada tratamiento.

- Se determina el porcentaje de partículas mayores de 0.2 mm, siguiendo el método de Bouyoucos para este tamaño, descrito en el numeral 2.1.2 del Capítulo 7.
- Se calcula el índice de inestabilidad estructural del suelo con la Fórmula [3.5].
- Los resultados obtenidos se consignan en un formulario como el que se presenta en la Figura 3.9.

El índice de inestabilidad se calcula mediante la ecuación:

$$Is = \frac{\% \text{ máximo de partículas} < 20\mu^*}{\frac{\% A_1 + \% A_2 + \% A_3}{3} - 0.9 sg} \quad [3.5]$$

Donde: Is: Índice de inestabilidad.

*: En el numerador se coloca el porcentaje máximo de partículas $< 20\mu$ (limos + arcillas) de los encontrados en los tratamientos con agua y con benceno.

A_1 : Porcentaje de agregados en el tratamiento con alcohol.

A_2 : Porcentaje de agregados en el tratamiento con benceno.

A_3 : Porcentaje de agregados en el tratamiento con agua.

sg: Porcentaje de arenas gruesas (partículas mayores de 0.2 mm).

CÓDIGO MUESTRA	A_1 (%)	A_2 (%)	A_3 (%)	$L + Ar$ agua (%)	$L + Ar$ benceno (%)	sg (%)

FIGURA 3.9. Formulario para el registro de los resultados de la determinación de la inestabilidad estructural del suelo, por el método de Henin.

5.2. INTERPRETACIÓN

Aunque no hay criterios unificados en torno a los valores óptimos de agregación del suelo, algunos autores han encontrado valores relacionados con algunas cualidades del suelo que pueden tomarse como guía de evaluación:

- Porcentajes altos de agregados menores de 0.5 mm, aumentan la susceptibilidad a la erosión del suelo (Cortés y Malagón, 1984).
- El DGM characteriza mejor el diámetro dominante en los agregados del suelo que el DPM y, generalmente, éste es mayor que el diámetro geométrico medio (Garner, 1956).
- El índice de agregación (DPM), determinado por el método de Yoder, cuando es menor de 0.5 mm, indica mala estructuración (Olarte et al, 1979).
- Cuando el contenido de agregados mayores a 2 mm es muy alto, alrededor de 80% o más, se puede estar en presencia de un suelo cementado.
- Los agregados menores a 0.25 mm no contribuyen a la aireación del suelo por lo que su contenido debe ser bajo para que haya un buen suministro de oxígeno a las raíces.

- Agronómicamente, los tamaños de agregados más deseables son aquellos que están alrededor de 3 mm de diámetro.

En la interpretación de los índices de estabilidad estructural del suelo hay que tener cuidado con la presencia de gravillas, gravas y/o concreciones en él pues, si no se tuvo la precaución de eliminarlas para el análisis, van a distorsionar los resultados, presentando un suelo con su estabilidad estructural sobreestimada.

El efecto de sobrevalorar la estabilidad estructural del suelo, por la presencia de concreciones, lo advirtieron Ordóñez et al (1992) en Ultisoles y en Inceptisoles del Guaviare, amazonia colombiana, al encontrar que el tamaño y estabilidad de los agregados en esos suelos aumentaban considerablemente cuando se talaba el bosque natural y se plantaban cultivos o pastos. La implantación de estos usos reducía la humedad en el suelo, haciendo que el hierro que estaba disuelto fuera precipitando y endureciéndose, cementando partículas de suelo y dándole a éste una aparente mayor estabilidad estructural.

RECORDAR

- **La estructura estudia la manera como se agrupan los sólidos del suelo.**
- **Las unidades básicas de estudio de la estructura del suelo se llaman Agregados o Peds.**
- **Los agregados son unidades durables en el tiempo, en cambio, los flóculos son unidades pasajeras.**
- **La estructura es una propiedad típicamente genética del suelo.**
- **La estructura se describe con tres parámetros: Tipo (forma), Clase (tamaño) y Grado de desarrollo.**
- **La estructura más favorable es la migajosa media.**
- **La resistencia de la estructura al deterioro se llama Estabilidad Estructural.**
- **Un alto contenido de agregados $> 3 \text{ mm}$ y/o $< 0.25 \text{ mm}$ no es deseable en la mayoría de los suelos.**
- **Para hacer análisis de estabilidad estructural hay que tener cuidado con no incluir en la muestra fragmentos de roca, concreciones o fragmentos de suelo compactados, ya que distorsionan el análisis.**
- **El método más utilizado para evaluar la estabilidad estructural del suelo es el de Yoder o de tamizado en agua.**

BIBLIOGRAFÍA

BOEKEL, P. 1982. Soil structure in modern agriculture. In : The 9th. conference of the International Soil Tillage Research. Yugoslavia. pp. 402-408.

BOELS, D. 1982. Physical soil degradation in the Netherlands. Technical Bulletins new series No. 12. Institute for Land and Water Managements Research. Wageningen. Separata de: Land Use Seminar on Soil Degradation. pp. 47-65.

COMERMA, J. A. 1987. Vertisoles 1985. Suelos Ecuatoriales 17 (2): 126-131.

- CORTÉS, A. y D. MALAGÓN. 1984. Los levantamientos agrológicos y sus aplicaciones múltiples. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá. 360 p.
- GARDNER, W. R. 1956. Representation of soil aggregate-size distribution by a logarithmic-normal distribution. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 20: 151-153.
- GONZÁLEZ, A. 1987. Anotaciones sobre Física de Suelos: Fracción teórica. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. 165 p.
- GONZÁLEZ, A. 1984. Características físicas en suelos desarrollados de cenizas volcánicas en Colombia. S.A. *Suelos Ecuatoriales* 14 (I): 229-235.
- HENIN, S.; R. GRAS y G. MONNIER. 1972. El perfil cultural: El estudio físico del suelo y sus consecuencias agronómicas. Ediciones Mundi – Prensa. Madrid. 342 p.
- HILLEL, D. 1998. Environmental soil physics. Academic Press. San Diego. 771 p.
- INGELMO, S. F. y S. CUADRADO. 1986. El agua y el medio físico del suelo. Temas monográficos No. 18. Centro de Edafología y Biología Aplicada. Salamanca. 102 p.
- KEMPER, W. D. and W. S. CHEPIL. 1965. Size distribution of aggregates. In: *Methods of Soil Analysis*. Part 1. C. A. Black et al editors. *Agronomy N° 9*. American Society of Agronomy Inc. Publisher. Wisconsin. Pp: 499-510.
- OLARTE, R. L. et al. 1979. Métodos analíticos de laboratorio de suelos. 4^a. Ed. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá. 644 p.
- ORDÓÑEZ, N.; E. LÓPEZ y P. J. BOTERO. 1992. Cambios en las propiedades de los suelos, relacionados con la colonización del bosque natural, en un área del Guaviare. *Colombia Amazónica* 6 (1): 37-64.
- SÁNCHEZ, P. A. 1981. Suelos del trópico: características y manejo. 1^a. Ed. en español. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Costa Rica. 534 p.
- SIMON-SYLVESTRE, G. 1978. Effects of pesticides on the organic matter degradation consequences on the soil structural stability. *Chemosphere* No. 10: 821-826.
- SOIL SURVEY DIVISION STAFF (SSDS). 1993. Soil survey manual. Handbook No. 18. United States Department of Agriculture (USDA). Washington. D. C. 437 p.
- UTOMO, W. H. and A. R. DEXTER. 1982. Changes in soil aggregate water stability induced by wetting and drying cycles in non-saturated soil. *Journal of Soil Sci.* 33: 623-637.

AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Qué es estructura de un suelo?. ¿Cómo se define agregado del suelo?.
2. ¿Qué es floculación?.
3. Enuncie tres agentes de estructuración del suelo.
4. ¿Con cuáles parámetros se define la estructura del suelo?.
5. ¿Cuál es el tipo de estructura más deseable en el suelo?. ¿Por qué?.
6. ¿En cuál horizonte del suelo hay predominancia de agregados esferoidales?. ¿Cómo se explica ese comportamiento?.
7. ¿Cuál es el tipo y grado de estructura más deseables desde el punto de vista agronómico?. ¿Por qué?.
8. ¿Por qué las muestras de suelo que se van a analizar para estabilidad estructural deben ser humedecidas lentamente, antes de sumergirlas en agua?.

9. ¿Qué efecto tiene el humedecimiento rápido de las muestras sobre la distribución de los tamaños de los agregados en el análisis de estabilidad estructural?.
10. ¿Cómo serían los valores del DPM y del IE de una muestra humedecida rápidamente, comparados con los de una muestra equivalente humedecida por capilaridad?.
11. ¿Puede darse el caso de que un suelo que presente índices de estabilidad estructural adecuados y que realmente no tenga esta característica?. Explique.
12. ¿Cuál es la diferencia fundamental entre flóculo y ped?.
13. ¿Un suelo que se clasifique como “sin estructura”, siempre está compactado?. Explique.

EVALUACIÓN

1. Dos suelos fueron sometidos a tamizado en agua para establecer su grado de estabilidad estructural, obteniéndose la siguiente distribución de agregados:

SUELO	CANTIDAD (g) DE AGREGADOS POR TAMAÑO (mm)				
	> 2	2 - 1	1 - 0.5	0.5 - 0.25	< 0.25
1	159.66	5.04	1.44	0.72	13.14
2	7.65	32.85	40.5	19.8	49.2

Elaborar una curva de adición porcentual de tamaño de agregados para cada suelo y hacer el análisis correspondiente, en términos de estabilidad estructural. Confirme ese análisis calculando los diferentes índices de estabilidad estructural planteados en éste capítulo. (R: **Suelo 1**: DPM=3.1631 mm, DGM=2.6236 mm, IE=4.17 %, AE=96 %, AF=7.7 %. **Suelo 2**: DPM=0.6394 mm, DGM=0.4522 mm, IE=163,85 %, AE=37.9 %, AF=46 %).

2. Un suelo fue sometido a análisis de estabilidad estructural tamizándolo en seco y en húmedo; se obtuvieron los resultados que se presentan en el siguiente cuadro:

TAMIZADO	CANTIDAD (g) DE AGREGADOS POR TAMAÑO					
	5 - 3	3 - 2	2 - 1	1 - 0.5	0.5 - 0.25	< 0.25
HÚMEDO	63.877	0.825	2.223	5.722	6.705	27.684
SECO	110.644	14.185	10.240	1.017	0.138	0.135

Definir, con ayuda de los índices de evaluación estudiados, cómo es la estabilidad estructural del suelo analizado. (R: **Húmedo**: DPM=2.5331 mm, DGM=1.2569 mm, IE=15.84 %, AE=86.313 %, AF=32.11 %. **Seco**: DPM=3.6244 mm, DGM=3.4754 mm, IE=9.1186 %, AE=91.6434 %, AF=0.2002 %).

EL COLOR DEL SUELO

CAPÍTULO 4

CONTENIDO

- ❖ Importancia
- ❖ Determinación
 - Diseño de la Tabla de colores Munsell
 - El matiz
 - La claridad
 - La pureza
 - La tabla de colores
 - Determinación y descripción del color del suelo
 - Factores que influyen en la determinación del color
- ❖ Patrones especiales de color en el suelo

OBJETIVOS

- ❖ Conocer una de las propiedades más visibles del suelo
- ❖ Aprender a describir el color del suelo utilizando la Tabla de Colores Munsell
- ❖ Relacionar el color del suelo con procesos pedogenéticos
- ❖ Relacionar el color del suelo con algunas de sus propiedades físico – químicas

E

l color es una de las características morfológicas más notorias del suelo. Guarda una estrecha relación con sus principales componentes sólidos.

1. IMPORTANCIA

Como se ha mencionado anteriormente, el color del suelo se relaciona fuertemente con los componentes sólidos del mismo. Entre las principales relaciones que se han encontrado entre el color y sus componentes, pueden destacarse las siguientes:

- Schulze et al (1993) obtuvieron una relación estrecha e inversa entre el valor del color y el contenido de materia orgánica de los horizontes superiores de suelos ubicados en el mismo paisaje y sin contrastes texturales muy amplios; también encontraron que la fracción orgánica que más influye sobre el color oscuro del suelo es la de los ácidos húmicos. Cuando extrajeron estos ácidos el suelo presentó un mayor cambio en el valor, que cuando extrajeron los ácidos fúlvicos.
- Schwertmann (1993) encontró varias relaciones entre el contenido de óxidos de hierro en el suelo y su color. Asoció estas relaciones a varios ambientes de evolución de esos suelos, como puede verse en la Tabla 4.1.
- Schwertmann (1993) advierte que, de todas formas, los colores mencionados pueden ser alterados debido al contenido de cada óxido que se presente en el suelo, al tamaño de los cristales, al grado de cristalinidad que ellos presenten, al grado de cementación y a posibles sustituciones isomórficas que se presenten en ellos. La pobre cristalinidad, la baja cantidad, el tamaño pequeño de los cristales y la cementación hacen los colores más claros que las condiciones contrarias.

TABLA 4.1. Óxidos de hierro y colores más frecuentes que le imprimen al suelo, así como pedoambientes para su formación y tipo de suelos donde se presentan, según Schwertmann (1993).

ÓXIDO (FÓRMULA)	COLOR EN EL SUELO	PEDOAMBIENTE	TIPO DE SUELO
Goetita (α - FeOOH)	7.5YR – 2.5Y	Donde se presente meteorización.	Todos los que presenten liberación de Fe.
Hematita (α - Fe ₂ O ₃)	7.5R – 5YR	Alta temperatura, baja actividad del agua, rápida incorporación de materia orgánica, alta liberación de Fe de las rocas.	Aeróbicos, tropicales y subtropicales con estación seca.
Lepidocrocita (γ - FeOOH)	5YR – 7.5YR, value \geq 6	Sistemas no calcáreos redoximórficos.	Subgrupos Aquic de zonas subtropicales.
Ferrhidrita (Fe ₅ O ₈ .4H ₂ O)	5YR – 7.5YR, value \leq 6	Oxidación rápida en ambientes húmicos.	Horizontes B espódicos gleizados.
Maghemita (γ - Fe ₂ O ₃)	2.5YR – 5YR	Usualmente producto de quemadas e incendios.	Tropicales y subtropicales.

Montenegro y Malagón (1990) también apuntan otras características del suelo, que pueden relacionarse con el color, como:

- Los colores oscuros, en suelos con bajo contenido de materia orgánica, pueden indicar la presencia de complejos de materia orgánica con óxidos de hierro, de carbón, de óxidos de manganeso y/o de magnetita.
- Los colores rojos indican buen drenaje y buena aireación, así como intensas meteorización y evolución, la mayoría de las veces (ver numeral 5 del Capítulo 1).
- Los colores grises a blancos pueden mostrar contenidos importantes de cuarzo, caolinita u otras arcillas silicatadas, carbonatos de Ca y/o Mg, yeso, sales y/o óxido ferroso y pueden indicar condiciones de mal drenaje; también pueden indicar muy bajos contenidos de coloides en el suelo (materia orgánica, arcillas y/o sesquióxidos de Fe y Al), característicos de horizontes sometidos a procesos intensos de eluviation.
- Los moteos, generalmente, se presentan en suelos con problemas de mal drenaje.

Aparte de lo anterior, algunas veces el suelo presenta el color del material parental, es decir, presenta colores **litocrómicos**. Este fenómeno puede estar relacionado con un bajo grado de alteración del material original del suelo o con la presencia de materiales parentales muy oscuros, como en el caso de lutitas negras, que le trasmiten al suelo este color o con una baja incorporación de materia orgánica. Los climas secos favorecen la expresión de colores litocrómicos en el suelo.

El color del suelo, tradicionalmente, se ha utilizado como criterio de clasificación y el sistema taxonómico americano (Soil Survey Staff, SSS, 1999, 1998) no ha sido la excepción. En la taxonomía se usa el color para definir algunas características diagnósticas, así como algunos taxa:

- Los epipedones como mólico, úmbrico, antrópico, melánico y ócrico deben cumplir requisitos de color en su definición y diferenciación.
- Algunos endopedones (ágrico) o los materiales que los caracterizan (materiales espódicos, álbicos, etcétera) están definidos por color.
- El régimen ácuico y las condiciones de reducción imprimen al suelo características particulares de color: colores grises y/o moteos.

En la nomenclatura de la clasificación taxonómica de los suelos (SSS, 1999, 1998), hay bastantes partículas en los nombres que se definen, entre otras características, con base en el color; por ejemplo:

- Al nivel de suborden: Alb, Aqu.
- Al nivel de gran grupo, en algunos órdenes, se presentan: Alb, Fulv, Fulvi, Rhod, Umbr.
- En los subgrupos se han establecido: Aeric, Albaquic, Aquandic, Aqueptic, Aquertic, Aquic, Aquollie, Aquultic, Chromic, Fluvaquentic, Humaqueptic, Mollic, Rhodic, Spodic, Umbreptic, Umbric, Xanthic.
- La familia Ferrihúmica de los Histosoles se define, entre otras propiedades, por el color.

2. DETERMINACIÓN

El color del suelo puede caracterizarse en forma precisa mediante el uso de los espectrofotómetros. Estos equipos registran la cantidad de luz que refleja el suelo en todas las longitudes de onda del espectro visible (entre 400 y 700 nm), produciendo unas curvas de pendiente positiva llamadas **curvas de reflectancia espectral**. La transformación de los valores de reflectancia del suelo a color se puede hacer mediante procesos matemáticos y/o computacionales (Torrent y Barrón, 1993).

Para fines prácticos, el color del suelo se determina por comparación del color del suelo (un fragmento de éste) con un catálogo de colores ordenados en unas secuencias específicas, contenidas en una libreta conocida comúnmente como ‘**La tabla de colores Munsell**’ (Munsell Color, 1990) de amplio uso a escala mundial y de fácil manejo en el campo.

2.1. DISEÑO DE LA TABLA DE COLORES MUNSELL

Como ya se mencionó, la tabla Munsell es un catálogo que agrupa una serie de colores que sirven para calificar el color del suelo. En este sistema de evaluación del color, este atributo se caracteriza mediante tres parámetros: **Matiz** (Hue), **Claridad** o brillo (Value) y **Pureza** (Chroma).

2.1.1. El matiz (Hue)

El matiz o hue es, según Soil Survey Division Staff (SSDS, 1993), una medida de la composición cromática de la luz que llega al ojo, es decir, establece el color dominante del suelo. El sistema Munsell se basa en 5 matices básicos: rojo (**R**), amarillo (**Y**), verde (**G**), azul (**B**) y púrpura (**P**), así como en 5 matices combinados de los anteriores: Amarillo – rojo (**YR**), verde – amarillo (**GY**), azul – verde (**BG**), púrpura – azul (**PB**) y rojo – púrpura (**RP**) (Munsell Color, 1990).

Las letras resaltadas en el párrafo anterior corresponden a la primera letra del color que las precede, en inglés, por ejemplo, **Y** de Yellow (amarillo). Cada uno de los matices tiene diferentes tonalidades que se especifican mediante números entre cero (0) y diez (10) colocados antes de la letra correspondiente. Así, un suelo rojo puede tener diferentes cantidades de rojo: 2.5R, 5R, 7.5R o 10R, por ejemplo; de 0 a 10 aumenta la intensidad del color respectivo, es decir, 7.5R es “más rojo” que 2.5R.

En la escala de matices, el color correspondiente a cero, es equivalente al 10 del matiz que está a continuación de él; tomando el ordenamiento de algunos matices: Rojo (**R**), rojo amarillento (**YR**) y amarillo (**Y**), se tiene entonces que el matiz 0Y es equivalente al matiz 10YR; por esta razón, el color con matiz de cero no se considera al momento de hacer la descripción del mismo.

2.1.2. La claridad (Value)

La claridad define el grado de oscuridad del color, en términos de la cantidad de blanco o de negro que él tenga; es una medida de la cantidad de luz que llega al ojo, bajo condiciones estándar de iluminación. La cantidad de negro o de blanco se especifica mediante una escala que va de cero (0) a diez (10), en la cual el cero corresponde al negro puro y el 10 al blanco puro; los colores oscuros tienen value entre 0 y 5 y los claros entre 5 y 10 (SSDS, 1993).

2.1.3. La pureza (Chroma)

La pureza indica la magnitud de la dilución que tiene el color, debida a la presencia de colores grises; los valores que puede tomar este atributo van, según Munsell Color (1990), desde cero (0) para el gris neutro, hasta 20 para aquella situación de ausencia de gris. Sin embargo, para los suelos, este rango se restringe a valores comprendidos entre 0 y 8 (SSDS, 1993). Este parámetro está directamente relacionado con la cantidad de materia orgánica acumulada en el suelo.

2.1.4. La tabla de colores

Con la combinación de los componentes mencionados, anteriormente, se diseñaron las diferentes cartas de color Munsell. En ellas cada página corresponde a un Hue (matiz) específico que aparece en la parte superior derecha de dicha página. En cada una de las páginas están las divisiones correspondientes al Value (claridad) y al Chroma (pureza). Las divisiones del value se presentan en la vertical de la hoja, incrementando su valor, es decir, tornando más claro el color, en la dirección de abajo hacia arriba. Las variaciones que presenta el color en chroma se encuentran señaladas en la parte inferior de la hoja y los valores que toma se incrementan desde el extremo izquierdo hacia el derecho.

En cada carta de hue, en la intersección de los values con los chromas, se encuentra una plaquita rectangular de papel, con el color correspondiente a cada combinación value – chroma del hue correspondiente; entre cada dos placas consecutivas, verticalmente, se encuentra una perforación circular que funciona, a manera de ventana, para asomar por ella la muestra del suelo al cual se le quiere determinar el color. En la Figura 4.1 se presenta la distribución de los colores correspondientes al matiz 10R, tal como aparece en la tabla Munsell de color (Munsell Color, 1990).

2.2. DETERMINACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL COLOR DEL SUELO

La determinación del color de un suelo se lleva a cabo mediante la comparación de una muestra del mismo con las plaquitas de colores que componen cada una de las cartas de hue disponibles en la tabla; esta comparación se hace colocando la muestra en la ventana que se encuentra entre las placas coloreadas, estudiando varias alternativas, hasta que se encuentre la plaquita que coincida, lo más cerca posible, con el color que tiene el suelo.

En la descripción del color del suelo se utilizan dos parámetros: La **notación Munsell** y el **color Munsell**. La notación define los valores para los parámetros hue, value y chroma del color del suelo. El color Munsell asigna un nombre de color a una determinada notación, con el fin de uniformizar la nomenclatura que se dé a los colores y ellos se encuentran en la página opuesta a la página donde se presentan las plaquitas de color correspondientes a cada hue.

Cuando se ha encontrado el color del suelo en la tabla, se procede a establecer su notación Munsell; en la parte superior derecha de la hoja respectiva se busca el hue correspondiente; en la margen izquierda se encuentran los numeradores de una fracción que corresponden al value; se toma el value que identificó el color del suelo y se coloca a continuación del hue; luego, en la parte inferior de la hoja se encuentran los chromas, en forma de denominadores de fracciones; se toma el que corresponde al color de la muestra y se coloca como denominador de la fracción que se inició con el value, completando así la notación del color buscado. En la página opuesta a la de las notaciones de los colores se ubica la notación que resultó elegida y se toma el nombre del color Munsell que le corresponde, queda identificado así el color del suelo.

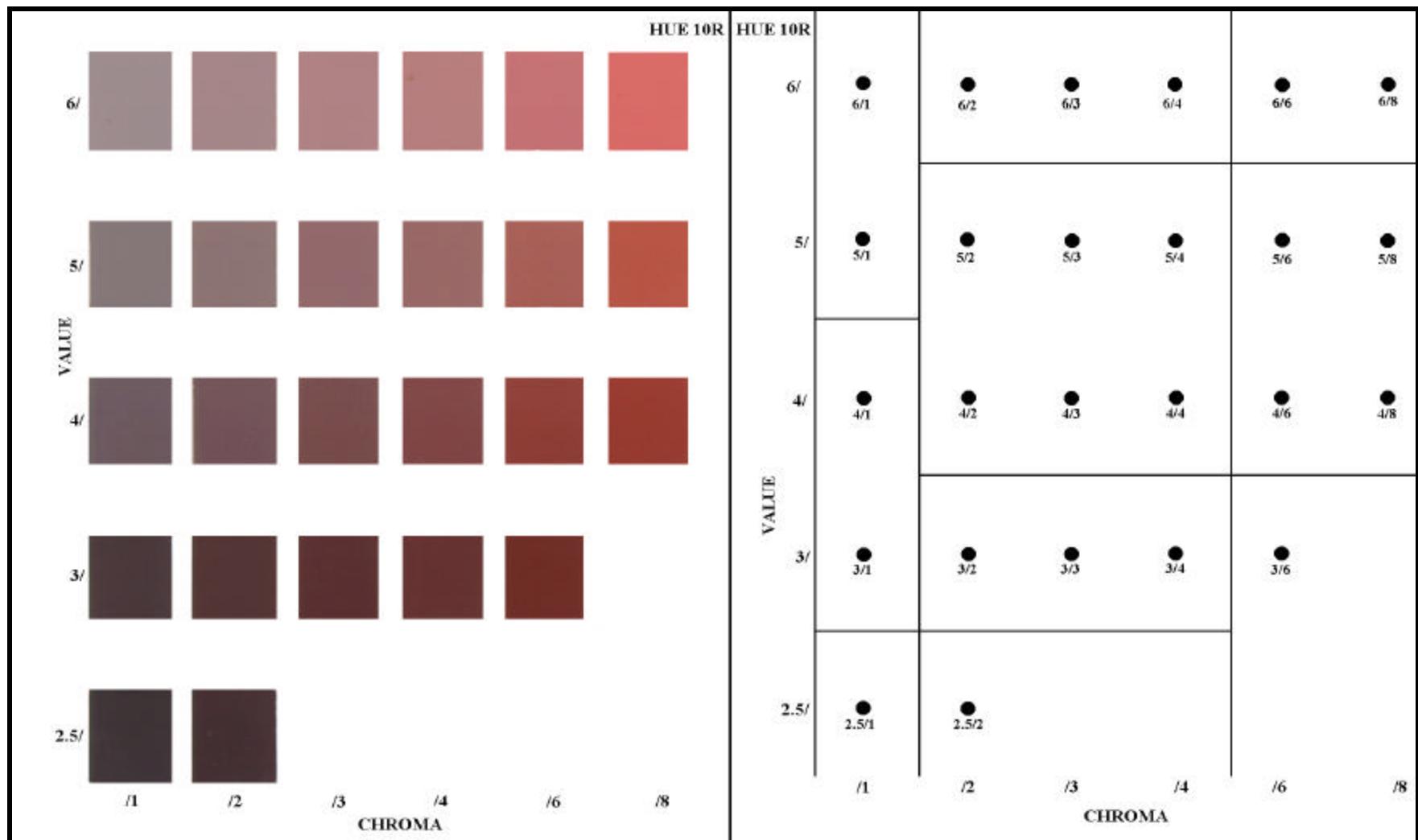


FIGURA 4.1. Colores de la tabla correspondientes al matiz 10R (Adaptada de Munsell Color, 1990).

La descripción del color del suelo está compuesta, entonces, de una notación de la forma **hue value/chroma**, seguida de un nombre; por ejemplo, si el suelo presentó un hue 10R (ver Figura 4.1), el value fue de 3 y el chroma de 2, la notación Munsell de su color es: **10R3/2**; el nombre Munsell de esta notación es **rojo oscuro**; la descripción completa y correcta de este color, según el SSDS (1993) es: **10R3/2 (rojo oscuro)**.

Hay suelos que no presentan valor de pureza, es decir, el chroma en la tabla corresponde a cero (0). En estos casos los colores corresponden al negro puro, al blanco puro o al gris puro, por lo que se consideran acromáticos. Cuando se da esta situación, el suelo tampoco tiene matiz y éste es reemplazado por la letra **N** (de Neutro). El color del suelo en este caso, se describe con dicha letra, seguida por el valor de la claridad del color, quedando una fracción sin denominador; por ejemplo, en la tabla de colores se encuentra, en el matiz 2.5YR, una columna de colores con chroma de cero y con values entre 2.5 y 6. El color más oscuro de esta columna se identifica con la notación y el color **N2.5/ (negro)**.

Debe tenerse en cuenta que las escalas utilizadas para cuantificar los parámetros del color en la tabla Munsell, admiten divisiones con decimales. Lo anterior quiere decir que, aunque en la tabla no se encuentre especificada la claridad correspondiente a 3.5, ella existe y es posible encontrar un suelo que se ubique, en la tabla, exactamente en un color cuyo value sea intermedio entre 3 y 4, teniendo que definirlo como 3.5; igual puede ocurrir para el matiz y para la pureza (Munsell Color, 1990).

2.3. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DETERMINACIÓN DEL COLOR

El color que es percibido por el ojo es la cantidad de energía de una longitud de onda definida que llega a él. Ésta ha sido reflejada por el objeto que se está observando, después de que él ha absorbido parte del total de la energía que le llegó.

Aparte de aquellos factores físicos relacionados con la luz y el color, la determinación del color en el suelo se ve afectada por varios factores, como:

- Cantidad y tipo de luz que cae sobre la muestra, ya que de ella depende la que se va a reflejar hacia el ojo; el color determinado en campo abierto con luz natural es diferente al que se obtiene bajo la luz de una lámpara fluorescente.
- La superficie del suelo que se mira: superficies muy rugosas dispersan ampliamente la luz que reflejan, reduciendo la cantidad de ella que llega al ojo; este efecto es más intenso en la medida en que el ángulo de incidencia de la luz sea más agudo.
- La humedad de la muestra: a mayor contenido de humedad en la muestra, más oscuro se torna el color.

Las consideraciones anteriores han llevado a recomendar que el color del suelo se debe tomar en condiciones de luz natural directa sobre la muestra y en estado húmedo; cuando se toma el color en muestras secas, se debe hacer constar esta situación en la descripción del mismo.

3. PATRONES ESPECIALES DE COLOR EN EL SUELO

No siempre el suelo o sus horizontes presentan colores homogéneos en todo su espesor, sino que manifiestan patrones en la distribución de varios colores en ellos; la manera más común en que se

presentan estos rasgos en el suelo corresponde a manchas de diversos colores inmersas dentro de un color dominante y homogéneo, que se denomina el color de la matriz del suelo.

La presencia de moteos debe hacerse notar siempre, puesto que ellos pueden ser indicativos de la presencia de condiciones reductoras en el ambiente de evolución del suelo o de bajo grado de meteorización del material parental del mismo.

Para describir la situación planteada anteriormente, primero se establece el color de la matriz del suelo, como se indicó en el numeral 2.2. Luego se describen las características de los moteos así: Su **color**, el cual se determina en la misma forma que en la matriz; la **forma** que presentan (puntos, rayas, bandas, etc.), la **abundancia** relativa, el **tamaño** y el **contraste** que presentan con la matriz.

Con relación a la abundancia, el SSDS (1993) establece las siguientes divisiones:

- Abundantes:** Si se presentan en más del 20% de la superficie expuesta del horizonte.
- Comunes:** Si los moteos ocupan entre el 2 y el 20% de la superficie expuesta del horizonte.
- Pocos:** Si ocupan menos del 2% de la superficie expuesta en el horizonte.

Según el tamaño que presenten, los moteos los clasifica el SSDS (1993) como:

- Gruesos:** Si tienen diámetro mayores a 15 mm.
- Medianos:** Si tienen diámetro entre 5 y 15 mm.
- Finos:** Cuando el diámetro es menor de 5 mm.

Con respecto a la nitidez (contraste) no hay definiciones tan precisas como para las otras características y pueden utilizarse los términos **tenues**, **definidos** y **prominentes** para describirla, pasando de menor a mayor contraste, respectivamente (SSDS, 1993).

RECORDAR

- El color refleja buena parte de la composición de sólidos que tiene el suelo.
- El color ayuda a identificar la acción de algunos procesos pedogenéticos.
- El color del suelo se determina, por comparación, con una tabla de colores, en muestras húmedas y bajo la luz natural directa.
- El color se describe con tres parámetros, presentados de la siguiente manera: Matiz Claridad/Pureza.
- A menor claridad y menor pureza, más oscuro es el color.
- El color no siempre es homogéneo en todo un horizonte del suelo, pueden presentarse manchas de otros colores, con diversas formas y tamaños, dentro de un color de fondo, homogéneo.

BIBLIOGRAFÍA

MONTENEGRO, H y D. MALAGÓN. 1990. Propiedades físicas de los suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá. 813 p.

MUNSELL COLOR. 1990. Munsell soil color chart. Baltimore.

SCHULZE, D. G. et al. 1993. Significance of organic matter in determining soil color. In: Soil color. J. M. Bigham y E. J. Ciolkosz editores. SSSA special publication No. 31. Madison. pp: 71-90.

SCHWERTMANN, U. 1993. Relations between iron oxides, soil color and soil formation. In: Soil color. J. M. Bigham y E. J. Ciolkosz editores. SSSA special publication No. 31. Madison. pp: 51-69.

SOIL SURVEY DIVISION STAFF (SSDS). 1993. Soil survey manual. Handbook No. 18. United States Department of Agriculture (USDA). Washington D. C. 437 p.

SOIL SURVEY STAFF. (SSS) 1999. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2^a. Ed. Agriculture Handbook N° 436. USDA. Washington D. C. 869 p.

SOIL SURVEY STAFF (SSS). 1998. Keys to soil taxonomy. 8^a. Ed. USDA. Washington D. C. 326 p.

TORRENT, J. and V. BARRON. 1993. Laboratory measurement of soil color: Theory and practice. In: Soil color. J. M. Bigham y E. J. Ciolkosz editores. SSSA special publication No. 31. Madison. pp: 21-33.

AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Por qué la porción superficial del suelo presenta los colores más oscuros, en la mayoría de los casos?.
2. ¿Por qué se presentan cambios de color entre diferentes porciones dentro del suelo?.
3. ¿Qué son colores litocrómicos y qué puede indicar su presencia en el suelo?.
4. Diga 5 características diagnósticas de la taxonomía de suelos que se definan con el color.
5. ¿Qué es una Tabla Munsell?. ¿Con cuáles parámetros se caracteriza el color del suelo y qué significa cada uno?. ¿Cómo se describe el color de un suelo que tiene chroma igual a cero?.
6. ¿Con qué condiciones se debe determinar el color del suelo?.
7. ¿Cuál de los siguientes colores es más oscuro: 10YR6/6 o 10YR3/2 ?.
8. ¿Qué pueden indicar los siguientes colores en el suelo?:
 - a. Rojo.
 - b. Gris.
 - c. Moteado.
 - d. Azul.
 - e. Blanco.

EVALUACIÓN

1. ¿Qué notación de color le corresponde a un suelo que se encuentra en la mitad de 5Y5/3 y 5Y5/4?.
2. Enumere 4 procesos pedogenéticos específicos que afecten directamente el color del suelo y diga qué color o característica produce en él cada uno (Ayudarse consultando el Capítulo 2).
3. Seleccionar algunos perfiles de suelos en algún informe de levantamiento de suelos y analizar cuál de los parámetros que caracterizan el color cambia más sistemáticamente con la profundidad del suelo y cómo se relaciona con el cambio en el contenido de materia orgánica.

EL PERFIL DEL SUELO

CAPÍTULO 5

CONTENIDO

- ❖ Los horizontes y capas maestros del suelo
 - Horizontes y capas O
 - Horizontes A
 - Horizonte E
 - Horizontes B
 - Horizontes y capas C
 - Capas R
- ❖ Horizontes combinados
 - Horizontes transicionales
 - Horizontes mezclados
- ❖ Características subordinadas de los horizontes y capas maestros del suelo
- ❖ Subdivisiones verticales
- ❖ Discontinuidades litológicas
- ❖ Las secuencias de horizontes y capas
- ❖ Descripción del perfil del suelo

OBJETIVOS

- ❖ Aprender a diferenciar los horizontes y capas que se presentan en el suelo
- ❖ Aprender a nombrar correctamente los horizontes y capas del suelo y a describir sus características
- ❖ Aprender a interpretar, desde un punto de vista genético y de limitaciones para el uso, los horizontes y capas que presente un suelo

C

omo se definió al inicio de esta parte del texto, el suelo es un cuerpo tridimensional y para poder comprender su evolución debe observarse todo el conjunto. Ésto implica que se debe exponer a la observación el interior del suelo.

Para observar el interior del suelo se debe realizar un corte vertical en él, exponiéndolo hasta una profundidad máxima de 2 m, para la mayoría de las aplicaciones prácticas, si antes no se encuentra el material parental fresco; el mínimo espesor del corte que es adecuado, es aquel que permita observar el **solum** (horizontes A y B), puesto que él es el que guarda el registro de la pedogénesis; el corte vertical mencionado se denomina **perfil del suelo**.

Cuando se expone el perfil de un suelo, la mayoría de las veces aparece una serie de porciones aproximadamente paralelas entre sí y a la superficie del terreno; cuando estas porciones se están diferenciando entre sí, debido a que sus características son el resultado de la pedogénesis, reciben el nombre de **horizontes genéticos**, o simplemente horizontes del suelo; si la diferenciación observada no se debe a la pedogénesis, las porciones observadas se nombran **capas**.

1. LOS HORIZONTES Y CAPAS MAESTROS DEL SUELO

El Soil Survey Division Staff (SSDS,1993) define 6 horizontes o capas maestros en el suelo, los cuales simboliza con las letras mayúsculas: **O, A, E, B, C y R**. Recientemente, el Soil Survey Staff (SSS, 1998) adicionó el símbolo **W** a la lista anterior para indicar la presencia de capas de agua dentro del suelo; este símbolo no se usa para capas de agua, hielo o nieve que estén sobre la superficie del suelo.

1.1. HORIZONTES Y CAPAS O

Son porciones del suelo dominadas por materiales orgánicos; no importa si estos materiales han estado o no saturados con agua; tampoco importa el grado de descomposición que tengan dichos materiales orgánicos para merecer el símbolo O.

En los horizontes o capas O, los materiales minerales representan un mínimo porcentaje del volumen de ellos y mucho menos de la mitad de su masa; generalmente, ellos se encuentran en la superficie de suelos minerales, aunque pueden presentarse enterrados por horizontes o capas minerales; también hay suelos donde todos los horizontes y capas son O.

1.2. HORIZONTES A

Son horizontes minerales que se encuentran en la superficie del terreno o por debajo de un horizonte o capa O, si no son enterrados. Además, presentan:

- Acumulación de materia orgánica humificada, íntimamente mezclada con la fracción mineral del suelo y que no está dominado por características de horizontes E o B, y/o
- Propiedades resultantes de actividades de disturbación como laboreo, pastoreo, etc.

1.3. HORIZONTE E

Es un horizonte mineral que se caracteriza por presentar pérdidas de arcillas y/o sesquióxidos de Fe y Al, generando una acumulación de partículas de arena y limo; generalmente está debajo de horizontes o capas O y A y sobre horizontes B; normalmente, presenta colores más claros y texturas más gruesas que los horizontes A y B, que lo confinan.

1.4. HORIZONTES B

Son horizontes minerales que se desarrollan por debajo de alguno de los horizontes descritos anteriormente. En éstos se ha perdido casi todo vestigio de la estructura original del material parental y se observa alguno de los siguientes rasgos pedológicos, solo o combinado con otros:

- Acumulación iluvial de arcillas, hierro, aluminio, humus, carbonatos, yeso y/o sílice.
- Remoción de carbonatos.
- Acumulación residual de sesquióxidos.
- Recubrimientos con sesquióxidos.
- Formación de arcilla y/o liberación de óxidos.
- Formación de estructura prismática, blocosa o granular.

Estos horizontes son siempre subsuperficiales, a menos que hayan sido expuestos en la superficie por procesos erosivos que hayan eliminado horizontes superficiales como O, A y/o E, es decir, que se trate de **suelos decapitados**; no se consideran horizontes B aquellas capas de materiales no consolidados que presentan recubrimientos de arcilla sobre fragmentos de roca o están en sedimentos finamente estratificados; tampoco son horizontes B las capas de acumulación de carbonatos que no están contiguas a otros horizontes genéticos, ni las capas donde el único proceso que ha actuado ha sido la **gleización**.

1.5. HORIZONTES Y CAPAS C

Son horizontes o capas que han sido muy poco afectados por procesos pedogenéticos; en las capas C se incluyen sedimentos, saprolitos y fragmentos de roca poco consolidados, que exhiben baja a moderada resistencia a la excavación; en los horizontes C se incluyen aquellas porciones del suelo que tienen acumulaciones de sílice, carbonatos, yeso o sales más solubles, aún endurecidas, que no presenten relación genética con los horizontes suprayacentes.

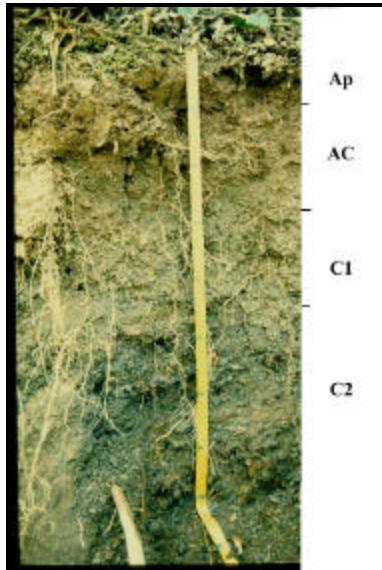
1.6. CAPAS R

Este concepto se reserva para las rocas duras, las cuales dificultan excesivamente su excavación, aunque pueden ser fragmentadas con equipos pesados. En la Figura 5.1 se presentan algunos perfiles de suelos en los que pueden verse varios de los horizontes maestros más comunes en nuestros suelos.

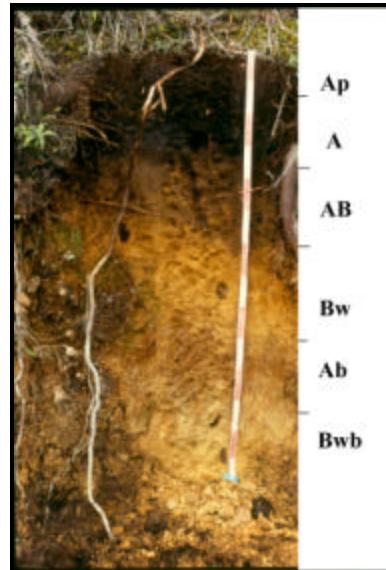
2. HORIZONTES COMBINADOS

En ocasiones, se presentan porciones dentro de los suelos que no tienen propiedades homogéneas en todo su espesor, sino que presentan características de dos horizontes o capas diferentes; en este caso, esta porción del suelo no puede identificarse con una sola letra, como en los horizontes

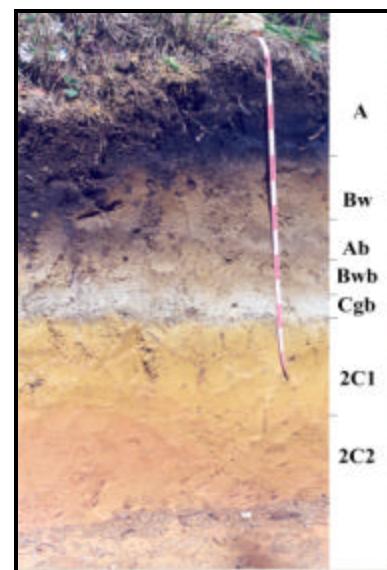
maestros simples, sino que debe recurrirse a la mezcla de dos letras mayúsculas para hacerlo. De acuerdo con la forma en que se combinan las propiedades, el SSDS (1993) define los horizontes transicionales y los mezclados.



a. Entisol



b. Andisol



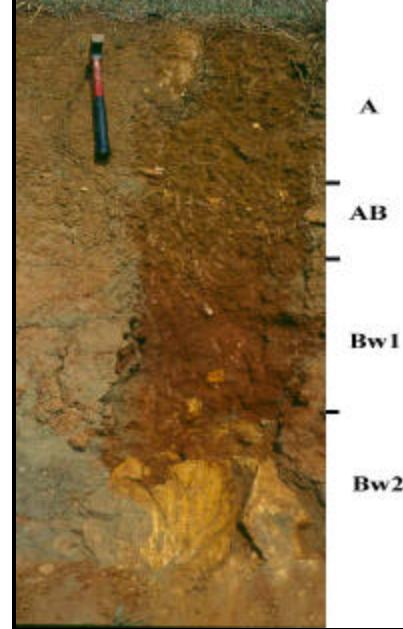
c. Andisol



d. Inceptisol

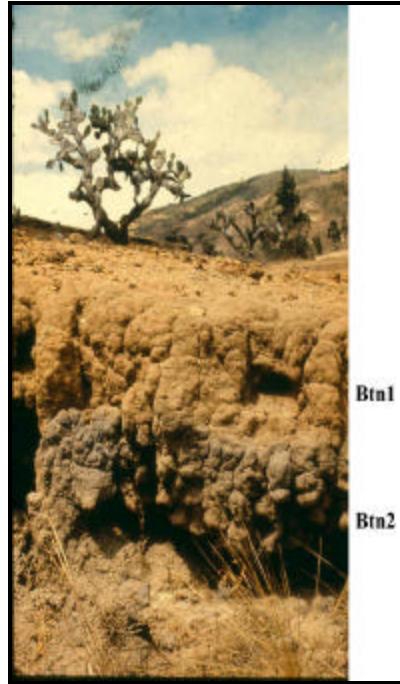


e. Inceptisol

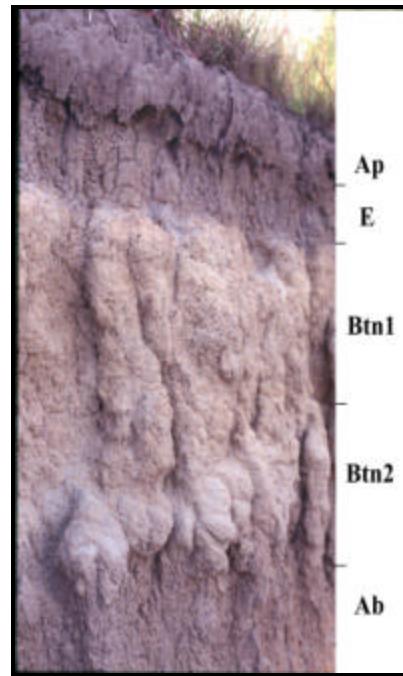


f. Inceptisol

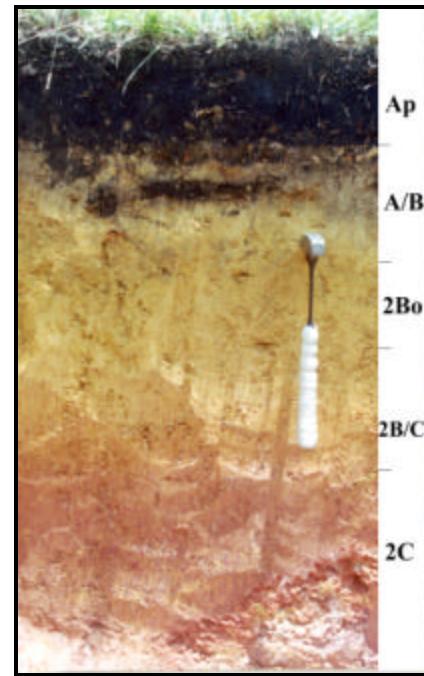
FIGURA 5.1. Perfiles y horizontes maestros comunes en el suelo. (Las fotos de los perfiles e y f fueron facilitadas por los profesores Alberto Arias y Luis Hernán González de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín).



g. Alfisol



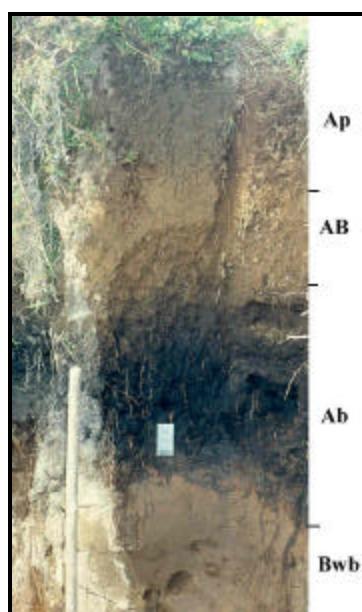
h. Alfisol



i. Oxisol



j. Entisol



k. Andisol



l. Andisol

FIGURA 5.1. Continuación.

2.1. HORIZONTES TRANSICIONALES

Son aquellos horizontes dominados por las propiedades de alguno de los horizontes maestros, pero con propiedades subordinadas de otro; se simbolizan con dos letras mayúsculas, la primera de las cuales indica el horizonte maestro cuyas características son dominantes; la segunda letra indica el horizonte maestro que aporta las demás características del horizonte; ejemplo: Un horizonte AB tiene propiedades dominantes de un horizonte A, pero también tiene algunas del horizonte B que lo subyace. También se presentan con frecuencia horizontes BA, EB, BE, BC y CB.

Este tipo de horizontes puede ser reemplazado por un **límite difuso**, ya que el SSDS (1993) define este límite como una zona de cambio entre dos horizontes o capas de más de 15 cm de espesor. La utilización de esta opción depende, obviamente, de las necesidades del estudio que se lleva a cabo.

2.2. HORIZONTES MEZCLADOS

Son aquellos en los cuales hay porciones específicas de un horizonte rodeadas por porciones de otro horizonte maestro. Se simbolizan por una fracción de dos letras mayúsculas, en la cual el numerador indica el horizonte maestro cuyas propiedades ocupan el mayor volumen del horizonte mezclado y, la del denominador, indica el horizonte que aporta menos volumen a aquél; por ejemplo, en un horizonte A/B, las propiedades del horizonte A ocupan más espacio que las del B, dentro del horizonte A/B.

En la Figura 5.2 se representa esquemáticamente la diferencia entre los dos grupos de horizontes combinados definidos anteriormente. Los colores representan las propiedades de cada horizonte y, en los dos casos del ejemplo, los horizontes combinados tienen propiedades dominantes del horizonte A (más cantidad de color café que de amarillo).

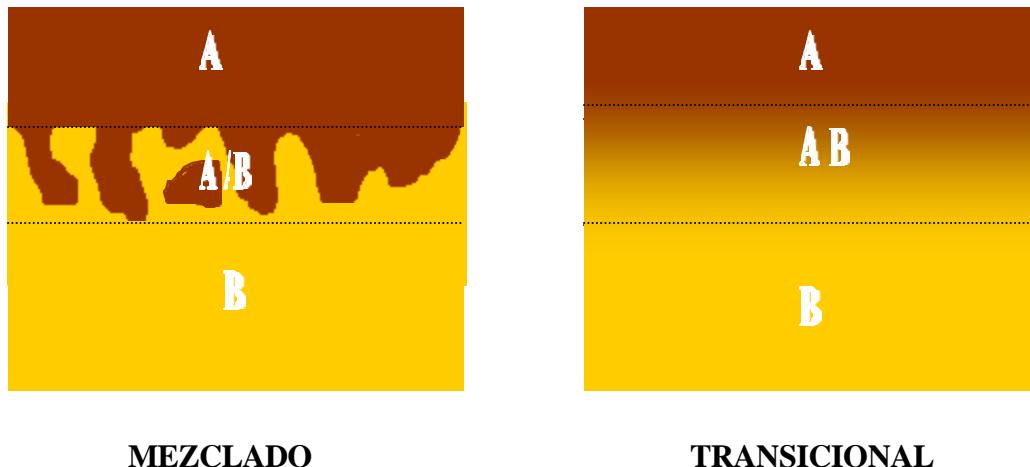


FIGURA 5.2. Diferencia entre un horizonte transicional y uno mezclado.

La nomenclatura de los horizontes y capas maestros que se utilizaba, hasta buena parte de la década de los 80's, era distinta a la que se utiliza actualmente, como puede verse en la Tabla 5.1.

TABLA 5.1. Nomenclatura de los horizontes y capas maestros del suelo, según SSS (1975, 1998)

HORIZONTES SEGÚN SSS		SIGNIFICADO ABREVIADO
1975	1998	
01	0i	Residuos orgánicos muy poco descompuestos
02	0a - 0e	Residuos orgánicos fuerte y moderadamente descompuestos, respectivamente
A1	A	Horizonte superficial con materia orgánica humificada y mezclada con la fracción mineral ó disturbado por el uso
A2	E	Eluvial de coloides del suelo
A3 - AB	AB - EB	Transicional entre A y B o entre E y B
A & B	E/B	Mezclado de E y B
AC	AC	Transicional entre A y C
B1	BA - BE	Transicional entre B y A o entre B y E
B & A	B/E	Mezclado de B y E
B2	B	Horizonte B característico
B3	BC - CB	Transicional entre B y C o entre C y B
C	C	Sedimentos, roca fragmentada y saprolitos
R	R	Sustrato rocoso duro y continuo
-	W	Capa de agua en el suelo
II, III, IV, etc.	2, 3, 4, etc.	Discontinuidad litológica

3. CARACTERÍSTICAS SUBORDINADAS DE LOS HORIZONTES Y CAPAS MAESTROS DEL SUELO

Algunos procesos pedogenéticos específicos o los efectos más notorios de ellos pueden hacerse resaltar en la nomenclatura de los horizontes y capas maestros del suelo, mediante la utilización de subíndices literales minúsculos que se adicionan a los símbolos de los primeros.

El USDA (SSS, 1998) ha definido una buena cantidad de símbolos para estos efectos, los cuales se presentan en la Tabla 5.2, con una definición simplificada en la mayoría de ellos; como los símbolos utilizados en esta publicación modifican los que se utilizaban anteriormente, también se presentan los que se definieron en aquella época (SSS, 1975), ya que hay mucha literatura escrita con ellos.

Para el uso de los subíndices literales mencionados, se han establecido algunas convenciones para su uso, entre las que se destacan:

- Cuando se usan las letras a, e, h, i, r, s, t, w, con otros subíndices, las expuestas aquí se colocan en primer lugar; solamente en los horizontes Bhs o Crt se combinan entre ellas.
- Cuando se usan las letras c, d, f, g, m, v, x, con otros subíndices, excepto con b, aquellas se colocan en último lugar.
- Cuando hay horizontes enterrados, la letra b se coloca al final; sólo se usa la b para suelos minerales enterrados.
- La letra t tiene precedencia sobre cualquier otro subíndice posible.

TABLA 5.2. Símbolos utilizados para identificar las características subordinadas de los horizontes y capas maestros del suelo, según el SSS (1975, 1998).

SÍMBOLO SEGÚN SSS		SIGNIFICADO ABREVIADO
1975	1998	
-	a	Materia orgánica muy descompuesta
b	b	Horizonte sepultado
cn	c	Concreciones o nódulos (Cuerpos cementados discretos, de composición variada, con o sin organización concéntrica interna, respectivamente)
-	d	Restricción física a la raíz
-	e	Materia orgánica con un grado de descomposición medio
f	f	Horizonte con hielo permanente
-	ff	Presencia de permafrost (Temperatura < 0°C) seco (Sin congelamiento de agua)
g	g	Gleización
h	h	Acumulación de materia orgánica iluvial
-	i	Materia orgánica poco descompuesta
-	j	Presencia de jarosita (Sulfato de Fe, amarillo)
-	jj	Crioturbación
ca	k	Acumulación de carbonatos, principalmente de Ca
m	m	Cementación
sa	n	Acumulación de sodio
-	o	Acumulación residual de sesquióxidos
p	p	Disturbación por arado o similar
si	q	Acumulación de sílice
r	r	Roca meteorizada restrictiva para la raíz
ir	s	Acumulación iluvial de complejos de materia orgánica y sesquióxidos
-	ss	Presencia de slickensides (Superficies de agregados pulidas y estriadas).
t	t	Acumulación iluvial de arcilla silicatada
-	v	Presencia de plintita (Cuerpos discretos, muy duros en seco, rojizos, enriquecidos en Fe).
-	w	Horizonte B con desarrollo de color y/o de estructura
x	x	Fragipán (Ver Numeral 2.5.2.3 del Capítulo 20)
cs	y	Acumulación de yeso
sa	z	Acumulación de sales más solubles que el yeso

4. SUBDIVISIONES VERTICALES

Dentro de un mismo horizonte o capa pueden presentarse algunos cambios morfológicos que, aunque no cambian su definición, son lo suficientemente notorios e importantes como para resaltarlos, lo cual se hace mediante subdivisiones verticales del mismo; estas subdivisiones verticales se simbolizan con subíndices numéricos arábigos continuos, empezando con 1. Éstos se colocan a continuación de los símbolos literales que identifican el horizonte; ejemplo: Ap - Bt₁ - Bt₂ - C.

Al establecer estas subdivisiones es importante hacerlas con el propósito de mejorar el conocimiento del suelo, pues ellas definen nuevos horizontes en el perfil. Ésto incrementa el trabajo de campo para describirlos y de laboratorio para caracterizarlos.

Cuando se hacen subdivisiones verticales, se realizan con la misma secuencia numérica sólo en aquel horizonte o capa que presente los mismos símbolos, incluyendo los subíndices literales de las características subordinadas; cuando cambie la nomenclatura de los horizontes o capas que se están subdividiendo, si los que siguen requieren subdivisiones, se debe empezar una nueva serie de numeración; ejemplo: Ap - Bth₁ - Bth₂ - Bt₁ - Bt₂ - C y no Ap - Bth₁ - Bth₂ - Bt₃ - Bt₄ - C.

Cuando en el perfil del suelo que se analiza se encuentran discontinuidades litológicas, estas no interrumpen la secuencia de la numeración de las subdivisiones verticales, siempre que se trate de los mismos horizontes o capas en todos los materiales diferentes; ejemplo: Ap - Bw₁ - Bw₂ - 2Bw₃ - 2C es la nomenclatura correcta y no Ap - Bw₁ - Bw₂ - 2Bw₁ - 2C.

En algunos estudios especiales de suelos, como por ejemplo para drenaje o riego, o cuando los horizontes o capas definidos en el perfil son muy gruesos y no pueden hacerse subdivisiones verticales en ellos, se requiere hacer un muestreo estratificado, en ellos, para realizar los respectivos análisis de laboratorio; en estos casos, las subdivisiones verticales son completamente arbitrarias, pero se manejan como si fueran iguales a las que se han descrito anteriormente.

Si un horizonte Bt tiene 40 cm de espesor y se debe hacer un muestreo cada 10 cm, el horizonte se subdivide en 4 porciones arbitrarias de 10 cm de espesor cada una y la nomenclatura queda: Bt₁ - Bt₂ - Bt₃ - Bt₄; si se presenta la situación planteada en un horizonte que ya se hubiera dividido verticalmente, se adiciona otro subíndice para diferenciar las nuevas porciones; si el horizonte es un Bs₂ de 30 cm de espesor, la nueva nomenclatura será: Bs₂₁ - Bs₂₂ - Bs₂₃.

5. DISCONTINUIDADES LITOLÓGICAS

Una discontinuidad litológica, en el suelo, se presenta cuando hay un cambio en el tipo de materiales litológicos dentro del perfil del suelo o una diferencia de edad considerable entre los materiales que han dado origen a los horizontes del suelo; estas discontinuidades se manifiestan comúnmente como cambios texturales o mineralógicos importantes entre las porciones del suelo que han evolucionado a partir de los diferentes materiales y, con frecuencia, presentan límites abruptos entre ellas.

Las discontinuidades litológicas se simbolizan colocando números arábigos como prefijos a las letras mayúsculas, que identifican los horizontes o capas maestros correspondientes. Se empieza con el número 2 donde se presente el primer cambio de material y se omite el numero 1. Los prefijos mencionados se pueden utilizar con cualesquiera de los símbolos de los horizontes y capas maestros. Todos los que se consideren desarrollados a partir del mismo material litológico llevan el mismo prefijo numérico.

La presencia de discontinuidades litológicas es frecuente en las terrazas aluviales antiguas del oriente antioqueño cercano (cercañas a la cabecera municipal de Marinilla, quebrada La Mosca), como puede verse en el siguiente perfil de suelos: Ap - Bw - C₁ - 2C₂ - 2C₃ - 3C₄, donde el primer material (el superior, el que está en la superficie del terreno) corresponde a un depósito de cenizas volcánicas; la primera discontinuidad, es decir, el segundo material, corresponde a un depósito aluvial formado por una capa de arena gruesa sobre una capa de cascallo y la segunda discontinuidad corresponde al saprolito de la cuarzodiorita del batolito antioqueño.

Según el SSDS (1993), cuando se presentan suelos enterrados, que se han desarrollado a partir de materiales litológicos que han tenido el mismo origen geológico - geomorfológico, no se tienen en cuenta las discontinuidades litológicas para identificar los horizontes o capas formados; así por ejemplo, en una secuencia de tres suelos enterrados en una terraza aluvial, todos desarrollados de aluviones, se tendrá la siguiente nomenclatura: Ap - Bw - C - Ab₁ - Bwb - Ab₂ - Cb; las capas de materiales aluviales sin desarrollo pedogenético apreciable, aunque sean granulométricamente

contrastantes, no deben tratarse como discontinuidades litológicas. Solamente en el caso en que se mejore la descripción del perfil y se comprenda mejor la génesis del suelo se puede hacer caso omiso de esta recomendación.

6. LAS SECUENCIAS DE HORIZONTES Y/O CAPAS

En algunos perfiles de suelos pueden encontrarse grupos de dos o más horizontes o capas que llevan los mismos símbolos y que están separados por otros diferentes; en este caso se habla de la existencia de secuencias (**sequum**) de horizontes o capas; cuando se presenta, a los horizontes o capas iguales se les colocan símbolos **prima** para relacionarlos; ejemplo: Ap – E – Bh – C – E' – Bt – E'' – B't.

7. DESCRIPCIÓN DEL PERFIL DEL SUELO

La descripción del perfil de un suelo es un proceso sistemático de observación, calificación y/o cuantificación de algunas de sus propiedades, con la intención primordial de:

- Caracterizar una población de suelos, y/o
- Apreciar su variabilidad espacial, y/o
- Establecer su génesis y su clasificación taxonómica, y/o
- Definir sus limitantes de uso y establecer su uso y manejo más racional.

El primer paso para llevar a cabo la descripción consiste en encontrar un corte de suelo fresco con un espesor de 1.5 a 2 m, aproximadamente, desde la superficie del terreno; en caso de no encontrarse cortes ya hechos en el sitio (taludes de carretera, canales, etc.), se debe abrir un hueco con la profundidad indicada y de 1 m de ancho por 1 m largo (**calicata**); se procede luego a pulir la superficie del perfil con un cuchillo, evitando dejar superficies brillantes en él por efecto del raspado.

Se pasa luego a determinar los horizontes y/o capas maestros presentes en el suelo y a comprobar la presencia de discontinuidades litológicas en él, observando las características morfológicas macroscópicas que presenta el perfil (color, estructura, etc.); se señalan en este perfil los sitios donde se producen cambios en las propiedades morfológicas macroscópicas.

Cuando se tienen definidos los horizontes y capas maestros, se definen en ellos las características subordinadas que tengan, así como las subdivisiones verticales que se detecten; se marcan los sitios donde se producen cambios en los horizontes y se establece la nomenclatura definitiva para cada uno de los horizontes separados (Ap, Ah, Bt, Bt2, etc.).

Una vez definidos los horizontes y capas que tenga el suelo, se procede a cuantificar o calificar, según el caso, las propiedades físico – químicas de cada uno de ellos, que puedan definirse en campo, utilizando los términos y definiciones del SSDS (1993), que se dan en los cuadros resumen de la Tabla 5.3; la textura se describe con las clases texturales expuestas en el triángulo textural (Capítulo 7) y la estructura como en la Tabla 3.1; el resultado de estas observaciones se va registrando en formularios especiales como los que se muestran en las Figuras 5.3 y 5.4; el tratamiento de las propiedades físico – químicas, mencionadas, es tema de los próximos capítulos y en ellos se planteará como se describen, cuantifican y califican.

TABLA 5.3. Cuadros resumen donde se presenta la terminología utilizada para describir variables ambientales y para caracterizar algunas propiedades físico – químicas del suelo, en el campo, con fines de descripción de perfiles de suelos (La mayoría sintetizados de SSDS, 1993).

Clasificación del gradiente de la pendiente

CLASE	INCLINACIÓN (%)
Plana o casi plana	< 3
Ligeramente inclinada	3 – 7
Fuertemente inclinada	7 – 12
Moderadamente escarpada	12 – 25
Escarpada	25 – 50
Muy escarpada	> 50

Pisos altitudinales

PISO CLIMÁTICO	ALTITUD (msnm)
Cálido	0 – 1000
Medio	1000 – 2000
Frío	2000 – 3000
Muy frío	3000 – 3600
Paramuno	3600 – 4200
Subnival y nival	> 4200

Clases de humedad (Índice de thorntwaite, ver numeral 1.2 del Capítulo 1, página 16)

CLASE DE HUMEDAD DISPONIBLE	ÍNDICE DE HUMEDAD
Muy húmeda	> 100
Húmeda	60 a 100
Semihúmeda	20 a 60
Subhúmeda	0 a 20
Semiárida	-20 a 0
Árida	-40 a -20
Muy árida o Desértica	< -40

Régimen de humedad del suelo

RÉGIMEN	DEFINICIÓN
Arídico o Tórrico	Seco la mayor parte del año y húmedo menos de 90 días consecutivos
Ústico	Seco 90 días o más acumulativos; húmedo 90 días o más consecutivos o 180 días o más acumulativos al año
Údico	El suelo no está seco más de 90 días acumulativos al año
Perhúmedo	La evapotranspiración es menor que la precipitación durante todos los meses del año
Ácuico	Saturado con agua y sin oxígeno durante un tiempo suficiente para producir condiciones de reducción
Perácuico	Nivel freático en o cerca a la superficie permanentemente

Régimen de temperatura del suelo

RÉGIMEN	TEMPERATURA (°C)
Isofríido	< 8
Isomésico	8 y 15
Isotérmico	15 y 22
Isohipertérmico	> 22

TABLA 5.3. Continuación.

Clases de erosión hídrica

CLASE	PÉRDIDA DE HORIZONTE SUPERFICIAL (%)
1	< 25
2	25 - 75
3	> 75
4	Todo y algo o todos los horizontes o capas subyacentes.

Cobertura vegetal natural

FORMACIÓN	CARACTERÍSTICAS
Selva basal	0 - 1000 msnm; 23 - 30 °C; >1800 mm; bosque.
Selva subandina	1000 - 2400 msnm; 16 - 23 °C; >1000 mm; bosque.
Selva andina	2400 - 3800 msnm; 6 - 15 °C; <1000 mm; nubosidad y niebla altas; bosque.
Páramo	3800 - 4700 msnm; 2 y 12 °C, áreas desarboladas con Poaceae, arbustos pequeños y plantas cespitosas, almohadilladas y arrosetadas.
Sabana	Llanuras cubiertas por vegetación baja de Poaceae y algunos arbustos y árboles muy espaciados en regiones bajas y cálidas.
Xerófitas	Zonas muy secas con árboles pequeños y arbustos achaparrados, de hojas coriáceas y cutícula gruesa; son abundantes las plantas espinosas y las cactáceas.
Manglares	Árboles y arbustos perennifolios y halófitos en áreas costeras tropicales y cerca a los estuarios de los ríos
De márgenes de ríos	Vegetación heliófila compuesta principalmente por gramíneas monoespecíficas de tallos rastreros y estoloníferas, a los lados de los ríos.

Frecuencia de inundaciones

CLASE	FRECUENCIA
Ninguna	No hay
Rara	1 a 5 veces cada 100 años
Ocasional	6 a 50 veces cada 100 años
Frecuente	Más de 50 veces en 100 años

Duración de las inundaciones

CLASE	DURACIÓN
Extremadamente breve	Menos de 4 horas
Muy breve	Entre 4 y 48 horas
Breve	Entre 2 y 7 días
Larga	Entre 1 y 4 semanas
Muy larga	Más de un mes

Pedregosidad superficial

CLASE	SUPERFICIE CUBIERTA (%)	DISTANCIA (m) ENTRE	
		PIEDRAS	BLOQUES
1	< 0.1	> 8	> 20
2	0.1 - 3	1 - 8	3 - 20
3	3 - 15	0.5 - 1	1 - 3
4	15 - 50	0.3 - 0.5	0.5 - 1
5	> 50	0.03 - 0.3	0.05 - 0.5

TABLA 5.3. Continuación.

Afloramientos rocosos

CLASE	% DE LA SUPERFICIE AFECTADA
1	<0.1
2	0.1 - 2
3	2 - 10
4	10 - 25
5	25 - 50
6	50 - 90
7	>90

Condición de drenaje

CLASE	CARACTERÍSTICAS
Excesivamente drenado	Agua removida muy rápido; nivel freático muy profundo; textura gruesa; conductividad hidráulica saturada muy alta
Algo excesivamente drenado	Conductividad hidráulica saturada alta; lo demás como en la clase anterior
Bien drenado	Agua es removida fácilmente; el suelo no presenta rasgos de condiciones redox
Moderadamente bien drenado	Evacuación del agua algo lenta; nivel freático moderadamente profundo; hay alguna capa con conductividad hidráulica saturada moderadamente baja o más lenta, en el primer metro del suelo
Algo pobemente drenado	Evacuación del agua es lenta; nivel freático superficial a moderadamente profundo y permanente a transitorio; se requiere drenaje artificial
Pobemente drenado	El suelo permanece mojado hasta poca profundidad por períodos largos de tiempo; el nivel freático es superficial a muy superficial y permanece cerca a la superficie largos períodos; se requiere drenaje artificial
Muy pobemente drenado	Nivel freático muy superficial y puede estar sobre la superficie durante largos períodos; generalmente se presenta en áreas depresionales

Profundidad efectiva (hasta donde pueden penetrar las raíces libremente)

CLASE	PROFUNDIDAD DEL SUELO (cm)
Muy superficial	< 25
Superficial	25 - 50
Moderadamente profunda	50 - 100
Profunda	100 - 150
Muy profunda	> 150

Abundancia y tamaño de los moteos

CLASE	ABUNDANCIA (%)	TAMAÑO	
		CLASE	(mm)
Pocos	< 2	Finos	< 5
Comunes	2 a 20	Medios	5 a 15
Muchos	> 20	Gruesos	> 15

Nitidez de los moteos

CLASE	ESPESOR DE LA GRADACIÓN DEL COLOR (mm)
Difuso	> 2
Claro	< 2
Abrupto	No hay

TABLA 5.3. Continuación.

Clases de fragmentos de roca

EQUIDIMENSIONALES		ALARGADOS	
DIÁMETRO (mm)	NOMBRE	LARGO (mm)	NOMBRE
2 – 75	Gravilla	2 - 150	Channer
75 – 250	Grava	150 - 380	Laja
250 – 600	Piedra	380 - 600	Piedra
> 600	Bloque	> 600	Bloque

Abundancia de fragmentos de roca en el suelo

% VOLUMÉTRICO	MODIFICADOR DE TEXTURA
< 15	No se usa ninguno.
15 - 35	Nombre adjetivado de la clase por tamaño para modificar la clase textural. Ejemplo: Franco gravoso.
35 - 60	Al nombre adjetivado de la clase por tamaño se le coloca la partícula "muy" para modificar la clase textural. Ejemplo: Franco muy gravoso.
60 - 90	Al nombre adjetivado de la clase por tamaño se le coloca la partícula "extremadamente" para modificar la clase textural. Ejemplo: Franco extremadamente gravoso.
> 90	Cuando hay tan poco material de tamaño menor a 2 mm (tierra fina) no se puede determinar la textura confiablemente; en este caso la clase por tamaño de fragmentos de roca reemplaza la clase textural. Ejemplo: Gravas.

Grado de desarrollo estructural

CLASE	DEFINICIÓN
Suelta	No hay ninguna unión entre las partículas del suelo
Masiva	Todas las partículas del suelo están unidas entre sí
Débil	Poco desarrollo de agregados, casi no se ven
Moderada	Agregados bien formados y diferenciables
Fuerte	Agregados muy bien formados, duraderos y diferenciables entre sí, aun con el suelo sin disturbar

Consistencia (ver Capítulo 10) del suelo en mojado

CLASE	PLASTICIDAD	ROLLO (espesor)	PEGAJOSIDAD
No plástico		No puede hacerse	No pegajoso
Ligeramente plástico		6 mm	Ligeramente pegajoso
Moderadamente Plástico		4 mm	Moderadamente pegajoso
Muy plástico		2 mm	Muy pegajoso

Consistencia del suelo en húmedo

CLASE	PRESIÓN PARA DESMENUZAR LOS AGREGADOS
Suelta	El material no es coherente
Muy friable	Muy poca entre los dedos
Friable	Débil entre los dedos
Firme	Moderada con los dedos
Muy firme	Muy fuerte entre los dedos
Extremadamente firme	No se dejan desmenuzar entre los dedos

TABLA 5.3. Continuación.

Consistencia del suelo en seco

CLASE	FUERZA NECESARIA PARA ROMPER LOS PEDS
Suelta	Material no coherente
Blanda	Muy débil entre los dedos
Ligeramente dura	Ligera entre los dedos
Dura	Moderada a fuerte entre los dedos
Muy dura	Hay que utilizar las dos manos para romperlo
Extremadamente dura	No rompe ni utilizando las dos manos

Tamaño de los poros y raíces del suelo

CLASE	DIÁMETRO (mm)
Muy gruesos	> 10
Gruesos	10 - 5
Medios	5 - 2
Finos	2 - 0.5
Muy finos	< 0.5

Abundancia de poros y raíces en el suelo, en un área de 1 dm²

CLASE	CANTIDAD SEGÚN TAMAÑO		
	MUY FINOS Y FINOS	MEDIOS Y GRUESOS	MUY GRUESOS
Pocos	< 100	< 1	< 0.01
Comunes	100 - 500	2 - 5	0.02 - 0.05
Muchos	> 500	> 5	> 0.05

Cantidad y nitidez de los cutanes (películas de diversos materiales que recubren superficies de peds y/o de poros)

CLASE	(%)	CANTIDAD		NITIDEZ	VISIBILIDAD
		CLASE	VISIBILIDAD		
Muy pocos	5	Tenua	Con lupa de 10x		
Pocos	5 a 25	Definidos	A ojo y con lupa 10x		
Comunes	25 a 50	Prominentes	A ojo		
Muchos	50				

Concreciones y los nódulos del suelo.

CLASE	TAMAÑO mm	FORMA	ABUNDANCIA (%) CLASE	
			(%)	CLASE
Fino	< 2	Redondeados	< 2	Pocos
Medio	2-5	Cilíndricos	2-20	Comunes
Grueso	5-20	Aplanados	> 20	Abundantes
Muy grueso	20-75	Irregulares		
Extremadamente grueso	> 75			

TABLA 5.3. Continuación.

Nitidez y topografía de los límites entre horizontes o capas del suelo

CLASE	NITIDEZ		TOPOGRAFÍA
		TRANSICIÓN (cm)	
Abrupto		< 2	Plano
Claro		2 - 5	Ondulado
Gradual		5 - 15	Irregular
Difuso		> 15	Quebrado

A continuación, a manera de ejemplo, se presenta la descripción de un perfil de suelo, tomada de Jaramillo (1989):

“Unidad cartográfica: Complejo Riachón – Bodega (R).

Unidad Taxonómica: Conjunto Esperanza: Paralithic Dystropept.

Describió: Daniel F. Jaramillo J.

Fecha: Marzo 28 de 1988.

Localización: Hacienda Los Suribios, municipio de Amalfi (Antioquia), a 30 m al norte de la estación meteorológica ubicada en la margen izquierda del río Riachón.

Altitud: 1470 msnm.

Posición fisiográfica: Terraza antigua del río Riachón, centro de la parte plana.

Topografía: Plana con pendiente menor de 3% y recta.

Material parental: Aluvión medio.

Uso actual: Ganadería extensiva.

Régimen de humedad del suelo: Údico.

Régimen de temperatura del suelo: Isotérmico.

Profundidad efectiva: Profundo.

Drenaje natural: Bien drenado.

Evidencias de erosión: Severa degradación de la unidad por antigua minería de oro de aluvión.

Epipedón: Órico.

Horizontes subsuperficiales: Cámbico.

Otras características diagnósticas: Presencia de un aluvión grueso a poca profundidad, funcionando como un contacto paráltico.

Descripción del perfil:

Ap 0 - 30 cm; color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/2); franco arenoso con 20% de gravilla fina, angulosa, cuarcítica; con estructura granular, fina, débil; muy friable, no plástico, no pegajoso; abundantes poros gruesos, continuos, redondeados; poca actividad biológica; abundantes raíces gruesas y medianas; pH 5.0; límite claro, plano.

Bw 30 - 45 cm; color en húmedo amarillo parduzco (10 YR 6/8); franco arcillo arenoso con 10% de gravilla media, angulosa, cuarcítica; estructura en bloques subangulares, medios débiles; friable, ligeramente plástico, ligeramente pegajoso; abundantes poros gruesos, continuos, redondeados; pocas raíces finas; pH 5.0; límite abrupto, plano.

C 45 -105 - + cm; capa de gravas y gravillas aluviales con una matriz franco arcillosa, de color en húmedo pardo fuerte (7.5 YR 5/8); plástica y pegajosa, con pH de 5.3.”

Unidad cartográfica				Perfil No.	
Describió				Fecha	
Departamento				Municipio	
Localización geográfica					
				Altitud	msnm
Unidad fisiográfica					
Localización del perfil en la unidad fisiográfica					
Relieve				Pendiente	%
Topografía vecina					
Temperatura: Edáfica	°C	Ambiental	°C	Nivel freático	cm
Precipitación promedio anual	mm	Distribución			
Régimen de temperatura				Régimen de humedad	
Material parental					
Material geológico					
Vegetación natural					
Uso actual de la tierra e intensidad					
Evidencias de erosión					
Profundidad efectiva					
Limitante de profundidad					
Inundaciones: Tipo				Frecuencia	1 cada años
Drenaje: Externo				Natural	
Horizontes diagnósticos:	Epipedón Endopedones				
Clasificación taxonómica del suelo					
Identificar factores y procesos pedogenéticos más importantes					
Identificar principales limitantes para varios uso					

FIGURA 5.3. Modelo de formulario para caracterizar los factores de formación que están actuando en un suelo cuyo perfil se describe.

CARACTERÍSTICAS		HORIZONTES				
Nomenclatura						
Espesor (cm)						
Textura						
Color Munsell	Notación					
	Nombre					
Estructura	Tipo					
	Clase					
	Grado					
Consistencia	Seco					
	Húmedo					
	Mojado					
Poros	Tamaño					
	Cantidad					
Raíces	Tamaño					
	Cantidad					
Actividad de macroorganismos						
Formaciones especiales						
Reacciones	NaF					
	HCl					
	H ₂ O ₂					
pH						
Límites	Nitidez					
	Topografía					
Observaciones especiales y croquis de ubicación del perfil en el paisaje.						

FIGURA 5.4. Modelo de formulario para registrar las propiedades morfológicas y físico – químicas durante la descripción del perfil de un suelo.

En la Tabla 5.4 se presentan algunos horizontes comunes con las características que sirven para su identificación en el campo; además, se dan algunos de sus principales limitantes para el uso y manejo del suelo.

TABLA 5.4. Horizontes comunes en suelos colombianos: Nomenclatura, características y limitantes más frecuentes para su uso agropecuario.

HORIZONTES	CARACTERÍSTICAS	LIMITANTE PARA USO	PRÁCTICAS GENERALES DE MANEJO
Ab	Horizonte oscuro a cierta profundidad en el suelo.	Acidez y baja fertilidad, en climas húmedos.	
Ag, Bg o Cg	Colores neutros con o sin moteos; poco desarrollo o ausencia de estructura.	Si están poco profundos pueden indicar problemas de mal drenaje.	Drenar, usar sistemas especiales de siembra (caballones), plantar cultivos tolerantes a mal drenaje.
Ah o Bh	Oscuro; buen desarrollo estructural; pH bajo.	Acidez y baja fertilidad, en climas húmedos.	Conservar la materia orgánica; fertilizar y encalar racionalmente.
Bk o Ck	Puede presentar partículas blancas distribuidas en el horizonte; pH alto; reacciona con HCl al 10%	Problemas asociados a pH alcalino.	Lavar y drenar, plantar cultivos tolerantes a la salinidad.
Horizontes con “m”.	Duros en seco, con estructura masiva.	Si están poco profundos pueden afectar el drenaje e impedir la penetración de raíces en el suelo; químicamente dependen del tipo de cementante (Si, Ca, Fe, etc.); pueden ocasionar problemas graves de erosión.	Realizar prácticas mecánicas como arada profunda o subsolado; adición de materia orgánica; plantar cultivos de raíz superficial.
Bn o Cn	Estructura generalmente columnar a masiva; pH alto.	Si están a poca profundidad limitan la profundidad efectiva del suelo y su drenaje; químicamente presenta problemas asociados a sodicidad.	Remover el Na del complejo de cambio por adición de sales, o ácidos y/o materia orgánica; lavar y drenar; realizar prácticas mecánicas; plantar cultivos tolerantes a alcalinidad.
Bo o Bs	Estructura muy bien desarrollada; colores rojos.	Baja fertilidad; acidez, alta retención de fosfatos.	Fertilizar y encalar racionalmente.
Ap	Muy suelto y poroso.	Susceptible de erosionarse.	Mantener humedad, cobertura y materia orgánica.
Bt	Textura pesada; estructura bien desarrollada; revestimiento de peds y poros.	Puede limitar la penetración de raíces y el drenaje del suelo.	Realizar riego y poca labranza; subsolar o arar profundo; plantar cultivos de raíz superficial.
Bw	Cambio de color, estructura y/o textura, con respecto a los horizontes suprayacentes.	Baja fertilidad y acidez, en climas húmedos.	Fertilizar y encalar racionalmente si no está muy profundo.
Bx o Cx	Poca porosidad; estructura con tendencia masiva.	Se comportan como horizontes poco cementados.	Ver horizontes con “m”

Muchos de los horizontes de la tabla anterior pueden presentar combinaciones de las características de éstos. En este caso, los limitantes de uso y su manejo serán la acumulación de limitantes y de prácticas de manejo establecidos para los horizontes simples, relacionados con ellos; ejemplo: Btm, Ckm, Btcb, etc.

RECORDAR

- La mayoría de los procesos pedogenéticos específicos producen horizontes en el suelo.
- Los horizontes maestros del suelo se simbolizan con las letras mayúsculas: A, B, E, C, R, O y W.
- La presencia de procesos pedogenéticos específicos puede hacerse notar adicionando a las mayúsculas, letras minúsculas con un significado predefinido.
- El conjunto de horizontes y capas presentes en el suelo componen el Perfil del Suelo.
- El perfil del suelo se describe, en campo, hasta una profundidad máxima cercana a los 2 m.
- La descripción del perfil del suelo permite: Caracterizar sus propiedades y la variabilidad de ellas, establecer su génesis y su clasificación taxonómica, identificar limitantes de uso y definir prácticas de manejo.

BIBLIOGRAFÍA

JARAMILLO, J. D. F. 1989. Estudio general de suelos, erosión y uso potencial agropecuario del área de influencia del proyecto hidroeléctrico Riachón, Amalfi, Antioquia. Empresas Públicas de Medellín. Medellín. 65 p.

SOIL SURVEY DIVISION STAFF (SSDS). 1993. Soil survey manual. Handbook No. 18. United States Department of Agriculture (USDA). Washington D. C. 437 p.

SOIL SURVEY STAFF (SSS). 1998. Keys to soil taxonomy. 8^a. Ed. USDA. Washington D. C. 326 p.

SOIL SURVEY STAFF (SSS). 1975. Soil Taxonomy: A basic System of making and interpreting soil surveys. Agriculture Handbook No. 436. USDA. Washington D. C. 754 p.

AUTOEVALUACIÓN

1. Definir los siguientes términos: solum, perfil de suelo, horizonte genético, capa.
2. ¿Con qué criterios se definen los horizontes A, E, B?.
3. ¿Qué son características subordinadas en los horizontes del suelo?. ¿Cómo se simbolizan en la nomenclatura de los horizontes?.
4. ¿Qué es una discontinuidad litológica y cómo se simboliza?.
5. ¿En qué consiste describir un perfil de suelo y para qué se hace?.
6. Enumere 20 variables que se caractericen en la descripción de un perfil de suelo.
7. ¿Cómo se denomina el horizonte del suelo que está disturbado por las prácticas de manejo?.
8. ¿En cuál horizonte del suelo se espera el menor desarrollo pedogenético?.
9. ¿Cómo es la nomenclatura de los horizontes del suelo que presenten las siguientes características?:
 - a. Iluviación de materia orgánica.
 - a. Iluviación de óxidos de hierro.
 - b. Acumulación residual de óxidos de hierro.
 - c. Iluviación de arcillas silicatadas.
 - d. Mal drenaje en el horizonte B.
 - e. Horizonte A enterrado.
10. Para cada uno de los horizontes definidos en el punto anterior, establecer, al menos, dos limitantes para su uso en actividades agropecuarias.

11. Se tienen los siguientes perfiles de suelos:

- a. Ap – A – Bs₁ – Bs₂
- b. Oi – A – C – Cg₁ – Cg₂ – Cg₃
- c. Ap – Bsg₁ – Bsg₂ – BCg
- d. Ap – A – Bh – Ab – 2Cg
- e. E – Bt – Btm – 2Btmk – 2BCk – 3BC – 3C

Para cada uno de los suelos correspondientes a los perfiles esquematizados, responda:

- i. ¿Cuáles tienen mal drenaje?. ¿Por qué?.
- ii. ¿Cuáles tienen baja permeabilidad?. ¿Por qué?.
- iii. ¿Cómo es la fertilidad de cada uno y por qué?.
- iv. ¿Cuál es el suelo, pedogenéticamente, más evolucionado y por qué?.
- v. Para cada suelo diga cuantos horizontes, cuantos horizontes maestros y cuantas discontinuidades litológicas hay.
- vi. Para cada suelo defina por lo menos dos procesos pedogenéticos específicos que puedan deducirse de la nomenclatura de los horizontes.
- vii. ¿En cuáles suelos hay horizontes iluviales?. Eluviales?.

EVALUACIÓN

Ubicar dos suelos en sitios contrastados fisiográficamente, describir los perfiles correspondientes a cada uno de ellos y definir:

- a. ¿Cuál ha sido el aporte de los diferentes factores de formación al desarrollo de cada suelo?.
- b. Los procesos pedogenéticos específicos que han determinado sus características.
- c. Comparar, en términos de desarrollo, los dos suelos estudiados.
- d. ¿Cuáles son los limitantes de uso agropecuario más sobresalientes que tienen los suelos estudiados?.

Tenga presente que realizar las actividades propuestas en equipo, con varios compañeros, es más productivo.

LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

PARTE 3

LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

EL MEDIO FÍSICO EDÁFICO

- ❖ Composición volumétrica del suelo
- ❖ Relaciones básicas

LA TEXTURA DEL SUELO

- ❖ Definiciones
- ❖ Evaluación
- ❖ La arcilla dispersa en el suelo

DENSIDAD Y POROSIDAD DEL SUELO

- ❖ Densidad real
- ❖ Densidad aparente
- ❖ Porosidad

LA FASE LÍQUIDA DEL SUELO

- ❖ Contenido de humedad del suelo
- ❖ Retención de la humedad del suelo
- ❖ Constantes de humedad
- ❖ Determinación
- ❖ La curva de retención de humedad
- ❖ Movimiento del agua en el suelo

LA CONSISTENCIA DEL SUELO

- ❖ Estados de consistencia en el suelo
- ❖ Evaluación
- ❖ Interpretación

MANEJO DEL MEDIO FÍSICO DEL SUELO

- ❖ Degradación física del suelo
- ❖ Recuperación del medio físico edáfico

E

l suelo, según Hillel (1998)¹, es un sistema heterogéneo, polifásico, particulado, disperso y poroso en el cual el área interfacial por unidad de volumen puede ser muy grande.

Las tres fases que componen el sistema suelo son:

- La fase **sólida**, compuesta por el conjunto de las partículas inorgánicas (cristalinas y no cristalinas) y las orgánicas.
- La fase **líquida**, que la componen el agua y los solutos que están disueltos en ella, es decir, la fase líquida es, en realidad, una solución: la solución del suelo.
- La fase **gaseosa**: o atmósfera del suelo, formada por todos aquellos compuestos que se presentan en forma gaseosa y cuyos representantes más abundantes, en condiciones de aireación adecuada del suelo son el CO₂, O₂ y vapor de agua.

La manera como interactúan las fases mencionadas define el campo de actividad de la Física de suelos: al definir la composición y la organización de la fase sólida, queda definido, también, el espacio que van a ocupar las otras dos fases.

Al entender las relaciones planteadas se puede, entonces, hacer un uso y un manejo racionales del agua, de la aireación y del espacio para las raíces, evitándose problemas de compactación y de erosión, es decir, de degradación física del suelo.

¹ HILLEL, D. 1998. Environmental soil physics. Academic Press. San Diego. 771 p.

EL MEDIO FÍSICO EDÁFICO

CAPÍTULO 6

CONTENIDO

- ❖ Composición volumétrica del suelo
- ❖ Relaciones básicas

OBJETIVOS

- ❖ Conocer los componentes del suelo y su organización ideal
- ❖ Conocer algunas relaciones matemáticas que pueden establecerse entre los componentes del suelo
- ❖ Aprender a manipular algunas relaciones matemáticas para efectuar cálculos sencillos

C

asi todos los suelos son mezclas de partículas minerales, materia orgánica en varios grados de descomposición, iones y elementos químicos, agua y aire, en proporciones variables.

1. COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA DEL SUELO

Físicamente, el suelo es un **medio poroso** compuesto por tres **fases**: sólida, líquida y gaseosa. La proporción idealizada en que deben estar las tres fases del suelo, para ofrecer un medio adecuado al crecimiento de las plantas, se esquematiza en la Figura 6.1.

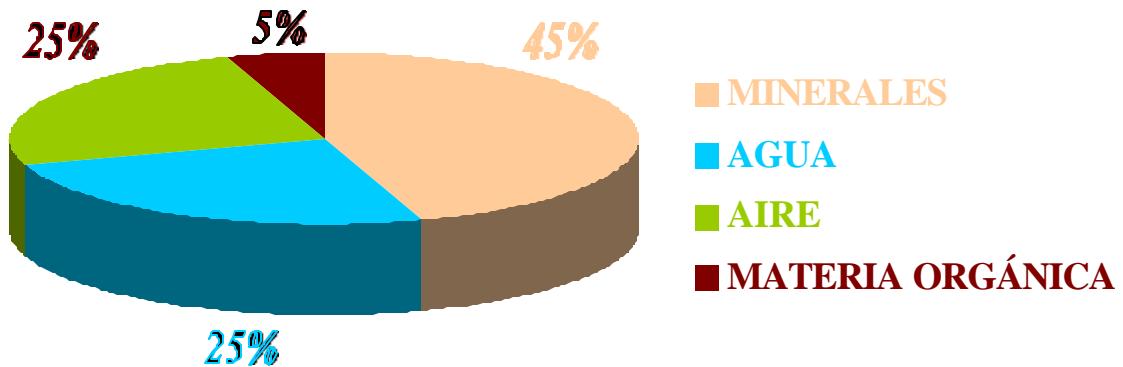


FIGURA 6.1. Composición física ideal del suelo.

En la conceptualización clásica de la edafología se cuantifica la relación presentada en la Figura 6.1. Se asigna a la fase sólida un valor de 50% del volumen del suelo, repartido en 45% de componente mineral y 5% de componente orgánico; el volumen restante se reparte en cantidades iguales entre las fases líquida y gaseosa.

Para tener una adecuada fertilidad física en el suelo, no sólo se requiere estar cerca de la composición ideal mencionada, sino que, además, los diferentes componentes deben estar distribuidos equilibradamente en el espacio; de acuerdo con esta observación, el medio físico del suelo puede idealizarse como se muestra en la Figura 6.2.

La situación que se presenta en la Figura 6.2 pierde su carácter de “ideal”, para convertirse en una necesidad, cuando se quiere utilizar el suelo como un recurso de producción agropecuaria, ya que este no debe permanecer ni inundado (salvo casos muy especiales), ni totalmente seco; lo anterior implica que debe haber un rango de situaciones en las cuales se dé una relación entre fases que proporcione un medio físicamente adecuado para suplir las necesidades de la planta.

Dicha situación de relativo equilibrio puede presentarla el suelo en condiciones naturales o puede crearse artificialmente; en el primer caso, la evolución del suelo lo lleva a esa condición quasi-

estable; en el segundo, el hombre puede acondicionarlo a sus necesidades, mediante el laboreo; en cualesquiera de los casos, el comportamiento físico edáfico obedecerá a la presencia de ciertas propiedades físicas y a la interacción entre ellas, como se muestra esquemáticamente en la Figura 6.3; se observa en esta representación que hay dos propiedades que prácticamente controlan la dinámica física del suelo que son la textura y la estructura, ambas dependientes de la fase sólida.

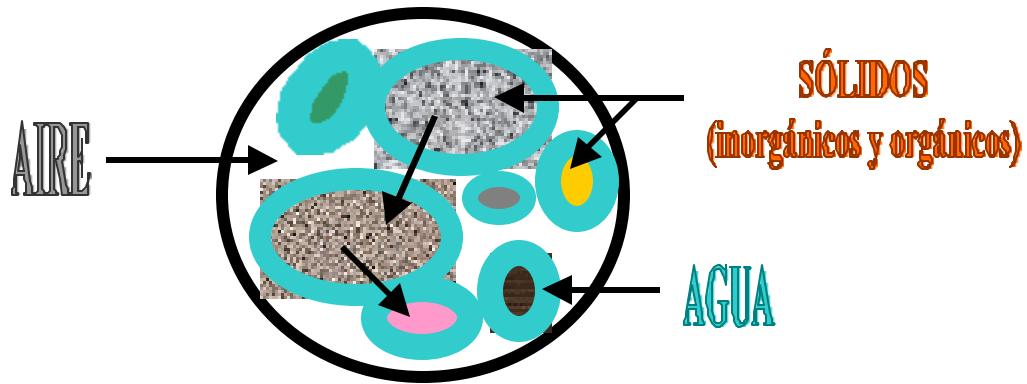


FIGURA 6.2. El medio físico ideal del suelo.

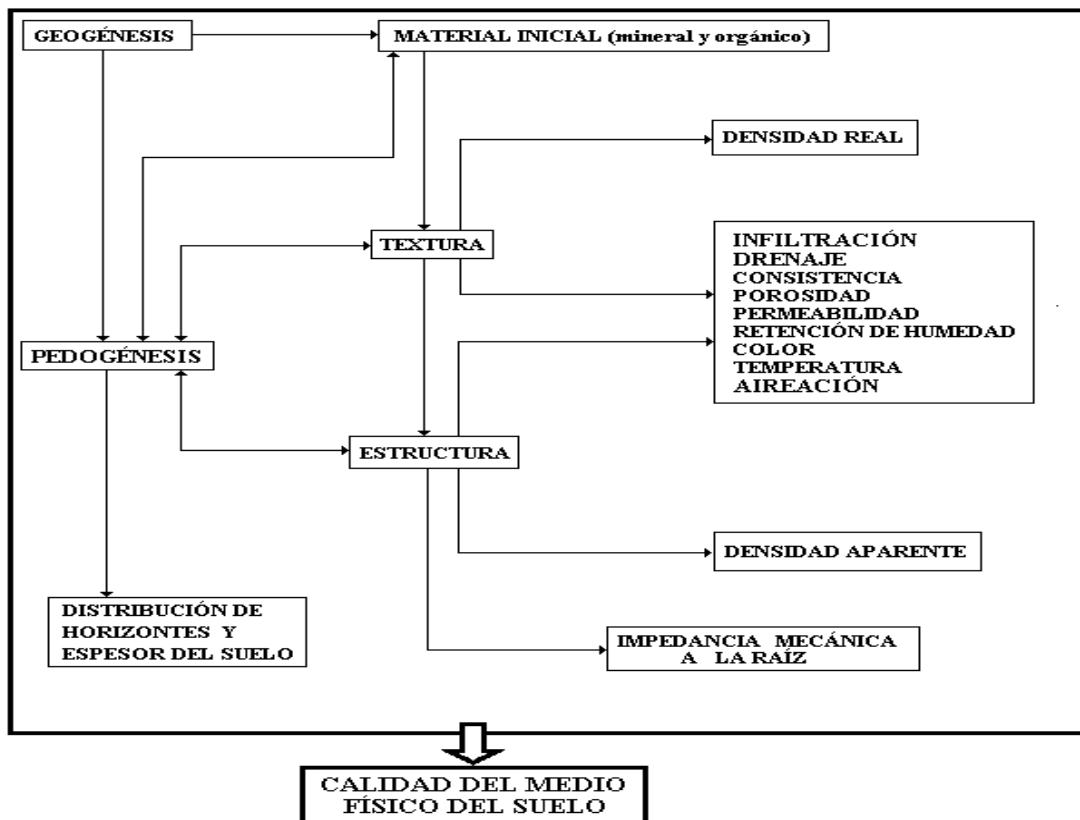


FIGURA 6.3. Las propiedades físicas del suelo y sus principales inter-relaciones.

En los capítulos siguientes se hará una breve descripción de casi todas las propiedades físicas del suelo representadas en la Figura 6.3. Se trata de abarcar en ella la definición, los métodos estandarizados para evaluarla y algunas interpretaciones útiles para su manejo.

2. RELACIONES BÁSICAS

Si se separan las diferentes fases del suelo, entre ellas se pueden establecer algunas relaciones básicas, tanto gravimétricas como volumétricas, las cuales se convierten en la manera más sencilla y común de establecer los valores de algunas propiedades físicas del mismo; para entender dichas relaciones, se recurre al apoyo de la Figura 6.4.

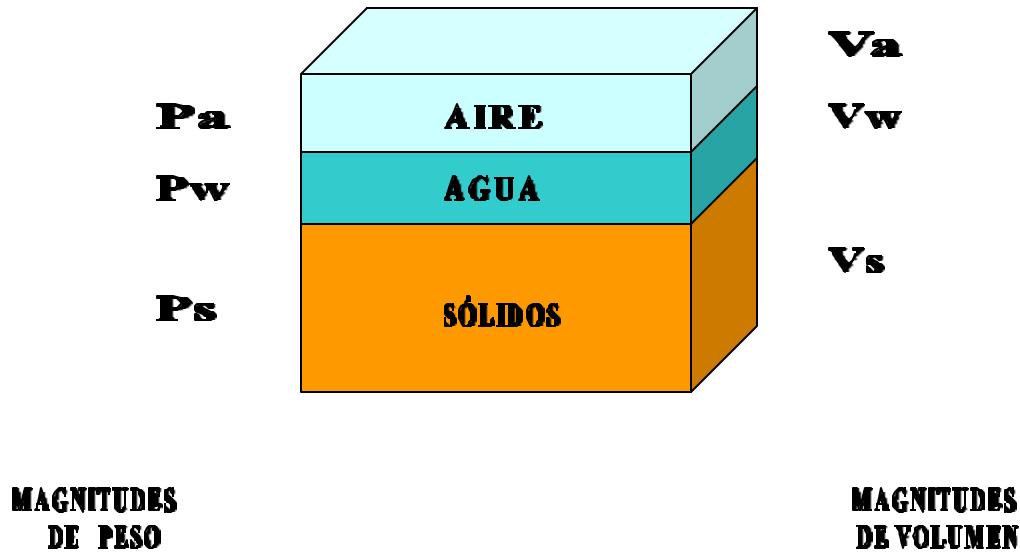


FIGURA 6.4. Componentes gravimétricos y volumétricos básicos del suelo.

En la Figura 6.4, las magnitudes peso de sólidos, peso del agua y peso del aire, se representan con los símbolos **Ps**, **Pw** y **Pa**, respectivamente. Las magnitudes volumen de sólidos, volumen de agua y volumen de aire, tienen los símbolos **Vs**, **Vw** y **Va**, respectivamente.

El volumen total del suelo (**Vt**), es la suma de **Vs + Vw + Va**; a su vez, **Vw + Va** constituyen el volumen del espacio poroso total del suelo (**Vp**). Para cálculos prácticos, el valor de **Pa** es despreciable. Con las magnitudes mencionadas se pueden establecer las siguientes relaciones:

- La densidad de la fase sólida (**densidad real**) del suelo se define como:

$$Dr = \frac{Ps}{Vs} \quad [6.1]$$

- La densidad del suelo teniendo en cuenta su organización (**Densidad aparente**), será:

$$Da = \frac{Ps}{Vt} = \frac{Ps}{Vs + Vp} = \frac{Ps}{Va + Vw + Vs}$$
[6.2]

- El espacio poroso del suelo (**porosidad**), en volumen, es:

$$P = \frac{Vp}{Vt} \times 100 = \frac{Vt - Vs}{Vt} \times 100$$
[6.3]

- El **contenido de humedad** del suelo, en términos porcentuales de peso de agua: **gravimétrico**, se calcula como:

$$W (\%) = \frac{Pw}{Ps} \times 100$$
[6.4]

- El **contenido de humedad** del suelo, en términos porcentuales de volumen de agua: **volumétrico**, es:

$$\Theta (\%) = \frac{Vw}{Vt} \times 100$$
[6.5]

- Los contenidos de humedad gravimétrico y volumétrico se pueden relacionar mediante la expresión:

$$\Theta = W \times Da$$
[6.6]

- El grado de **saturación con agua** que presenta el suelo se evalúa con la relación:

$$S (\%) = \frac{Vw}{Vp} \times 100$$
[6.7]

RECORDAR

- **El suelo es un sistema trifásico compuesto por sólidos (minerales y orgánicos), agua y aire.**
- **Debe haber un equilibrio entre las fases del suelo; lo ideal es que se presente 50% del volumen ocupado por los sólidos y 50% de espacio poroso para el agua y el aire.**
- **La textura y la estructura son las propiedades que mayor control ejercen sobre el medio físico del suelo.**

AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Cuáles son las fases del suelo?.
2. ¿Cuáles son las proporciones ideales en que deben estar las fases del suelo?.
3. ¿El hombre puede modificar la relación en que se encuentren las fases del suelo?. ¿Cómo?.
4. Enumerar 4 propiedades del suelo que sean controladas por la textura y por la estructura del mismo.
5. ¿Qué se entiende por determinación gravimétrica?. ¿Y volumétrica?.

EVALUACIÓN

1. Una muestra de 1 ft³ de suelo presentó la siguiente composición gravimétrica:

<input type="checkbox"/> Material mineral:	70 lb
<input type="checkbox"/> Material orgánico:	5 lb
<input type="checkbox"/> Agua:	13 lb
<input type="checkbox"/> Aire:	10 g

Representar gráficamente la anterior composición en forma volumétrica y compararla con la de un suelo ideal. (R: Minerales: 42.43%, Materia Orgánica: 5.86%, Agua: 20.88%, Aire: 30.83%).

2. Calcular la saturación con agua que presenta el suelo del punto anterior (R: 40.86%).
3. Representar gráficamente la distribución de las tres fases del suelo utilizado para el ejemplo de la Página 218 en el Capítulo 9; asumir la densidad de partículas promedia donde sea necesaria. (R: **Primer horizonte**: Sólidos: 37.74%, Agua: 39.6%, Aire: 22.66%; **Segundo horizonte**: Sólidos: 45.28%, Agua: 26.8%, Aire: 27.92%; **Tercer horizonte**: Sólidos: 49.06%, Agua: 12.1%, Aire: 38.84%).

LAS PROPIEDADES	¡Error! Marcador no definido.
LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO	151
LA TEXTURA DEL SUELO	151
DENSIDAD Y POROSIDAD DEL SUELO	151
LA FASE LÍQUIDA DEL SUELO	151
LA CONSISTENCIA DEL SUELO	152
MANEJO DEL MEDIO FÍSICO DEL SUELO	152
EL MEDIO FÍSICO EDÁFICO.....	155
CAPÍTULO 6.....	155
CONTENIDO	155
OBJETIVOS	155
1. COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA DEL SUELO	157
2. RELACIONES BÁSICAS	159
AUTOEVALUACIÓN.....	161
EVALUACIÓN	161

LA TEXTURA DEL SUELO

CAPÍTULO 7

CONTENIDO

- ❖ Definiciones
- ❖ Evaluación de la textura del suelo
 - Determinación de la textura del suelo por sedimentación
 - Bases teóricas
 - Determinación por el método de Bouyoucos
 - Evaluación de la textura del suelo en el campo
 - Propiedades del separado arena
 - Propiedades del separado limo
 - Propiedades del separado arcilla
 - Procedimiento
 - Limitaciones del método del tacto para determinar la textura del suelo
- ❖ La arcilla dispersa en el suelo

OBJETIVOS

- ❖ Conocer la textura como propiedad física fundamental del suelo
- ❖ Conocer los métodos más comunes existentes para determinar la textura del suelo, así como sus limitaciones
- ❖ Conocer las propiedades y la importancia de las diferentes partículas del suelo

L

a textura es una propiedad exclusiva de la fase sólida del suelo y, más específicamente, de la fracción inorgánica de aquella. Es, además, una propiedad fuertemente dependiente del material parental del suelo.

1. DEFINICIONES

La **textura** es aquella propiedad que establece las cantidades relativas en que se encuentran las partículas de diámetro menor a 2 mm, es decir, la **tierra fina**, en el suelo; estas partículas, llamadas **separados**, se agrupan en tres clases, por tamaños: **Arena (A)**, **Limo (L)** y **Arcilla (Ar)** y son definidas como se muestra en la Tabla 7.1, según varias instituciones internacionales.

TABLA 7.1. Definición de los separados del suelo. (Generalizado parcialmente de Montenegro y Malagón, 1990).

SEPARADO	RANGO DE DIÁMETRO DE PARTÍCULA (mm)		
	USDA	ISSS*	DIN y BSI**
ARENA	2 - 0.05	2 - 0.02	2 - 0.08
LIMO	0.05 - 0.002	0.02 - 0.002	0.08 - 0.002
ARCILLA	< 0.002	< 0.002	< 0.002

* Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo.

** DIN: Instituto Alemán de Estándares; BSI: Instituto Británico de Estándares.

En la tabla anterior, se observa la coincidencia que hay entre los diferentes sistemas, al establecer el límite de tamaño para las arcillas. Ésto obedece a las notorias diferencias de comportamiento físico-químico de estas partículas, con respecto a las de la arena y el limo, pues éstas son prácticamente inertes, desde el punto de vista químico, en tanto que las arcillas se comportan como coloides cargados eléctricamente; también, se observa que no hay un límite estandarizado entre la arena y el limo, lo cual demuestra que su definición es, hasta cierto punto, arbitraria y que tiene un objetivo eminentemente práctico. El sistema de clasificación más aceptado en nuestro medio es el que propone el USDA, el cual subdivide los separados en los rangos que se exponen en la Tabla 7.2.

TABLA 7.2. Clasificación de los separados del suelo, según el sistema USDA. (Tomada parcialmente de Mejía, 1983).

SEPARADO	RANGO DE DIÁMETRO DE PARTÍCULA	
	mm	mm
Arena muy gruesa	2 - 1	2000 - 1000
Arena gruesa	1 - 0.5	1000 - 500
Arena media	0.5 - 0.25	500 - 250
Arena fina	0.25 - 0.1	250 - 100
Arena muy fina	0.1 - 0.05	100 - 50
Limo grueso	0.05 - 0.02	50 - 20
Limo medio	0.02 - 0.005	20 - 5
Limo fino	0.005 - 0.002	5 - 2
Arcilla gruesa	0.002 - 0.0002	2 - 0.2
Arcilla fina	< 0.0002	< 0.2

El tamaño de las partículas que predominan determina la textura del suelo; se dice que un suelo es de **textura gruesa** cuando las partículas predominantes son de tamaño grande; en cambio, los suelos de **textura fina** son aquellos cuyas partículas predominantes son las de menor tamaño; además, las distintas partículas difieren bastante en cuanto a sus propiedades físico-químicas, por lo cual, la naturaleza de los suelos minerales está determinada, en gran parte, por el grupo de separados que predominan en él.

La textura del suelo tiene especial significado en: aireación, movimiento del agua, retención de humedad, retención y liberación de iones, disponibilidad de nutrientes y con ellos en su productividad, erodabilidad, uso y manejo.

2. EVALUACIÓN DE LA TEXTURA DEL SUELO

Existen dos métodos generales para la determinación de la textura del suelo: a) **por sedimentación** y b) **al tacto**.

2.1. DETERMINACIÓN DE LA TEXTURA DEL SUELO POR SEDIMENTACIÓN

2.1.1. Bases teóricas

Este método consiste en dejar sedimentar una muestra de suelo en un medio líquido durante un determinado tiempo, al cabo del cual se cuantifica la cantidad de partículas de un determinado tamaño que hay en suspensión; la medida de las partículas en suspensión se hace directamente en el líquido, por medio de un **hidrómetro** (que es un densímetro), o muestreando aquella con una pipeta y cuantificando, posteriormente, la cantidad de material extraído.

La textura del suelo, para los fines prácticos normales, se determina por el método del **hidrómetro** o de **Bouyoucos**, el cual consiste en determinar los porcentajes en que se encuentran los diferentes separados del suelo, de acuerdo con el peso de una muestra seca del mismo; este método se fundamenta en la **Ley de Stokes**, la cual establece que la velocidad de caída de las partículas pequeñas, en un medio líquido, es directamente proporcional a su tamaño, según la siguiente relación:

$$V = \frac{2(Dr - \rho_w) g r^2}{9\eta} \quad [7.1]$$

Donde: V: Velocidad de caída: cm s^{-1} .

Dr: Densidad de partículas: g cm^{-3} .

ρ_w : Densidad del líquido (agua en este caso): g cm^{-3} .

g: Aceleración de la gravedad: cm s^{-2} .

r: Radio de la partícula: cm.

η : Viscosidad del líquido: $\text{g cm}^{-1} \text{s}^{-1}$.

Para que la relación anterior tenga validez, deben cumplirse algunas condiciones como:

- Total **dispersión** de las partículas del suelo durante todo el tiempo que dure el proceso de sedimentación, es decir, que no se presente **floculación** durante la determinación.
- Que todo el proceso de sedimentación se lleve a cabo a temperatura constante.
- Que la concentración de la suspensión sea lo suficientemente diluida, de modo que no afecte significativamente la viscosidad.
- Que el recipiente en el cual se efectúa la sedimentación, tenga un diámetro lo suficientemente grande, como para evitar la atracción de sus bordes sobre las partículas.

Las condiciones anteriores llevaron, entonces, a calibrar un hidrómetro que permitiera estandarizar el método y establecer correcciones en aquellos casos en que se presentaran desviaciones en las condiciones experimentales ideales; estas condiciones de calibración se basan en varios supuestos:

- Las partículas del suelo son esféricas y presentan igual densidad.
- Se asume una densidad de partículas igual a 2.65 g cm^{-3} .
- Las partículas se sedimentan en caída libre.
- No se presenta turbulencia en la suspensión.
- Todas las partículas que están sedimentando, tienen tamaños mayores al tamaño de las moléculas de agua.

El hidrómetro estandarizado para este análisis es el **ASTM-152H** (Forsythe, 1975) y las condiciones analíticas para las cuales fue calibrado son:

- Temperatura de 19.4°C .
- Densidad de partículas de 2.65 g cm^{-3} .
- El medio de suspensión es agua pura, por lo cual $\delta w = 1 \text{ g cm}^{-3}$ y que $\eta = 0.01 \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

Cuando se utilizan otros hidrómetros y/u otras condiciones de trabajo, diferentes a las expuestas, se deben hacer las respectivas correcciones; para ampliar los criterios expuestos, anteriormente, pueden consultarse algunos textos como Baver et al (1973), Forsythe (1975), Bowles (1982), Arango (1985), Montenegro y Malagón (1990), entre otros.

2.1.2. Determinación por el método del hidrómetro o de Bouyoucos

2.1.2.1. Procedimiento

Para establecer la textura del suelo por este método, en análisis de rutina y con suelos que tengan bajo contenido de materia orgánica ($< 5\%$), se llevan a cabo las siguientes acciones (ver implementos en la Figura 7.1):

- Se pesan 50 g de suelo, cernido por tamiz de 2 mm y seco al aire, siempre que no se note arenoso, caso en el cual se pesan 100 g de suelo.
- Se coloca el suelo en el vaso de una batidora (especialmente diseñada para no moler el suelo), se le agregan 10 a 20 mL de dispersante y se bate durante 10 minutos.

- Se transfiere la suspensión anterior a un cilindro graduado de 1000 mL, se lava el vaso con agua destilada y se completa el volumen del cilindro.
- Se agita la suspensión unas 10 veces, vigorosamente, con un émbolo de caucho y se deja reposar, tomando registro del tiempo a partir del momento en que se retire el émbolo.
- A los 40 s de reposo se hace la primera lectura con el hidrómetro apuntando, además, la temperatura de la suspensión; con esta lectura se calcula el contenido de arena (A%) con la Fórmula [7.2].
- Al terminar la lectura de los 40 s, se retira el hidrómetro y se deja en reposo la suspensión hasta completar 2 horas. Al cabo de éstas, se introduce nuevamente el hidrómetro y se hace otra lectura; se toma también la temperatura; con esta lectura se calcula el contenido de arcilla (Ar%), utilizando la Fórmula [7.3].
- A continuación, se calcula el contenido de limo (L%) con la Fórmula [7.4].
- Los porcentajes obtenidos se llevan al triángulo textural (ver Figuras 7.4 y 7.5) y se define la clase textural correspondiente a la muestra tratada.
- En las Figuras 7.2 y 7.3 se presentan dos modelos de formulario para consignar los resultados que se van obteniendo en este análisis textural.

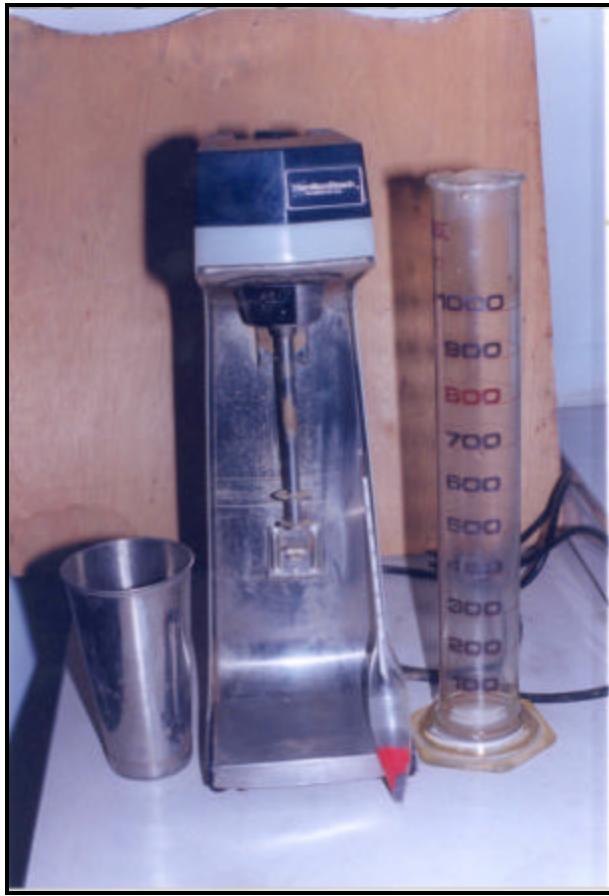


FIGURA 7.1. Implementos utilizados para la determinación de la textura del suelo por el método del hidrómetro.

Las fórmulas a utilizar para establecer los contenidos de los separados del suelo, son:

$$A (\%) = 100 - \left(\frac{\text{Lectura corregida } 40\text{s}}{\text{Peso muestra}} \times 100 \right) \quad [7.2]$$

$$Ar (\%) = \frac{\text{Lectura corregida } 2\text{h}}{\text{Peso muestra}} \times 100 \quad [7.3]$$

$$L (\%) = 100 - [A (\%) + Ar (\%)] \quad [7.4]$$

Código de la muestra	Lectura a los 40 s			Lectura a las 2 h		
	Hidrómetro	Temperatura (°C)	Hidrómetro corregida	Hidrómetro	Temperatura (°C)	Hidrómetro corregida

FIGURA 7.2. Formulario para consignar los resultados de la determinación de la textura del suelo por el método del hidrómetro.

Código de la muestra	Contenido de los separados (%)			Clase Textural
	Arena	Limo	Arcilla	

FIGURA 7.3. Formulario para registrar la información requerida para establecer la clase textural de un suelo.

Para llevar a cabo la dispersión de la muestra se utilizan sales de **sodio**; en casos especiales de suelos con altos contenidos de materia orgánica, de óxidos de hierro, de carbonatos de calcio o de compuestos hidrofóbicos, hay que someter la muestra a pretratamientos para eliminar dichos componentes; para esto, se utilizan diferentes compuestos químicos y/o procedimientos mecánicos, cuya descripción escapa a los objetivos de estas notas, pero que pueden consultarse en Forsythe (1975), Suárez y Gómez (1976), Montes y Delgado (1977), Escorcia y Gaviria (1981), Giovannini et al (1983), entre otros.

Las lecturas del hidrómetro corresponden a la cantidad de material sólido que se encuentra en suspensión, a la altura del centro de volumen del hidrómetro, en g L^{-1} , es decir, mide una densidad; como la temperatura afecta la densidad, el hidrómetro ha sido calibrado previamente para trabajar a temperatura de 19.4 °C (67 °F). Cuando esta condición de temperatura no se cumple, hay que corregir la lectura, agregándole o restándole 0.2 unidades a ella, por cada grado centígrado de temperatura, por encima o por debajo de la temperatura de calibración que se registre, respectivamente.

2.1.2.2. Manejo de los resultados

Para facilitar el manejo de la información obtenida en el análisis textural descrito anteriormente, las diferentes cantidades en que se presentan los separados del suelo han sido agrupadas en doce (12) **clases texturales**. Se trata de incluir en cada clase aquellos suelos que, aunque presentan diferentes cantidades de arena, limo y arcilla, las presentan en proporciones tales que su comportamiento físico, químico y mecánico no difiere apreciablemente entre ellos.

Los rangos de variación de las clases texturales se presentan en la Tabla 7.3 y están representados en el **triángulo textural** (Figura 7.4). La nomenclatura utilizada para nombrar las clases texturales ha sido establecida por el USDA (Soil Survey Division Staff, SSDS, 1993). Para determinar la clase que le corresponde a un suelo dado, se ubican los porcentajes de arena, limo y arcilla en el respectivo eje del triángulo, se proyecta en él dicho valor, siguiendo la dirección indicada por la flecha, hasta que las tres líneas se intercepten determinando un punto; la clase en la cual queda comprendida dicha intersección es

la clase textural del suelo analizado; así por ejemplo, a un suelo que presente 40% de arena, 30% de limo y 30% de arcilla, le corresponde la clase textural Franco arcillosa.

El término utilizado para definir una clase textural implica el separado dominante en la textura; así, en un suelo Arcillo limoso, el separado dominante es la arcilla, ya que es el separado que encabeza el nombre de la clase textural; el suelo **Franco** es aquel cuyos separados están en una proporción tal que ninguno de ellos domina las propiedades del suelo; desde el punto de vista de la planta, esta clase textural es la que presenta un mejor equilibrio entre sus separados.

TABLA 7.3. Rango de variación de los contenidos de arena, limo y arcilla en las diferentes clases texturales de suelos.

CLASE TEXTURAL	RANGO (%) EN EL CONTENIDO DE		
	ARENA	LIMO	ARCILLA
Arenosa	100 – 85	15 – 0	10 – 0
Arenosa franca	90 – 70	30 – 0	15 – 0
Franco arenosa	85 – 43	50 – 0	20 – 0
Franca	52 – 23	50 – 32	27 – 7
Franco limosa	50 – 0	87 – 50	27 – 0
Limosa	20 – 0	100 – 80	12 – 0
Franco arcillo arenosa	80 – 45	28 – 0	35 – 20
Franco arcillosa	45 – 20	53 – 15	40 – 27
Franco arcillo limosa	20 – 0	73 – 40	40 – 27
Arcillo arenosa	67 – 45	20 – 0	55 – 35
Arcillo limosa	20 – 0	60 – 40	60 – 40
Arcillosa	45 – 0	40 – 0	100 – 40

El triángulo textural de la Figura 7.4 ha sido generalizado de varias formas, tratando de agrupar clases texturales en **familias texturales** (Figura 7.5a) y éstas, a su vez, en **grupos texturales**, con base en la fracción predominante en la textura (Figura 7.5b).

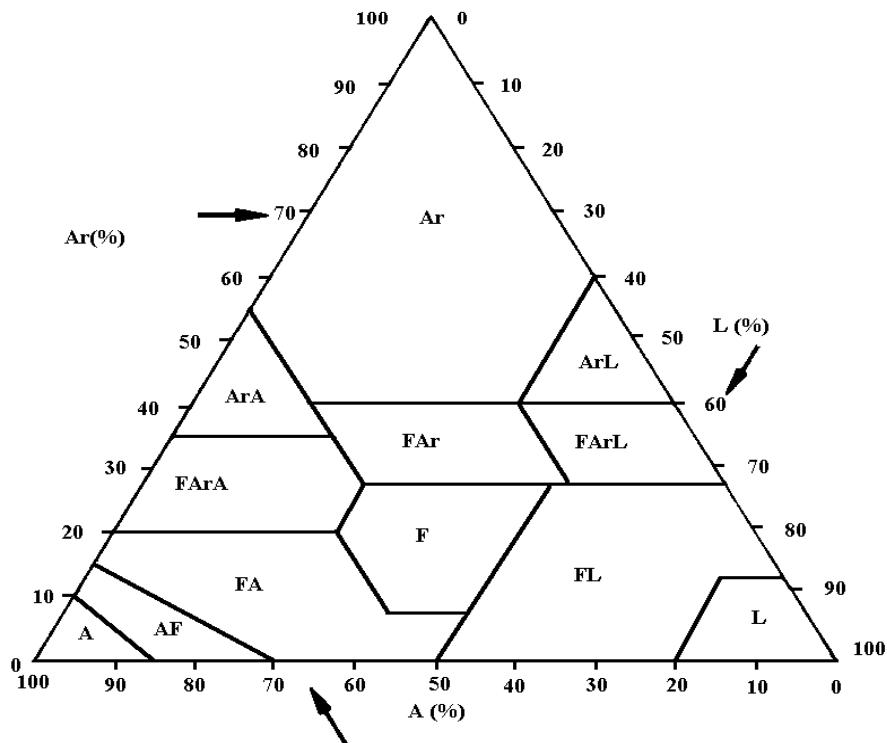


FIGURA 7.4. Triángulo de las clases texturales del suelo (Tomado de SSDS, 1993).

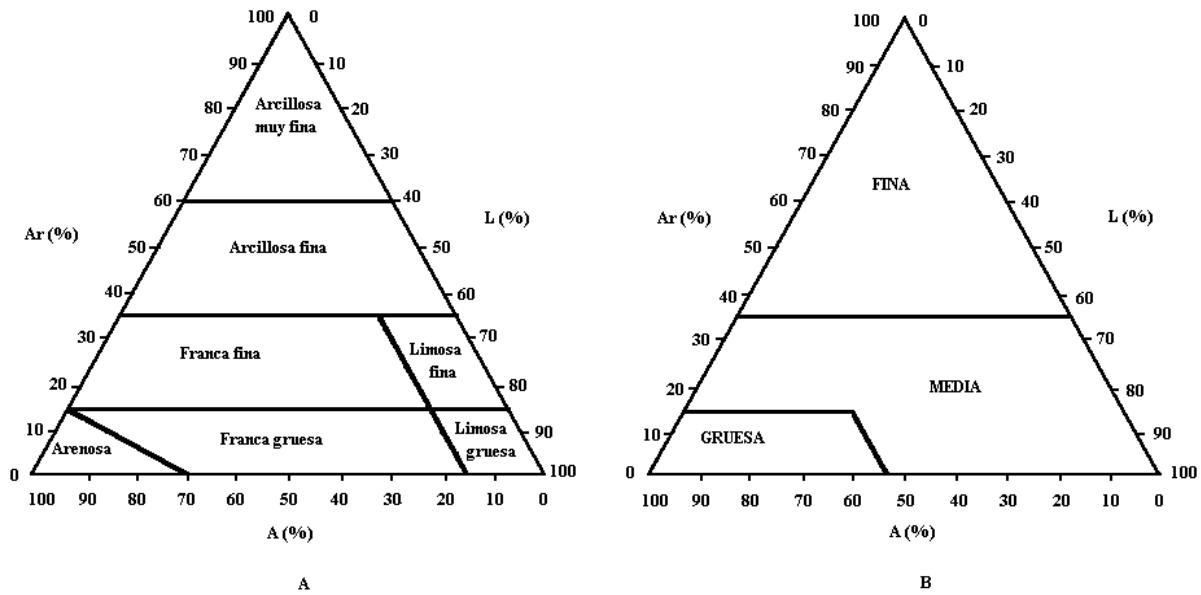


FIGURA 7.5. Generalizaciones de las clases texturales del suelo, según el USDA. A: Familias texturales. B: Grupos texturales.(Tomados de Mejía, 1983)

2.1.2.3. Limitaciones del método de Bouyoucos para determinar la textura del suelo

Aunque la determinación de la textura del suelo por el método de Bouyoucos es recomendada para los análisis de rutina, tiene algunas limitaciones en su aplicación, para ciertos casos especiales, como son :

- No permite establecer la **curva granulométrica** de los suelos.
- La dispersión de ciertos suelos, como los **Andisoles** y algunos **Oxisoles**, no se obtiene con el método estandarizado, por lo cual, los resultados del análisis no son válidos; sucede lo mismo con suelos que presentan altos contenidos de materia orgánica; para obtener la dispersión en estos suelos se requiere de un pretratamiento especial de la muestra, el cual no se efectúa en los análisis de rutina.

2.2. EVALUACIÓN DE LA TEXTURA DEL SUELO EN EL CAMPO

Esta determinación es bastante importante en trabajos de reconocimiento de suelos, donde hay que realizar gran número de observaciones y de descripciones de perfiles de suelos, en períodos de tiempo cortos, que no dan espera para llevar a cabo determinaciones en el laboratorio. Además, los altos costos implicados no hacen viable esa posibilidad.

También, es importante este método para caracterizar la textura de suelos difíciles de dispersar, como son los Andisoles o los Oxisoles; a este respecto, Mejía (1983) considera que para muchos suelos de estos órdenes la textura determinada al tacto es más confiable, que la determinada en laboratorio por los métodos convencionales.

Este método consiste en establecer la clase textural del suelo, basada en la observación de la respuesta de éste al ser sometido a manipulación en diferentes estados de humedad, la cual está directamente relacionada con la proporción en que están presentes los diferentes separados que lo componen. Las principales propiedades de los separados del suelo, que resultan útiles para evaluar su textura al tacto, son las siguientes:

2.2.1. Propiedades del separado arena (A)

- Si está presente en grandes cantidades o lo está en granos muy gruesos, las partículas individuales se pueden ver y separar fácilmente.
- Cuando el suelo es “frotado” entre el pulgar y el índice, se siente áspero y grueso y cuando esta operación se repite cerca del oído, el ruido producido por la fricción de los granos de arena entre sí, se hace fácilmente audible.
- Si un poco de suelo se mezcla con agua en la palma de la mano y se frota con el dedo índice de la mano opuesta, se sentirá áspero y grueso, esta prueba permite diferenciar pequeñas cantidades de arena en la muestra.
- Se satura con poca cantidad de agua y se seca rápidamente al aire; cuando se seca se disgrega.
- Se deja moldear sólo en un rango muy estrecho de humedad.
- No presenta pegajosidad.
- Para que la arena domine las propiedades del suelo, debe presentarse en altas cantidades.

2.2.2. Propiedades del separado limo (L)

- La cualidad más característica es su apariencia suave, sedosa en estado húmedo y su apariencia polvosa en estado seco.
- Al estrujar un poco de limo húmedo entre el pulgar y el índice se nota como se enrolla al secarse, dejando la superficie de la piel limpia.
- El limo es muy fino para impartir una cualidad áspera al suelo, excepto el limo grueso, el cual es difícil de distinguir de la arena muy fina.
- No es pegajoso y es muy poco plástico.
- No retiene la humedad por largos períodos de tiempo.

2.2.3. Propiedades del separado arcilla (Ar)

- Cuando se le agrega agua ligeramente en exceso, se siente jabonosa y resbaladiza.
- Si se “amasa” y se trabaja en el estado plástico (ver Capítulo 10), forma cintas y rollos finos, firmes y dúctiles.
- Estrujando un poco de arcilla humedecida entre el pulgar y el índice, se nota que aparece suave y lisa; a medida que se seca se adhiere a la piel.
- Es más adhesiva, cohesiva, pegajosa y plástica que el limo.
- La cualidad cohesiva de la arcilla puede descubrirse, aún cuando ésta se encuentre en pequeñas cantidades.
- Retiene mucha humedad y se demora para secarse.
- Cantidad relativamente pequeña de arcilla son suficientes para impartir cualidades plásticas al suelo.

Algunas de las propiedades que se observan para establecer la clase textural de un suelo al tacto son: la sensación que se produce al frotar la muestra entre los dedos, la facilidad de formar cintas y bolas con la muestra y la firmeza de ellas, así como la adhesividad o pegajosidad de la muestra al ser sometida a compresión entre los dedos y posteriormente al ser liberada esta compresión; la definición de estas propiedades para las diferentes clases texturales se resume en la Tabla 7.4.

TABLA 7.4. Algunas características de las clases texturales del suelo, al tacto.

TEXTURA	TAUTO	CINTA	BOLAS	ADHESIVIDAD*
A	Áspero	No	No	No
AF	Áspero	Muy mala	Mala	Muy poca
FA	Áspero	Mala	Mala	Poca
F	Muy suave	Mala	Resistente	Poca
FL	Suave	Rizada	Buena	Media
L	Harinoso	Rizada	Regular	Poca
FArA	Poco áspero	Regular	Buena	Alta
FAr	Suave	Regular	Buena	Alta
FArL	Suave	Rizada	Buena	Alta
ArA	Poco áspero	Buena	Buena	Alta
ArL	Suave	Buena	Buena	Alta
Ar	Jabonoso	Buena	Firmes	Muy alta

* Se determina con el suelo casi saturado de agua, las demás propiedades se determinan con el suelo húmedo.

2.2.4. Procedimiento

Para llevar a cabo la determinación de la textura del suelo al tacto, se procede de la siguiente manera:

- Se toma una muestra de suelo seco sobre la mano y se observa el tamaño de los granos (grueso, medio, fino); se frota una pequeña cantidad entre el pulgar y el índice y se observa como se siente al tacto (suave, áspera, sedosa, etc.); se frota luego cerca al oído y se establece si se produce ruido.
- Se humedece la muestra anterior lentamente, sin llegar a tener exceso de agua, se amasa y se trata de formar una bola, observando su comportamiento y estabilidad; se amasa nuevamente la muestra y se frota entre la palma de la mano y una superficie sólida para formar un rollo, se observa su espesor y estabilidad; se estruja la muestra entre el pulgar y el índice y se define su plasticidad (facilidad para deformarse y conservar esa deformación): plástico, no plástico.
- Se agrega un poco más de agua a la muestra, se estruja entre el pulgar y el índice y se observa la pegajosidad de ella en los dedos (alta, regular, baja, nula).
- En la palma de la mano, se coloca una cantidad de muestra definida, se lava repetidamente, eliminando el agua turbia hasta que el agua salga limpia; se establece un porcentaje aproximado de los separados que posee la muestra.
- En la Figura 7.6 se presenta un modelo de formulario. En éste se va registrando la calificación correspondiente a las diferentes propiedades evaluadas en las muestras, utilizando para ello términos relativos como buena, regular, mala, alta, media, baja, etc.

Código de la muestra	Muestra Seca			Muestra Húmeda			Cantidad estimada (%) de			Clase textural
	Tamaño de los granos	Sensación al tacto	Ruido	Cinta	Rollo	Pegajosidad	A	L	Ar	

FIGURA 7.6. Modelo de formulario para registrar algunas propiedades de muestras analizadas al tacto para textura.

2.2.5. Limitaciones del método del tacto para determinar la textura del suelo

Este método para evaluar la textura del suelo, aunque es más rápido y más económico que el método de laboratorio, tiene varios limitantes importantes para su aplicación como:

- Es difícil establecer las clases texturales de suelos que se encuentran cercanos a los límites entre clases.
- Es difícil establecer la clase textural de suelos cuyos separados se encuentran cerca a sus límites de tamaño; por ejemplo, es difícil establecer la diferencia entre el limo grueso y la arena fina.
- En suelos con alto contenido de materia orgánica, ésta puede producir sensaciones al tacto parecidas a las que producen los separados más finos del suelo.
- El método requiere de buena experiencia por parte de quien hace la determinación para que ella sea confiable y exige un intenso entrenamiento.
- En suelos de estructuras bien desarrolladas, debe tenerse especial cuidado para lograr la destrucción total de los agregados.
- En suelos donde se presenten concreciones, éstas pueden distorsionar la determinación de los separados más gruesos del suelo.

3. LA ARCILLA DISPERSA EN EL SUELO

La cantidad relativa de arcilla que se encuentre dispersa, es decir, sin unirse a otras partículas del suelo, da una idea del grado de agregación y de la estabilidad de los agregados que tiene el suelo (Castillo et al, 2000); si se mide este contenido en suelos que están siendo sometidos a laboreo intenso, en diferentes épocas, el incremento de su valor puede ser un indicador de degradación física de aquellos y de aumento de su susceptibilidad a la erosión.

Al comparar la cantidad de arcilla que se encuentra dispersa en el suelo, con la cantidad de arcilla que se mide por el método del hidrómetro, se puede establecer un coeficiente llamado **coeficiente de dispersión (CD)**. El procedimiento para hacer esta determinación es el siguiente, tomado de González (1990):

- Se toman 50 g de suelo seco al aire y tamizado por malla de 2 mm de diámetro de perforación.
- Se lleva la muestra a un cilindro de 1000 mL y se completa ese volumen con agua.
- Se agita el cilindro, con la muestra, 20 veces y se deja reposar durante 2 horas.
- Al cabo de las 2 horas, se succionan 25 mL de la suspensión con una pipeta, a una profundidad de 10 cm dentro de la suspensión en el cilindro.
- Se coloca el material succionado en una tara adecuada y se lleva a secar en horno, a 105 °C, durante 24 a 36 horas. Al cabo de este tiempo, se pesa el material seco y se calcula el coeficiente de dispersión con la Fórmula [7.5].

La fórmula para calcular el CD es:

$$CD = \frac{a}{b} \times 100 \quad [7.5]$$

Donde: a: Porcentaje de arcilla en la muestra sin dispersante.

b: Porcentaje de arcilla obtenido por el método del hidrómetro.

Para determinar el valor de a, se tiene la siguiente relación:

$$a = \frac{PMF}{PMI} \times 100 \quad [7.6]$$

Donde: PMF: Peso del material pipeteado a las 2h, seco al horno.

PMI: Peso del material que hay en 25 mL de la suspensión, al iniciar la sedimentación; se supone que todo el material está distribuido homogéneamente en todo el líquido, en ese momento.

Hay que tener en cuenta, como en todos los casos en que los resultados se deben referenciar a peso de suelo seco, que se debe hacer una corrección por humedad a la muestra tomada para el análisis, siguiendo el procedimiento que se muestra en el ejemplo que se presenta a continuación.

Ejemplo: Se tomaron 50 g de un suelo que tenía 8% de humedad gravimétrica; el contenido de arcilla de este suelo, por hidrómetro, fue de 30%. Para la determinación del CD, el PMF fue de 0.012 g. ¿Cuál es el CD de ese suelo?.

□ Corrección por humedad:

$$P_{ss} = \frac{Psh}{\frac{W(\%)}{100} + 1} = \frac{50 g}{\frac{8 \%}{100} + 1} = 46.296 g$$

□ Cálculo de a:

$$a = \frac{PMF}{PMI} \times 100 = \frac{0.012 g}{PMI} \times 100$$

Cálculo de PMI:

$$PMI = \frac{46.296 g \times 25 mL}{1000 mL} = 1.157 g$$

$$\sqrt{a} = \frac{0.012 g}{1.157 g} \times 100 = 1.037 \%$$

□ Cálculo de CD:

$$CD = \frac{a}{b} \times 100 = \frac{1.037 \%}{30 \%} \times 100 = 3.46 \%$$

El valor encontrado para CD se considera bajo y puede esperarse que el suelo analizado no presenta problemas de estructuración ni alta susceptibilidad a la erosión. El nivel crítico para el CD corresponde a un valor de 25%, según González (1990).

RECORDAR

- La textura del suelo estudia la proporción en que se encuentran las partículas inorgánicas del mismo, que tienen tamaños menores a 2 mm.
- Las partículas mencionadas se denominan separados y se agrupan, por tamaño, en 3 categorías: Arena (2 a 0.05 mm), Limo (0.05 a 0.002 mm) y Arcilla (< 0.002 mm).
- La textura se determina en el laboratorio por métodos de sedimentación y el más utilizado es el del hidrómetro.
- En el campo es posible estimar la textura del suelo, examinando las características de aspereza, plasticidad y pegajosidad que le transmiten a este los separados que contiene.
- La manera más común de presentar los resultados de los análisis de textura del suelo es mediante el establecimiento de su clase textural.
- Hay suelos cuyos componentes no permiten determinar la textura en el laboratorio porque no dispersan con los métodos normales: Aluminosilicatos amorfos (Andisoles) y sesquióxidos de Fe y Al (Oxisoles).
- La clase textural agrupa suelos que tienen unas proporciones de arena (A), limo (L) y arcilla (Ar) que le dan un comportamiento físico similar.
- Hay 12 clases texturales; el nombre de la clase implica el separado que mayor control ejerce sobre el comportamiento físico del suelo.
- La clase textural franca (F) implica que ninguno de los separados domina las propiedades del suelo; que hay un equilibrio entre ellos; no es la que tiene los separados en iguales proporciones.
- Cuando en el suelo hay más de 35 % de Ar, este separado domina sus propiedades; en cambio, para que la A haga lo mismo, debe estar en cantidades mayores a 70 %.
- La textura del suelo se relaciona con propiedades tan importantes como: aireación, drenaje, retención de humedad, fertilidad, susceptibilidad a la erosión, permeabilidad.
- Del análisis de la textura del suelo se puede derivar el coeficiente de dispersión (CD) del suelo, el cual puede ser indicador de deterioro físico del mismo.
- El CD establece la cantidad de arcilla del suelo que se encuentra dispersa y su valor crítico se presenta en 25 %.

BIBLIOGRAFÍA

ARANGO, V. A. 1985. Manual de laboratorio de Mecánica de Suelos. 2^a. Ed. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Medellín. 276 p.

BAVER, L. D.; W. H. GARDNER y W. R. GARDNER. 1973. Física de suelos. 1^a. Ed. en español. U.T.E.H.A. México. 529 p.

- BOWLES, J. E. 1982. Propiedades geofísicas de los suelos. 1^a. Ed. en español. McGraw - Hill. Bogotá. 491 p.
- CASTILLO, J.; E. AMÉZQUITA y K. MÜLLER-SÄMANN. 2000. La turbidimetría una metodología promisoria para caracterizar la estabilidad estructural de los suelos. Suelos Ecuatoriales. 30 (2): 152-156.
- ESCORCIA. M. A. E. y A. R. GAVIRIA. 1981. Distribución por tamaño de partículas de un Andosol del Oriente Antioqueño. Tesis. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Agronomía. Medellín. 83 p.
- FORSYTHE, W. 1975. Manual de laboratorio de Física de Suelos. Instituto Interamericano de cooperación para la Agricultura (IICA). Costa Rica. 212 p.
- GIOVANNINI, G.; S. LUCCHESI y S. CERVELLI. 1983. Water repellent substances and aggregate stability in hydrophobic soil. Soil Science. 135 (2): 110-113.
- GONZÁLEZ, A. 1990. Guías de prácticas de la Maestría en Suelos y Aguas. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. Inédito.
- MEJÍA, L. 1983. Pedología descriptiva. Centro Interamericano de Fotointerpretación (CIAF) . Bogotá. 176 p.
- MONTENEGRO, H. y D. MALAGÓN. 1990. Propiedades físicas de los suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá. 813 p.
- MONTES, C. M. y R. DELGADO. 1977. Adaptación de un método de dispersión para el análisis físico de suelos derivados de cenizas volcánicas (Oriente Antioqueño). Tesis. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Agronomía. Medellín. 70 p.
- SOIL SURVEY DIVISION STAFF (SSDS). 1993. Soil survey manual. Handbook No. 18. United States Department of Agriculture (USDA). Washington D. C. 437 p.
- SUÁREZ, V. S. y A. GÓMEZ. 1976. Eficiencia de dispersantes químicos en el análisis de textura de suelos derivados de cenizas volcánicas. Cenicafé 27 (1): 34-44.

AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Qué se entiende por textura del suelo?. Por separado?. ¿Cuáles son los separados básicos del suelo?. ¿Cuál es el tamaño de las partículas de arcilla del suelo?.
2. ¿Cuáles propiedades del suelo están relacionadas directamente con la textura del mismo?.
3. Enuncie la ley de Stokes. ¿Cómo se relaciona esta ley con la textura del suelo?.
4. ¿Cómo interfiere la materia orgánica en la determinación de la textura del suelo?.
5. ¿Qué influencia tienen, sobre la determinación de la textura del suelo, los materiales derivados de ceniza volcánica?. Los carbonatos de calcio?. Los óxidos de Fe y Al?.
6. Si se aumenta desproporcionadamente la cantidad de dispersante, ¿qué pasará con las lecturas del hidrómetro?.
7. ¿Qué efecto tiene la temperatura de la suspensión sobre las lecturas hechas con el hidrómetro?.
8. ¿Qué sucede en la determinación de la textura, por el método del hidrómetro, si no se agrega suficiente dispersante?. (Analice a la luz de la Fórmula [7.1]).
9. ¿Qué relación hay entre la floculación y la determinación de la textura del suelo por el método del hidrómetro?.
10. Defina una textura franca.
11. ¿En cuáles suelos no es confiable la determinación de la textura con el hidrómetro y por qué?.
12. Diga 3 características que le permitan identificar la arcilla manualmente.

13. ¿Cómo será una lectura con el hidrómetro en un suelo floculado con respecto al mismo suelo sin flocular?. ¿Por qué?.
14. ¿La determinación de la textura con el hidrómetro es gravimétrica o volumétrica?.
15. De 2 razones que justifiquen aprender a determinar la textura del suelo al tacto.
16. Diga 5 limitaciones que tenga el método del tacto para determinar la textura del suelo.
17. ¿Qué es arcilla dispersa del suelo?. ¿Qué refleja?. ¿Qué es coeficiente de dispersión del suelo?.

EVALUACIÓN

1. En un análisis de textura por el método del hidrómetro se obtuvieron los siguientes resultados:
 - a. Lectura con el hidrómetro a los 40 s: 42.
 - b. Temperatura a los 40 s: 21.5 °C.
 - c. Lectura con el hidrómetro a las 2 horas: 14.
 - d. Temperatura a las 2 horas: 24 °C.

Determinar:

 - i. La clase textural de ese suelo. (R: FArL).
 - ii. El peso de la arcilla contenida en ese suelo, por hectárea, hasta 20 cm de profundidad, si el suelo tiene una densidad aparente de 1.4 Mg m^{-3} ? (R: 835.52 Mg).
2. Mediante la ley de Stokes, calcular el tiempo requerido para tomar una muestra de partículas de 0.001 mm de diámetro equivalente, a una profundidad de 10 cm en un cilindro de 1000 mL, ubicado en una localidad que presenta una temperatura media anual de 18°C. (R: 1 día, 8 h, 37 minutos y 49.44 s).
3. Para el suelo del problema 1, calcular el coeficiente de dispersión sabiendo que:
 - a. La muestra inicial tenía 4.5 % de humedad gravimétrica.
 - b. El material pipeteado a las 2 horas, seco al horno, pesó 0.013 g. (R: 3.64 %).
4. Determinar la clase textural para cada uno de los horizontes del suelo del problema 1, en la evaluación del Capítulo 11. (R: Ar, F, FA y F, desde la superficie hacia el interior).

DENSIDAD Y POROSIDAD DEL SUELO

CAPÍTULO 8

CONTENIDO

- ❖ Densidad real
 - Determinación
 - Interpretación
- ❖ Densidad aparente
 - Determinación
 - Método del cilindro biselado
 - Método de la cajuela
 - Interpretación
 - Importancia
- ❖ Porosidad
 - Tipos de porosidad en el suelo
 - Determinación
 - Interpretación

OBJETIVOS

- ❖ Conocer las densidades que se pueden cuantificar en el suelo y los métodos para hacerlo
- ❖ Entender la diferencia entre la densidad aparente y la real y aprender a utilizarlas adecuadamente
- ❖ Conocer la porosidad del suelo y la manera de calcularla

L

a densidad de un material se define como el peso que tiene dicho material, por unidad de volumen. En el suelo, por ser éste un cuerpo poroso, se presentan dos situaciones diferentes con respecto a la densidad: si se considera la masa de las partículas sólidas, únicamente, se tiene la **densidad real**, pero si, aparte de la masa de las partículas, se tiene en cuenta su organización, entonces se tiene la **densidad aparente**.

En la Figura 8.1 se presenta, esquemáticamente, la diferencia que induce el volumen de referencia entre las densidades real y aparente del suelo; así mismo, con los parámetros definidos en ella, como ejercicio aclaratorio, se desarrolla el cálculo de ambas densidades:

- Cada cubo pequeño tiene 1 cm^3 de volumen y 2 g de peso y en conjunto representan las partículas del suelo.
- El volumen del cubo grande es de 1000 cm^3 y de éste está ocupado solamente el volumen correspondiente al de los cubos pequeños; este cubo representa la muestra total del suelo.
- Si se calcula la densidad real (**Dr**) de esta muestra, utilizando la Fórmula [8.4], se tiene:

$$\begin{aligned} Pss &= 3 \text{ cubos pequeños} \times 2 \text{ g} = 6 \text{ g} \\ Vs &= 3 \text{ cubos pequeños} \times 1 \text{ cm}^3 = 3 \text{ cm}^3 \\ Dr &= 6 \text{ g} / 3 \text{ cm}^3 = \mathbf{2 \text{ g cm}^{-3}} \end{aligned}$$

- Si se calcula la densidad aparente (**Da**) de la misma muestra, haciendo **Vc** equivalente al volumen del cubo grande en la Fórmula [8.5], se tiene:

El peso de los sólidos sigue igual que en el cálculo de Dr, es decir:

$$\begin{aligned} Pss &= 6 \text{ g} \\ Vc &= 1000 \text{ cm}^3 \\ Da &= 6 \text{ g} / 1000 \text{ cm}^3 = \mathbf{0.006 \text{ g cm}^{-3}} \end{aligned}$$

Aunque el ejemplo anterior es exagerado, queda claro que la diferencia fundamental entre las dos densidades está determinada por el volumen de referencia tomado para cada uno de los cálculos.

1. DENSIDAD REAL (Dr)

Como se dijo anteriormente, la densidad real es el peso de las partículas sólidas del suelo, relacionado con el volumen que ocupan, sin tener en cuenta su organización en el suelo, es decir, sin involucrar en el volumen el espacio ocupado por los poros; se deduce, entonces, su dependencia de la composición mineral del suelo y del contenido de algunos sólidos especiales en él, como la materia orgánica y los óxidos de hierro.

En la Tabla 8.1 se presentan las densidades correspondientes a algunos silicatos y óxidos comunes en el suelo. En ella se puede apreciar la alta variabilidad que puede presentarse en la densidad real del mismo, si cambian la composición mineralógica y/o la proporción en que se presentan los diferentes minerales.

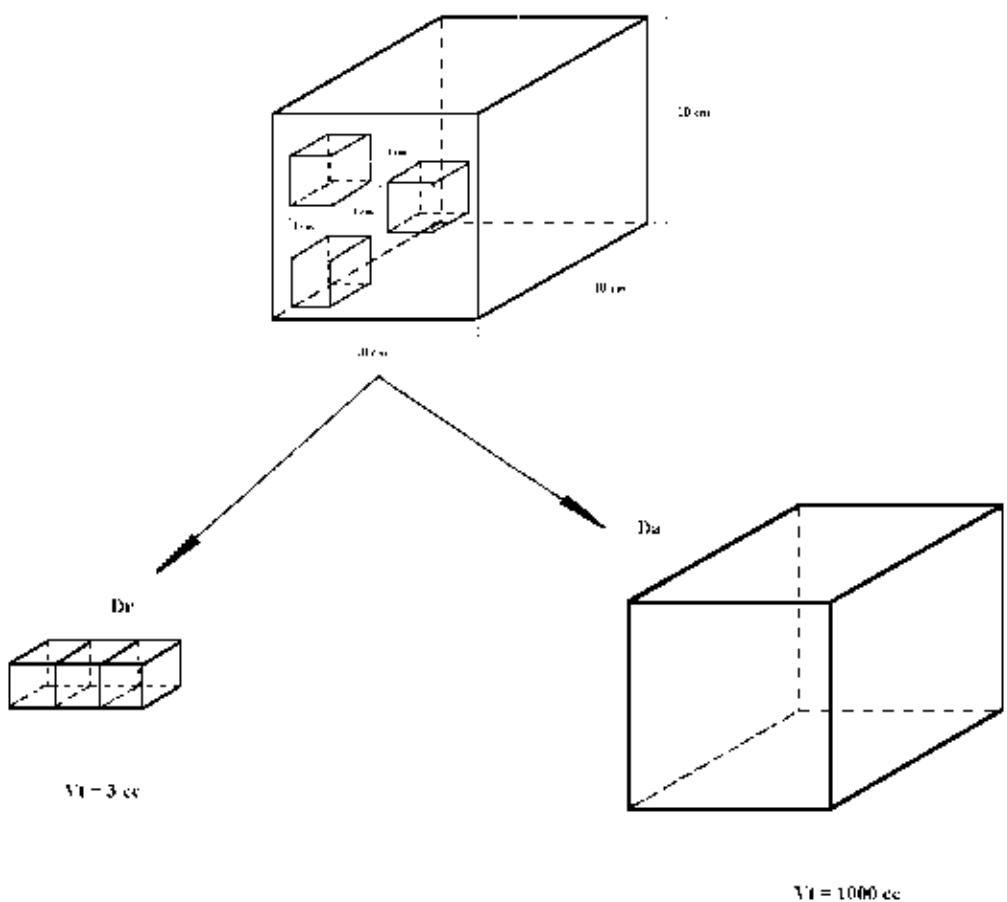


FIGURA 8.1. Representación esquemática de las densidades real y aparente del suelo.

1.1. DETERMINACIÓN

El método más recomendado para medir la densidad real del suelo es el del **picnómetro**. En él se desarrollan los siguientes pasos:

- Se pesa un picnómetro completamente seco (P_{ps}).
- Se llena el picnómetro con agua y se pesa (P_{pw}).
- Se pesa una muestra de suelo seco al horno (P_{ss}).
- Se merma la mitad del agua del picnómetro, se vierte en él la muestra de suelo seco, se completa el volumen y se pesa (P_t).
- Se calcula el peso del agua desplazada por la muestra del suelo (P_w) mediante la Fórmula [8.1].

- Asumiendo una densidad para el agua de 1 g cm^{-3} , el volumen del agua desplazada será numéricamente igual a P_w y éste será el valor del volumen que ocupa la muestra de suelo (V_s).
- Se calcula la densidad real (D_r) con la Fórmula [8.4].
- En la Figura 8.2 se presenta un modelo de formato para registrar los resultados que se van obteniendo en la determinación de la densidad real del suelo.

Las fórmulas a utilizar son:

$$P_w = P_{w_1} - P_{w_2} \quad [8.1]$$

Donde: P_{w_1} : Es el peso del agua contenida en el picnómetro, sin el suelo.

P_{w_2} : Es el peso del agua que hay en el picnómetro cuando se le adiciona el suelo; estos pesos de agua se calculan con las siguientes relaciones:

$$P_{w_1} = P_{pw} - P_{ps} \quad [8.2]$$

$$P_{w_2} = P_t - P_{ps} - P_{ss} \quad [8.3]$$

$$D_r = \frac{P_{ss}}{V_s} \quad [8.4]$$

TABLA 8.1. Densidad de algunos materiales inorgánicos comunes en el suelo. (Tomado de Bowles, 1982).

MATERIAL	DENSIDAD (g cm^{-3})
Gibrita	2.30 - 2.40
Montmorillonita	2.40
Ortoclasa	2.56
Illita	2.60
Cuarzo	2.60
Caolinita	2.60-2.63
Clorita	2.60-3.00
Plagioclasa	2.62-2.72
Calcita	2.80-2.90
Moscovita	2.80-2.90
Biotita	3.00-3.10
Hornblenda	3.00-3.47
Olivino	3.27-3.37
Limonita	3.80
Siderita	3.83-3.88
Hematita	4.90-5.30
Magnetita	5.17-5.18

Para la determinación de la densidad real del suelo hay que tener presente que el aire debe ser eliminado del sistema, razón por la cual debe efectuarse bajo condiciones de vacío; esta condición hace que el método sea un poco dispendioso y lento; para más detalles analíticos acerca de esta determinación pueden consultarse Forsythe (1975), Motta et al (1990) y Montenegro y Malagón (1990), lo mismo que para obtener otros métodos de evaluación de esta propiedad.

MUESTRA CÓDIGO	Pps (g)	Ppw (g)	Pss (g)	Pt (g)	Pw ₁ (g)	Pw ₂ (g)	Pw (g)	Vs (cm ³)	Dr* (Mg m ⁻³)

* Mg m⁻³ es igual a g cm⁻³ pero la primera expresión es la recomendada para usar en suelos.

FIGURA 8.2. Formulario para el registro de los resultados obtenidos en la determinación de la densidad real del suelo por el método del picnómetro.

1.2. INTERPRETACIÓN

Para fines prácticos, se asume como un valor promedio adecuado de densidad real para suelos minerales, **2.65 Mg m⁻³**. Este valor será apropiado para un suelo cuya composición mineralógica esté equitativamente distribuida entre los filo y tectosilicatos expuestos en la Tabla 8.1, como podría ser entre cuarzo, ortoclasa, plagioclasa, montmorillonita y caolinita, por ejemplo.

En un suelo cuya mineralogía esté dominada por óxidos de hierro se presentará una densidad real muy por encima del valor promedio anotado anteriormente. De otro lado, los valores por debajo del promedio pueden indicar la presencia de altos contenidos de materia orgánica y/o de aluminosilicatos no cristalinos en el suelo.

2. DENSIDAD APARENTE

Es la densidad del suelo que se calcula teniendo en cuenta el espacio ocupado por los poros al cuantificar el volumen de la muestra de suelo, razón por la cual depende de la organización que presente la fracción sólida del mismo y está afectada por su textura, su estructura, su contenido de materia orgánica, su humedad (en especial en suelos con materiales expansivos) y su grado de compactación, principalmente. En términos prácticos, es la densidad que tiene la tierra fina del suelo, con la organización que ella posea.

2.1. DETERMINACIÓN

La evaluación de la densidad aparente se hace con el suelo a **capacidad de campo** (ver Capítulo 9) y los métodos más usados para hacerla son los siguientes:

2.1.1. Método del cilindro biselado

Este método es el más conocido y aceptado. Se aplica en la mayoría de los suelos agrícolas que presentan poca o ninguna pedregosidad interna y/o que no son sueltos. Además, en suelos que no presentan abundante cantidad de raíces gruesas, como en el caso de suelos bajo bosques bien desarrollados. Las condiciones mencionadas anteriormente impiden, o por lo menos dificultan, la introducción del cilindro y la extracción de la muestra completa del suelo. Se llevan a cabo las siguientes operaciones:

- Se introduce el cilindro en la porción del suelo que se desea muestrear. Si la muestra se requiere de la parte superficial del suelo, el cilindro se introduce verticalmente; si se desea hacer un muestreo de todo el suelo debe prepararse un perfil, determinar los horizontes que posee y en la parte central o en varios puntos de cada uno de ellos, dependiendo de la precisión buscada, se introduce el cilindro horizontalmente. En cualesquiera de los casos debe tenerse la precaución de introducir completamente el cilindro y hacerlo de forma que se disturbe lo menos posible la muestra.
- Se retira el cilindro lleno con suelo, se enrasan sus bordes con una navaja, se coloca en una bolsa plástica y se sella, para traerlo al laboratorio. Si se requiere tomar un elevado número de muestras no es necesario utilizar un cilindro diferente para cada una de ellas; la muestra de suelo puede retirarse del cilindro en el campo y empacarse sola en la bolsa para reutilizar el cilindro con otras muestras. Identificar muy bien el cilindro que se utilice con cada muestra para evitar errores en el volumen que le corresponde para los cálculos.
- Se coloca el cilindro con la muestra de suelo a secar en horno a 105°C, durante 24 a 36 horas, al cabo de las cuales se retira el conjunto del horno, se deja enfriar y se pesa (Pt).
- Se retira el suelo del cilindro y se pesa éste (Pc). Además, al cilindro se le toman las medidas de su longitud (h) y de su diámetro interno (d), con las cuales se calcula el volumen de éste (Vc), utilizando la Fórmula [8.6].
- Se calcula la densidad aparente (Da), utilizando la Fórmula [8.5].
- Los resultados que se obtengan pueden consignarse en un formulario como el que se presenta en la Figura 8.3.

Las fórmulas necesarias para esta determinación son:

$$Da = \frac{Pss}{Vc} \quad [8.5]$$

Donde: Da: densidad aparente: Mg m³.

Pss: peso del suelo seco en el horno: = Pt – Pc: g.

Vc: volumen del cilindro: cm³.

$$Vc = \frac{\mathbf{p} d^2 h}{4} = \mathbf{p} r^2 h \quad (\text{r: radio}) \quad [8.6]$$

El proceso de introducir el cilindro en el suelo es más eficiente, en el sentido de que perturba menos la muestra, si se realiza con un barreno diseñado para tomar muestras de suelos sin disturbar, como el que se presenta en la Figura 8.4. Con este equipo, los cilindros para tomar la muestra se introducen en otro cilindro portador que, a su vez, se atornilla en la parte inferior del brazo del barreno; la masa disponible, que está unida a una varilla metálica que se introduce en el tubo del brazo, se utiliza para golpear el barreno e introducirlo en el suelo, dejándola caer desde una altura adecuada sobre la manija del brazo; lo anterior permite evitar al máximo la compactación de la muestra que se va a tomar.

FIGURA 8.3. Formulario para el registro de los resultados obtenidos en la determinación de la densidad aparente del suelo, por el método del cilindro biselado.

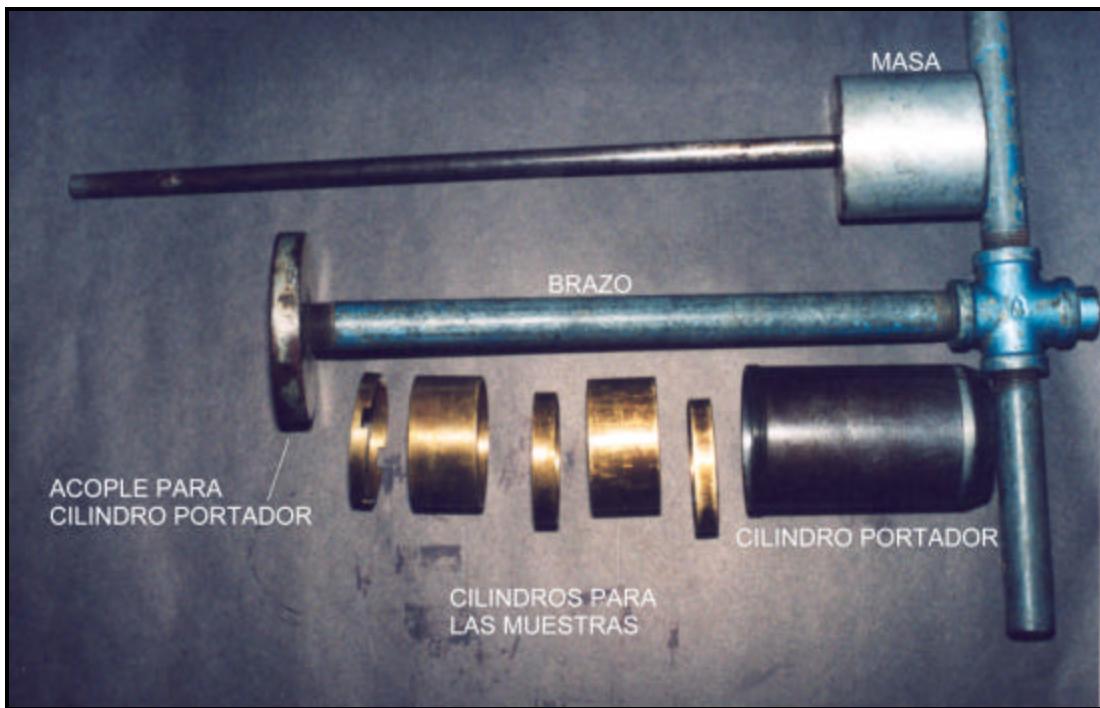


FIGURA 8.4. Barreno para tomar muestras de suelo sin disturbar.

En el laboratorio también puede medirse la densidad aparente por otros métodos, como el del terrón parafinado, el del terrón en petróleo o el del picnómetro de arena, los cuales pueden consultarse en Olarte et al (1979), Motta et al (1990) y Montenegro y Malagón (1990).

2.1.2. Método de la cajuela

Para suelos que presentan alto contenido de gravillas, gravas, piedras, concreciones u otra característica similar, es decir, aquellos donde no puede utilizarse el cilindro, es recomendable utilizar este método para determinarles su densidad aparente. También es el método a utilizar cuando se quiere determinar la densidad aparente de materiales orgánicos como turbas o capas de litter. Para hacer la determinación se procede de la siguiente manera:

- Se abre un hueco en el terreno de aproximadamente 20 cm x 20 cm, con la profundidad necesaria, teniendo la precaución de no compactar las paredes, ni el fondo del hueco al abrirlo.
- Se recoge todo el suelo extraído en una bolsa plástica y se recubre el hueco con plástico, procurando el mayor ajuste de éste a las paredes de aquél. Si el suelo tiene fragmentos de roca, lo que se extrae se pasa por un tamiz con malla de 2 mm y lo que queda retenido por él se regresa al hueco, sobre el plástico que lo recubre, puesto que la densidad aparente que interesa en el suelo es la de su tierra fina. Nótese que dichos fragmentos reducen el volumen de “suelo”.

- Se llena el hueco completamente con agua, controlando los volúmenes que se van adicionando y se mide el volumen total de líquido que se gastó para el llenado.
- Se pesa el suelo extraído del hueco y se toma una submuestra del mismo para determinar el contenido de humedad gravimétrica del suelo, con la Fórmula [9.7] y el formulario de la Figura 9.7.
- Se determina el peso del suelo seco al horno (P_{ss}), haciendo la corrección por humedad para el peso total del suelo extraído del hueco, como se hizo en el ejemplo del numeral 3 del Capítulo 7, en la página 176.
- Se calcula la densidad aparente, con la Fórmula [8.5], indicada en el numeral anterior, haciendo V_c igual al volumen de líquido gastado en la determinación.
- Los resultados se registran en un formulario como el de la Figura 8.5.

MUESTRA CÓDIGO	MEDIDAS HUECO (cm)			VOLUMEN LÍQUIDO (cm ³)	P_{ss} (g)	Da (Mg m ⁻³)
	LARGO	ANCHO	PROFUNDIDAD			

FIGURA 8.5. Formulario para registrar los resultados de la determinación de la densidad aparente del suelo por el método de la cajuela.

2.2. INTERPRETACIÓN

Como referencia para interpretar la densidad aparente del suelo, desde un punto de vista netamente práctico, se ha establecido el valor de **1.3 Mg m⁻³**, como densidad aparente promedio para los **suelos minerales**, diferentes a los **Andisoles**, cuyo valor es menor de **0.90 Mg m⁻³** (Soil Survey Staff, SSS, 1999, 1998). Para los **materiales orgánicos**, Rawls (1983) propone un valor promedio de **0.224 Mg m⁻³**, aunque, dependiendo del grado de descomposición que ellos presenten, puede variar entre menor de 0.1 Mg m⁻³, para **materiales fibrosos**, hasta mayor de 0.2 Mg m⁻³, para **materiales sápicos** ó más descompuestos (SSS, 1998). Jaramillo y Hendrickx (2000), determinaron una densidad aparente de 0.0474 Mg m⁻³, para acículas de pino muy poco descompuestas de plantaciones de 27 años de edad, en el oriente antioqueño, por el método de la cajuela (resultados sin publicar). En este valor puede haber un pequeño error que subestime la densidad, debido a la posible volatilización de azufre al secar la submuestra tomada para establecer la humedad.

Teniendo en cuenta la textura, Cortés y Malagón (1984) consideran como valores altos para la densidad aparente, aquellos que sean superiores a **1.3 Mg m⁻³**, en suelos con **texturas finas**; los mayores a **1.4 Mg m⁻³**, en suelos con **texturas medias** y los mayores a **1.6 Mg m⁻³**, en suelos con **texturas gruesas**.

2.3. IMPORTANCIA DE LA Da

El valor de la densidad aparente es un parámetro necesario en varios cálculos relacionados con el suelo, como son:

- Calcular el peso de un determinado volumen de suelo.
- Transformar el contenido de humedad gravimétrico del suelo, a contenido volumétrico.
- Calcular la porosidad total del suelo, cuando se conoce su densidad real.

A parte de lo anterior, es un estimador del grado de compactación del suelo, ya que si se está presentando este problema, la densidad aparente se incrementa; también es un indicador de altos contenidos de materia orgánica en el suelo, puesto que ellos reducen el valor de dicha densidad.

Debido a la facilidad con la cual se puede medir esta propiedad, se ha utilizado como parámetro para estimar el grado de deterioro del suelo, teniendo en cuenta que a medida que aumenta su valor, se está produciendo una degradación de la estructura del mismo, bien sea por compactación o por pérdida de materia orgánica.

Cabe aclarar, sin embargo, que la compactación del suelo no siempre es perjudicial, como lo demuestran los resultados obtenidos por Silva et al (1986); ellos encontraron que a medida que se iba compactando el horizonte A de un Latosol rojo arcilloso del Brasil, también se iba incrementando el contenido de humedad en él, tanto en bosque como en cultivo; ésto se debe, probablemente, a que la compactación ejercida disminuyó el tamaño natural de los poros, mejorando la capacidad de almacenamiento de agua por parte del suelo. También en estudios realizados en Vertisoles del Valle del Cauca (Cenicaña, 1996), se encontró que la eficiencia del riego por surcos alternos aumentaba a medida que el suelo se iba compactando naturalmente ó debido al tráfico de maquinaria.

Como parámetro útil para estimar el deterioro del suelo, es conveniente analizar su variación a través del perfil del suelo, ya que ésta puede indicar horizontes que están siendo compactados; en la Figura 8.6 se observa la variación que puede presentar esta propiedad, cuando es evaluada en todo el perfil del suelo; la curva **a**, representa la distribución de la densidad aparente en un suelo clasificado como Typic Humitropept, el cual presenta un perfil bastante homogéneo y prácticamente sin problemas de densidad; en cambio, la gráfica **b**, representa la distribución en un suelo Typic Durustalf, la cual evidencia la presencia de dos horizontes compactados dentro del suelo, uno alrededor de los 60 cm de profundidad y otro que empieza a los 140 cm, lo cual lleva a esperar comportamientos físicos y químicos especiales en este suelo. Los datos analíticos utilizados para elaborar los gráficos, fueron tomados de Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 1977).

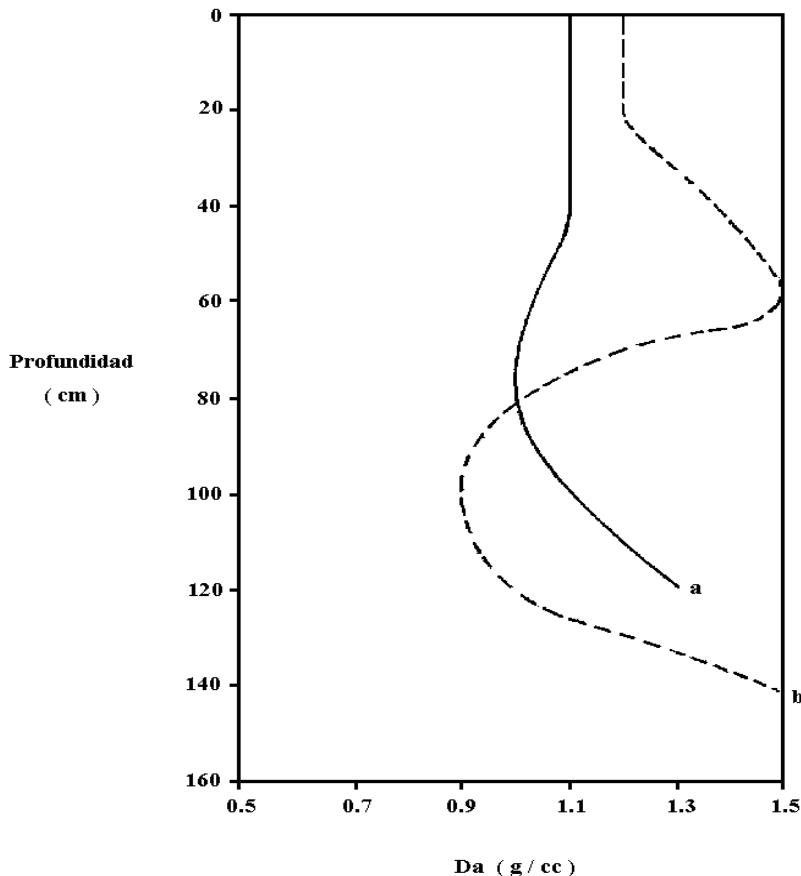


FIGURA 8.6. Variación de la densidad aparente con la profundidad en dos suelos. **a.** Typic Humitropept. **b.** Typic Durustalf. (Con base en datos de IGAC, 1977).

3. POROSIDAD

La porosidad total del suelo es el volumen de éste que no está ocupado por sólidos; es el volumen que hay disponible en el suelo para los líquidos y los gases.

3.1. TIPOS DE POROSIDAD EN EL SUELO

La distribución del espacio poroso depende de la composición y arreglo de la fracción sólida, es decir, de la textura, del contenido de materia orgánica y de la estructura, definiéndose dos tipos de espacios porosos:

- **Microporosidad o Porosidad textural**, está compuesta por el volumen de los poros más finos que tiene el suelo y que, en su mayor cantidad se encuentran en el interior de los pedos.
- **Macroporosidad o Porosidad estructural**, es el volumen de poros grandes del suelo, los cuales se encuentran, en mayor proporción, ubicados entre los pedos.

La diferenciación anterior tiene su máxima importancia, cuando se considera la función específica de cada tipo de porosidad, ya que los macroporos son los responsables de la circulación del agua, sobretodo cuando está en exceso, y del aire en el suelo, en tanto que los microporos son los encargados de almacenar agua dentro del mismo.

De las consideraciones anteriores se deduce que, más importante que conocer la porosidad total del suelo, es conocer la distribución de los poros de diferentes tamaños. La proporción en que se encuentren los diferentes tamaños es la que controla las relaciones fundamentales entre las fases sólida - líquida - gaseosa, influyendo grandemente en cualidades edáficas como drenaje, infiltración, almacenamiento de agua, aireación, temperatura, etc.

Para agrupar los poros del suelo, de acuerdo al tamaño que presenten, se han propuesto varias clasificaciones, como la que puede verse en la Tabla 8.2, propuesta por el Soil Survey Division Staff (SSDS, 1993).

TABLA 8.2. Clasificación de los poros del suelo, según su tamaño, propuesta por SSDS (1993).

TIPO DE POROS	DIÁMETRO (mm)
Muy gruesos	> 10
Gruesos	10 – 5
Medios	5 – 2
Finos	2 – 0.5
Muy finos	< 0.5

3.2. DETERMINACIÓN

Debido a que la porosidad del suelo depende de las características de su fracción sólida, ella se estima con base en las densidades real y aparente, según la relación:

$$P = \left(1 - \frac{Da}{Dr} \right) \times 100 \quad [8.7]$$

Donde: P: Porosidad total: %.

Da: Densidad aparente: Mg m⁻³.

Dr: Densidad real: Mg m⁻³.

Para calcular el volumen de microporos se han desarrollado fórmulas aproximadas, como:

$$m = q_{cc} \quad (\text{Pizarro, 1978}) \quad [8.8]$$

$$m = He \times Da \times f \quad (\text{Olarte et al, 1979}) \quad [8.9]$$

Donde: m: volumen de microporos: %.

θ_{cc} : Humedad volumétrica a capacidad de campo: %.

He: Humedad equivalente: Porcentaje de humedad que queda en el suelo después de centrifugarlo por media hora, a 1000 veces la fuerza de gravedad: %.

Da: Densidad aparente: Mg m⁻³.

f: Tierra fina (< 2 mm) del suelo: %/100.

Calculando la microporosidad, la macroporosidad puede calcularse por diferencia con la porosidad total, según la relación:

$$M = P - m \quad [8.10]$$

Donde M el volumen de macroporos: %.

Para ilustrar el uso de las relaciones anteriores, se desarrolla el siguiente ejemplo:

$$Dr = 2.7 \text{ Mg m}^{-3}; \quad He = 29.7 \%; \quad f = 100 \%; \quad Da = 1.3 \text{ Mg m}^{-3}; \quad Wcc = 33.4 \%$$

$$P (\%) = \left(1 - \frac{1.3 \text{ Mg m}^{-3}}{2.7 \text{ Mg m}^{-3}} \right) \times 100 = 51.9 \%$$

$$m = \theta_{cc} = Wcc \times Da = 33.4 \% \times 1.3 \text{ Mg m}^{-3} = 43.42 \%$$

$$M = P - m = 51.9 \% - 43.42 \% = 8.48 \%$$

o también

$$m = He \times Da \times f = 29.7 \times 1.3 \times 1 = 38.01 \%$$

$$M = P - m = 51.9 \% - 38.01 \% = 13.29 \%$$

En el ejemplo anterior se puede ver lo aproximados que son los cálculos realizados; si se requieren cálculos más precisos, se debe recurrir a otros métodos, como el de curvas de tensión de humedad vs volumen de agua desplazado (Cortés y Malagón, 1984), el método de Kubiena del analizador granulométrico (Mejía, 1980), al análisis micromorfológico de suelos (Bullock et al, 1985) o al método del porosímetro de mercurio (Pinzón, 2000).

Pla (1977) considera que un tamaño de poro de **15 m** de radio, cuando se presenta en cantidades menores a **10%**, puede generar problemas para la evacuación rápida de un exceso de agua en el suelo. Propone un método de laboratorio para determinar el contenido de este tipo de porosidad, midiendo el contenido de poros que pierde o no el agua, cuando el suelo es sometido a una succión de 100 cm de columna de agua; el procedimiento para llevar a cabo esta determinación es el siguiente:

- Se toman en el campo muestras de suelo sin disturbar con cilindros, metálicos o de PVC, de 5 cm de altura y 5 cm de diámetro.
- En el laboratorio se coloca en el extremo inferior de cada cilindro una cubierta de liencillo amarrada con una bandita de goma. Los cilindros así preparados se ponen a saturar, por capilaridad, en una bandeja con un soporte con malla, de manera que el agua alcance a subir hasta 1 cm por encima del fondo del cilindro.
- Se satura con agua un plato de porcelana y se mantiene su saturación uniéndolo a un frasco nivelador lleno de agua con una manguera fina. El frasco se coloca de tal manera que el nivel de agua esté 2.5 cm por encima del nivel del plato. Se debe confirmar que pase agua continuamente del frasco nivelador al plato. La saturación completa del plato y la eliminación del aire atrapado suelen lograrse en 3 ó 4 horas. Debe asegurarse la reposición continua del agua que va saliendo del frasco nivelador.
- Una vez saturados con agua el plato y los cilindros con el suelo (se comprueba por el aspecto brillante de la superficie del suelo en el extremo superior) se colocan los cilindros con suelo sobre el plato, presionando bien para establecer un íntimo contacto entre el suelo, la malla de liencillo y la porcelana porosa.
- Se deja el conjunto anterior en reposo por unas 3 ó 4 horas, manteniendo el nivel del agua en el frasco, y al cabo de este tiempo se remueven y pesan los cilindros con el suelo saturado con agua (Pt).
- Despues de pesados se vuelven a colocar en la misma forma sobre el plato de porcelana, luego se baja el frasco nivelador a una altura tal que el nivel del agua en él se mantenga 97.5 cm por debajo del nivel del plato; esto provoca una succión de 100 cm en el suelo que se encuentra en la parte central de los cilindros.
- Se coloca y satura con agua un papel secante por debajo del plato y se puede colocar una tapa, dejando siempre entrada del aire para mantener presión atmosférica; con ésto se reducen al mínimo las pérdidas de agua por evaporación.
- El equilibrio suele alcanzarse antes de las 48 horas; es conveniente realizar 2 ó 3 pesadas de los cilindros con el suelo en equilibrio a 100 cm de columna de agua, hasta obtener peso constante (Psh).
- Alcanzado el equilibrio, se remueve la malla, la banda de goma y el cilindro y se pesan estos componentes secos (Pc); se calcula el volumen del cilindro utilizado (V), utilizando la Fórmula [8.6]; luego se seca el suelo en el horno a 105°C durante 24 a 48 horas y se pesa (Pss).
- Se calcula la porosidad total (P) y la porosidad con radio equivalente menor a 15 μ ($P_{15\mu}$) con las Fórmulas [8.11] y [8.12] respectivamente.

$$P = \frac{Pt - (Pc + Pss)}{V} \times 100 \quad [8.11]$$

$$P_{15m} = \frac{Pt - Psh}{V} \times 100 \quad [8.12]$$

3.3 INTERPRETACIÓN

Teóricamente se acepta como buena una porosidad total promedia de alrededor de 50%. Kaurichev (1984), califica la porosidad total del suelo como se presenta en la Tabla 8.3.

TABLA 8.3. Calificación de la porosidad total del suelo (Kaurichev, 1984)

POROSIDAD TOTAL (%)	CALIFICACIÓN
> 70	Excesiva
55 - 70	Excelente
50 - 55	Satisfactoria
40 - 50	Baja
< 40	Muy baja

Con relación a la distribución de poros, Baver et al (1973) consideran como ideal, aquella en la cual, macro y microporos se encuentran en igual proporción y agrega que, cuando la macroporosidad es menor del **10 %**, se restringe la proliferación de raíces, valor también establecido por Pla, citado por Cortés y Malagón (1984). Pla (1977) establece que con aportes controlados de agua (riego) dicho valor límite podría bajarse a 6 u 8 %.

También, es importante analizar, como en el caso de la densidad aparente, la distribución de la porosidad a través del perfil, para identificar posibles horizontes limitantes del drenaje, de la aireación, del aporte de humedad a la planta y/o del crecimiento de las raíces; en la Figura 8.7 se presenta una gráfica que muestra una de las formas de hacer este análisis, elaborada a partir de datos tomados de IGAC (1977), para un Typic Dystranddept medial isomésico, de la Sabana de Bogotá.

Al interpretar la porosidad del suelo, debe tenerse en cuenta que si predominan los macroporos, se va a presentar un drenaje y una aireación excesivos y una baja capacidad de almacenamiento de agua, en tanto que, si predomina la microporosidad, se presentarán problemas de drenaje y aireación y aumentará la posibilidad de compactación del suelo y de producción de compuestos tóxicos para la planta por efecto de las condiciones reductoras que pueden generarse.

La distribución interna de la porosidad del suelo es un parámetro que debe ser evaluado periódicamente, sobre todo en suelos sometidos a usos intensivos. Los cambios en esta propiedad pueden ser indicativos de deterioro físico del suelo, como lo muestran los resultados presentados por Boels (1982), Klute (1982) y Centurion y Dematté (1985), así como los encontrados por García (1991), en suelos franco limosos del Valle del Sinú, sometidos a laboreo con discos durante 25 años, con base en los cuales se elaboró la Figura 8.8.

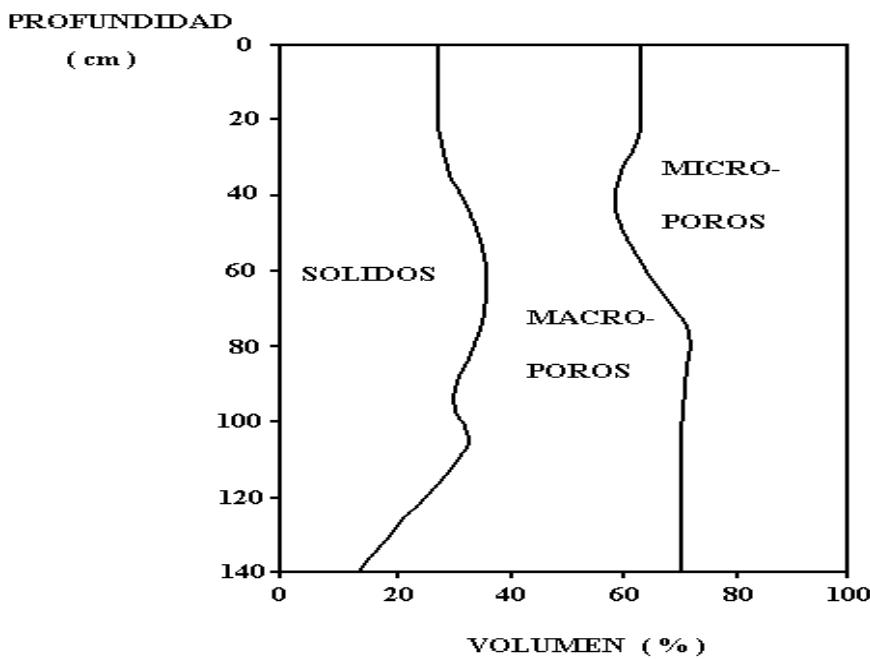


FIGURA 8.7. Variación de la distribución de la porosidad en un Typic Dystrandpt medial isomésico, con la profundidad del suelo. (Con base en datos de IGAC, 1977).

En la Figura 8.8 se observa un decrecimiento apreciable en la porosidad subsuperficial del suelo, prácticamente desde el momento en que es sometido a laboreo; además, hay un incremento permanente de la porosidad en el horizonte superficial hasta los 17 años de laboreo, presentándose una disminución en ella a partir de este tiempo. El comportamiento de la densidad aparente es completamente contrario al de la porosidad, obviamente por la relación inversa que existe entre estas dos propiedades del suelo.

Lo anterior está resaltando el hecho de que el suelo trabajado probablemente ha desarrollado un piso de arado (banda de suelo compactada a la profundidad de arada) cerca de la superficie del suelo, como consecuencia del laboreo intenso con discos a que ha estado sometido por tanto tiempo. Nótese que a partir de los 17 años de laboreo, la pérdida de porosidad y la compactación se empiezan a manifestar, también, en el horizonte superficial.

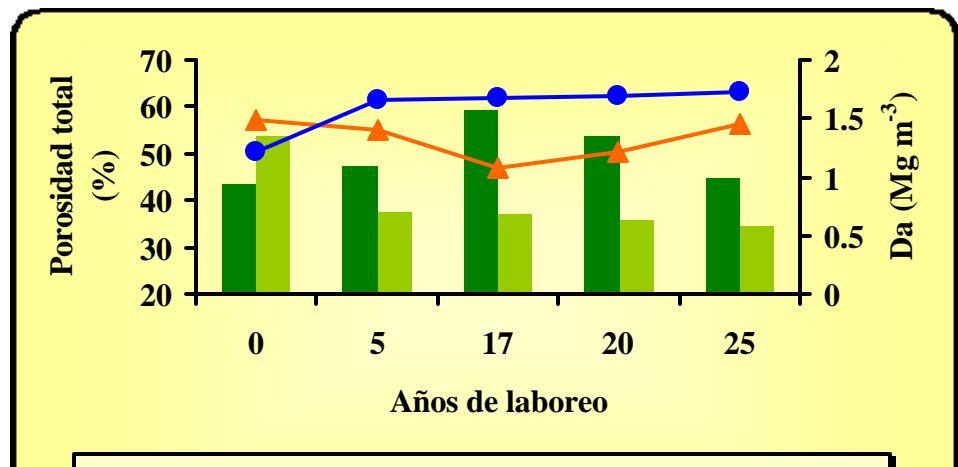


FIGURA 8.8. Efecto del tiempo de laboreo con discos, sobre la Da y la porosidad de un suelo Franco Limoso del Valle del Sinú (elaborada con base en resultados de García, 1991).

RECORDAR

- El suelo presenta dos tipos de densidad, dependiendo del volumen de referencia que se tome para calcularla.
- Si la muestra del suelo se toma sin disturbar, es decir, incluyendo el espacio poroso en el volumen, se obtiene la densidad aparente; si se elimina el espacio poroso, se obtiene la densidad real o de partículas.
- Un alto contenido de materia orgánica, reduce la densidad del suelo, así como un alto contenido de óxidos de hierro la aumenta.
- El estado de humedad en que se encuentre el suelo al momento de tomar la muestra influye en el resultado que se obtenga; el suelo debe estar a capacidad de campo.
- El método de la cajuela se utiliza para determinar la densidad aparente en suelos arenosos, pedregosos, orgánicos o con alto contenido de raíces gruesas.
- La densidad aparente es la más importante de las densidades del suelo porque puede ser indicadora de deterioro físico en él y porque es la que se usa para hacer los cálculos que involucran su peso.
- La relación entre las densidades aparente y real sirve para estimar la porosidad total del suelo.
- Los macroporos intervienen en el drenaje rápido del suelo y en su aireación, mientras que los microporos almacenan agua.
- Una macroporosidad menor de 10% puede generar problemas de aireación en buena parte de las plantas de cultivo.

BIBLIOGRAFÍA

- BAVER, L. D.; W. H. GARDNER y W. R. GARDNER. 1973. Física de suelos. 1^a. Ed. en español. U.T.E.H.A. México. 529 p.
- BOELS, D. 1982. Physical soil degradation in the Netherlands. Technical Bulletins new series No. 12. Institute for Land and Water Managements Research. Wageningen. Separata de: Land Use Seminar on Soil Degradation. pp. 47-65.
- BOWLES, J. E. 1982. Propiedades geofísicas de los suelos. 1^a. Ed. en español. McGraw - Hill. Bogotá. 491 p.

- BULLOCK, P. et al. 1985. Handbook for soil thinsection description. Waine Research Publications. Inglaterra. 152 p.
- CENICAÑA. 1996. Informe anual 1994. Cenicaña. Cali. 78 p.
- CENTURION, J. F. y J. L. I. DEMATTÉ. 1985. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de un solo sob cerrado cultivado com soja. Rev. Bras. Ci. Solo. 9: 263-266.
- CORTÉS, A. y D. MALAGÓN. 1984. Los levantamientos agrológicos y sus aplicaciones múltiples. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá. 360 p.
- FORSYTHE, W. 1975. Manual de laboratorio de Física de Suelos. Instituto Interamericano de cooperación para la Agricultura (IICA). Costa Rica. 212 p.
- GARCÍA, J. 1991. Efectos del laboreo en algunas propiedades físicas de los suelos algodoneros del valle medio del Sinú. Suelos Ecuatoriales. 21(1): 51-54.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, IGAC. 1977. Estudio general y detallado de suelos de los municipios de Cota, Funza, Mosquera y parte de Madrid (Departamento de Cundinamarca). IGAC. Bogotá. 513 p.
- KAURICHEV, I. S. 1984. Prácticas de edafología. 1^a. Ed. en español. Ed. Mir. Moscú. 280 p.
- KLUTE, A. 1982. Tillage effects on the hydraulic properties of soil: a review. In: Predicting tillage effects on soil physical properties and processes. Michigan. Cap. 3. pp. 29-43.
- MEJÍA, L. 1980. Conceptos básicos comunes a la pedología y geomorfología. Centro Interamericano de Fotointerpretación (CIAF). Bogotá. 278 p.
- MONTENEGRO, H. y D. MALAGÓN. 1990. Propiedades físicas de los suelos. IGAC. Bogotá. 813 p.
- MOTTA de M. B. et al. 1990. Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos. 5^a. Ed. IGAC. Bogotá. 502 p.
- OLARTE, R. L. et al. 1979. Métodos analíticos de laboratorio de suelos. 4^a. Ed. IGAC. Bogotá. 644 p.
- PINZÓN, A. 2000. Evaluación de la porosidad del suelo por medio del porosímetro de mercurio. Suelos Ecuatoriales. 30(2): 179-181.
- PIZARRO, F. 1978. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Editora Agrícola Española S.A. Madrid. 521 p.
- PLA, I. 1977. Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. Universidad Central de Venezuela. Maracay. 111 p.
- RAWLS, W. J. 1983. Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content. Soil Science. 135 (2): 123-125.
- da SILVA, A. P.; P. L. LIBARDI y. O. A. CAMARGO. 1986. Influencia da compactasao nas propriedades físicas de dois Latossolos. Rev. Bras. Ci. Solo. 10: 91-95.
- SOIL SURVEY DIVISION STAFF (SSDS). 1993. Soil survey manual. Handbook No. 18. United States Department of Agriculture (USDA). Washington D. C. 437 p.
- SOIL SURVEY STAFF. (SSS) 1999. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2. Ed. Agriculture Handbook N° 436. USDA. Washington D. C. 869 p.

AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Cuántas densidades se pueden establecer en el suelo?. ¿Cómo se definen?. ¿En qué se diferencian?.
2. ¿De qué depende directamente la densidad real del suelo y cuál es su valor promedio?.
3. ¿Se puede modificar la densidad aparente de un suelo?. ¿Cómo podría hacerse?.
4. Con las prácticas de manejo del suelo, ¿cuál de las dos densidades varía más y por qué?.
5. ¿Por qué la densidad real es numéricamente mayor que la densidad aparente?.
6. Enumerar cinco propiedades del suelo que se relacionen con la densidad aparente.
7. ¿En qué condiciones se recomienda utilizar el método de la cajuela para determinar la densidad aparente del suelo?.
8. ¿Cómo afecta la presencia de fragmentos de roca la determinación de la densidad aparente del suelo?.
9. ¿La compactación del suelo siempre es nociva para el mismo?. Comente su respuesta.
10. ¿Cuántos tipos de espacio poroso hay?. ¿Cómo se definen y cuál es la función principal de cada uno de ellos?.
11. ¿Por qué la cantidad de macroporos tiende a disminuir con la profundidad del suelo?.
12. ¿Se puede cambiar la distribución del tamaño de los poros del suelo, a una determinada profundidad dentro de él?. Comente su respuesta.
13. ¿Cuál es el valor crítico de la macroporosidad del suelo?.

EVALUACIÓN

1. Demostrar que $Mg\ m^{-3}$ es igual a $g\ cm^{-3}$.
2. ¿Cómo influye la humedad en la determinación de la densidad aparente del suelo?. ¿En cuáles suelos es más importante este efecto?.
3. ¿La densidad aparente de un suelo sódico será mayor o menor que la densidad promedia para un suelo mineral normal, con la misma textura?. Comente su respuesta.
4. Deducir la Fórmula [8.7]. (Consulte la parte 2 del Capítulo 6).
5. Con un cilindro de 6 cm de diámetro y 5 cm de altura, se obtuvo una muestra de un suelo, la cual, al momento de tomarla, pesó 120 g y presentó un contenido de humedad gravimétrica de 15 %; calcular la densidad aparente del suelo muestreado. (R: 0.7381 $Mg\ m^{-3}$).
6. Con un cilindro que tiene 5.2 cm de diámetro y 46 mm de altura y que pesa 184.45 g, se tomó una muestra de suelo que en la condición de campo y con el cilindro pesó 345.75 g; la muestra de suelo se secó al horno y se volvió a pesar, también con el cilindro, obteniéndose un valor de 317.67 g; se debe calcular para ese suelo:
 - a. Densidad aparente. (R: 1.3637 $Mg\ m^{-3}$).
 - b. Porosidad. (R: 48.5396 %).
 - c. El peso del horizonte A de 25 cm de espesor, representado por esa muestra, en una hectárea. (R: 3409.25 Mg).
 - d. Si este suelo tuviera 15% de fragmentos de roca, ¿cuál sería su densidad aparente?. (R: 1.5566 $g\ cm^{-3}$).
7. ¿Cuál es la densidad real de un suelo en que el análisis con picnómetro dio los siguientes resultados: peso del picnómetro vacío y seco: 20.63 g; peso del picnómetro lleno con agua: 45.50 g; peso del picnómetro con la muestra de suelo seco al horno: 25.63 g; peso del picnómetro con la muestra de suelo seco al horno y con su volumen completado con agua: 48.58 g?. (R: 2.6042 $g\ cm^{-3}$).
8. Un suelo que tiene 15% de gravilla presentó una densidad aparente de 1.35 $g\ cm^{-3}$. ¿Cuál será su densidad aparente si, además de la gravilla, tuviera 12% de piedras?. (R: 1.506 $g\ cm^{-3}$).

9. Un suelo con 5% de gravilla presentó una densidad aparente de 1.42 g cm^{-3} . ¿Cuál será su densidad aparente si la gravilla es reemplazada por suelo?. (R: 1.3585 g cm^{-3}).
10. Representar gráficamente, como en la Figura 8.7, la distribución de la porosidad que presenta el suelo del primer problema de la evaluación del Capítulo 11.
11. Para determinar la densidad aparente de un suelo de bosque se hizo un hueco y se recogió cuidadosamente el material extraído de él. Para llenar el hueco, previamente forrado en plástico, con agua, se gastaron 2.1 L y el material que se extrajo pesó 3338.08 g. Se tomó una submuestra de suelo que pesó, húmeda, 130.21 g y seca al horno, 91.8 g. ¿Cuál es la densidad aparente de dicho suelo?. (R: 1.1218 g cm^{-3}).
12. ¿Cuál es la porosidad de un suelo que tiene una humedad gravimétrica de 0.25 y una humedad volumétrica equivalente de 0.35?. (R: 47.1698%).
14. ¿ Cuál es la densidad aparente de un suelo que tiene la siguiente composición volumétrica: sólidos: 300 cm^{-3} , agua: 250 cm^{-3} y aire: 200 cm^{-3} ? . (R: 1060 kg m^{-3}).

LA FASE LÍQUIDA DEL SUELO

CAPÍTULO 9

CONTENIDO

- ❖ Contenido de humedad del suelo
- ❖ Retención de la humedad del suelo
 - Potencial gravitacional
 - Potencial osmótico
 - Potencial mátrico
 - Potencial de sobrecarga
 - Potencial de humedecimiento
 - Potencial de presión del aire
 - Potencial de presión hidrostática
 - Medida de los potenciales del suelo
- ❖ Constantes de humedad del suelo
- ❖ Determinación de la humedad del suelo
 - Determinación del contenido de agua
 - Determinación de la retención de humedad en el campo
 - Tensiómetro de mercurio
 - Tensiómetro de vacuómetro
- ❖ La curva de retención de humedad
- ❖ Movimiento del agua en el suelo
 - Infiltración
 - Factores que afectan la infiltración
 - Determinación de infiltración del suelo
 - Conductividad hidráulica del suelo
 - Determinación de la conductividad hidráulica saturada
 - Interpretación de la conductividad hidráulica saturada

OBJETIVOS

- ❖ Adquirir los conocimientos básicos relacionados con la humedad del suelo y con su estado energético
- ❖ Entender cómo se almacena el agua en el suelo
- ❖ Aprender a determinar el contenido de agua del suelo
- ❖ Saber cómo se mueve el agua en el suelo
- ❖ Conocer dos propiedades relacionadas con el flujo de agua en el suelo: La infiltración y la permeabilidad
- ❖ Aprender a medir la infiltración y la permeabilidad del suelo

E

n este capítulo se tratará lo relacionado con la fase líquida del suelo. Se entiende que al hablar del agua del suelo, se hace referencia a una solución y no al agua pura, ya que ésta no se presenta en él.

1. CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO

La cantidad de agua que posea el suelo es una de sus características más específicas y está determinada, fundamentalmente, por su textura, su contenido de materia orgánica, la composición de sus fracciones mineral y orgánica y el arreglo que presente el medio físico edáfico, por el aporte que se le haga natural (lluvia) o artificialmente (riego) de ella, así como por el consumo causado por la evapotranspiración.

Con respecto a la influencia que tiene el contenido de coloides (arcilla y humus) sobre el contenido de humedad del suelo, en la Figura 9.1 se observa que la cantidad de agua en él aumenta linealmente al aumentar su contenido de arcilla y/o de materia orgánica, conservándose constantes las fuerzas de retención.

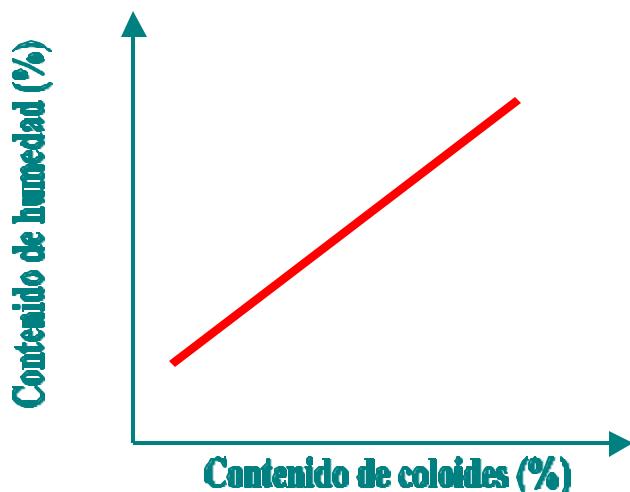


FIGURA 9.1. Relación teórica general entre el contenido de coloides y el contenido de humedad del suelo, a una fuerza de retención constante.

Debido a que el agua del suelo se adhiere a las partículas sólidas del mismo, hay una estrecha relación entre la cantidad de agua que son capaces de retener estas partículas y su composición; Jury et al (1991) reportan que la capacidad de adsorción de agua de la montmorillonita es mayor que la de la ilita y que la de ésta es mayor que la de la caolinita; así mismo, sostienen que se ha observado que las arcillas saturadas con cationes divalentes, retienen más agua que cuando están saturadas con monovalentes, excepto cuando este catión es el Li^+ .

González y García (1987) encontraron diferencias notorias entre el contenido de humedad de arenas de diferentes suelos (Andisol y Mollisol), atribuyéndole la mayor acumulación obtenida en el Andisol a la presencia de características vesiculares en sus granos.

Sánchez (1981) concluyó que los Andisoles retienen más agua a una misma tensión, que los Oxisoles, debido a que los agregados de alofano y materia orgánica son más porosos que los de caolinita y de óxidos de hierro; la Figura 9.2 ilustra el comportamiento descrito anteriormente.

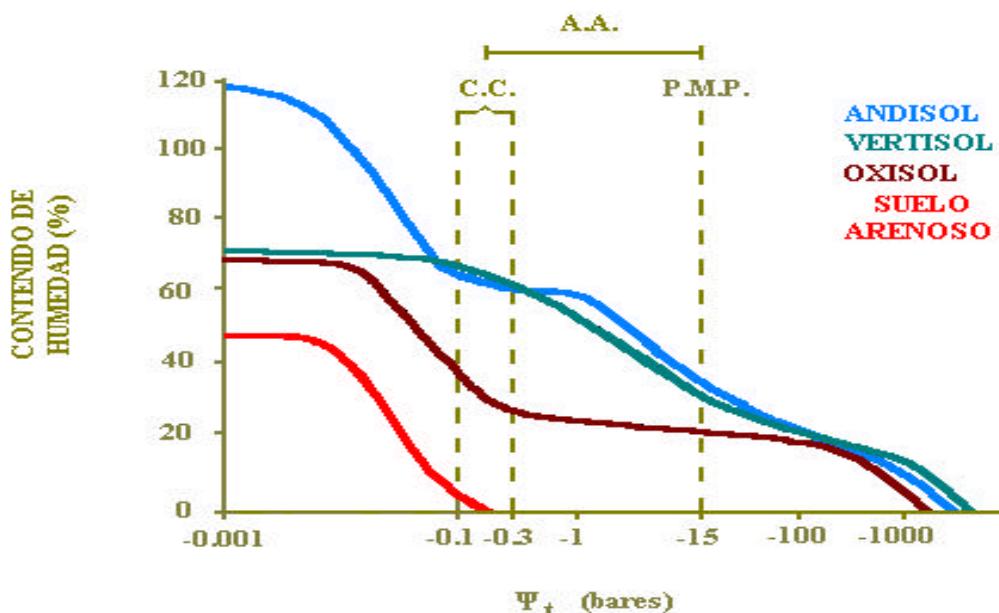


FIGURA 9.2. Efecto del tipo de arcilla del suelo, sobre su capacidad de etención de humedad (Contenido gravimétrico de humedad; A.A.: Agua aprovechable; C.C.: Capacidad de campo; P.M.P.: Punto de marchitez permanente). (Adaptada y complementada de varios autores, citados por Sánchez, 1981).

Es interesante notar en la Figura 9.2 el comportamiento de las curvas en el rango de bajas tensiones. Tanto el Oxisol como el Andisol tienen un comportamiento similar al del suelo arenoso: en un rango corto de tensión ceden un gran volumen de agua; en cambio, el Vertisol cede su humedad a una tasa muy baja y durante un intervalo de tensión muy amplio. Despues de pasar la capacidad de campo, el Andisol y el Vertisol prácticamente se comportan de igual manera.

Lo expuesto en el párrafo anterior evidencia el efecto de la porosidad en la humedad del suelo. El Oxisol puede tener tanta o más arcilla que el Vertisol pero, en el primero, la composición de óxidos de hierro genera una estructura bien desarrollada que deja un espacio de macroporos abundante. Lo mismo que en el Oxisol ocurre en el Andisol con su estructura, cementada por complejos de aluminio silicatos no cristalinos con humus. Esta distribución de poros hace que el suelo, por encima de capacidad de campo, suministre altos volúmenes de agua fácilmente.

En el Vertisol, en cambio, la porosidad es muy fina y homogénea, producida por arcillas de tipo 2:1 expansivas, lo que hace que la humedad esté sometida a una tensión alta que va liberando la humedad suavemente.

En relación con el arreglo físico edáfico, la distribución de tamaños de poros y de agregados, tiene un marcado efecto en el comportamiento hídrico del suelo; Sánchez (1981) reporta los resultados de Sharma y Uehara, quienes encontraron que en Oxisoles, a tensiones menores de -0.1 atm, la cantidad de agua retenida a la misma tensión aumentaba, a medida que aumentaba el tamaño de los agregados del suelo; también atribuye el autor citado, la mayor capacidad de retención de humedad de los Andisoles a su mayor porosidad y al mayor tamaño de sus agregados estables en agua.

Silva et al (1986) encontraron, en Latosoles arcillosos y de textura media del Brasil, incrementos en la cantidad de agua retenida por el suelo, a bajas tensiones, al aumentar la compactación, debido al incremento en el porcentaje de microporos.

2. RETENCIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO

El agua del suelo se presenta adherida a las partículas sólidas de éste en forma de películas y no está libre en él, a no ser que se encuentre **saturado**; lo anterior implica que sobre el agua del suelo actúan una serie de fuerzas, de magnitud y dirección variadas, que definen el estado energético del agua del suelo en un determinado punto de él.

Jury et al (1991) indican que el agua del suelo está sometida a varias fuerzas, entre las que destacan la atracción vertical, hacia abajo, que ejercen el campo gravitacional de la tierra, el propio peso del agua y el peso de las partículas sólidas suspendidas en ella; el campo de fuerzas que generan, en todas direcciones, las superficies de los sólidos del suelo; las fuerzas que ejercen los iones disueltos en el agua, atrayéndola hacia ellos y las fuerzas de atracción entre moléculas de agua y el desbalance entre éstas y la interfase agua – aire (ver Figura 9.3).

El estado energético del agua del suelo depende, como el de cualquier cuerpo, de los dos tipos de energía: La energía **cinética** y la energía **potencial**. La energía cinética (E_c) depende del movimiento del cuerpo considerado y es proporcional a su velocidad al cuadrado ($E_c = \frac{1}{2}mv^2$: m: masa; v: velocidad). En el suelo, el movimiento del agua es muy lento, por lo que su energía cinética es despreciable (Hillel, 1998).

La energía potencial es la energía que tiene un cuerpo en virtud de su posición en un campo de fuerzas (Jury et al, 1991). Esta energía, según Hillel (1998), es la que tiene especial importancia en la determinación del estado y del movimiento del agua en el suelo. Como no hay un valor absoluto de energía, para poder definir el estado energético del agua del suelo es indispensable definir una condición o estado de referencia con el cual poder comparar.

El **estado de referencia** o **estado estándar** para la energía potencial del agua del suelo, lo definen Jury et al (1991) como “*el estado del agua pura (sin solutos) y libre (sin otras fuerzas diferentes a*

la gravedad actuando sobre ella), sometida a una presión de referencia P_0 (la atmosférica), a una temperatura de referencia T_0 y a una elevación de referencia Z_0 ". Al agua que se encuentra en el estado anterior se le ha asignado, arbitrariamente, un valor de **energía potencial de cero**.

La **energía potencial del agua del suelo** se define, entonces, como la "diferencia en energía por cantidad unitaria de agua, comparada con el estado estándar" (Jury et al, 1991). Esta diferencia en energía potencial entre dos puntos, más comúnmente llamada **potencial total del agua del suelo**, en sistemas isotérmicos, determina:

- La dirección del flujo del agua, y
- La cantidad de trabajo disponible para causar flujo, o
- La cantidad de trabajo que debe hacerse desde afuera, para generar flujo.

La Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo, citada por Hillel (1998), define el **potencial total del agua del suelo** como "la cantidad de trabajo que se debe hacer por cantidad unitaria de agua pura para transportar, de forma reversible e isotérmica, una cantidad infinitesimal de agua, desde un depósito de agua pura hasta el agua del suelo a una elevación especificada, a presión atmosférica". Este potencial tiene varios componentes (ver Figura 9.3), los cuales se definen en los siguientes numerales y que se expresan, según Jury et al (1991), mediante la siguiente relación:

$$\Psi_t = \Psi_g + \Psi_o + \Psi_{tp} \quad [9.1]$$

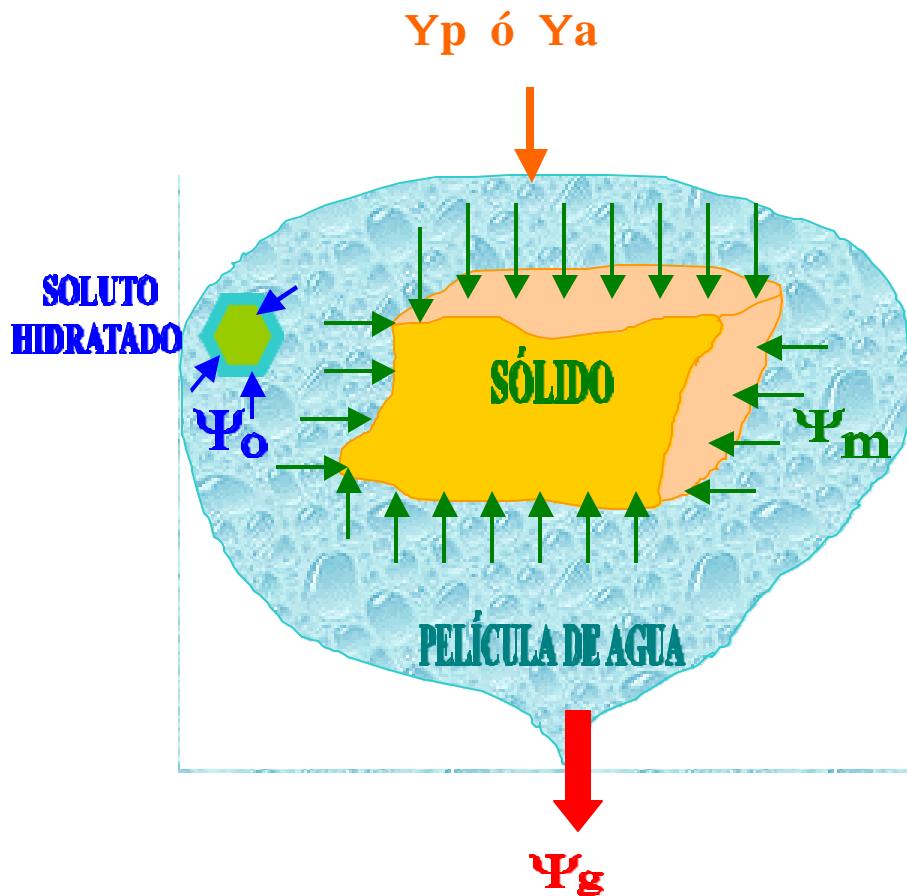


FIGURA 9.3. Representación esquemática de los potenciales componentes del potencial total del agua del suelo, en un suelo no expansivo.

Ψ_{tp} (potencial de presión tensiométrica) abarca los efectos de los potenciales mátrico (Ψ_m), de presión de aire (Ψ_a), de presión hidrostática (Ψ_p), de presión de sobrecarga (Ψ_b) y del potencial de humedecimiento (Ψ_w); Ψ_g es el potencial gravitacional y Ψ_o es el potencial osmótico.

Los componentes del potencial total del agua del suelo tienen diferente grado de importancia, dependiendo del tipo de suelo tratado, así como de la condición de humedad en que aquel se encuentre. Jury et al (1991) presentan diferentes posibilidades de estimar el potencial total del agua del suelo, en variadas condiciones, de las cuales se destacan las siguientes:

➤ En suelos no expansivos no saturados:	$\Psi_t = \Psi_g + \Psi_o + \Psi_a + \Psi_m$.
➤ En suelos no expansivos saturados:	$\Psi_t = \Psi_g + \Psi_o + \Psi_p$.
➤ En suelos expansivos no saturados:	$\Psi_t = \Psi_g + \Psi_o + \Psi_a + \Psi_m$, ó $\Psi_t = \Psi_g + \Psi_o + \Psi_a + \Psi_b + \Psi_w$.
➤ En suelos expansivos saturados:	$\Psi_t = \Psi_g + \Psi_o + \Psi_p + \Psi_b$.

Obsérvese en las relaciones anteriores que:

- Los componentes Ψ_b y Ψ_w sólo se tienen en cuenta cuando los suelos son expansivos, debido a que en ellos hay, permanentemente, deformación de su geometría y reorientación de sus partículas y esos dos componentes consideran dichas alteraciones.
- Los potenciales Ψ_g y Ψ_o aparecen en todos los suelos y condiciones de humedad.
- Las relaciones anteriores, para fines prácticos, se pueden simplificar aun más, teniendo en cuenta que el valor del Ψ_a es tan bajo que puede ser ignorado.

A continuación se hace una descripción de los potenciales que se han mencionado.

2.1. POTENCIAL GRAVITACIONAL (Ψ_g)

Todos los cuerpos son atraídos con una fuerza gravitacional proporcional a su masa. El potencial gravitacional del agua del suelo en un punto está determinado por la elevación de éste con relación a un nivel de referencia seleccionado arbitrariamente. En suelo no saturado su efecto no es muy importante.

El potencial gravitacional puede ser positivo, negativo o igual a cero, si el punto en evaluación está por encima, por debajo o en el nivel de referencia que se haya elegido para hacer la evaluación. Su valor corresponde a la distancia vertical que haya entre el punto de interés y el nivel de referencia seleccionado (Jury et al, 1991).

2.2. POTENCIAL OSMÓTICO (γ_o)

La presencia de solutos en el agua del suelo disminuye la energía de ésta, así como su presión de vapor. En el agua del suelo este potencial siempre es negativo.

El potencial osmótico es importante en la interacción entre las raíces de las plantas y el suelo, si se tiene en cuenta que el agua se mueve desde una solución diluida hacia una solución más concentrada, cuando ambas soluciones están separadas por una membrana permeable al agua. Este potencial también es importante en procesos que involucren difusión de vapor (Hillel, 1998).

2.3. POTENCIAL MÁTRICO (γ_m)

Según Stephens (1996), este subcomponente tiene en cuenta el efecto que ejercen los sólidos del suelo, sobre el agua, al atraerla hacia ellos mediante dos mecanismos diferentes:

- Las fuerzas de **capilaridad**, que actúan cuando el suelo está húmedo, y
- Las fuerzas de **adsorción**, que son más importantes en suelos secos.

El agua que retiene el suelo capilarmente, se encuentra en los poros mayores del mismo, mientras que el agua adsorbida se presenta en forma de película, recubriendo las superficies cargadas de las partículas sólidas del suelo, gracias al carácter dipolar que tiene el agua (Stephens, 1996).

El efecto de la capilaridad es un fenómeno que solamente se observa en el suelo cuando éste está en condiciones de no saturación. Es la causa que obliga al agua a ascender cuando se coloca en contacto con un suelo que se ha secado en parte.

Este potencial, en el suelo no saturado, es negativo, mientras que cuando el suelo está saturado, el potencial mátrico es cero, pues los poros, al estar llenos de agua, no presentan el fenómeno de la capilaridad.

El valor del potencial mátrico está relacionado con la altura que alcanza una columna de agua en el suelo y ésta altura varía inversamente con el radio del poro: A menor tamaño de poro, mayor es la altura de la columna de agua y mayor es la fuerza con la cual es retenida el agua por los poros del suelo; el tamaño de los poros está definido, fundamentalmente, por la estructura y por la textura del suelo; así, poros grandes se asocian a suelos bien estructurados y/o con texturas gruesas, en tanto que los poros pequeños se relacionan con texturas finas, suelos compactados y/o poco estructurados no arenosos.

El potencial mátrico, como se ha tratado hasta aquí, tiene validez en suelos que no presentan expansibilidad. En los suelos expansivos (con propiedades vírticas), los procesos de humedecimiento y secamiento están cambiando permanentemente la geometría del suelo y alteran la disposición y la unión entre las partículas del suelo. Por lo anterior, Jury et al (1991) recomiendan partir el potencial mátrico, en los suelos expansivos, en dos componentes:

2.3.1. Potencial de sobrecarga (γ_b)

Es el potencial que describe el efecto que tienen, sobre el agua del suelo, aquellos materiales sólidos del mismo que no se encuentran soportados, al ejercer sobre ella una presión mecánica.

2.3.2. Potencial de humedecimiento (Y_w)

Este potencial describe el efecto de la geometría del suelo y es el valor del potencial mátrico cuando el potencial de presión de sobrecarga y la presión externa del aire tienen un valor de cero.

2.4. POTENCIAL DE PRESIÓN DEL AIRE (Y_a)

Llamado **potencial neumático** por Hillel (1998) y por Stephens (1996), se refiere a la presión que ejerce la fase gaseosa al actuar sobre la fase líquida del suelo. Generalmente, en condiciones de campo, su valor es despreciable, aunque, bajo condiciones de laboratorio puede llegar a tener valores altos.

2.5. POTENCIAL DE PRESIÓN HIDROSTÁTICA (Y_p)

Cuando el suelo está saturado se crea una carga hidrostática sobre el agua que se encuentra en un determinado punto del suelo, debida a la columna de agua que está sobre él. Este potencial es positivo y proporcional a la altura que adquiere la lámina de agua sobre el punto en estudio. El potencial de presión hidrostática es cero cuando el suelo no está saturado.

A continuación se representan, esquemáticamente, los signos que pueden tomar los potenciales gravitacional, mátrico y de presión, según la posición analizada en el suelo, con respecto al nivel de referencia seleccionado (S.S.: superficie del suelo; N.F.: nivel freático; N.R.: nivel de referencia).

POSICIÓN	Y_g	Y_p	Y_m
S.S. = N.R.	0	0	-
	-	0	-
N.F.	-	0	0
	-	+	0
S.S.	+	0	-
	+	0	-
N.F. = N.R.	0	0	0
	-	+	0
S.S.	+	0	-
	+	0	-
N.R.	0	0	-

		-	0	
N.F.		-	0	0
		-	+	0

Generalizando las relaciones resaltadas en el recuadro de la página 207 se puede establecer una relación genérica de trabajo práctico, la cual cambia la Ecuación [9.1] a la forma de las Ecuaciones [9.2], utilizadas por autores como Stephens (1996) y por Hanks y Ashcroft (1980):

$$\boxed{\Psi_t = \Psi_g + \Psi_o + \Psi_m} \quad \text{Para suelo no saturado} \quad [9.2a]$$

$$\boxed{\Psi_t = \Psi_g + \Psi_o + \Psi_p} \quad \text{Para suelo saturado} \quad [9.2b]$$

El potencial del agua del suelo se puede expresar de varias maneras, siendo más utilizadas las siguientes (Hillel, 1998; Stephens, 1996; Jury et al, 1991; Hanks y Ashcroft, 1980):

- Como Energía/Volumen: Con dimensiones ($ML^{-1}T^2$) y con unidades **ergios cm⁻³, N m⁻², dinas cm⁻², bar, atm o Pa**.
- Como Energía/Peso: También llamada Cabeza de Potencial o Cabeza Hidráulica; tiene dimensiones longitudinales (L) y unidades **cm o m**.

La manera más fácil de expresar los potenciales es la que los presenta en dimensiones de longitud y, si se asume que no hay efecto osmótico importante en la solución del suelo o, si se quiere mirar sólo la dirección del flujo de agua, caso en el que el potencial osmótico no interviene, todos los otros potenciales de las Ecuaciones [9.2] pueden ser expresados como una distancia con respecto al nivel de referencia establecido.

En términos de cabeza de potencial total, las Ecuaciones [9.2] se presentan de la siguiente manera, eliminando el potencial osmótico:

$$\boxed{H = z + m} \quad \text{Para suelo no saturado} \quad [9.3a]$$

$$\boxed{H = z + h} \quad \text{Para suelo saturado} \quad [9.3b]$$

Donde: H: Cabeza hidráulica.

z: Cabeza de potencial gravitacional.

m: Cabeza de potencial mátrico.

h: Cabeza de potencial de presión.

Para transformar medidas de potencial obtenidas en la forma de energía/volumen a la forma de energía/peso, se debe dividir el potencial respectivo por el valor de la densidad del agua (ρ_w), multiplicado por el valor de la aceleración de la gravedad ($g = 9.81 \text{ N kg}^{-1}$) (Jury et al, 1991; Stephens,

1996); por ejemplo, si se tiene un potencial total del agua del suelo de 0.4 N m^{-2} , la cabeza hidráulica equivalente será:

$$H = \frac{\Psi_t}{\rho_w g} = \frac{\frac{0.4 \text{ N}}{\text{m}^2}}{\frac{1 \text{ kg}}{\text{m}^3} \times \frac{9.81 \text{ N}}{\text{kg}}} = \frac{0.4 \text{ N m}^3 \text{ kg}}{9.81 \text{ N m}^2 \text{ kg}} = 0.047 \text{ m}$$

El potencial total del agua del suelo es negativo, ya que su valor es menor que el de la presión atmosférica y puede expresarse, como ya se mencionó, en diferentes sistemas de unidades. Las más comunes, con sus equivalencias, son las que se dan a continuación, tomadas de Thien y Oster (1981):

kPa	Atm	bar	cm de agua	Pa	N m ⁻²
101.3	1	1.013	1000	101 300	101 300

El **kilopascal (kPa)** es la unidad recomendada por el Soil Survey Staff (SSS, 1998), como básica para describir la retención de humedad en el suelo. Para efectos de transformación de unidades, tener en cuenta que:

$$N = m \text{ kg s}^{-2}; \quad J = N \text{ m} = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-2}; \quad \text{ergio} = 10^7 \text{ J}; \quad \text{dina} = 10^{-5} \text{ N}$$

Con el fin de ilustrar el manejo de las cabezas de potencial, a continuación se desarrolla el siguiente ejemplo:

Se tiene un suelo homogéneo cuyo nivel freático se encuentra a 80 cm de profundidad. ¿Cómo será el valor de las cabezas de los potenciales total (H), gravitacional (z), de presión (h) y mátrico (m), en intervalos de profundidad de 10 cm y hasta una profundidad de 120 cm, cuando el agua del suelo está en equilibrio, asumiendo que no hay efectos osmóticos y que el nivel de referencia se establece a los 50 cm de profundidad en el suelo?

En la Tabla 9.1 se muestra el balance entre las cabezas de potencial estudiadas, teniendo en cuenta que, por estar el agua del suelo en equilibrio, el valor de la cabeza hidráulica (H) es constante e igual al valor que tenga a la altura del nivel freático, puesto que en este punto h y m tienen un valor de cero y z equivale a la diferencia de altura entre el nivel de referencia y el nivel freático. Además, recuérdese que $H = z + h + m$. En la Figura 9.4 se representa el comportamiento de las cabezas de potencial establecidas en la Tabla 9.1.

TABLA 9.1. Balance de las cabezas de potencial en un suelo hipotético cuya agua está en equilibrio.

PROFUNDIDAD (cm)	CABEZAS DE POTENCIAL (cm)			
	z	h	m	H
0	50	0	-80	-30
10	40	0	-70	-30

20	30	0	-60	-30
30	20	0	-50	-30
40	10	0	-40	-30
50 (N.R.)	0	0	-30	-30
60	-10	0	-20	-30
70	-20	0	-10	-30
80 (N.F.)	-30	0	0	-30
90	-40	10	0	-30
100	-50	20	0	-30
110	-60	30	0	-30
120	-70	40	0	-30

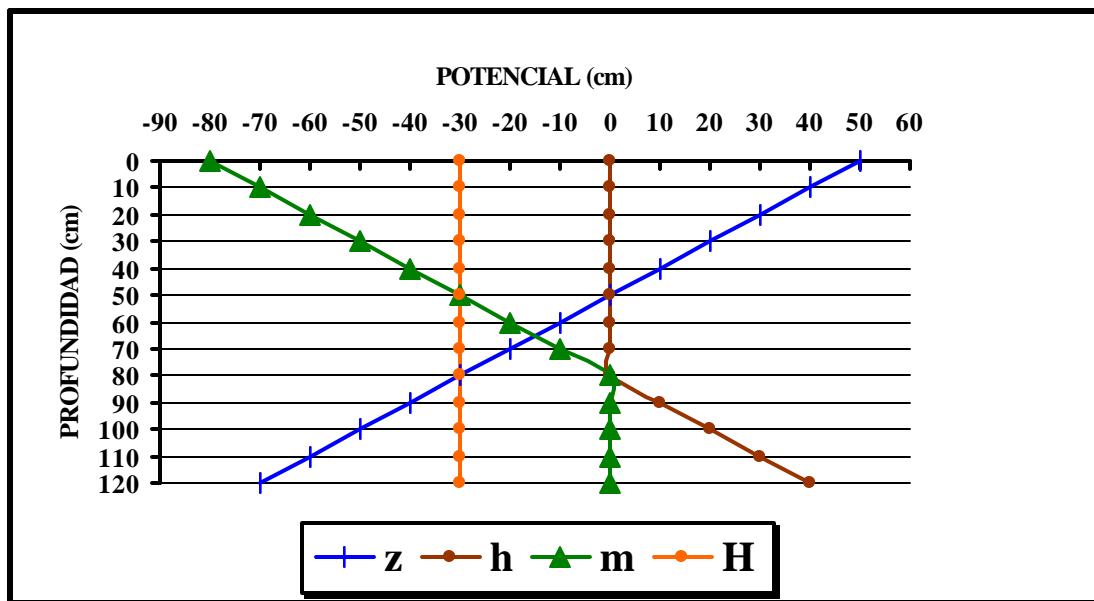


FIGURA 9.4. Comportamiento de las cabezas de potencial en un suelo hipotético cuya agua está en equilibrio. (Con base en los datos de la Tabla 9.1).

En la gráfica anterior es interesante notar que la presión del agua del suelo es un continuum como lo indica la línea inclinada que va del extremo superior izquierdo al extremo inferior derecho. Sin embargo, obsérvese que en ese continuum los potenciales que intervienen en la retención cambian, dependiendo de que el suelo esté o no saturado: Al anularse el efecto del potencial mátrico cuando el suelo se satura con agua, el potencial de presión comienza a actuar, manteniendo el continuum mencionado. Hay que puntualizar que para desarrollar el ejemplo anterior en condiciones en que el agua no esté en equilibrio, es necesario tener medidas o, por lo menos, estimaciones del potencial mátrico.

La cantidad de agua retenida por el suelo depende de las fuerzas que se desarrollan en éste. Dichas fuerzas dependen, a su vez, de los factores que se discutieron en el numeral anterior, donde se analizó el contenido de humedad; para ilustrar este comportamiento se presenta la Tabla 9.2.

TABLA 9.2. Comportamiento de la humedad del suelo con respecto a su contenido de materiales coloidales. (Resultados tomados de IGAC, 1977).

SUELO	HORIZONTE	ESPESOR (cm)	CONTENIDO (%) DE*		CONTENIDO GRAVIMÉTRICO DE HUMEDAD (%)**		
			Ar	M.O.	C.C.	P.M.P.	A.A.
Andisol	Ap	0 - 20	14	10.58	63.3	34.6	28.7
	Bs	55 - 76	10	3.10	34.6	17.4	17.2
Alfisol	E	0 - 22	14	1.74	32.6	8.8	23.8
	Bt	32 - 60	19	0.81	31.4	16.6	14.8
Inceptisol	Ah	0 - 28	14	13.72	55.1	30.5	24.6
	Bs	37 - 58	14	3.36	43.9	27.4	16.5

* Ar: Arcilla. M.O.: Materia orgánica.

** C.C.: Capacidad de campo. P.M.P.: Punto de marchitez permanente. A.A.: Agua aprovechable.

En la Tabla 9.2 se observar cómo cambia el contenido de humedad del suelo a una misma fuerza de retención, al presentarse cambios en sus contenidos de materia orgánica y de arcilla. Las diferencias que se presentan entre los contenidos de humedad de horizontes que tienen contenidos similares de materia orgánica y de arcilla, se explica por las diferencias que existen en la composición de estos coloides en los diferentes suelos.

También en la Tabla 9.2 se aprecia que no hay diferencias importantes entre los contenidos de agua aprovechable de los horizontes superficiales de los suelos analizados, así como entre los horizontes subsuperficiales; lo que sí presenta diferencias apreciables entre los mismos horizontes de los diferentes suelos, es el contenido de humedad que deben tener, a C.C. y en el P.M.P., para llegar a suministrar la cantidad de A.A. que se ha obtenido; ésto puede implicar serias limitaciones en el uso de los suelos más exigentes en humedad, si ellos se encuentran en una región que presente climas relativamente secos y encarecería considerablemente los costos de producción, si las deficiencias hídricas se van a suplir con riego.

2.6. MEDIDA DE LOS POTENCIALES DEL SUELO

Los componentes del potencial total del agua del suelo pueden ser medidos de diferentes maneras. Hillel (1998), Jury et al (1991) y Koorevaar et al (1983), exponen algunos de los métodos utilizados comúnmente para hacer dichas medidas y de sus discusiones se extrae la información que se presenta a continuación. Se presentará el método de determinación que evalúa el potencial en la forma más frecuente de expresarlo (como cabeza o como potencial en unidades de energía por volumen).

El potencial gravitacional se establece midiendo directamente en el suelo la distancia que hay entre el nivel de referencia y el punto de interés dentro del suelo.

El potencial de presión hidrostática se establece midiendo la altura que hay entre el punto de interés en el suelo y el punto donde se encuentra el nivel del agua libre que está por encima de él. Esta altura se determina mediante la instalación de **piezómetros** (tubos abiertos por ambos extremos) en el suelo, hincados en él de modo que el extremo inferior del tubo quede en el nivel de referencia.

Al instalar piezómetros debe tenerse en cuenta que éstos deben quedar en suelo saturado pues, de lo contrario, el agua no puede entrar en el tubo (piezómetro 1 de la Figura 9.5). Cuando se instala un

piezómetro en un suelo no expansivo (piezómetro 2 de la Figura 9.5), el agua sube, dentro del tubo, a una altura igual a la del nivel freático y esa altura es la **cabeza de presión hidrostática (h)** del suelo.

Cuando la instalación de los piezómetros se hace en un suelo expansivo (número 3 de la Figura 9.5), el agua asciende hasta una altura que sobrepasa la altura del nivel freático, obteniéndose dos cabezas de potencial diferentes: una de **potencial de presión hidrostática (h)**, hasta la altura del nivel freático y otra, la de **potencial de sobrecarga (b)**, que es la distancia entre la altura del nivel freático y el límite superior de la columna de agua dentro del piezómetro. En la Figura 9.5 se ilustran las situaciones mencionadas.

El **potencial de presión del aire** se establece midiendo la presión de aire que hay en el suelo, con un barómetro, y restándola a la presión de aire de referencia. Recuérdese que el valor de este potencial es muy bajo y que, para efectos prácticos, puede ser ignorado.

El **potencial osmótico** puede calcularse extrayendo solución del suelo y midiendo en ella la concentración de solutos, para luego aplicar la siguiente relación:

$$\Psi_o = -RTCs \quad [9.4]$$

Donde: R: Constante universal de los gases: $8.32 \text{ bar cm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$.

T: Temperatura absoluta: ${}^\circ\text{K}$.

Cs: Concentración de solutos: mol cm^{-3} .

Porta et al (1994) presentan otra aproximación al cálculo del potencial osmótico, con base en la medición de la conductividad eléctrica del extracto de la pasta de saturación del suelo, utilizando la siguiente relación:

$$\Psi_o = -aCEs \quad [9.5]$$

Donde: Ψ_o : Potencial osmótico: kPa.

a: Constante que depende del tipo de sal disuelta. Para fines prácticos se toma igual a 36.

CEs: Conductividad eléctrica del extracto de la pasta de saturación del suelo: dS m^{-1} .

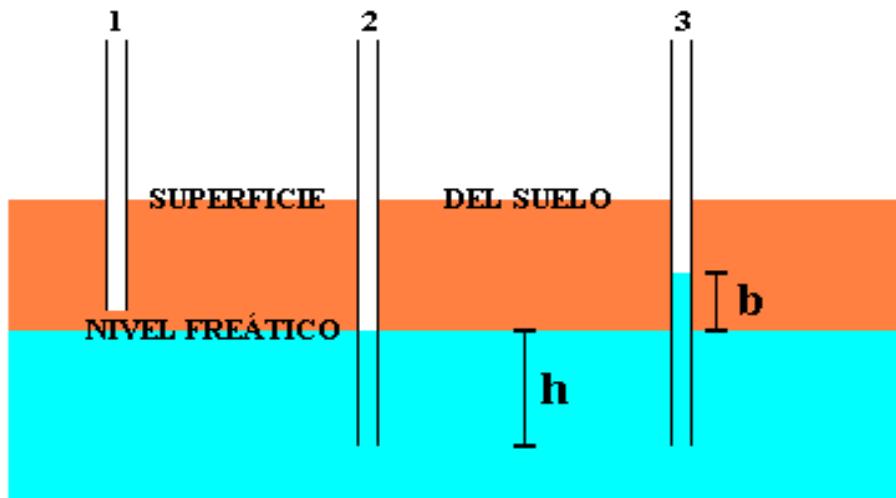


FIGURA 9.5. Cabezas de potencial que se determinan con piezómetros.

Para determinar el **potencial mátrico** en un determinado punto del suelo se puede utilizar el tensiómetro de mercurio (ver Figura 9.6). Según Jury et al (1991) la lectura del tensiómetro corresponde a la suma del potencial mátrico (incluyendo el de sobrecarga si lo hay) más el potencial de presión del aire y, además, dicha lectura es una función de la distancia entre la cápsula porosa y el reservorio de mercurio: ($H + L$) en la Figura 9.6. Haciendo el potencial de presión del aire igual a cero y expresando el potencial mátrico como cabeza de potencial, se tiene:

$$m = H + L - 12.6X \quad [9.6a]$$

Igualando a cero la ecuación anterior ($m = 0$) y despejando X se obtiene un valor de corrección que se debe aplicar al tensiómetro para que su lectura exprese el potencial mátrico del suelo en la vecindad de la copa porosa:

$$X = \frac{(H + L)}{12.6} \quad [9.6b]$$

A la distancia X sobre el reservorio de mercurio se coloca el cero de la escala de lectura del tensiómetro y así, la lectura obtenida en el campo es la del potencial mátrico promedio del suelo en los alrededores de la cápsula porosa.

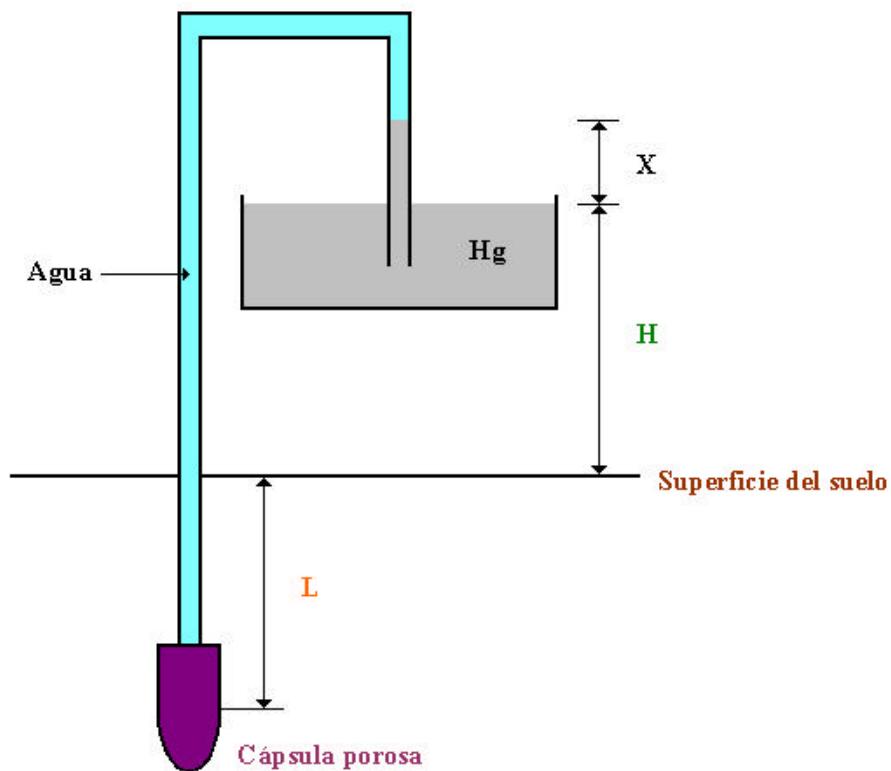


FIGURA 9.6. Representación esquemática de un tensímetro de mercurio.

En suelos expansivos, la lectura del tensímetro equivale a la suma de los potenciales de sobrecarga y de humedecimiento; por lo tanto, si se conoce el potencial de sobrecarga (se vio en párrafos anteriores), por diferencia puede estimarse el **potencial de humedecimiento** del suelo.

3. CONSTANTES DE HUMEDAD DEL SUELO

De acuerdo con las fuerzas de retención que están actuando sobre la humedad del suelo, se han definido, más o menos arbitrariamente, ciertos estados y límites de humedad de uso corriente en edafología. Los que se usan más frecuentemente son los siguientes:

- **Coeficiente higroscópico:** contenido de humedad que retiene el suelo cuando se seca al aire; esta humedad es retenida a una tensión de -30 atm, aproximadamente.
- **Punto de marchitez permanente:** contenido de humedad del suelo al cual la planta se marchita irreversiblemente; el agua del suelo en este punto, está retenida a -15 atm, aproximadamente.
- **Capacidad de campo:** es el contenido de humedad con que queda el suelo, luego de que sus macroporos han drenado completamente; se llega a esta condición de humedad luego de dejar drenar el suelo saturado, entre 48 y 72 horas; el agua en esta condición está retenida a tensiones comprendidas entre -0.1 y -0.3 atm.
- **Agua aprovechable:** Es la humedad que presenta el suelo retenida entre el punto de marchitez permanente y la capacidad de campo.

Cabe recalcar, nuevamente, que las constantes de humedad definidas anteriormente son **arbitrarias** y que no son aplicables, estrictamente, a todas las plantas ni a todos los suelos, puesto que hay factores

de tipo ambiental y genético que intervienen en la eficiencia de la planta para utilizar el agua del suelo, cuyo efecto no está considerado en las definiciones dadas; para mayor ilustración al respecto, pueden verse Kramer (1974) y Cassel (1981), entre otros muchos autores. En la Figura 9.7 se representan las constantes mencionadas, además de otros estados de humedad del suelo.

4. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO

La humedad del suelo puede evaluarse midiendo el contenido de agua, midiendo la fuerza con que ella está retenida o midiendo otras propiedades relacionadas con la humedad, como la capacidad de transmitir calor o de transmitir una corriente eléctrica.

4.1. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA

Se trata de establecer la cantidad de agua que contiene el suelo, expresada como porcentaje, con base en el peso (contenido **gravimétrico**), o en el volumen (contenido **volumétrico**) de una muestra representativa de aquél. La manera más común de medir la humedad del suelo es la gravimétrica y se calcula con base en el suelo seco al horno, para tener un nivel de referencia igual en todos los suelos y poderlos comparar, según la siguiente expresión:

$$W (\%) = \frac{Psh - Pss}{Pss} \times 100 \quad [9.7]$$

Donde: W: Porcentaje de humedad.

Psh: Peso del suelo húmedo.

Pss: Peso del suelo seco al horno.

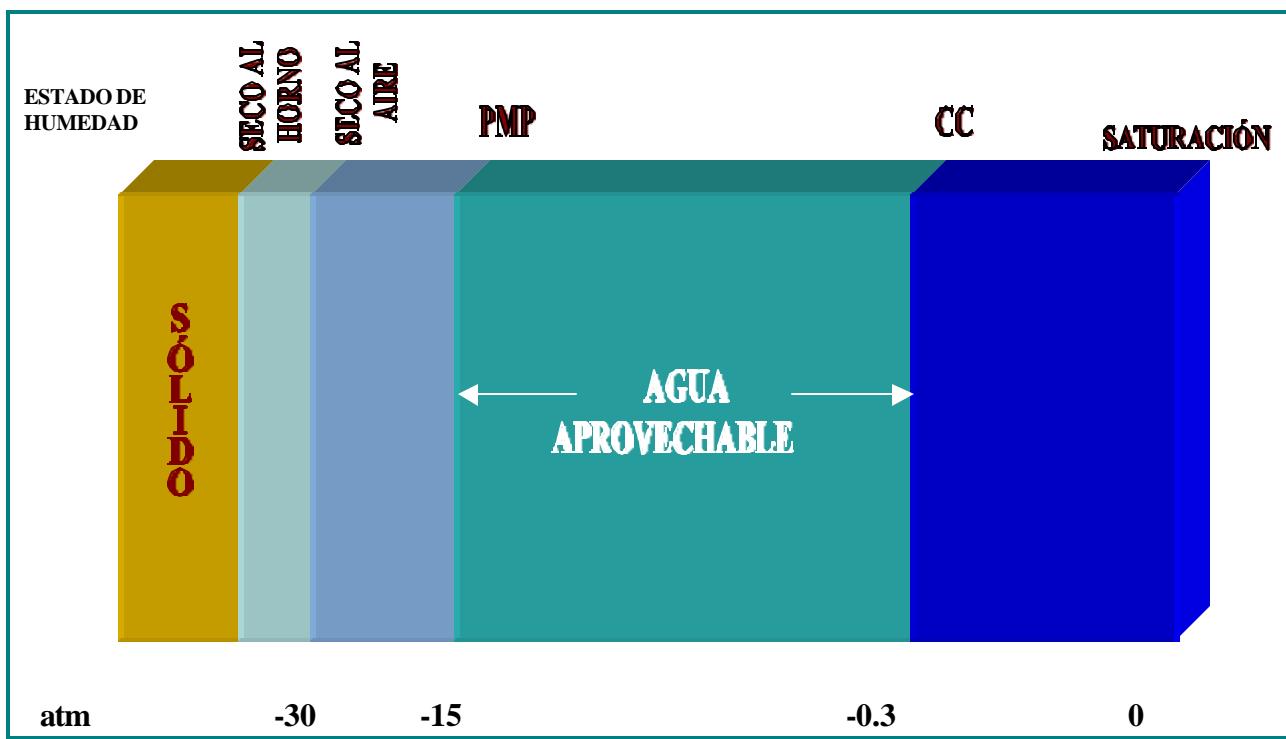


FIGURA 9.7. Representación esquemática de los estados de humedad del suelo.

El método para hacer la determinación del contenido de humedad gravimétrica consta de los siguientes pasos:

- Se pesa una caja para muestras, vacía (P_c).
- Se coloca la muestra de suelo en la caja, se tapa y se pesa el conjunto (P_{csh}).
- Se coloca la caja con suelo en el horno, a 105°C , hasta que no se presenten cambios en el peso de esos materiales; en la práctica se asume que esa condición se obtiene con un tiempo de secado de 24 a 36 horas; al cabo de este tiempo, se retira la caja del horno y se pesa (P_{css}).
- Se calcula el porcentaje de humedad con la Fórmula [9.7], con el apoyo de las Fórmulas [9.8] y [9.9].
- En un formato como el que se muestra en la Figura 9.8 se registran los resultados que se van obteniendo.

$$P_{sh} = P_{csh} - P_c \quad [9.8]$$

$$P_{ss} = P_{css} - P_c \quad [9.9]$$

MUESTRA	P_c (g)	P_{csh} (g)	P_{css} (g)	P_{sh} (g)	P_{ss} (g)	W (%)

FIGURA 9.7. Formulario para el registro de los resultados que se obtengan en la determinación del contenido de humedad del suelo, por el método gravimétrico.

Si se conoce la densidad aparente del suelo (D_a , Capítulo 8), el valor de la humedad gravimétrica puede ser expresado en términos de humedad volumétrica (θ), en porcentaje, mediante la relación:

$$\theta (\%) = \frac{W (\%) \times D_a}{\rho_w} \quad [9.10]$$

Donde ρ_w es la densidad del agua.

La humedad volumétrica [$\theta (\%)$] puede ser expresada como una **lámina de agua** (L), es decir, como el espesor que tendría esa cantidad de agua si se extendiera formando una capa continua de agua; la transformación se hace con la siguiente fórmula:

$$L = \frac{\Theta (\%)}{100} \times h \quad [9.11]$$

Donde h es el espesor del suelo, del horizonte o de la porción del suelo que se está caracterizando.

En caso de que se quiera conocer la lámina de agua compuesta de varios horizontes del suelo, se calcula la lámina para cada uno de ellos y luego se suman todas estas láminas parciales para obtener la lámina total del suelo. Esta manera de expresar la humedad del suelo como lámina tiene amplio uso en trabajos de diseño de riegos y de drenajes. Con el siguiente ejemplo se ilustra el uso de las relaciones anteriores.

Ejemplo: Cuál es el valor de la lámina de agua que está acumulada en un suelo que dio los siguientes resultados para la determinación de su humedad gravimétrica:

Espesor (cm)	Da ($Mg m^{-3}$)	Pc (g)	Pesh (g)	Pess (g)	Psh (g)	Pss (g)
15	1.0	8.7	16.1	14.0	7.4	5.3
25	1.2	8.2	26.3	23.0	18.1	14.8
40	1.3	8.5	20.3	19.3	11.8	10.8

Los contenidos de humedad, gravimétricos, son:

$$W_1 (\%) = \frac{(7.4 - 5.3) g}{5.3 g} \times 100 = 39.6\% ; \text{ estos mismos cálculos, para los otros dos horizontes, dan que}$$

$$W_2 = 22.3\% \text{ y } W_3 = 9.3\% .$$

Los contenidos de humedad, volumétricos, son:

$$\Theta_1 (\%) = \frac{39.6\% \times 1.0 Mg m^{-3}}{1.0 Mg m^{-3}} = 39.6\% ; \text{ haciendo los mismos cálculos anteriores, para los otros dos}$$

horizontes, se tiene que $\Theta_2 = 26.8\%$ y $\Theta_3 = 12.1\%$.

Para transformar θ en lámina L , se tiene:

$$L_1 = \frac{39.6\%}{100} \times 15 cm = 5.9 cm ; \text{ de igual manera, para los otros dos horizontes se tiene que } L_2 = 5.6 \text{ cm y} \\ L_3 = 3.7 \text{ cm.}$$

Por lo tanto, la lámina de agua que tiene acumulada este suelo, en 80 cm, es:

$$Lt = (5.9 + 5.6 + 3.7) \text{ cm} = 15.2 \text{ cm.}$$

4.2. DETERMINACIÓN DE LA RETENCIÓN DE HUMEDAD

Hay varios métodos para realizar esta determinación. Además, puede llevarse a cabo en el campo o en el laboratorio. En el campo, para fines de manejo agropecuario del suelo, lo más común es trabajar el suelo en condiciones no saturadas (salvo pocas excepciones); aquí interesa conocer el estado energético del agua con fines de control de la humedad en la zona radicular y su relación con el riego, lo cual hace que el potencial tensiométrico (Ψ_{tp}) adquiera un gran valor, puesto que, en las condiciones de humedad mencionadas, es el potencial que más controla la retención de la humedad en los suelos. Para determinar ese potencial se utilizan, preferencialmente, los **tensiómetros**.

En el laboratorio, lo más común es determinar el potencial total del agua del suelo, mediante el uso de ollas y platos de presión; este método de laboratorio se analizará posteriormente, cuando se trate el tema de la curva de retención de humedad.

Los tensímetros constan, básicamente, de una copa de cerámica conectada a un tubo que contiene agua y que tiene adaptado un sistema de medida de presión; los diseños de estos equipos son muy variados y van desde los tensímetros sencillos, de tubo de plástico transparente (Camargo et al, 1982), hasta los sofisticados equipos automáticos electrónicos (Bottcher y Miller, 1982).

El principio con que funcionan estos equipos consiste en establecer un equilibrio estático entre la humedad que tiene el suelo y la humedad que alcanza la copa cerámica que, por ser porosa, intercambia agua con su entorno hasta alcanzar esa condición de equilibrio. La entrada o la salida de agua del tensímetro genera un cambio de presión en el equipo, con respecto a las condiciones de calibración del mismo, que es registrado por el instrumento que para el efecto tenga aquel y, generalmente, es expresado en unidades de energía/volumen. Estos equipos dan lecturas confiables de potencial hasta valores de -0.8 atm (~ -800 cm). Para realizar las medidas con tensímetros, el procedimiento a seguir depende del sistema de medida de presión que posea, así:

4.2.1. Tensiómetros de mercurio

- Se llena, hasta las 2/3 partes, el recipiente para el mercurio.
- Se llena de agua el tubo que conecta la cápsula con el mercurio, evitando que quede aire en el sistema.
- Se tapa el tubo de agua y se espera hasta obtener una lectura entre -200 y -300 mbar, para completar el agua.
- Se coloca la cápsula porosa en agua, hasta cuando la columna de mercurio se estabilice.
- Se desliza la escala longitudinalmente hasta que el cero coincida con el menisco de la columna de mercurio; así queda calibrado el equipo. Si se requieren valores precisos de Ψ_m , tener en cuenta la corrección que debe hacerse con la Fórmula [9.6b], página 215, para ubicar el cero de la escala.
- Se instala el equipo calibrado, a la profundidad deseada, abriendo un hueco en el suelo con un barrenó; para obtener el mejor contacto entre la cápsula porosa y el suelo, se compacta un poco alrededor de ella.

- Se termina de llenar el hueco y se espera hasta que la columna de mercurio se estabilice para hacer la primera lectura; se deja instalado el equipo para lecturas posteriores.

4.2.2. Tensiómetros con vacuómetro

- Se llena el tubo del tensímetro con agua.
- Se satura la cápsula con agua hasta que el manómetro marque el máximo porcentaje de humedad.
- Se instala el tensímetro como se hace con el de mercurio.
- Para hacer la primera lectura se espera hasta que el manómetro se estabilice; el equipo se deja en el suelo para posteriores lecturas.

En la Figura 9.9 se muestra un modelo de estos equipos.

5. LA CURVA DE RETENCIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO

También es conocida como **curva característica de humedad** del suelo. Es una gráfica que representa la relación existente entre el potencial total del agua del suelo y el contenido de humedad del mismo, en un amplio rango de tensiones. Esta relación tiene una dependencia muy grande de la textura del suelo, como puede verse en las gráficas teóricas que se presentan en la Figura 9.10. Es una herramienta indispensable en el manejo de riegos y sirve para establecer controles en el campo, utilizando, generalmente, los tensímetros.

Para establecer la curva, en el laboratorio, las muestras de suelos se someten a diferentes presiones (0.1, 0.3, 1, 5, 10 y 15 atm, por ejemplo) y cuando se llega al equilibrio, se determina el contenido de humedad que presenta la muestra por el método gravimétrico, según la Fórmula [9.7], registrando los resultados en un formulario como el que se presenta en la Figura 9.11. Con la Fórmula [9.10] se transforma el contenido gravimétrico a volumétrico.

Las tensiones se aplican a las muestras en ollas y platos de presión (ver Figura 9.12) y los resultados se grafican en papel semilogarítmico, colocando, en la escala logarítmica, la tensión y, en la aritmética, el % de humedad, como puede verse en la Figura 9.2.

Teniendo definida la curva de retención de humedad de un suelo, puede establecerse el contenido de humedad que presenta éste en cualquier momento, al medir en el campo la tensión con que esa agua está retenida.



a.



b.

FIGURA 9.9. a. Tensiómetro con vacuómetro (Irrómetro). b. Detalle del vacuómetro (unidades en centibares).

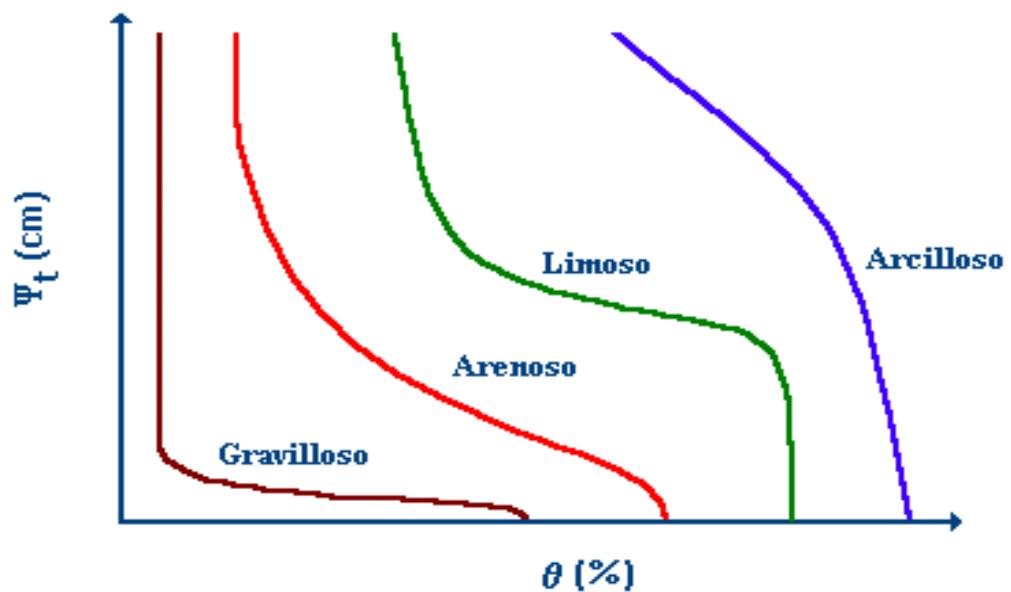


FIGURA 9.10. Efecto teórico de la textura sobre el comportamiento de la curva de retención de humedad del suelo (Generalizada de Stephens, 1996).

MUESTRA	TENSIÓN (atm)	Pc (g)	Pesh (g)	Pcss (g)	Psh (g)	Pss (g)	W (%)

FIGURA 9.11. Formulario para el registro de los resultados correspondientes a la determinación de la curva característica de humedad del suelo.

6. MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO

Cuando el agua del suelo está en equilibrio, el potencial total en el sistema es constante y, por lo tanto, no hay ningún movimiento de ella en el suelo. El movimiento de agua en el suelo se da cuando las condiciones de equilibrio se rompen y se generan diferencias de potencial entre los diferentes puntos del sistema.

Cuando se presenta flujo de agua en el suelo, el agua se desplaza obedeciendo a **gradientes** de potencial total en el mismo: Ella se desplaza desde donde está retenida con un potencial menos negativo (mayor potencial) hacia donde se presenta un potencial más negativo (menor potencial); cuando el Ψ_t en los diferentes puntos del suelo se iguala en todos ellos, se suspende el movimiento de agua. Por ejemplo, si un punto A está ubicado a 70 cm de profundidad en el suelo y tiene una cabeza hidráulica de -0.55 m y otro punto B, a 120 cm de profundidad tiene una cabeza hidráulica de -0.65 m, el agua en ese suelo se moverá desde el punto A hacia el punto B, es decir, en el suelo habrá un flujo de agua descendente.



FIGURA 9.12. Ollas y plato de presión utilizados en el laboratorio para determinar la curva característica de humedad del suelo.

El agua en el suelo puede moverse en forma líquida o en forma de vapor, dependiendo de la situación de humedad que se presente en él: Mientras el suelo no esté saturado ni muy seco, el agua se mueve en estado líquido y en forma de película, rodeando las partículas sólidas y las paredes de los poros; cuando se llega a tensiones tan altas como las de P.M.P., se pierde la continuidad en la película de agua y el flujo se produce en forma de vapor (Kramer, 1974).

Además, el agua líquida puede moverse en el suelo cuando éste presenta diferentes estados de humedad, generándose **flujo saturado** o **flujo no saturado**. Los problemas específicos relacionados con el flujo de agua en el suelo escapan al alcance de este texto y, por lo tanto, no se tratarán aquí. Sin embargo, hay dos conceptos básicos relacionados con el movimiento del agua en el suelo que, debido a la importancia que tienen en el manejo de la humedad edáfica y de cultivos, se analizan a continuación. Ellos son: La **infiltración** y la **permeabilidad**, esta última medida por la **conductividad hidráulica**.

6.1. INFILTRACIÓN

Es la propiedad que evalúa la velocidad de entrada del agua al suelo. Es un parámetro crítico cuando se están haciendo diseños de riego, pues ella define cuánto tiempo debe permanecer el agua sobre la

superficie del suelo para que haya un adecuado humedecimiento, si se trata de riego superficial, o limita los caudales de aplicación en sistemas de aspersión.

6.1.1. Factores que afectan la infiltración

La velocidad con la cual pasa el agua del exterior al interior del suelo depende de varios factores como:

- El contenido de humedad que presente el suelo al momento de hacer la evaluación: A mayor contenido de humedad, menor será la velocidad de infiltración.
- La permeabilidad del suelo: La calidad del arreglo físico del suelo facilita o dificulta el movimiento de agua dentro de él, aumentando o disminuyendo, respectivamente, la velocidad con la cual el suelo puede recibir nuevas cantidades de agua.
- La cantidad y tipo de coloides: Si en el suelo hay contenidos considerables de coloides expansibles, a medida que el suelo se va humedeciendo se va reduciendo el tamaño de los poros, aumentando la fricción del agua en ellos y por tanto aumentando la dificultad para su movimiento, lo cual reduce, a su vez, la infiltración.
- El tipo de poros: Si en el suelo predominan los poros finos, la infiltración será baja; éste tipo de poros puede estar relacionado con texturas finas y/o poco desarrollo estructural, así como con problemas de compactación.
- La homogeneidad del perfil del suelo: En suelos de perfil homogéneo se presenta una alta continuidad en el espacio poroso, la cual facilita el movimiento del agua y su infiltración; cuando hay contrastes texturales y estructurales en el interior del suelo, éstos pueden generar interrupciones en los poros, o reducciones drásticas en el tamaño de ellos que desaceleran el flujo del agua y la infiltración.
- Las condiciones superficiales del suelo: La presencia de sellamiento y/o encostramiento superficial del suelo reduce su infiltración.
- La presencia de materiales hidrofóbicos en el suelo: La velocidad de infiltración se ve menguada en la medida en que se presenten en el suelo materiales repelentes al agua, como lo han confirmado varios investigadores, Ritsema et al (1996), por ejemplo, de quienes se presenta la Figura 9.13 que ilustra dicho comportamiento.
- El tiempo que dure el suministro de agua al suelo, sea por riego o por lluvia.

6.1.2. Determinación de la infiltración del suelo

El método más utilizado para evaluar la infiltración en el suelo es el llamado de los **anillos infiltrómetros**; consiste en colocar en el suelo, en forma concéntrica, dos anillos de lámina de hierro con agua y medir la cantidad de agua que penetra en el suelo por unidad de tiempo, hasta que esa tasa de entrada se vuelva constante.

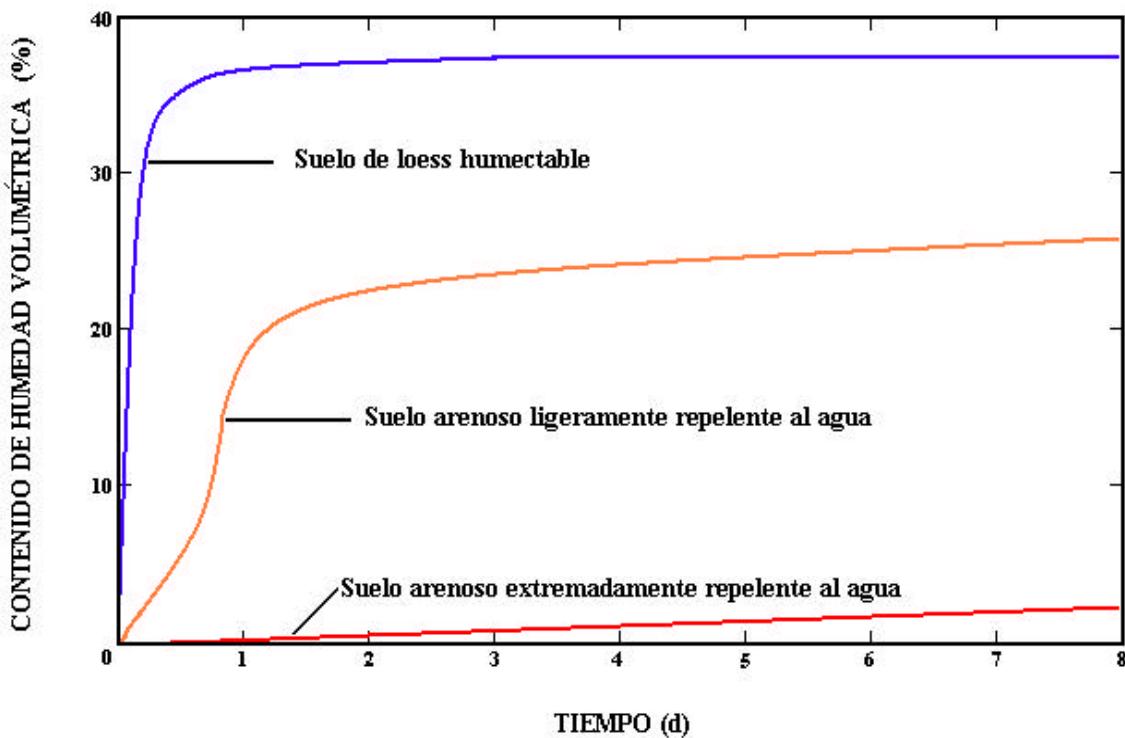


FIGURA 9.13. Cambio en el contenido de humedad en suelos arenosos y limosos, con una succión de -5 cm y con diferente grado de hidrofobicidad. (Tomada de Ritsema et al, 1996).

Un juego de anillos lo conforman dos unidades, uno de 30 cm y otro de 50 cm de diámetro; los dos anillos tienen entre 30 y 40 cm de altura; la prueba debe hacerse por triplicado, colocando 3 juegos de anillos en triángulo, separados 5 m y puede hacerse con cabeza hidráulica constante o variable; Motta et al (1990) describen el método con cabeza variable de la siguiente manera:

- Una vez seleccionado el sitio para la prueba en el campo, se introducen los cilindros verticalmente en el suelo, de modo que penetren 15 cm en él, tratando de que queden puestos en forma concéntrica.
- Se coloca un plástico en el cilindro interior que pueda admitir una columna de agua de 12 cm de altura y se coloca ésta cantidad de agua; seguidamente se instala la escala de medida en uno de los bordes del cilindro, con graduación en cm.
- Se coloca agua en el espacio entre el cilindro exterior y el interior y se deja que penetre durante 3 minutos.

- Al cabo del tiempo estipulado en el punto anterior, se retira el plástico del cilindro interior y se empieza a contabilizar el tiempo para la prueba.
- Al minuto de iniciada la penetración de agua en el cilindro interno, se hace la primera lectura en la escala para establecer cuánto bajó la lámina de agua.
- En adelante, se continúan haciendo lecturas de tiempo y de descenso de la columna de agua en el cilindro interno, espaciando los intervalos de tiempo a medida que transcurre la prueba y teniendo la precaución de no dejar que la columna de agua baje de 7 cm; cuando llegue a éste punto, se repone el agua hasta completar los 12 cm iniciales.
- Las lecturas de tiempo y entrada de agua se realizan hasta que el agua entre a una rata más o menos constante en el suelo (dependiendo del suelo puede tardar hasta más de 4 horas); las mediciones que se van haciendo se pueden consignar en un formulario como el que se presenta en la Tabla 9.3.

Con la información obtenida se calculan las ecuaciones que caracterizan la infiltración del suelo: La **infiltración instantánea** y la **infiltración acumulada** y se determina la **infiltración básica**; las ecuaciones pueden obtenerse de dos maneras:

- Ajustando los resultados de tiempo acumulado y de infiltración instantánea y acumulada a modelos teóricos de tipo $y = ax^b$, por procedimientos estadísticos de regresión, o
- Graficando los mismos resultados en un papel doble logarítmico y ajustándolos visualmente a una recta; cortando el eje de las ordenadas, se obtiene el valor del intercepto, el cual define la constante a del modelo teórico y calculando la pendiente de la recta se obtiene el valor de la constante b del mismo modelo.

La **infiltración básica** la define Mercado (1989) como aquel valor que adquiere la infiltración instantánea cuando presenta la tendencia a ser constante; según la definición anterior y lo que se ha discutido acerca de la infiltración instantánea, si se grafican en escala aritmética el tiempo acumulado vs la infiltración instantánea, se obtiene una curva de forma hiperbólica, la cual, después de un cierto tiempo, empieza a ser asintótica al eje de las abscisas; si se proyecta esta línea asintótica hasta cortar el eje de las ordenadas, se obtiene un valor estimado de la infiltración básica, la cual refleja el movimiento de agua en el suelo saturado, por lo que puede hacerse igual a la **conductividad hidráulica saturada** del mismo.

En la Tabla 9.3, como ejemplo se presentan los resultados obtenidos en una prueba de infiltración llevada a cabo en un Typic Hapludand del oriente antioqueño (Colombia). La caracterización de la infiltración de este suelo se realiza por el método de regresión; para el suelo estudiado se obtuvo un valor de infiltración básica de aproximadamente 7 cm h^{-1} .

Con los resultados de Infiltración, Tiempo Acumulado e Infiltración Acumulada de la Tabla 9.3 se construye la Figura 9.14, en la cual se aprecia la forma hiperbólica de las curvas que se generan; además, se puede ver cómo se determina la infiltración básica, utilizando la curva de infiltración vs tiempo acumulado. Con base en los procedimientos de regresión, se obtuvieron las siguientes ecuaciones:

$$I = 497.556 t^{-0.815531} \quad (r = -0.94241) \quad \text{y} \quad D = 6.46869 t^{0.547998} \quad (r = 0.975452)$$

Donde: I: Infiltración instantánea: cm h⁻¹.

D: Infiltración acumulada en forma de lámina: cm.

t: Tiempo: min.

TABLA 9.3. Resultados de una prueba de infiltración de un Typic Hapludand medial isomésico del oriente antioqueño (Colombia). (Resultados de Jaramillo, D. F., 1988, sin publicar).

HORA	TIEMPO (min)		LECTURAS ESCALA (cm)		INFILTRACIÓN (cm h ⁻¹)**
	DIFERENCIA	ACUMULADO	LECTURA	DIFERENCIA	
3 pm	0	0	51.12	0	0
	1	1	46.06	5.06	5.06
	1	2	43.29	2.77	7.83
	1	3	41.28	2.01	9.84
	1	4	38.60	2.68	12.52
	1	5	36.64	1.96	14.48
R*	5	49.47			
	2	7	44.43	5.04	19.52
	2	9	40.23	4.20	23.72
	2	11	36.49	3.74	27.46
	2	13	33.06	3.43	30.89
R	13	50.05			
	2	15	46.89	3.16	34.05
	2	17	43.91	2.98	37.03
	2	19	41.75	2.16	39.19
	2	21	39.95	1.80	40.99
	2	23	38.12	1.83	42.82
	2	25	37.05	1.07	43.89
	2	27	36.13	0.92	44.81
R	27	50.55			
	3	30	48.50	2.05	46.86
	3	33	46.90	1.60	48.46
	3	36	45.80	1.10	49.56
	3	39	44.73	1.07	50.63
	3	42	43.78	0.95	51.58
	5	47	42.49	1.29	52.87
	5	52	41.17	1.32	54.19
	5	57	40.15	1.02	55.21
	5	62	39.15	1.00	56.21
R	62	51.20			
	10	72	47.99	3.21	59.42
	10	82	45.68	2.31	61.73
	10	92	43.86	1.82	63.55
	10	102	42.36	1.50	65.05
	10	112	41.09	1.32	66.37
					7.92

* En éste momento hubo necesidad de recargar de agua el cilindro interno.

** Es la infiltración instantánea $I = \frac{\text{Diferencia Lectura Escala} \times 60}{\text{Diferencia Tiempo}}$.

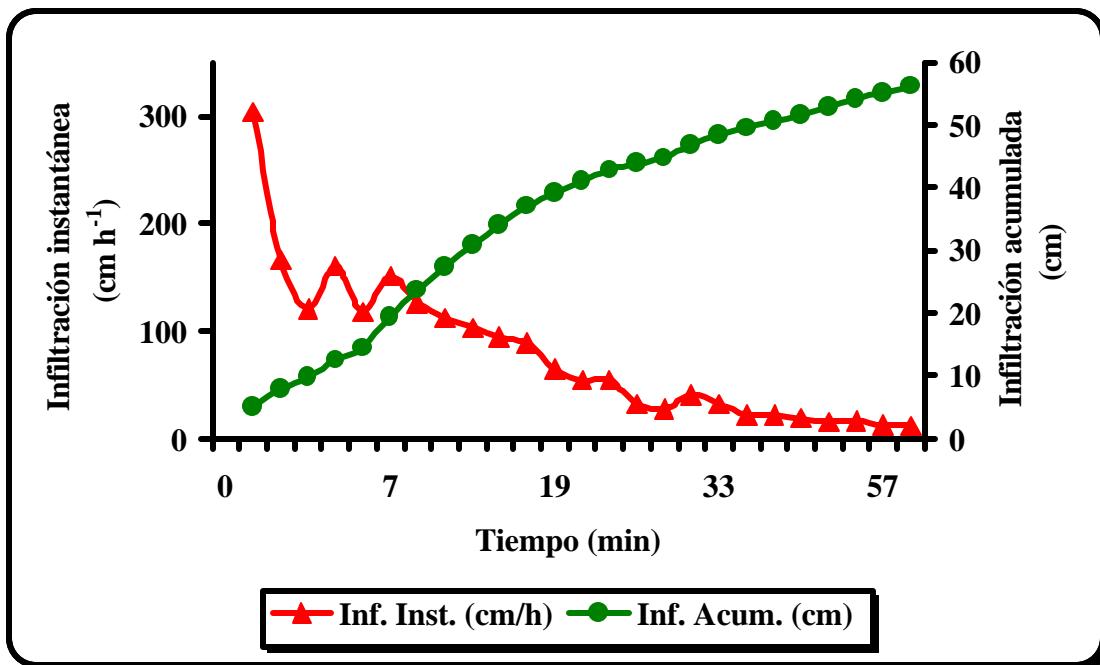


FIGURA 9.14. Curvas de infiltración instantánea e infiltración acumulada de un Typic Hapludand medial isomésico del oriente antioqueño (Colombia). (Con base en los datos de la Tabla 9.3).

Otra manera de evaluar la infiltración de un suelo, aunque de una forma más cualitativa que cuantitativa, consiste en medir el tiempo que gasta un determinado volumen de agua en entrar completamente en un volumen de suelo empacado en una columna de vidrio con una densidad aparente específica; a través del tiempo que dure la prueba, se puede ir midiendo el avance del frente de humedecimiento y al final se puede graficar este resultado, como se muestra en la Figura 9.15; este método es útil para comparar suelos con respecto a su infiltración.

Para interpretar los resultados de la infiltración obtenida en un suelo, se puede evaluar la infiltración básica del mismo con los parámetros que se tienen para evaluar la conductividad hidráulica saturada del suelo, la cual se presenta en el próximo numeral.

6.2. LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DEL SUELO

Esta cualidad es la que define las posibilidades que tiene el agua de moverse dentro del suelo; la propiedad que se mide para evaluar dicha posibilidad se conoce como **conductividad hidráulica** del

suelo y se representa como K_s o simplemente K ; por su definición, es una cualidad que se relaciona estrechamente con el drenaje del suelo.

La conductividad hidráulica del suelo es fuertemente dependiente de su contenido de humedad y puede disminuir varios órdenes de magnitud al pasar del estado de saturación a punto de marchitez permanente (Hanks y Ashcroft, 1980). La conductividad hidráulica del suelo es máxima cuando está saturado, pues todos los poros están llenos con agua y actúan como conductores; además, a mayor tamaño de poros, mayor es la conductividad, por lo cual es una propiedad que depende fuertemente de la estructura, la textura y la composición mineralógica de las arcillas.

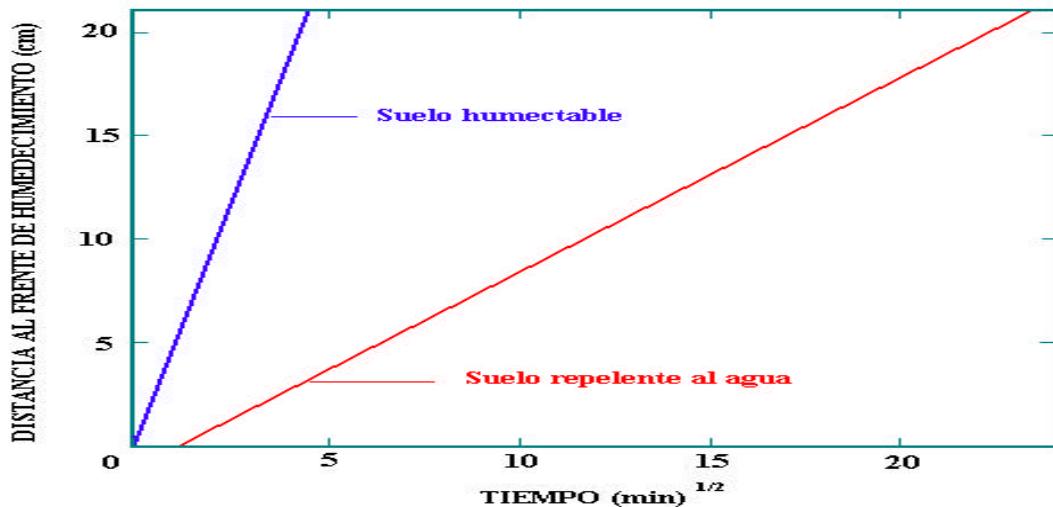


FIGURA 9.15. Avance del frente de humedecimiento en dos columnas de suelos de diferente grado de humectabilidad (Adaptada de DeBano, 1971).

6.2.1. Determinación de la conductividad hidráulica saturada

La conductividad hidráulica del suelo se determina, en laboratorio, midiendo el tiempo que gasta en pasar un volumen determinado de agua a través de una columna de él, saturado con agua; para hacer esta prueba se utilizan los **permeámetros**, los cuales pueden ser de **cabeza constante** (el más común; ver representación en la Figura 9.16) y de **cabeza variable** (especial para suelos de baja permeabilidad).

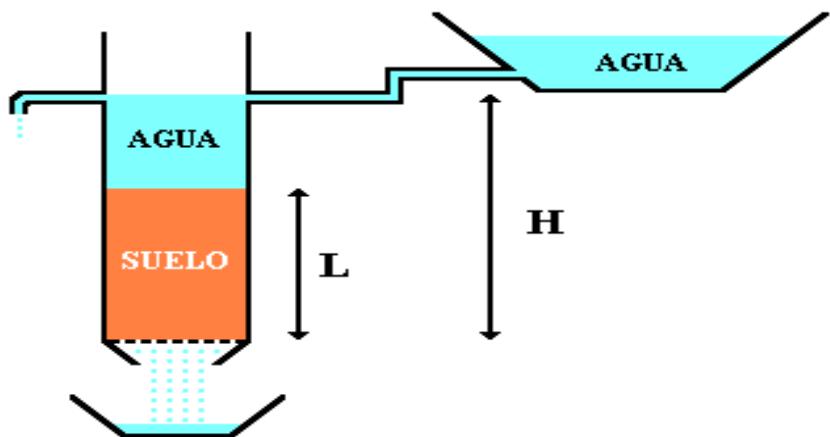


FIGURA 9.16. Representación esquemática de un permeámetro de cabeza constante.

Para llevar a cabo la determinación, lo más recomendable es tomar muestras, sin disturbar, en sentido vertical y replicadas por lo menos 4 veces; pueden fabricarse los cilindros con tubería de PVC o de metal, según la dureza del suelo, de 20 a 30 cm de altura y de 10 ó 12 cm de diámetro; se les debe biselar uno de los bordes para facilitar su penetración en el suelo; a unos 4 ó 5 cm del borde no biselado hacer dos perforaciones enfrentadas, pegando en ellas un tubito al cual se puedan adherir sendas mangueras, una para entrada y la otra para salida de agua para poder mantener el nivel del agua constante; luego, los procedimientos a seguir son:

- Tomar las muestras en campo con cilindros que no las disturbren, hasta la altura deseada.
- En la parte inferior del cilindro se coloca una malla fina y se pone a saturar la muestra.
- Se coloca el cilindro con el suelo saturado en un soporte; debajo del cilindro se coloca un recipiente graduado para recoger el agua que pase a través del suelo; se conecta la manguera que abastecerá el agua y se empieza a adicionar ésta hasta que se alcance el nivel constante; observar el caudal que se está aplicando para no sobrepasar el nivel que proveen los orificios en el cilindro.
- Cuando se alcance el nivel constante, se empieza a contabilizar el tiempo; a ciertos intervalos de tiempo, se anota el volumen de agua que se ha recogido; éstas observaciones se hacen hasta que la velocidad de paso del agua a través de la columna de suelo sea más o menos constante.
- Al finalizar las observaciones anteriores, se calcula la conductividad hidráulica mediante la Fórmula [9.12].

$$K_{sat} = \frac{V}{tA} \times \frac{L}{H} \quad [9.12]$$

Donde: K_{sat} : Conductividad hidráulica saturada: cm h^{-1} .

V: Volumen total de agua que pasó a través del cilindro: cm^3 .

t: Tiempo total empleado en la prueba: min.
A: Área transversal interna del cilindro: cm^2 .
L: Longitud de la columna de suelo: cm.
H: Longitud de la columna de agua: cm.

Aparte del método descrito anteriormente hay otros, tanto de laboratorio como de campo, los cuales pueden consultarse en Motta et al (1990) o en textos de Física de Suelos o de Drenajes.

6.2.2. Interpretación de la conductividad hidráulica saturada

Para fines de interpretación de los valores de Ksat que se obtengan, el Soil Survey Division Staff (SSDS, 1993) recomienda el uso de los límites críticos que se presentan en la Tabla 9.4. Cabe recordar que como la infiltración básica del suelo se asimila a la Ksat, la información de la tabla mencionada también puede utilizarse para interpretar dicha infiltración.

TABLA 9.4. Clases de conductividad hidráulica del suelo saturado. (Tomadas de SSDS, 1993).

CLASE	RANGO DE VALORES DE K _{SAT}		
	mm s^{-1}	cm h^{-1}	m dia^{-1}
Muy alta	> 100	> 36	> 864
Alta	10 – 100	3.6 – 36	86.4 – 864
Moderadamente alta	1 – 10	0.36 – 3.6	8.64 – 86.4
Moderadamente baja	0.1 – 1	0.036 – 0.36	0.864 – 8.64
Baja	0.01 – 0.1	0.0036 – 0.036	0.0864 – 0.864
Muy baja	< 0.01	< 0.0036	< 0.0864

RECORDAR

- La cantidad de agua que puede acumular un suelo depende directamente de la cantidad y tipo de coloides que él tenga, así como de su arreglo espacial (estructura).
- El agua en el suelo no está en forma libre sino que se encuentra retenida por unas fuerzas que se conocen como el potencial total del agua del suelo.
- El potencial total del agua del suelo tiene diferentes componentes, dependiendo del tipo de coloides que tenga el suelo: expansivos o no, así como del hecho de estar o no saturado con agua.
- Para la mayoría de las situaciones prácticas, el potencial total del agua del suelo lo componen los potenciales parciales: mátrico, gravitacional y de presión. También, en la práctica, en suelos no salinos y no saturados, el potencial mátrico se toma como el potencial total.
- Cada suelo retiene una cantidad específica de agua a un determinado potencial total.
- La unidad en que se expresa el potencial es el kilo Pascal – kPa – .
- La cantidad de agua disponible para las plantas es la que se encuentra entre capacidad de campo (-33 kPa) y punto de marchitez permanente (-1500 kPa).

- La forma más recomendable de expresar el contenido de agua del suelo es el porcentaje volumétrico.
- La curva de humedad del suelo relaciona el potencial total del agua del suelo con su contenido de humedad.
- El agua en el suelo se mueve obedeciendo a diferencia de potencial y va desde donde hay un potencial menos negativo hacia donde el potencial es más negativo.
- La infiltración y la conductividad hidráulica son dos propiedades del suelo relacionadas con el movimiento del agua.
- La infiltración básica puede tomarse igual a la conductividad hidráulica saturada del suelo.

BIBLIOGRAFÍA

- BAVER, L. D.; W. H. GARDNER y W. R. GARDNER. 1973. Física de suelos. 1^a. Ed. en español. U.T.E .H.A. México. 529 p.
- BOTTCHER, A. B. and L. W. MILLER. 1982. Automatic tensiometer scanner for rapid measurements. Transactions of the ASAE. 25 (5): 1338-1342.
- CAMARGO, A. P. de; F. GROHMAN e M. P. de CAMARGO. 1982. Tensiometro simples de leitura direta. Pesq. Agropec. Bras. Brasilia 17 (12): 1763-1772.
- CASSEL, D. K. 1981. Effects of soil characteristics and tillage practices on water storage and its availability to plant roots. In : Crop reactions to water and temperature stresses in humid, temperate climates. Westview Press. Colorado. pp. 167-186.
- DEBANO, L. 1971. The effect of hydrophobic substances on water movement in soil during infiltration. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 35: 340-343.
- GONZÁLEZ, A. y J. E. GARCÍA. 1987. Retención de agua en Andosoles del Departamento del Cauca, Colombia., S. A. Suelos Ecuatoriales. 17(2): 56-63.
- HANKS, R. J. and G. L. ASHCROFT. 1980. Applied soil physics: Soil water and temperature applications. Springer-Verlag. Berlín. 159 p.
- HILLEL, D. 1998. Environmental soil physics. Academic Press. San Diego. U.S.A. 771 p.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, IGAC. 1977. Estudio general y detallado de suelos de los municipios de Cota, Funza, Mosquera y parte de Madrid (Departamento de Cundinamarca). IGAC. Bogotá. 513 p.
- JURY, W. A.; W.R. GARDNER and W. H. GARDNER. 1991. Soil physics. 5^a Ed. John Wiley and Sons, Inc. New York. 328 p.
- KOOREVAAR, P.; G. MENELIK and C. DIRKSEN. 1983. Elements of soil physics. 3^a Ed. Elsevier. Amsterdam. 230 p.
- KRAMER, P. J. 1974. Relaciones hídricas de suelo y plantas. 1a. ed. española. Edutex S.A. México. 538 p.

MERCADO, E. 1989. Requerimientos de agua de los cultivos y principios básicos de diseño. En: Curso sobre actualización en sistemas de riego. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Medellín. pp: 56-147.

MOTTA de M. B. et al. 1990. Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos. 5^a. Ed. IGAC. Bogotá. 502 p.

PORTE, J.; M. LÓPEZ – ACEVEDO y C. ROQUERO. 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi Prensa. Madrid. 807 p.

RITSEMA, C.; T. M. STEENHUIS; J. Y. PARLANGE and L. W. DEKKER. 1996. Predicted and observed finger diameters in field soils. Geoderma 70: 185-196.

SÁNCHEZ, P. A. 1981. Suelos del trópico: características y manejo. 1^a . Ed. en español. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Costa Rica. 534 p.

da SILVA, A. P.; P. L. LIBARDI e O. A. CAMARGO. 1986. Influencia da compactasao nas propriedades físicas de dois Latossolos. Rev. Bras. Ci. Solo. 10: 91-95.

SOIL SURVEY DIVISION STAFF (SSDS). 1993. Soil survey manual. Handbook No. 18. United States Department of Agriculture (USDA). Washington D. C. 437 p.

SOIL SURVEY STAFF (SSS). 1998. Keys to soil taxonomy. 8^a Ed. USDA. Washington D. C. 326 p.

STEPHENS, D. B. 1996. Vadose zone hydrology. Lewis Publishers. Florida. U.S.A. 347 p.

THIEN, S. J. and J. D. OSTER. 1981. The international system of units and its particular application to soil chemistry. Journal of Agronomic Education. 10: 62-70.

AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Cuáles factores determinan el contenido de agua de un suelo?.
2. ¿Cuáles potenciales intervienen en la retención del agua del suelo?.
3. ¿Cuáles son los componentes más importantes del potencial total del agua del suelo en los suelos agrícolas normales?.
4. ¿Cuál es la unidad recomendada para expresar el potencial total del agua del suelo?.
5. Las unidades de medida del potencial total del agua del suelo son negativas. ¿A qué se debe ésto?.
6. ¿Qué es un piezómetro? ¿Cuál potencial se puede medir con él?.
7. ¿Qué es un tensímetro?. Describa uno. ¿Cómo se usa para medir directamente el potencial mátrico del suelo?.
8. ¿Qué es la curva característica de humedad del suelo?.
9. ¿Cómo se definen capacidad de campo, punto de marchitez permanente, coeficiente higroscópico y agua aprovechable del suelo?.
10. ¿Por qué las determinaciones del contenido de humedad del suelo se deben hacer con base en el suelo seco al horno?.
11. Dos suelos que se coloquen a igual ψ_t , deben tener el mismo contenido de humedad volumétrica. Comente esta afirmación.
12. ¿Qué se requiere para que se presente movimiento de agua en el suelo?. ¿En qué dirección se produce ese movimiento?.
13. Expresar los siguientes valores de tensión de humedad en las unidades equivalentes indicadas:

TENSIÓN DE HUMEDAD EN			
atm	Mbar	cm de agua	kPa
1/10			

14. ¿Cuál es la diferencia entre infiltración y permeabilidad?.
15. Diga 5 factores que afectan la infiltración.
16. ¿Qué es infiltración básica?. ¿Cómo se determina?.
17. ¿Para qué condiciones de permeabilidad de suelos es recomendable usar el permeámetro de cabeza variable?. Diga el nombre de un orden taxonómico de suelo donde se tenga una alta probabilidad de tener que utilizar este permeámetro.

EVALUACIÓN

1. Con los datos del problema Nº 6 de la evaluación del Capítulo 8, calcular:
 - a. Contenido de humedad gravimétrica. (R: 21.0779 %).
 - b. Contenido de humedad volumétrica. (R: 28.744 %).
 - c. Saturación de humedad. (R: 60.6167 %).
2. Para el horizonte A (20 cm) de un suelo con densidad aparente de 1.2 Mg m^{-3} , se obtuvieron los siguientes contenidos de agua gravimétrica para elaborar su curva característica de humedad:

TENSIÓN (atm)	HUMEDAD (%)
0.1	31.3
0.3	27.6
5.0	16.5
10.0	10.5
15.0	8.8

Con los resultados anteriores se pide:

- a. Expresar los contenidos de humedad en términos volumétricos.
- b. Determinar el porcentaje de humedad gravimétrica aprovechable para las plantas. (R: 18.8 %).
- c. Calcular la lámina de agua aprovechable del horizonte. (R: 45.12 mm).
- d. ¿Cuántos $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de agua aprovechable tiene el horizonte?. (R: 451.2 m^3).
- e. Hacer la gráfica de la curva característica de humedad del suelo y determinar ¿qué porcentaje de humedad gravimétrica tendrá el horizonte cuando el agua esté retenida a una tensión de 8 atm?. (R: 12.3 %).
3. Un suelo tiene una densidad aparente de 1.32 Mg m^{-3} hasta 20 cm de profundidad y de 1.52 Mg m^{-3} entre 20 y 60 cm; el contenido de humedad es de $0.12 \text{ g de agua (g de suelo)}^{-1}$ en los primeros 20 cm y de $0.10 \text{ g de agua (g de suelo)}^{-1}$ entre 20 y 60 cm; la capacidad de campo para cada una de las profundidades estudiadas es de 0.20 y 0.18, como w, respectivamente.
 - a. ¿Cuánta es la humedad total del suelo, en cm?. (R: 9.248 cm).
 - b. ¿Cuánta es la humedad volumétrica en cada horizonte del suelo después de un aguacero de 80 mm?. (R: 0-20 cm: 0.264; 20-60 cm: 0.2736).
4. Se tiene un lote cultivado de 12 ha y se riega con un gasto de 98.5 L s^{-1} , durante 48 horas. ¿Cuánta lámina de agua fue aplicada a este suelo?. (R: 14.184 cm).
5. El suelo del punto anterior, después de regado quedó con una humedad gravimétrica de 0.25 y después de 5 días esta humedad bajó al 0.18; si la densidad aparente del suelo es de 1.3 Mg m^{-3} , ¿cuál es el valor de la lámina media evapotranspirada diariamente en ese suelo?. (R: 7.943 mm d^{-1}).
6. El suelo de una parcela de 10 ha presenta las siguientes características en sus dos primeros horizontes:

a. 0-20 cm:	$Da = 1.4 \text{ Mg m}^{-3}$	Capacidad de campo (como w) = 17 %.
b. 20-80 cm:	$Da = 1.6 \text{ Mg m}^{-3}$	Capacidad de campo (como w) = 13 %.

Si se riega este suelo uniformemente con un gasto de 28 L s^{-1} durante 40 horas, ¿hasta qué profundidad se humedecerá este suelo, sabiendo que ambos horizontes tenían una humedad inicial (w) igual de 0.10?. (R: 63.1667 cm).

7. Con los datos del problema 1 de la evaluación del Capítulo 11, calcular ¿Cuántos m^3 de agua aprovechable por hectárea almacena el suelo completo?. (R: $1686.5 \text{ m}^3 \text{ de agua ha}^{-1}$).
8. Graficar en papel doble logarítmico los resultados de la Tabla 9.3 y definir de la gráfica el valor de los parámetros a y b de la ecuación de infiltración; compararlos con los obtenidos por regresión.
9. Repetir el balance que se presenta en la Tabla 9.1, pero cambiando la ubicación del nivel de referencia, primero a la superficie del suelo y, segundo, al nivel freático.
10. Se quiere medir el potencial mátrico de un suelo a 40 cm de profundidad y se tiene un tensiómetro que mide 80 cm desde el centro de la copa porosa hasta el nivel de mercurio. ¿A qué altura de este nivel se debe colocar el cero de la escala de medida del tensiómetro para hacer la determinación requerida?. (R: 6.35 cm).

LA CONSISTENCIA DEL SUELO

CAPÍTULO 10

CONTENIDO

- ❖ Estados de consistencia del suelo
 - Estado coherente
 - Estado de friabilidad o fragilidad
 - Límite de soltura
 - Límite inferior de plasticidad
 - Estado plástico
 - Estado de fluidez
- ❖ Compactación
- ❖ Encostamiento superficial
- ❖ Cementación
- ❖ Expansión y contracción
- ❖ Evaluación de la consistencia del suelo
 - Resistencia a la penetración
 - Resistencia a la ruptura
 - Cambios de estado
 - Determinación en el campo
 - Determinaciones en el laboratorio
 - Expansión y contracción
- ❖ Interpretación

OBJETIVOS

- ❖ Conocer la consistencia del suelo y los estados que ella genera en él
- ❖ Conocer algunos índices de consistencia relacionados con el manejo físico del suelo y aprender a determinarlos en el campo y/o en el laboratorio

L

a consistencia es la propiedad que define la resistencia del suelo a ser deformado por las fuerzas que se aplican sobre él. La deformación puede manifestarse, según Hillel (1998), como **ruptura**, **fragmentación** o **flujo** de los materiales del suelo y depende, directamente, de los contenidos de humedad y de materia orgánica del suelo, así como de su contenido y tipo de arcilla. Además, como un componente importante de esta resistencia hay que considerar la estabilidad estructural.

La consistencia se ha manejado tradicionalmente como una propiedad mecánica del suelo y en este sentido ha tenido su máxima aplicación en la Ingeniería Civil. Sin embargo, desde el punto de vista agronómico, esta propiedad está íntimamente relacionada con el laboreo del suelo y, por ende, sobre sus efectos en él como la **compactación**, el **encostramiento superficial** y la reducción del espacio vacío disponible para el desarrollo de las raíces. Estos aspectos también pueden considerarse manifestaciones de la deformación del suelo, en adición a las consideradas por Hillel (1998) expuestas en el primer párrafo.

De acuerdo con el contenido de humedad, el suelo presenta varios estados de consistencia, los cuales le dan ciertas propiedades especiales que definen su comportamiento mecánico; estos estados reflejan la relación en que se encuentran las fuerzas de **cohesión** (atracción entre partículas o moléculas de la misma sustancia) y de **adhesión** (atracción entre sustancias o partículas heterogéneas) en el suelo.

1. ESTADOS DE CONSISTENCIA DEL SUELO

Como se mencionó anteriormente, estos estados dependen del contenido de humedad del suelo. En la Figura 10.1 se representa gráficamente la variación de las fuerzas de cohesión y de adhesión, con respecto al incremento de la humedad en el suelo, indicándose los diferentes estados de consistencia que se producen, así como los índices que los definen.

En la Figura 10.1 se puede observar como a medida que se incrementa el contenido de humedad del suelo, van cambiando las fuerzas que determinan su comportamiento mecánico, lo cual se manifiesta en las propiedades que va adquiriendo el suelo en sus diferentes estados de consistencia.

1.1. ESTADO COHERENTE

Se presenta cuando el suelo está **seco**, manifestándose por una extrema dureza de los terrones del suelo (suelo cohesivo), cuando este no es arenoso, o por partículas sueltas, en suelos arenosos (suelo no cohesivo). En la mayoría de los suelos agrícolas, cuando se someten a laboreo en este estado de consistencia, se presenta aterronamiento grueso; hay partición y disgregación mecánica de partículas, formándose grandes nubes de polvo; en este estado no es posible volver a unir terrones de suelo entre sí, después de haberlos separado por ruptura de otros de mayor tamaño.

En la Figura 10.1 se observa que el estado coherente está determinado por las fuerzas de cohesión del suelo y que se extiende hasta el contenido de humedad en el cual empiezan a desarrollarse las fuerzas de adhesión en él.



FIGURA 10.1. Efecto de la humedad en la consistencia del suelo (complementado de Mejía, 1980).

1.2. ESTADO DE FRIABILIDAD O DE FRAGILIDAD

Se presenta al aumentar el contenido de humedad del suelo hasta sobrepasar los límites del estado coherente, pero sin que se acumule tanta agua que las películas de ella que rodean las partículas sólidas creen fuerzas de adhesión dominantes en el sistema.

En este estado el suelo es blando, se disagrega fácilmente sin pulverizarse y en él se presenta el rango de humedad **óptimo para el laboreo**, ya que se produce la menor alteración de la estructura. En los suelos agrícolas, dentro del estado de friabilidad, se presentan dos índices de consistencia importantes para su manejo:

1.2.1. Límite de Soltura (LS)

Llamado también **límite de glutinosidad**, **límite de pegajosidad** o **punto de deterción** (Baver et al., 1973), representa el contenido máximo de humedad que presenta un suelo, sin que se adhiera a cuerpos extraños; este es el **punto óptimo de labranza**.

1.2.2. Límite Inferior de Plasticidad o Límite Plástico (LIP)

Es el contenido de humedad en el cual, las fuerzas de cohesión y adhesión se igualan. Normalmente el valor de este límite es ligeramente mayor que el valor del límite de soltura y es el límite máximo de humedad que debe tener el suelo para ser sometido a laboreo con bajo riesgo de deterioro físico.

1.3. ESTADO PLÁSTICO

Es el rango de humedad del suelo en el cual se deja **moldear** y conserva las deformaciones que le ocasionan fuerzas extrañas. Como se ve en la Figura 10.1, está comprendido entre el límite inferior de plasticidad (LIP) y el límite superior de plasticidad (LSP) o límite líquido (LL) y es el rango en el cual se presentan las mayores fuerzas de adhesión.

El **Límite Líquido** se define como el contenido mínimo de humedad del suelo, en el cual éste empieza a comportarse como un fluido, es decir, a deformarse bajo su propio peso.

En el estado plástico, el suelo no se pulveriza cuando es sometido a laboreo y, a medida que aumente la humedad, será mayor el **riesgo de compactación** y se incrementarán los requerimientos de potencia para el laboreo.

1.4. ESTADO DE FLUIDEZ

Se presenta cuando el suelo sobrepasa el contenido de humedad del límite líquido y empieza a fluir por su propio peso. En este estado se presenta saturación de humedad y el laboreo se hace prácticamente imposible, salvo casos especiales de cultivo y máquinas, como en el caso de fangueo en el cultivo de arroz bajo inundación.

2. COMPACTACIÓN

Según Hillel (1998), un suelo se considera compactado cuando su macroporosidad es tan baja que restringe la aireación. El suelo se encuentra tan finamente empaquetado y el tamaño de sus poros es tan fino que se impiden la penetración de las raíces, la infiltración y el drenaje. La compactación también reduce el volumen y la continuidad de los macroporos con lo cual se reduce la conductividad de aire y de agua.

La compactación, según Montenegro y Malagón (1990) se produce principalmente al someter el suelo muy húmedo a laboreo y es mayor en aquellos suelos que tienen bajo contenido de materia orgánica, que están mal drenados o que presentan una alta variedad de tamaños de partículas.

El laboreo del suelo en condiciones inadecuadas de humedad, realizado a la misma profundidad durante períodos de tiempo relativamente largos, va generando una zona de compactación en el fondo del surco de la labor por donde va rodando el implemento de labranza. Al cabo de cierto tiempo se expresa un horizonte completamente compactado que se conoce como **piso de arado** o **pie de arado**.

También, el pastoreo de ganado vacuno en condiciones de humedad inadecuadas o con una intensidad mayor a la aceptable para el suelo puede causar compactación aunque, en este caso, no es común la presencia de capas o de horizontes compactados continuos. Una manifestación muy frecuente de este fenómeno es la microtopografía conocida como **pista de pata de vaca**.

Las capas u horizontes compactados se pueden formar también por procesos naturales como en el caso de la formación de los ‘**claypan**’ que son capas u horizontes subsuperficiales compactados, con alto contenido de arcilla. Estos claypanes se pueden originar como capas sedimentarias, en depósitos aluviales o como horizontes iluviales de arcilla (algunos horizontes **nátricos**, ver Capítulo 20). En todos los casos, el desarrollo estructural es pobre y la mayor parte de la arcilla se encuentra dispersa (Hillel, 1998; Soil Survey Staff, SSS, 1999). El SSS (1999) le da el nombre genérico de **materiales densos** a todos los materiales que se encuentran compactados en el suelo.

3. ENCOSTRAMIENTO SUPERFICIAL

Otra manifestación de alteración importante del medio físico del suelo, que se observa por cambios en la consistencia del mismo, es la formación de costras en su superficie (ver Figura 14.4).

El encostramiento superficial del suelo es un proceso que comprende el desprendimiento, el transporte y la acumulación de partículas finas del suelo por acción del agua que le llega desde cierta altura, como lluvia o como riego por aspersión, formando capas delgadas y superficiales de material. Según Porta et al (1994), las acciones mencionadas llevan el relleno de los poros y el secado del suelo consolida la costra.

Según Montenegro y Malagón (1990), la formación de costras es frecuente en aquellos suelos que tienen bajo grado de estructuración y baja estabilidad estructural. Las costras limitan la emergencia de plántulas, aumentan la escorrentía y reducen el intercambio gaseoso en el suelo.

Para controlar la formación de costras superficiales en el suelo Porta et al (1994) recomiendan tener precauciones especiales con el riego, si hay que hacerlo: se debe evitar la caída de gotas de agua desde alturas considerables (superiores a los 2 m en Andisoles muy deteriorados), se debe evitar la formación de gotas grandes y debe evitarse el secado del suelo. Una alternativa de manejo del riego propuesta por los autores citados es la utilización de riegos de baja intensidad, con alta frecuencia y con tamaño de gota pequeño, para lo que sugieren el uso de nebulizadores como solución ideal. También ayuda el uso del mulch (ver Capítulo 17).

4. CEMENTACIÓN

Aunque muy similar en sus efectos físicos a la compactación, se diferencia de ésta en que la pérdida de espacio poroso en la cementación se debe a la unión de partículas mediante sustancias químicas que se ubican a su alrededor y que llegan a formar una fase casi continua con los sólidos del suelo.

En este caso se genera una consistencia dura en el suelo, a veces quebradiza, cuyas propiedades dependen mucho del tipo de sustancia que actúa como cementante. Según Montenegro y Malagón (1990), en esta situación en particular, la arcilla no se considera como cementante.

Teniendo en cuenta el tipo de cementante que está actuando, el SSS (1999) define los siguientes horizontes diagnósticos para la clasificación taxonómica de los suelos (ver Capítulo 20):

- **Duripán:** Horizonte cementado por sílice, tiene consistencia firme o más fuerte en húmedo y puede llegar a ser friable después de un humedecimiento prolongado.
- **Fragipán:** Similar al anterior pero friable en húmedo, aunque es duro o muy duro en seco.
- **Petrocálcico:** Horizonte cementado por carbonato de calcio y por otros carbonatos.
- **Petrogypsico:** Horizonte cementado por yeso.
- **Plácico:** Horizonte cementado por Fe y/o Mn, con materia orgánica.
- **Orstein:** Horizonte de materiales espódicos cementado con materia orgánica y Al.

5. EXPANSIÓN Y CONTRACCIÓN

Cuando en la fracción de tamaño arcilla del suelo hay una cantidad alta de minerales expansibles, el suelo mismo adquiere esta propiedad y la manifiesta con los cambios de humedad que sufre: a medida que el suelo recibe agua se va expandiendo y, cuando se va secando, se va contrayendo, reduciendo el volumen ocupado por sus sólidos y formando grietas.

Aunque esta característica es un limitante muy fuerte para utilizar el suelo como soporte de obras civiles y sanitarias, en agricultura también tiene sus efectos nocivos:

- El agua disponible para las plantas se presenta a unos niveles de humedad muy altos en el suelo, lo que implica, en zonas con suelos bajo riego, que se deben hacer aportes altos de agua para suplir las necesidades de las plantas con el consiguiente incremento en los costos de producción.
- Los niveles óptimos de laboreo son altos y se requieren equipos con alta potencia para llevarlo a cabo.
- El suelo mojado es muy pegajoso y seco es duro.
- El suelo tiene muy baja permeabilidad: es muy susceptible a encarcamiento y a problemas de mal drenaje y de acumulación de sales y de Na.
- Se presenta una alta incidencia de daño mecánico y muerte en las raíces por efecto de la trituración a que son sometidas cuando el suelo se seca.

Las propiedades mencionadas en el párrafo anterior son típicas de los suelos del orden Vertisol (ver Capítulo 20) pero no exclusivas de ellos; en muchos otros órdenes se encuentran suelos que no cumplen estrictamente con las características de los Vertisoles pero que tienen los minerales expansibles en cantidades suficientes como para expresar expansibilidad: éstos suelos son los intergrados vírticos.

Además, en los Andisoles e intergrados ándicos es frecuente encontrar que se presenta expansibilidad considerable y agrietamiento al secarse, aunque en este caso no es debida a la presencia de minerales silicatados expansivos, sino a cambios irreversibles en la organización de los materiales no cristalinos que componen buena parte de la mineralogía de estos suelos (Nanzyo et al, 1993; Warkentin, 1992 y Maeda y Soma, 1992). Abril y Ortiz (1996) encontraron valores promedios, entre 82 determinaciones, de 34.67% de porcentaje de contracción absoluto (con base en suelo seco al horno) en Andisoles del oriente antioqueño, con rango de variación entre 9.8 y 53.64%. Como se observa en los valores anteriores, estos suelos tienen una gran capacidad de retracción con el secado.

6. EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA DEL SUELO

Según Montenegro y Malagón (1990), evaluar la consistencia de un suelo es establecer su resistencia a la penetración, su resistencia a la ruptura y determinar los contenidos de humedad que lo hacen cambiar de estado. Por lo que se ha discutido en párrafos anteriores, debe adicionarse, además, la evaluación de la expansibilidad que tenga el suelo. Las unidades más adecuadas para definir las resistencias a la penetración y a la ruptura son **bar** o **kPa**, aunque tradicionalmente se usan con frecuencia **kg cm⁻²** y **PSI** (**lb in⁻²**: libras por pulgada cuadrada).

6.1. RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN

Esta propiedad se determina en campo y sobre suelo sin disturbar, con unos implementos llamados **penetrómetros**, los cuales miden la fuerza que se debe hacer sobre el instrumento para introducir su punta en el suelo hasta una determinada profundidad. Hay penetrómetros de bolsillo (ver Figura 10.2) y de mayor tamaño como el penetrómetro de cono, aunque el de bolsillo es más utilizado por la facilidad para transportarlo.



FIGURA 10.2. Penetrómetro de bolsillo.

Esta prueba, hecha en la superficie del suelo, estima la resistencia que éste opone a la emergencia de las plántulas y, midiendo la resistencia a su penetración en forma continua a lo largo del perfil del suelo, se puede detectar la presencia de horizontes compactados o cementados en él.

Obando (2000), haciendo determinaciones de resistencia a la penetración con un penetrómetro electrónico a intervalos de 3.5 cm hasta una profundidad de 52 cm, detectó encostramiento superficial y un piso de arado a 25 cm de profundidad en un Entic Dystropept cultivado con maíz-soya en la llanura aluvial del río Ariari, llanos orientales de Colombia. También, en la misma región y con la misma metodología, detectó pisos de arado a 18 y a 30 cm de profundidad en varios suelos Aquic Dystropepts, con diferencias en textura, pero sometidos a una mecanización intensa para cultivos de maíz o de maíz-arroz, durante más de 20 años.

La determinación de la resistencia a la penetración con el fin de estimar si hay restricción para el crecimiento radicular, debe hacerse, según el Soil Survey Division Staff (SSDS, 1993), en suelo húmedo. Para determinar la resistencia a la penetración con el penetrómetro de bolsillo se procede de la siguiente manera:

- Se selecciona un sitio que sea representativo de las condiciones estructurales del suelo que se evalúa para hacer la determinación.
- Se coloca en cero (0) el anillo de calibración.
- Se coloca la punta de la aguja perpendicular a la superficie sobre la cual se trabaja.
- Se empuja firme y uniformemente el penetrómetro en el suelo hasta que la aguja llegue a la marca indicadora que posee.
- Se lee el valor indicado por el anillo de calibración en la escala de medida; éste es el valor de la resistencia del suelo a la penetración, en kg cm^{-2} .

6.2. RESISTENCIA A LA RUPTURA

Con esta prueba se trata de establecer la resistencia que opone un suelo seco y remoldeado en una figura geométrica definida, a ser partido por la fuerza que se le aplica en una de sus caras. El método para llevar a cabo esta determinación es el del **módulo de ruptura**, diseñado por Richards (1953) para evaluar la resistencia que oponían las costras superficiales a la emergencia de las plántulas.

Tanto los procedimientos como el equipo para llevarlos a cabo fueron diseñados por el autor citado en el párrafo anterior y se encuentran descritos en Laboratorio de Salinidad (1974) y en Motta et al (1990). Esta determinación se hace con un dispositivo especial de 2 cuchillas inferiores, separadas 5 cm, y una tercera cuchilla superior, todas paralelas y alineadas, entre las cuales se coloca la muestra del suelo remoldeando en un molde rectangular montado en una balanza de brazo (ver Figura 10.3).

También puede establecerse el módulo de ruptura con un equipo para medir compresión no confinada del suelo, con ayuda de una prensa o de un gato hidráulico o con un dispositivo como el que se muestra en la Figura 10.4 en el cual el dial de un penetrómetro de cono se ha montado en un soporte especial para presionar el suelo¹. En estas últimas variantes el suelo es remoldeando en un cilindro como los que se utilizan para la determinación de la densidad aparente y, en todos

¹ Adaptación hecha por Zapata, R. (1999). Profesor Universidad Nacional de Colombia. Medellín.

los casos, se trabaja con suelo tamizado a 2 mm, saturado con agua en los moldes y secado en el horno a 50°C hasta peso constante o al aire durante 8 días.

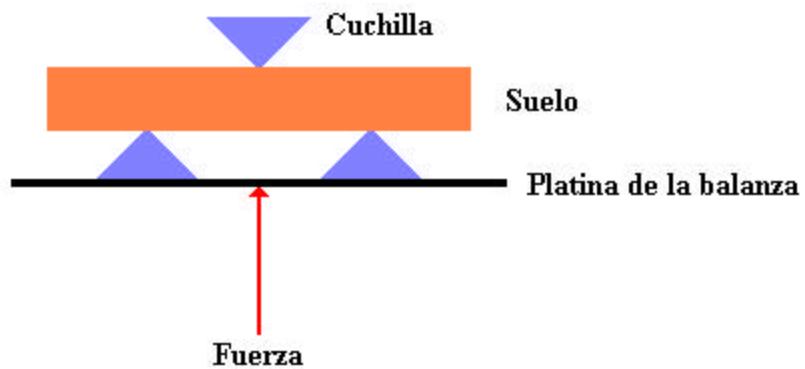


FIGURA 10.3. Representación de la disposición de los materiales utilizados para determinar el módulo de ruptura del suelo por el método de Richards.



FIGURA 10.4. Equipo para determinar módulo de ruptura, adaptado con el dial de un penetrómetro de cono.

Según Porta et al (1994) el módulo de ruptura también es un indicador del grado de estructuración que tiene el suelo, ya que su valor depende de la cantidad de arcilla dispersable y del grado de dispersión que él posea.

Mediante la utilización de una prensa hidráulica, Rivera y Gómez (1991) determinaron la resistencia a la ruptura en algunos suelos de la zona cafetera colombiana, a 10 cm de profundidad, encontrando valores entre 0.06 y 4.15 kg cm⁻² en Andisoles (Dystrandepts) y entre 0.66 y 13.42 kg cm⁻² en Mollisoles (Argiudolls). Jaramillo (1990, sin publicar), con este mismo método encontró una resistencia a la ruptura de 44.19 kg cm⁻² para un Haplustalf del Valle del Cauca.

Rivera y Gómez (1991) encontraron, en los suelos que trabajaron en la zona cafetera colombiana, coeficientes de correlación significativos estadísticamente, al nivel del 99%, entre la resistencia a la ruptura y el contenido de materia orgánica, la densidad aparente, la permeabilidad (conductividad hidráulica saturada), el contenido de arena, el contenido de arcilla, el contenido de arena mas limo y el contenido de limo mas arcilla. El coeficiente de correlación fue positivo con la densidad aparente, con el contenido de arcilla y con el contenido de limo mas arcilla y con las demás variables fue negativo.

Para determinar la resistencia a la ruptura, utilizando una prensa hidráulica para medir el módulo de ruptura, se ha utilizado el siguiente método (González, 1990):

- Se tamiza el suelo a 2 mm y se amasa mojado; se rellena un cilindro metálico, con la pasta formada y se deja secar al aire durante 8 días a la sombra.
- Una vez que el suelo está seco se retira del cilindro y se le determina su diámetro.
- Se coloca el cilindro de suelo sobre la plataforma de la prensa, en forma vertical.
- Se ejerce presión sobre el cilindro de suelo hasta que este se fracture por algún lado y cuando esto pase se registra el valor que marcaba el manómetro de la prensa: éste es el módulo de ruptura del suelo.
- Se calcula la resistencia a la ruptura del suelo con la Fórmula [10.1].

La fórmula a utilizar es:

$$F = \frac{S \times c}{A} \quad [10.1]$$

Donde: F: Resistencia a la ruptura: kg cm⁻².
S: Módulo de ruptura: kg cm⁻².
c: Constante del equipo: cm⁻².
A: Área de la base del cilindro: cm⁻².

6.3. CAMBIOS DE ESTADO

La evaluación de esta característica de la consistencia del suelo puede llevarse a cabo en forma cualitativa, en el campo, o puede ser realizada cuantitativamente estableciendo los **Límites de Atterberg** en el laboratorio

6.3.1. Determinación en el campo

En el campo, la consistencia del suelo se evalúa estableciendo la resistencia que opone éste a ser desmenuzado, tanto en estado seco como en estado húmedo; además, se comprueban su pegajosidad y plasticidad, en mojado.

En **seco**, la consistencia se define en términos relativos de **dureza**, desde blanda hasta extremadamente dura; en **húmedo**, en términos de **friabilidad** y **firmeza** y en **mojado**, en términos de **pegajosidad** (no pegajoso a muy pegajoso) y de **plasticidad** (no plástico a muy plástico), como se muestra en el Tabla 10.1, elaborada con base en recomendaciones del SSDS (1993).

TABLA 10.1. Calificación de la consistencia del suelo en el campo, según SSDS (1993).

CONSISTENCIA DEL SUELO EN ESTADO			
Seco	Húmedo	Mojado	
Suelta	Suelta	Pegajosidad	Plasticidad
Blanda	Muy friable	No pegajoso	No plástico
Ligeramente dura	Friable	Ligeramente pegajoso	Ligeramente plástico
Dura	Muy firme	Moderadamente pegajoso	Moderadamente plástico
Muy dura	Extremadamente firme	Muy pegajoso	Muy plástico
Extremadamente dura			

6.3.2. Determinaciones en el laboratorio

Con los límites de Atterberg se mide el contenido de humedad característico de los límites superior e inferior de plasticidad y del límite de soltura; los métodos estandarizados para llevar a cabo estas determinaciones se describen a continuación, adaptados de Motta et al (1990) los dos primeros y tomado de Jaramillo y Gómez (1986) el del límite de soltura. Los procedimientos son los siguientes:

6.3.2.1. Determinación del Límite Superior de Plasticidad

- Se toma una muestra de suelo de aproximadamente 100 g y se coloca en un recipiente adecuado (beaker grande, por ejemplo).
- Se añade agua hasta llevar la muestra por encima de su límite plástico (que forme una pasta).
- Se toma una porción de la pasta y se coloca en la taza del equipo de Casagrande (Ver Figura 10.5).
- Se enrasa con una espátula la pasta en la taza, de modo que su espesor máximo sea de 1 cm.
- Se hace una zanja en la pasta por el centro, con la espátula especial provista para el efecto.

- Se enciende el motor y se deja golpear la taza hasta que los bordes inferiores de la pasta se unan nuevamente y se cuentan los impactos necesarios para lograrlo. Si el equipo no tiene motor, se le dan vueltas al álabе (manivela), a un ritmo de 2 por segundo, hasta que se una la pasta y se cuentan las vueltas que se necesitaron para lograrlo.
- Cuando se llegue a producir la unión, se determina la humedad de la pasta por el método gravimétrico, según la Fórmula [9.7].
- Se repite el procedimiento, sin adicionar más agua, otras cuatro veces y se grafican los resultados en papel semilogarítmico, colocando en la escala logarítmica, el número de golpes y en la aritmética el % de humedad.
- De la gráfica se determina el % de humedad correspondiente a 25 golpes y éste es el límite superior de plasticidad o límite líquido del suelo analizado.
- Los resultados obtenidos se van registrando en un formulario como el de la Figura 10.6.

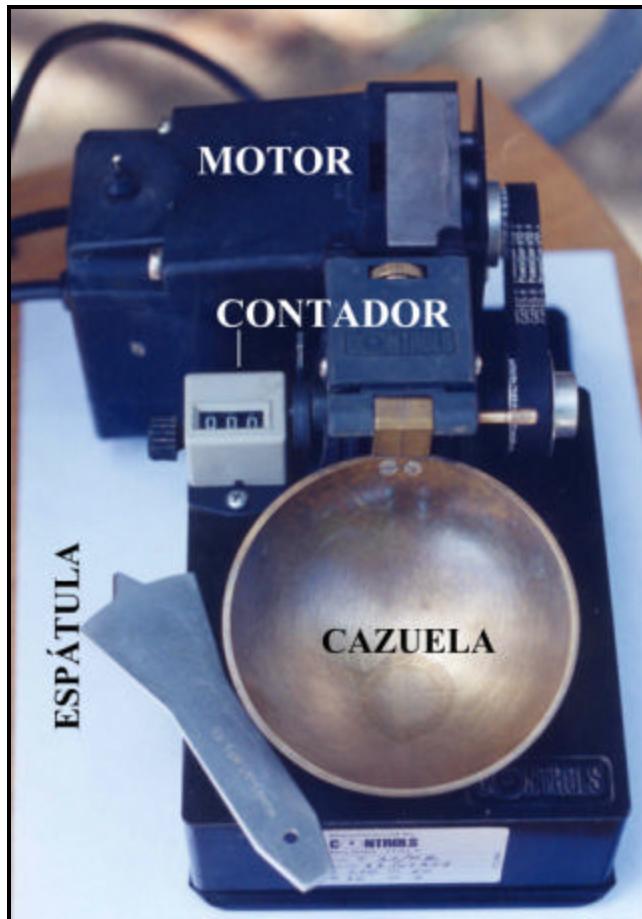


FIGURA 10.5. Cazuela de Casagrande para determinar el Límite Superior de Plasticidad (LSP).

PUNTO NÚMERO	NÚMERO DE GOLPES	Pc (g)	Pesh (g)	Psh (g)	Pess (g)	Pss (g)	W (%)
1							
2							
3							
4							
5							
LSP	25						

FIGURA 10.6. Formulario para el registro de los resultados obtenidos en la determinación del Límite Superior de Plasticidad del suelo.

6.3.2.2. Determinación del Límite Inferior de Plasticidad

- Se toma una muestra de 5 a 10 g de suelo seco al aire y se humedece, sin saturarla.
- Se coloca la muestra sobre una placa de vidrio o de metal y se desliza con la mano, hasta formar un rollo de unos 3 mm de diámetro.
- Cada que se forme el rollo de las dimensiones mencionadas, se unen sus puntas para formar un anillo.
- Si el rollo, al formar el anillo no se rompe se repite el procedimiento desde el principio.
- Cuando el rollo al formar el anillo se rompa, se determina la humedad de la muestra por el método gravimétrico, como se indicó en el numeral anterior. Éste es el límite plástico del suelo analizado.

6.3.2.3. Determinación del Límite de Soltura

- Se toma una muestra de unos 15 g de suelo y se coloca en una caja metálica.
- Se le agrega agua hasta que se vuelva plástica.
- Se empareja la mezcla anterior, se introduce en un extremo una espátula y se desliza a través de la muestra cortándola.
- Se retira la espátula por el otro extremo de la muestra y se observa si sale suelo adherido a ella.
- Si sale suelo adherido, se adiciona un poco más de suelo seco a la mezcla y se repite el procedimiento hasta que la espátula salga limpia.
- Cuando la espátula salga limpia, se determina gravimétricamente el contenido de humedad de la muestra como se ha indicado. Éste será su límite de soltura, o sea, la humedad a la cual debe ser sometido a laboreo el suelo que se analizó.
- En la Figura 10.7 se presenta un formulario en el cual pueden registrarse los resultados obtenidos, tanto para el límite inferior de plasticidad como para el límite de soltura del suelo.

Con base en los límites superior e inferior de plasticidad se genera un índice que es ampliamente utilizado como parámetro de evaluación de suelos para aplicaciones en ingeniería llamado **Índice**

de Plasticidad, el cual establece el rango de humedad en el cual el suelo es plástico y se calcula con la siguiente relación:

$$IP = LSP - LIP \quad [10.2]$$

Donde: IP: Índice de Plasticidad: %.

LSP: Límite Superior de Plasticidad: %.

LIP: Límite Inferior de Plasticidad: %.

FIGURA 10.7. Formulario para registrar los resultados obtenidos en la determinación del Límite Inferior de Plasticidad y del Límite de Soltura del suelo.

6.4. EXPANSIÓN Y CONTRACCIÓN

La capacidad que tiene un suelo de expandirse y de contraerse obedeciendo a cambios de humedad se evalúa determinando el coeficiente de extensibilidad lineal o **COLE** (SSS, 1999). El Soil Survey Laboratory (1996) advierte que el concepto de COLE no se aplica a suelos que presenten contracción irreversible como en algunos Andisoles y suelos orgánicos. El método utilizado en dicho laboratorio, para determinar el COLE en suelos que no tienen fragmentos de roca, consiste en evaluar la densidad aparente del suelo a capacidad de campo y seco al horno y luego calcular el COLE con la siguiente relación:

$$COLE = \left| \frac{Da_{ss}}{Da_{cc}} \right|^{\frac{1}{3}} - 1 \quad [10.3]$$

Donde: Da cc: Densidad aparente del suelo a capacidad de campo: Mg m⁻³.

Da ss: Densidad aparente del suelo seco al horno: $Mg\ m^{-3}$.

El COLE se expresa en **cm cm⁻¹**. El SSS (1999) propone el siguiente método alternativo para estimar el COLE con medidas lineales:

- Se hace una pasta con el suelo a capacidad de campo.
- Se rellena una jeringa plástica, a la cual se le ha cortado la punta donde se coloca la aguja, con el suelo preparado en el punto anterior (Motta et al, 1990).
- Con el émbolo de la jeringa se saca el rollo de suelo formado y se le mide la longitud (L_{cc}).
- Se pone a secar el rollo de suelo al horno, a 105°C, hasta peso constante, se retira del horno y se mide nuevamente su longitud (L_{ss}).
- Se calcula el COLE con la Fórmula [10.4].

$$COLE = \frac{L_{cc} - L_{ss}}{L_{ss}} \quad [10.4]$$

El método lineal subestima bastante el valor del COLE por lo que, siempre que sea posible, debe utilizarse el método que tiene como base las densidades. Con el valor del COLE se han propuesto dos estimaciones:

- El SSS (1999) propone calcular la **extensibilidad lineal (EL)** para predecir el potencial de expansión y de contracción que tiene un horizonte (El_h) o todo el suelo (El_s). Se calcula de la siguiente manera:

$$El_h = COLE \times h \quad [10.5]$$

Donde h es el espesor del horizonte en cm. Sumando los EL de cada uno de los horizontes que componen el suelo (El_{hi}) se obtiene el EL total del mismo (El_s), mediante la siguiente fórmula:

$$El_s = \sum_{i=1}^n El_{hi} \quad [10.6]$$

- González (1990) referencia una propuesta de Franzmeier y Ross (1968) para calcular el **cambio de volumen** del suelo (V_n) con la fórmula:

$$V_n = [(1 + COLE)^3 - 1] \times 100 \quad [10.7]$$

7. INTERPRETACIÓN

Desde el punto de vista agrícola, el índice más importante es el **límite de soltura**, ya que es el que define el estado óptimo de humedad del suelo para que sea sometido a laboreo, con el menor perjuicio de su estructura y con la mayor eficiencia de la labor. Aunque no hay un valor crítico específico para el este límite, dicho valor será menor en la medida en que el suelo presente una textura más gruesa y/o un menor contenido de materia orgánica.

Según Forsythe (1975), lo ideal es que el suelo presente una capacidad de campo menor que el límite de soltura, pero, en caso de que sea mayor, la diferencia entre estas dos humedades debe ser mínima, ya que ésto implica un secamiento más rápido del suelo hasta el límite de soltura, después de un aguacero o de un riego.

Con respecto a la interpretación de los valores obtenidos para la resistencia a la ruptura se han propuesto las clases de módulo de ruptura que se presentan en la Tabla 10.2.

TABLA 10.2. Interpretación de los valores del módulo de ruptura del suelo (Tomados de Montenegro y Malagón, 1990).

MÓDULO DE RUPTURA	FUERZA (mbar)
Bajo	< 0.05
Moderadamente bajo	0.05 – 0.1
Medio	0.1 – 0.15
Moderadamente alto	0.15 – 0.2
Alto	> 0.2

Porta et al (1994) dicen que, en términos generales, cuando se tiene un módulo de ruptura superficial en el suelo, **< 10 kPa**, no hay problemas para la emergencia de las plántulas en él. Además, González (1990) puntualiza que en la literatura se establece frecuentemente el valor de **270 PSI**, leído con el penetrómetro, como límite crítico para la penetración de raíces en el suelo.

El SSDS (1993) propone interpretar la resistencia a la penetración del suelo mediante los niveles que se presentan en la Tabla 10.3. García y Durán (1998) reportan que un valor de resistencia a la penetración mayor a **35.5 kg cm⁻²**, es limitante para el desarrollo radicular de la mayoría de los cultivos.

TABLA 10.3. Interpretación de la resistencia a la penetración del suelo (Tomada de SSDS, 1993).

CLASE DE RESISTENCIA	RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN (MPa)
Baja	< 0.1
Media	0.1 – 2
Alta	2 – 8
Muy alta	> 8

La capacidad expansiva del suelo puede evaluarse de acuerdo con los valores propuestos en la Tabla 10.4.

TABLA 10.4. Interpretación de la capacidad de expansión del suelo según McCormick y Wilding (1975) citados por González (1990).

EXPANSIBILIDAD	COLE (cm cm ⁻¹)	CAMBIO DE VOLUMEN (%)
Baja	< 0.03	< 10
Media	0.03 – 0.06	10 – 20
Alta	0.06 – 0.09	20 – 30
Muy alta	> 0.09	> 30

El sistema taxonómico norteamericano (SSS, 1999) ha establecido que suelos que presenten en sus primeros 100 cm de espesor una extensibilidad lineal (Els) de 6 cm o más, se consideran

intergrados Vertic (ver Capítulo 20), es decir, son suelos que presentan propiedades vérticas: alto potencial de expansión y contracción.

En relación con los límites de Atterberg, Márquez (1985), reporta como valores frecuentes de ellos los siguientes:

- Límite Superior de Plasticidad:
 - 40 - 60% para arcillas
 - 25 - 50% para limos
- Límite Inferior de Plasticidad:
 - 5 - 30% para arcilla y limo
- Índice de Plasticidad:
 - 20 - 40% para arcillas en general
 - 70 - 80% para las arcillas más plásticas
 - 10 - 20% para limos.

Como valores críticos para el índice de plasticidad Márquez (1985) cita los valores recomendados por Burnmister y presentados en la Tabla 10.5.

TABLA 10.5. Calificación del grado de plasticidad del suelo, según Burnmister (Tomado de Márquez, 1985).

IP (%)	GRADO DE PLASTICIDAD
0	No presenta
1 – 5	Ligera
5 – 10	Baja
10 - 20	Media
20 - 40	Alta
>40	Muy alta

RECORDAR

- La consistencia del suelo estudia la resistencia de éste a ser deformado y depende de los coloides y de la humedad.
- De los estados de consistencia del suelo, el más importante, desde el punto de vista agrícola, es el estado de friabilidad.
- La consistencia se relaciona ampliamente con el laboreo del suelo.
- El contenido de humedad óptimo para mecanizar un suelo es el que tiene en el límite de soltura.
- Otras propiedades que estudia la consistencia son la compactación, la cementación y la expansibilidad del suelo.

BIBLIOGRAFÍA

ABRIL, M. y B. ORTIZ. 1996. Variabilidad espacial de algunas propiedades físico-químicas del horizonte A de Andisoles hidrofóbicos, bajo plantaciones de *Pinus patula*. Tesis (Ingeniero Agrónomo). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Medellín. 75 p.

- BAVER, L. D.; W. H. GARDNER y W. R. GARDNER. 1973. Física de suelos. 1^a Ed. en español. U.T.E.H.A. México. 529 p.
- FORSYTHE, W. 1975. Manual de laboratorio de Física de Suelos. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Costa Rica. 212 p.
- GARCÍA, J. y R. DURÁN. 1998. Evaluación de varios sistemas de labranza en un suelo algodonero del Valle del Cesar. En: Memorias Encuentro Nacional de Labranza de Conservación. Romero G. et al editores. Villavicencio. pp: 241 – 257.
- GONZÁLEZ, A. 1990. Guías de prácticas de la Maestría en Suelos y Aguas. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. Inédito.
- HILLEL, D. 1998. Environmental soil physics. Academic Press. San Diego. 771 p.
- JARAMILLO, D. F. y E. GÓMEZ. 1986. Manual de prácticas de Suelos I (versión preliminar). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín. s.p.
- LABORATORIO DE SALINIDAD. 1974. Suelos salinos y sódicos. Diagnóstico y rehabilitación. United States Department of Agriculture (USDA). Ed. Limusa. México. 172 p.
- MAEDA, T. and K. SOMA. 1992. Physical properties of Andisols. Suelos Ecuatoriales 22 (1): 16-24.
- MÁRQUEZ, C. G. 1985. Propiedades ingenieriles de los suelos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Medellín. 243 p.
- MEJÍA, L. 1980. Conceptos básicos comunes a la pedología y geomorfología. Centro Interamericano de Fotointerpretación (CIAF). Bogotá. 278 p.
- MONTENEGRO, H. y D. MALAGÓN. 1990. Propiedades físicas de los suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá. 813 p.
- MOTTA, B. et al. 1990. Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos. 5^a. Ed. IGAC. Bogotá. 502 p.
- NANZYO, M.; S. SHOJI and R. DAHLGREN 1993. Physical characteristics of volcanic ash soils. In: Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization. Developments in Soil Science 21. Elsevier. Amsterdam. pp: 189-207.
- OBANDO, F. 2000. Indicadores de degradación estructural en suelos de agricultura intensiva del piedemonte llanero. Suelos Ecuatoriales 30 (2): 167-178.
- PORTE, J.; M. LÓPEZ – ACEVEDO y C. ROQUERO. 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi Prensa. Madrid. 807 p.
- RICHARDS, L. A. 1953. Modulus of rupture as an index of crusting of soil. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 17: 321-323.
- RIVERA, H. y A. GÓMEZ. 1991. Erodabilidad de los suelos de la zona cafetera central colombiana (Caldas, Quindío y Risaralda). Cenicafé 42(3): 67-88.
- SOIL SURVEY DIVISION STAFF (SSDS). 1993. Soil survey manual. Handbook N° 18. USDA. Washington D. C. 437 p.
- SOIL SURVEY LABORATORY (SSL). 1996. Methods manual. Soil Survey Investigations Report N° 42. Version 3.0. USDA. USA. 693 p.

SOIL SURVEY STAFF. (SSS) 1999. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2^a. Ed. Agriculture Handbook Nº 436. USDA. Washington D. C. 869 p.

WARKENTIN, B. P. 1992. Management of Andisols related to their structure. Suelos Ecuatoriales 22(1): 9-15.

AUTOEVALUACIÓN

1. Diga 4 formas en que puede manifestarse la deformación de un suelo.
2. ¿Cuáles fuerzas controlan la consistencia del suelo?. ¿Cómo se definen?. ¿Cuál es el agente que las controla a ellas?.
3. Definir los 4 estados de consistencia que se pueden presentar en el suelo y decir bajo qué condiciones de humedad se presenta cada uno.
4. ¿Qué condiciones favorecen la compactación del suelo?. ¿Sólo se produce compactación por laboreo o puede haber otro agente que la haga?.
5. ¿Cuáles condiciones favorecen la formación de costras superficiales en el suelo?.
6. ¿Cómo se define la cementación del suelo y cómo se diferencia de la compactación?.
7. Diga 4 efectos nocivos de la expansión y contracción del suelo.
8. ¿Qué es un penetrómetro?. ¿En qué condiciones de suelo se utiliza?.
9. Definir módulo de ruptura.
10. ¿En qué se diferencia el límite inferior de plasticidad del límite superior de plasticidad?.
11. ¿Por qué es importante conocer el límite de soltura del suelo?.
12. ¿Qué le sucede al suelo si es sometido a laboreo en estado seco?. Y en estado casi saturado?.
13. ¿Qué es el COLE?.
14. ¿Cómo afecta el contenido de materia orgánica la consistencia del suelo?.

EVALUACIÓN

1. ¿En cuál suelo será más fácil el laboreo: en uno de textura gruesa o en uno de textura fina?. ¿Por qué?.
2. ¿A cuántos kPa equivalen 270 PSI?. (R: 1861.65 kPa).
3. Se debe arar un lote de 4 ha hasta 20 cm de profundidad. El límite de soltura de este suelo es equivalente al 75 % de su límite inferior de plasticidad que es de 25 %; sabiendo que el suelo es un Andisol ($Da = 0.8 \text{ Mg m}^{-3}$) y que el peso del agua que tiene es de 3 832 t, se podrá arar el lote en la condición de humedad en que se encuentra sin deteriorarlo?. Sustente su respuesta con los cálculos correspondientes. (R: No; límite de soltura = 1200 t de agua, contenido actual de agua = 3832 t).
4. Con el fin de determinar si un suelo era un intergrado Vertic se muestreó su perfil cuando el suelo estaba a capacidad de campo, con cilindro; hechos los análisis, se obtuvieron los siguientes resultados:

Horizonte	Espesor del horizonte (cm)	Altura del cilindro metálico (cm)	Diámetro del cilindro metálico (cm)	Peso del cilindro metálico (g)	Peso del cilindro metálico mas el suelo húmedo (g)	Peso del cilindro metálico mas el suelo seco al horno (g)	Altura del cilindro de suelo seco al horno (cm)	Diámetro del cilindro de suelo seco al horno (cm)
Ap	25	6	5.33	162.85	354.56	305.70	5.91	5.13
Bw1	42	6	5.39	158.79	293.32	241.81	5.83	5.17
Bw2	43	6	5.39	145.99	314.29	261.18	5.94	5.12

- a. ¿Corresponde el suelo estudiado a un intergrado Vertic?. (R: No es Vertic, $Els = 3.6391 \text{ cm}$).
- b. ¿Cuánto es el cambio de volumen que presenta cada horizonte, según fórmula y según una relación aritmética simple?. Discutir los valores obtenidos. (R: Vn : Ap = 9.59%, Bw1 = 11.87%, Bw2 = 11.94%; **Relación aritmética**: Ap = 8.747%, Bw1 = 10.606%, Bw2 = 10.671%).

MANEJO DEL MEDIO FÍSICO DEL SUELO

CAPÍTULO 11

CONTENIDO

- ❖ Degradación física del suelo
 - El laboreo del suelo
 - Objetivos
 - Principales operaciones de labranza del suelo
 - Tipos de labranza
 - Problemas ocasionados por la mala labranza
 - El pastoreo
 - Sistemas de pastoreo
 - Efectos del pastoreo sobre el medio físico edáfico
 - El riego
 - Sistemas de riego
 - Efectos nocivos del riego en el suelo
 - El drenaje
 - Efectos del mal drenaje
 - Beneficios del drenaje
 - El uso de la tierra
- ❖ Recuperación del medio físico edáfico
 - Rotación de cultivos
 - Uso de acondicionadores físicos
 - Acondicionadores físicos naturales
 - Acondicionadores físicos sintéticos

OBJETIVOS

- ❖ Conocer las prácticas de manejo de suelos que más afectan el medio físico de éste
- ❖ Conocer los efectos nocivos que con mayor frecuencia se presentan en el suelo, como consecuencia de las malas prácticas de manejo que se realizan en él
- ❖ Conocer algunas prácticas orientadas a mantener y/o a recuperar el medio físico edáfico

E

n este capítulo se quiere ilustrar el efecto general que tienen algunas prácticas de manejo sobre las propiedades físicas del suelo, en una forma integral.

1. DEGRADACIÓN FÍSICA DEL SUELO

Según el concepto de Pla, citado por Alfaro et al (1995), la **degradación del suelo** comprende aquellos procesos que lo conducen a una **reducción** gradual o acelerada, temporal o permanente, de su **capacidad productiva** y/o al **incremento de los costos de producción**.

Aunque hay situaciones naturales que no permiten el desarrollo de un buen espacio físico en el suelo como las condiciones de drenaje impedido o de sequía por largos períodos de tiempo, en este capítulo se hará énfasis en el deterioro edáfico provocado por el uso inadecuado de este recurso.

Castro (1995) identifica como las principales causas del deterioro físico del suelo las siguientes:

- Exceso de mecanización.
- Monocultivo.
- Pérdida de la materia orgánica.
- Problemas de mal drenaje.

Amézquita (1998) considera que los principales problemas físicos del suelo que restringen la producción vegetal y que se relacionan con el laboreo del mismo son:

- Impedancia mecánica.
- Estrés de agua (déficit).
- Estrés de aireación (exceso de agua).
- Escorrentía y erosión.

A los anteriores problemas se les podría agregar el uso del suelo en explotaciones que no están de acuerdo con su aptitud, así como alteraciones graves producidas por el mal manejo del riego. A continuación se hará una discusión corta de los aspectos más relevantes de las causas de la degradación física del suelo.

1.1. EL LABOREO DEL SUELO

Se entiende por **laboreo**, **labranza** o **mecanización** del suelo todas aquellas prácticas de manejo del suelo o del cultivo o explotación que tenga aquél, que se llevan a cabo con máquinas que se desplazan sobre él; cabe aclarar en este punto que en los siguientes apartes se hará referencia únicamente a aquellas labores que se hacen bajo condiciones de uso intensivo del suelo, excluyendo las áreas de ladera.

1.1.1. Objetivos del laboreo del suelo

La labranza del suelo tiene como objetivos fundamentales mejorar el espacio físico del suelo en el cual van a estar las raíces de las plantas y combatir algunas malezas, plagas y enfermedades que puedan atacar al próximo cultivo.

Montenegro y Malagón (1990) establecen como objetivos específicos del laboreo del suelo los siguientes:

- Facilitar la germinación de las semillas.
- Facilitar el crecimiento de las raíces de las plantas.
- Incorporar materia orgánica.
- Favorecer la entrada y acumulación de agua para las plantas.
- Mejorar las condiciones de aireación.

Siempre que se haga un correcto uso de la maquinaria, es posible alcanzar los objetivos propuestos, conservando la productividad y sostenibilidad del suelo laborado.

1.1.2. Principales operaciones de labranza del suelo

Las labores básicas de preparación del suelo para su explotación agropecuaria pueden resumirse en:

1.1.2.1. Arada

Es la labor más pesada que se hace en el suelo y consiste en romper la porción superficial del mismo, a veces con inversión de ella, incorporando, de paso, la materia orgánica de la vegetación que está sobre él o de lo que queda de ella; generalmente es una labor que se lleva a cabo hasta una profundidad no mayor de 15 a 20 cm.

1.1.2.2. Rastrillada

Consta de una serie de pasadas que se hacen sobre el suelo arado con implementos de discos o de cinceles, cuyo objetivo principal es desmenuzar los terrones que han quedado de la arada. Algunas veces, también, hace una nivelación del terreno listo para la siembra así como un control de malezas; generalmente es una labor más superficial que la arada. Tanto esta labor como la arada pueden llevarse a cabo con un rotavator o arado rotatorio, haciendo los ajustes pertinentes al implemento, según la labor deseada.

1.1.2.3. Subsolada

También llamada arada profunda. Consiste en roturar al suelo en profundidad (35 a 40 cm, generalmente) con subsolador o con arados de cinceles. Es una labor especial para romper capas compactadas que se encuentran a profundidades donde no llega la arada común. En suelos pesados esta labor puede mejorar el drenaje de los mismos.

1.1.2.4. Cultivada

Esta labor se realiza para controlar malezas y aflojar un poco el suelo cuando ya el cultivo está establecido; puede llevarse a cabo con cinceles o con escarificadores diseñados especialmente para trabajar en los primeros centímetros del suelo sin afectar el cultivo; puede mejorar, de paso, la infiltración de agua en el suelo.

1.1.2.5. Otras labores mecanizadas

Aparte de las descritas anteriormente, sobre el suelo se llevan a cabo otras actividades mecanizadas que pueden o no realizarse directamente con él, pero que de todas formas lo afectan en alguna medida.

Es frecuente que en zonas que requieren riego, los suelos que van a ser explotados agropecuariamente requieran una nivelación del terreno que garantice unas condiciones mínimas para que aquella práctica sea eficiente; dicha nivelación implica el movimiento de grandes volúmenes de suelo y el tráfico de gran cantidad de máquinas sobre él, lo que puede afectar enormemente sus condiciones físicas.

La nivelación generalmente se realiza en el subsuelo, sobre todo en aquellos casos en los cuales el horizonte A tiene poco espesor, lo que implica remover y recoger completamente el material de este horizonte en algún sitio mientras se efectúa dicha operación, para luego volverlo a distribuir sobre la superficie nivelada. Tanta manipulación tiene que afectar el medio físico edáfico; sin embargo, hay que tener en cuenta que ésta es una labor que se realiza sólo una vez, en muchos años, en el suelo y por lo tanto, éste recupera un estado físicamente adecuado.

Labores como la aplicación de enmiendas, fertilizantes y agroquímicos, en general, así como la renovación de pastizales y la siembra de cultivos, suelen hacerse mecanizadamente en suelos sometidos a explotación intensiva, lo que puede generar áreas con problemas de compactación superficial en las zonas de tráfico.

La cosecha es también una labor bastante mecanizada, sobre todo en cultivos de cereales, aunque por llevarse a cabo en condiciones de suelo con poca humedad, su efecto nocivo sobre las propiedades físicas de éste no es tan dramático como las demás.

1.1.3. Tipos de labranza

Los tipos de labranza que se hacen en el suelo se pueden agrupar desde diferentes puntos de vista; Montenegro y Malagón (1990), Castro (1996) y Amézquita (1998), entre otros, definen los tipos de labranza que se presentan a continuación.

1.1.3.1. Según el objetivo principal de la labranza

1.1.3.1.1. Labranza primaria

Es la labranza que se hace para roturar el suelo y/o para descompactar capas endurecidas o densas (adensadas), así como para incorporar materia orgánica en el suelo. Se hace con implementos pesados como arados de discos, de vertedera o de cinceles, subsoladores y rastras pesadas. Es la labranza más agresiva, puede afectar hasta 35 cm de profundidad y produce alta rugosidad superficial en el suelo. En la Figura 11.1 se presentan algunos de los implementos utilizados en las labores de mecanización del trabajo en los suelos.



a. Arado de discos.



b. Arado de vertedera.



c. Arado de cinceles rígidos.



d. Arado de cinceles vibratorio.



e. Rotavator o arado rotatorio.



f. Subsolador.

FIGURA 11.1. Algunos implementos utilizados para el laboreo del suelo.

1.1.3.1.2. Labranza secundaria

El principal objetivo de esta labor es remover el suelo superficialmente para producir un mayor fraccionamiento de los terrones que deja la labranza primaria, así como para nivelar algo el terreno. Se hace con rastra de discos y afecta, generalmente, los primeros 15 cm del suelo.

1.1.3.2. *Según la intensidad o cantidad de labores que se hacen*

1.1.3.2.1. Labranza convencional

Es la de mayor intensidad. En Colombia este sistema se caracteriza por la realización de uno o dos pases de arado pesado, seguidos de dos, tres o cuatro pases de rastrillo, más un pase de pulidor, hasta dejar el suelo completamente pulverizado.

Los implementos que más se han utilizado en este sistema son los arados y rastrillos de discos. Con este tipo de preparación se causa el mayor grado de deterioro al suelo, por el tipo de implementos utilizados, porque se voltea el horizonte superficial del suelo y se pulveriza el mismo y por el exceso de labor que generalmente se hace, según observa Fenalce (1987).

1.1.3.2.2. Labranza reducida

Labranza en la cual se minimiza el número de operaciones de la labranza secundaria, bien porque se han hecho modificaciones a la labranza primaria o bien porque se usan sistemas especiales de siembra.

1.1.3.2.3. Labranza mínima

Este sistema consiste en realizar el menor número de labores posible en el suelo, de modo que se garantice, de una parte, la consecución de un área adecuada para la germinación y el establecimiento de la planta, y de otra, favorecer la entrada de agua al suelo y su aireación. El suelo debe ser **friable** y estar en una condición **óptima de humedad** para que la labor tenga la máxima eficiencia.

En este sistema las labores de arada se hacen, generalmente, con arado de vertedera; el área donde irán las semillas se pulveriza un poco mediante herramientas livianas, para dejar la zona entre hileras de cultivo tal como queda después de la arada.

1.1.3.2.4. Labranza cero

Con este sistema de trabajo, sólo se prepara el sitio donde va a colocarse la semilla o la plántula a trasplantar, dejando el resto del suelo sin manipular. Para que este sistema funcione adecuadamente, se requiere que el suelo tenga unas **excelentes condiciones físicas** y que se haga un estricto control de malezas que generalmente se lleva a cabo con **herbicidas**.

Según Fenalce (1987), el sistema de labranza cero requiere unas condiciones excelentes de drenaje y no es recomendable para suelos arcillosos; además, es un sistema adecuado para zonas de ladera.

En el sistema descrito puede producirse una alta acumulación de materia orgánica en la superficie del suelo por la falta de manipulación de dicho material que favorezca su oxidación; ésta condición puede causar hidrofobicidad en el suelo, como lo confirmó Chan (1992), cuya manifestación depende, obviamente, del tipo de material que se esté acumulando.

1.1.3.3. Según el volumen de suelo afectado con la labor

1.1.3.3.1. Labranza vertical

Este sistema se aplica a suelos con limitaciones físicas internas, principalmente presencia de capas endurecidas o compactadas. El suelo se rotura a profundidades entre 30 y 40 cm, generalmente con subsolador o con arado de cinceles, siguiendo una línea en el terreno, por lo cual se afecta un volumen de suelo adyacente a la línea por donde corre el implemento.

Con este tipo de labranza se aumenta la infiltración del suelo, se aumenta la capacidad de almacenamiento de agua en el mismo, se favorece el crecimiento radicular y se incorpora materia orgánica en profundidad al suelo. Algunos autores llaman a este tipo de laboreo **labranza profunda**.

1.1.3.3.2. Labranza horizontal

Es la que se hace con implementos que poseen discos o vertederas. En ella se afecta todo el volumen del suelo, hasta la profundidad de trabajo.

En cualesquiera de los sistemas mencionados anteriormente hay que tener algunas precauciones para evitar los daños que pueda producir su uso indebido; la profundidad a la cual se hagan las labores está controlada por aquellos factores que limiten el desarrollo de la raíz y por el mismo volumen de ella; Castro (1996) establece los criterios edafológicos a tener en cuenta para seleccionar algunos de los tipos de labranza mencionados, los cuales se presentan en la Tabla 11.1.

Jen y Quintero (1987) concluyeron de sus trabajos en suelos arcillosos del Valle del Cauca, que sólo en aquellos suelos que presentaban capas compactadas, dentro del perfil, que restringían el desarrollo de la raíz, se obtenían beneficios con el subsolado en la producción de caña de azúcar; así mismo, no encontraron ningún mejoramiento de la producción cuando subsolaron suelos arcillosos bien estructurados.

Castro (1996) también recomienda que antes de utilizar labranza se deben conocer muy bien propiedades del suelo como espesor total y de enraizamiento, contenido de materia orgánica, textura, estructura, densidad aparente, condición de drenaje, nivel freático, consistencia y limitantes químicos.

Castro y Amézquita (1991) no recomiendan que cada semestre se lleven a cabo prácticas de labranza en el suelo con cincel; antes deben hacerse evaluaciones físicas, siquiera anualmente para decidir cuándo se justifica su utilización, sobre todo desde el punto de vista de la infiltración del agua en el suelo.

TABLA 11.1. Algunos criterios para seleccionar sistemas de labranza apropiados, desde el punto de vista de la conservación del medio físico edáfico. (Según Castro, 1996).

CARACTERÍSTICA DEL SUELO	CONDICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS SEGÚN SISTEMA DE LABRANZA		
	CERO	CONVENCIONAL	PROFUNDA
Profundidad efectiva	> 60 cm	> 60 cm	Limitante (compactación)
Cambio textural abrupto (en 60 cm)	No hay	Leve a moderado	Abrupto
Grado de estructura	Fuerte	Moderado a fuerte	Débil
Consistencia en húmedo	Friable	Friable a firme	Muy firme
Porosidad total (%)	50 a 60	40 a 50	< 35
Drenaje interno	Moderado a rápido	Moderado a rápido	Lento a moderado
Densidad aparente (Mg m ⁻³)	< 1.2	< 1.5	> 1.5
Macroporos (%)	10 a 12	10 a 12	< 10
Materia orgánica (%)	Alta	Media a alta	Baja
Presencia de raíces (en 60 cm)	Abundantes	Regulares	Pocas

Amézquita (1998) recomienda que antes de decidir el sistema de laboreo que se vaya a utilizar en un determinado suelo, se haga un diagnóstico de la condición física de él y evaluar sus posibilidades de soportar el desarrollo de las plantas que se piensan tener; en minicalicatas de 40 o más centímetros de profundidad, según el tipo de suelos, cuyo número depende de la variabilidad de los suelos presentes, se debe estudiar:

- Espesor del horizonte superficial
- Distribución y tipo de horizontes
- Textura y estructura
- Presencia de capas u horizontes endurecidos y su espesor
- Continuidad del espacio poroso
- Distribución del sistema radicular de la vegetación existente y profundidad en la cual es mayor su volumen
- Cambios en el contenido de humedad

1.1.4. Problemas ocasionados por la mala labranza

Cuando se está sometiendo un suelo a laboreo, si no se tienen las precauciones debidas como el contenido de humedad del suelo, el tipo e intensidad de la labranza y todas las propiedades físicas del suelo, incluyendo su espesor, se generan problemas como:

- Pérdida de estructura
- Compactación
- Encostramiento y sellamiento superficiales
- Pérdida en la porosidad de aireación
- Pérdida de materia orgánica
- Bajo almacenamiento de agua en el subsuelo
- Incremento en la escorrentía y en la pérdida de suelo por erosión
- Poco desarrollo radicular y baja producción en la explotación que se tenga

En los apartes siguientes se presentarán algunos resultados que ilustran los efectos de la labranza sobre algunas propiedades del suelo.

Una de las propiedades del suelo que más se afectan con el laboreo es la estructura, cuyo cambio conlleva alteraciones en la porosidad del mismo, tanto en su contenido total como en la proporción en que se encuentran sus diferentes tamaños; estos cambios afectan, por ende, la densidad aparente del suelo.

En las Figuras 11.2 y 11.3 pueden observarse los efectos que tienen diferentes sistemas de laboreo sobre la densidad aparente, la porosidad total y la macroporosidad de los horizontes A y Bt de un suelo Arenic Haplustalf del valle del Magdalena, en el Tolima; se aprecia como el laboreo con cincel (labranza profunda) mejora las condiciones físicas del suelo, con respecto a la labranza convencional.

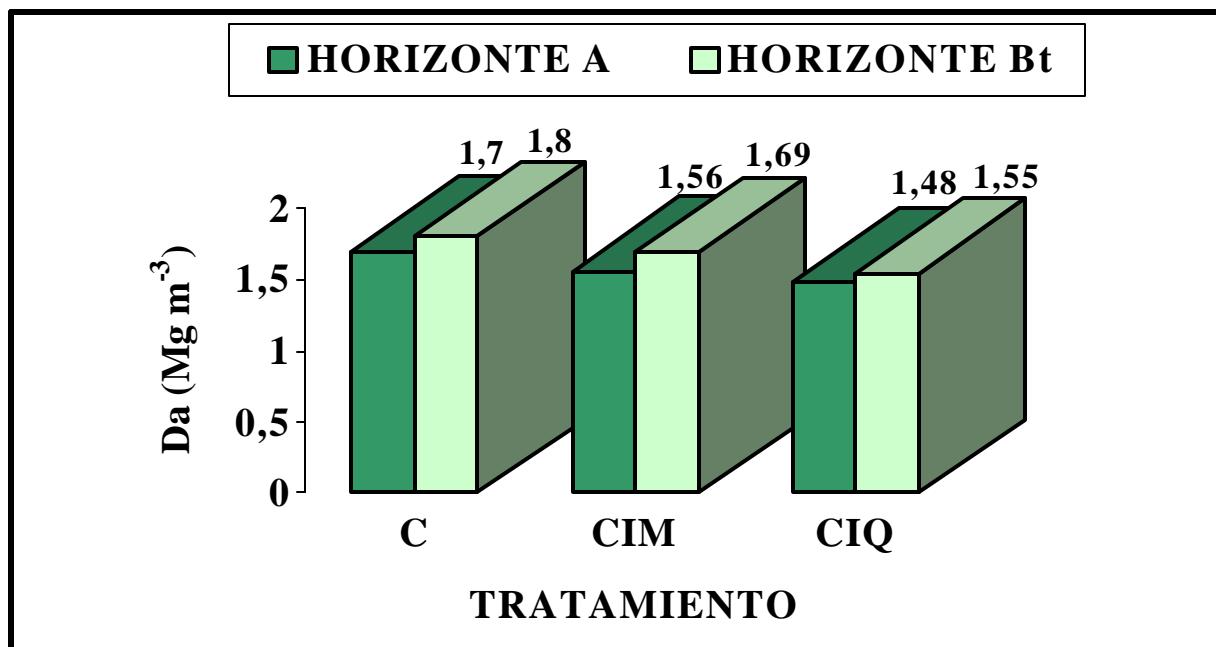


FIGURA 11.2. Efecto de diferentes métodos de labranza sobre la densidad aparente de los horizontes A (0-18 cm) y Bt (18-40 cm) de un Arenic Haplustalf de El Espinal (Tolima). C: Labranza convencional; CIM: Labranza profunda con cincel, incorporando cascarilla de arroz; CIQ: Labranza reducida profunda con cincel y control de malezas con herbicida. (Con base en resultados de Castro y Amézquita, 1991).

En la Figura 11.4 puede verse el efecto que tiene sobre la producción de los cultivos de algodón y sorgo el mejoramiento de las condiciones físicas del Alfisol del Tolima, mencionado anteriormente. En los dos cultivos se presentaron diferencias significativas en producción entre el sistema convencional y los otros dos sistemas, pero no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos que incluían laboreo con cincel (Castro y Amézquita, 1991).

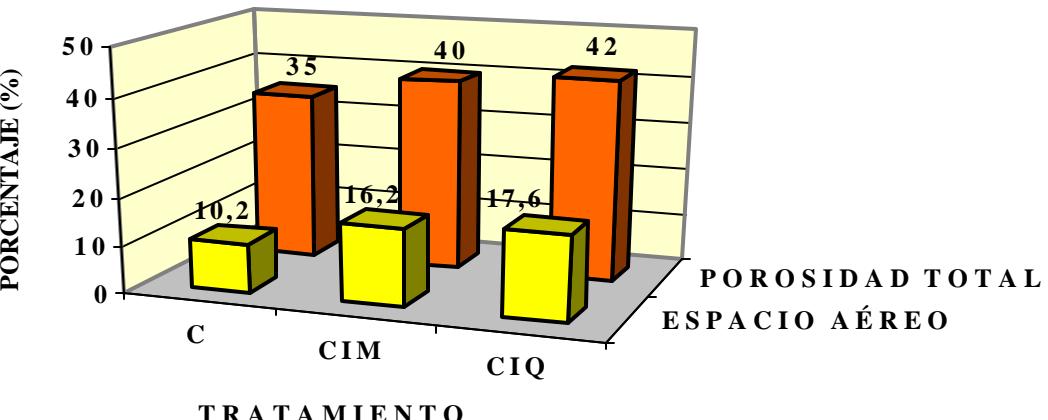


FIGURA 11.3. Efecto de diferentes tipos de labranza sobre la porosidad total y de aireación del horizonte A (18 cm) de un Arenic Haplustalfs de El Espinal (Tolima). Para significado de los tratamientos, ver Figura 11.2. (Con base en resultados de Castro y Amézquita, 1991).

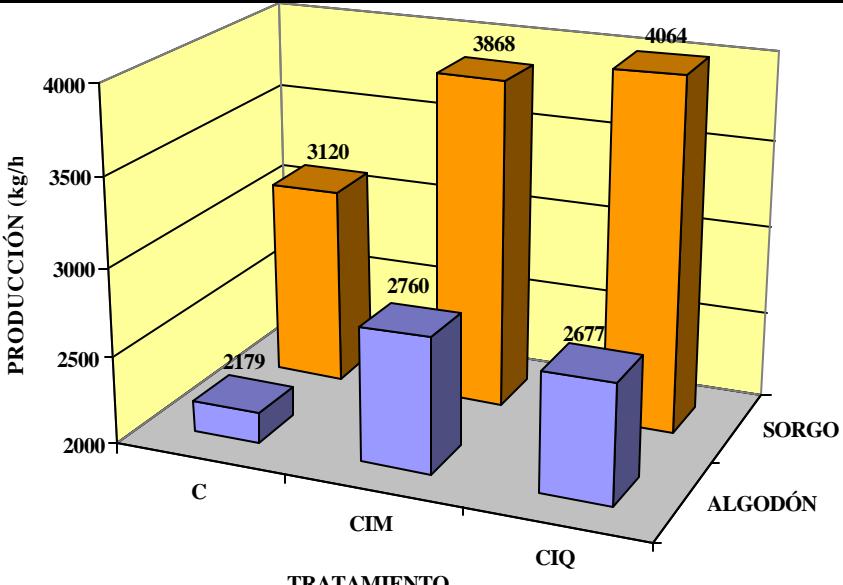


FIGURA 11.4. Efecto de diferentes sistemas de labranza de un Arenic Haplustalfs de EL Espinal (Tolima), sobre la producción promedio de dos semestres de algodón y sorgo sembrados en él. Para significado de los tratamientos, ver Figura 11.2. (Con base en resultados de Castro y Amézquita, 1991).

La Figura 11.5 muestra el efecto que tuvieron los sistemas de labranza sobre la infiltración básica del Alfisol del Tolima, cuando se le hizo un seguimiento a esta propiedad durante tres semestres consecutivos de cultivo.

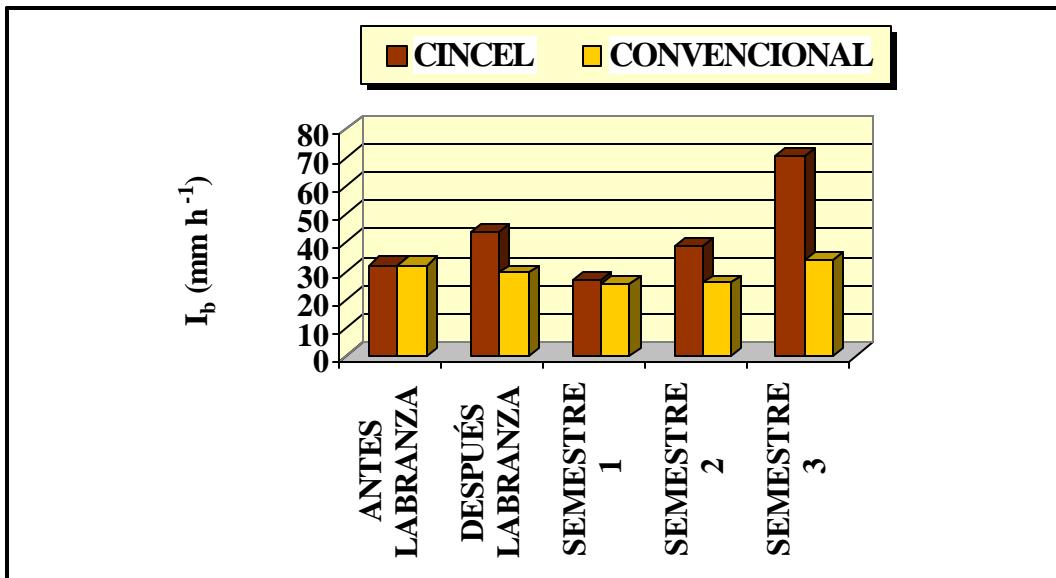


FIGURA 11.5. Efecto de diferentes sistemas de labranza, en el tiempo, sobre la infiltración básica de un suelo arenoso franco compactado de El Espinal (Tolima). (Con base en resultados de Castro y Amézquita, 1991).

Se puede notar en la Figura 11.5 que el laboreo permanente y frecuente con cincel puede llevar al suelo a adquirir unas características indeseables de excesiva infiltración, las cuales pueden producir demandas exageradas de agua para mantener un adecuado suministro de humedad para las plantas, como lo apuntan Castro y Amézquita (1991). Se observa, además, que el laboreo convencional deteriora la capacidad de infiltración del suelo hasta el segundo semestre pero en el tercero el suelo vuelve a recuperar esta propiedad, incluso a un nivel superior al inicial.

A parte de los efectos sobre la demanda de agua, puede producirse un lavado intenso de bases por percolación profunda y/o un ascenso peligroso del nivel freático, con todos los posibles problemas de manejo de la fertilidad y de sales que ellos conllevan.

García y Durán (1998) evaluaron el efecto de 6 sistemas de laboreo utilizados durante 3 años, sobre algunas propiedades físicas de un suelo del valle del Cesar, con una rotación sorgo – algodón y encontraron, entre otros, los resultados que se presentan en la Tabla 11.2. Los sistemas evaluados fueron:

- Labranza tradicional (LT): 1 pase de arado de disco + 1 pase de rastrillo + 2 pases cruzados de pulidor
- Labranza convencional (LC): 2 pases de rastra pesada de discos + 2 pases de pulidor
- Labranza profunda (LP): 2 pases cruzados de cincel rígido
- Labranza combinada (LB): Cincel + rastra pesada + pulidor

- Labranza reducida (LR): 1 pase de rastra pesada + 1 pase de pulidor
- Labranza cero (SD): Ningún implemento

TABLA 11.2. Cambios en algunas propiedades físicas de un suelo franco arcilloso del valle del Cesar, en dos profundidades, y en la producción y desarrollo radicular de algodón, debidos al uso de diferentes sistemas de labranza durante 3 años consecutivos; promedios de 3 replicaciones del último año del estudio (1996). (Resultados de García y Durán, 1998).

PROPIEDAD	CONDICIÓN INICIAL	SISTEMA DE LABRANZA					
		LT	LC	LP	LB	LR	SD
Da ($Mg\ m^{-3}$)*	1.72 - 1.84	1.61-1.76	1.64-1.79	1.64-1.67	1.63-1.72	1.67-1.80	1.71-1.83
Porosidad (%)*	33.6 - 28.9	37.9-32.0	36.8-30.8	37.1-35.4	37.5-33.5	35.6-30.5	34.2-29.2
Profundidad radicular (cm) ¹	-	35.7bc	28.6cd	50.7a	43.0ab	28.3cd	21.0d
Producción (kg/ha) ¹	-	3034ab	2732b	3282a	2895ab	2782b	2009c

* El primer valor corresponde a la profundidad de 0 a 25 cm y el segundo a la de 25 a 50 cm.

¹ Valores con igual letra no presentan diferencia significativa al 95%.

En la Tabla 11.2 se aprecia que cualesquiera de los sistemas de labranza utilizados, tiende a mejorar las condiciones físicas evaluadas; el sistema de labranza cero fue el que más bajos resultados produjo, tanto en adecuación física del suelo como en las variables relacionadas con la planta, probablemente por tratarse de un suelo de textura pesada. Obsérvese que el sistema de labranza profunda fue el que mejores resultados de producción arrojó, debido a un mejoramiento del medio físico a una mayor profundidad, situación que le da mayores posibilidades a la planta para absorber agua y nutrientes.

En la Tabla 11.3 se puede ver el efecto que tiene el empleo del mismo sistema de labranza en el tiempo y sobre los dos primeros horizontes de un suelo de textura media del valle del Sinú; es notorio el deterioro que sufren las propiedades físicas del suelo, a medida que aumenta el tiempo de laboreo, probablemente utilizado siempre a la misma profundidad, sobre todo en el subsuelo, observándose la compactación del mismo y la posible generación de un pie de arado.

TABLA 11.3. Efecto del tiempo de laboreo (1 arada con discos y 2-3 rastrelladas) en algunas propiedades físicas de un suelo franco limoso algodonero del valle del Sinú. (Resultados de García, 1991).

AÑOS DE LABOREO	PROFUNDIDAD DEL HORIZONTE (cm)	Da ($Mg\ m^{-3}$)	POROSIDAD TOTAL (%)	INFILTRACIÓN BÁSICA ($cm\ h^{-1}$)
Testigo (0 años)	0 - 12	1.49	43.7	3.5
	12 - 50	1.22	53.9	2.0
5	0 - 25	1.40	47.2	4.0
	25 - 50	1.65	37.7	2.0
17	0 - 15	1.08	59.2	6.0
	15 - 34	1.67	36.9	2.5
20	0 - 12	1.22	53.9	10.0
	12 - 50	1.70	35.8	1.0
25	0 - 19	1.46	44.9	3.0
	19 - 50	1.73	34.7	0.1

Preciado (1998) encontró un grado de deterioro dramático en un suelo del Casanare, debido al uso prolongado del mismo bajo cultivo intensivo de arroz; algunos de los resultados más sobresalientes de este investigador se presentan en la Tabla 11.4.

TABLA 11.4. Cambios producidos en algunas propiedades físicas de un suelo del Casanare por efecto de su uso intensivo en cultivo de arroz durante 20 años. Promedios de 3 repeticiones. (Resultados de Preciado, 1998).

PROPIEDAD	TIEMPO DE USO EN ARROZ (años)	
	0	20
Da ($Mg\ m^{-3}$)	1.06	1.54
Porosidad total (%)	62.81	41.13
Volumen de macroporos (%)	10.35	5.62
D50 (mm)*	2.87	Masivo
Resistencia a la penetración ($kg\ cm^{-2}$)	0.5	3.71

* Diámetro estimado para el 50% de los agregados del suelo, después de tamizarlos en agua.

La compactación del suelo, por efecto de la labranza, se produce a diferentes profundidades en él y consecuentemente tiene diferentes efectos sobre sus propiedades y sobre los cultivos. Amézquita et al (1997a) estudiaron el efecto de la compactación del suelo a diferentes profundidades, creando artificialmente una capa compactada, de 2 cm de espesor, en un Dystric Haplustand medial isomésico de la Sabana de Bogotá, a profundidades de 5, 10 y 15 cm; algunos de los resultados de este trabajo se presentan en las Tablas 11.5 y 11.6

TABLA 11.5. Efecto de la compactación de un Andisol de la Sabana de Bogotá sobre su densidad aparente y porosidad total y de la ubicación de las capas compactadas dentro del perfil sobre la producción de tres hortalizas en ese suelo (Resultados de Amézquita et al, 1997a).

PROFUNDIDAD DE LA CAPA COMPACTADA (cm)	Da ($Mg\ m^{-3}$) DE LA CAPA COMPACTADA		POROSIDAD TOTAL DE LA CAPA COMPACTADA (%)		PRODUCCIÓN		CULTIVO
	ANTES SIEMBRA	DESPUÉS COSECHA	ANTES SIEMBRA	DESPUÉS COSECHA	$kg\ ha^{-1}$	% DEL MEJOR	
Testigo	1.07	1.07	48.2	48.2	41.8	100	ACELGA
5	1.77	1.38	23.7	40.5	15.5	37	
10	1.90	1.39	15.9	38.8	21.3	50	
15	1.90	1.39	13.2	30.0	34.6	82	
Testigo	1.07	1.07	48.7	48.7	64.5	100	REPOLLO
5	1.78	1.44	23.3	37.9	21.2	32.9	
10	1.90	1.44	15.0	36.6	30.0	46.6	
15	1.89	1.44	16.7	36.6	38.3	59.4	
Testigo	1.07	1.07	47.3	47.3	62.3	100	ZANAHORIA
5	1.85	1.42	20.3	38.8	12.6	20	
10	1.83	1.42	19.4	36.6	23.8	38.2	
15	1.90	1.41	12.8	37.9	51.6	82.8	

TABLA 11.6. Crecimiento de la raíz de tres hortalizas en un Andisol compactado a diferentes profundidades en la Sabana de Bogotá y en diferentes tiempos. (Resultados de Amézquita et al, 1997a).

Profundidad de la capa compactada (cm)	Longitud de la raíz (cm) a los días después de la siembra								
	Acelga			Repollo			Zanahoria		
	45	90	135	45	90	135	45	90	135
Testigo	9.33	28.36	28.79	8.85	19.63	21.60	6.99	17.66	15.53
5	5.30	14.83	16.43	4.74	9.36	11.35	3.42	10.10	11.53
10	6.66	17.80	19.92	5.23	12.36	12.76	3.84	12.63	13.50
15	7.58	21.46	21.88	6.07	16.53	16.60	4.48	15.70	14.50

En la Tabla 11.5 se observa que tanto la densidad aparente como la porosidad de la capa que fue sometida a la compactación mejoraron notablemente, por efecto de haber estado sometida a la acción de las raíces de las plantas que estaban creciendo en el suelo, así como por su cosechada.

También es evidente en la Tabla 11.5 que, con todos los cultivos utilizados en el ensayo, el máximo efecto nocivo de la compactación sobre la producción se produjo cuando la capa compactada estuvo ubicada a 5 cm de profundidad dentro del suelo; además, en todos los casos el repollo fue la planta que más se afectó por la compactación del suelo, posiblemente debido a que su sistema radicular fibroso no tiene la suficiente fortaleza para atravesar la capa compactada y poder, así, explorar un mayor volumen de suelo.

Con relación al crecimiento radicular, los resultados de la Tabla 11.6 muestran que la acelga tuvo un mejor desarrollo radicular, el cual Amézquita et al (1997a) atribuyen a su fuerte raíz pivotante, capaz de atravesar la capa compactada; el repollo no se vio tan afectado en el desarrollo radicular porque se extendió ampliamente en el suelo que estaba por encima de aquella capa; en este caso la zanahoria fue la más afectada, tanto en cantidad como en calidad, pues se presentó abundante bifurcación de ellas, lo que indica que es un cultivo bastante susceptible al deterioro físico del suelo.

El exceso de mecanización produce una pulverización elevada en el suelo, la cual es la causante de problemas de **encostramiento** y **sellamiento** superficiales cuando se ve sometido a la acción de gotas de agua que caen sobre él, sean de lluvia o de riego, ya que se produce un taponamiento de sus poros.

El sellamiento de la superficie del suelo reduce su capacidad de infiltración y de aireación y aumenta la escorrentía del agua, incrementando así su susceptibilidad a la erosión; también, el encostramiento superficial se convierte en un impedimento para la germinación de las semillas.

Para ver la relación entre la labranza y la erosión, Almansa y Argüello (1998) estudiaron la cantidad de escorrentía y de pérdida de suelo que se producía en parcelas ubicadas en terrazas, cercanas a Villavicencio, con suelos Tropeptic Haplorthox y pendiente entre 3 y 4 %, por efecto del uso de diferentes tratamientos de labranza en ellos; los sistemas de labranza estudiados fueron:

- Labranza convencional (LC): 2 pasos de rastra
- Labranza reducida (LR): 1 paso de cincel rígido + 1 paso de cincel vibratorio
- Labranza cero (SD): Herbicida y siembra con máquina

Algunos de los resultados de este estudio se presentan en la Tabla 11.7.

TABLA 11.7. Efecto de diferentes sistemas de labranza sobre la escorrentía y la pérdida de suelo en un Oxisol de Villavicencio. (Resultados de Almansa y Argüello, 1998).

SISTEMA DE LABRANZA	ESCORRENTÍA (mm)	PÉRDIDA DE SUELO (t ha ⁻¹)
LR	209.72 (19.4)*	6.79
LC	123.39 (11.4)	4.99
SD	67.63 (6.2)	3.54

* Entre paréntesis el % de la precipitación caída en 120 días que se transformó en escorrentía.

Cabe anotar, para el estudio anterior, que la precipitación generada en los 120 días fue de 1082.2 mm. Tanto la escorrentía como la pérdida de suelo tienden a igualarse en todos los sistemas de labranza a los 60 días después de sembrado el cultivo de arroz y los valores de ellas son mínimos.

Otro de los efectos importantes que tiene el exceso de mecanización del suelo es la pérdida de materia orgánica en el mismo, originada por el exceso de aireación y oxidación, que se genera por su uso a corto plazo; a largo plazo, pueden presentarse también efectos como pérdidas por erosión, mineralización de materia orgánica nativa y/o deterioro de la actividad biológica del suelo, debido a la compactación y pobre aireación en él.

Castro (1996) ilustra el proceso de pérdida de materia orgánica, con resultados recopilados en suelos del Tolima en los cuales puede verse como el contenido de materia orgánica de una pradera natural era de 3.5 % en 1963 y en 1993, por efecto de la mecanización (mayor mineralización) y del cambio de uso a cultivo de arroz en fangueo (menor aporte), bajó a 1.2 %.

Almansa y Argüello (1998), ya citados anteriormente, también evaluaron las pérdidas de materia orgánica en los Oxisoles de Villavicencio que trabajaron y encontraron pérdidas de 218, 156 y 126 kg/ha de este material, cuando utilizaron los sistemas de labranza reducida, convencional y cero, respectivamente. Aparte de ésto, también observaron que en ese mismo orden de laboreo se presentaban las pérdidas de fósforo, calcio, magnesio y potasio, medidos en los erodados de los suelos.

1.2. EL PASTOREO

El proceso de alimentación de los ganados puede alterar negativamente el medio físico del suelo. Este efecto depende, básicamente, del sistema de pastoreo que se tenga y del tiempo durante el cual se utilice dicho sistema.

1.2.1. Sistemas de pastoreo

Bernal (1988) define los sistemas que se describen a continuación.

1.2.1.1. *Pastoreo continuo*

Con este sistema los animales están permanentemente en el mismo potrero hasta que salen al mercado; es el sistema más ineficiente en producción por hectárea; fácilmente se puede producir sobrepastoreo, el cual genera **calvas** en los potreros y erosión laminar; generalmente se utiliza en suelos de baja fertilidad o en zonas donde el costo de la tierra es bajo.

1.2.1.2. *Pastoreo alterno*

Éste es una variante del sistema anterior. El lote se divide en dos potreros que se van utilizando alternativamente con todo el ganado, hasta agotar la disponibilidad del pasto; también se utiliza en suelos similares a los del sistema anterior, pero es un poco más conservacionista que aquel.

1.2.1.3. Pastoreo en rotación

En este sistema todo el lote disponible para el pastoreo se divide en pequeños potreros que van a estar ocupados por el ganado unos pocos días; con este pastoreo se pueden tener períodos largos de recuperación de los potreros; el sistema de rotación se aplica en áreas donde se tienen suelos de buena calidad y/o tierra de alto costo y generalmente va acompañado de sistemas semiintensivos o intensivos de la explotación ganadera.

1.2.1.4. Pastoreo en fajas

Esta es una variante del sistema de pastoreo en rotación, en la cual cada potrero es dividido, con ayuda de cercas eléctricas, en fajas que son utilizadas un solo día; el uso de este sistema implica un tipo de explotación intensivo de la ganadería y del suelo.

1.2.1.5. Confinamiento

En esta condición el forraje es cosechado, picado y suministrado al ganado en establos; en la mayoría de estos sistemas los animales no van a los potreros, aunque algunas veces se combina el confinamiento con un pastoreo en fajas durante algunas horas diarias.

En el orden en el cual se han presentado los diferentes sistemas de pastoreo va disminuyendo el efecto nocivo de éstos sobre el suelo y va aumentando la eficiencia del sistema, con respecto a la producción ganadera.

1.2.2. Efectos del pastoreo sobre el medio físico edáfico

Herrera et al (1991), estudiaron los efectos del laboreo en un Andic Eutropept mezclado isomésico de la Sabana de Bogotá, utilizaron como testigo potreros que tenían pastoreo continuo desde hacía 15 años. Con relación a la compactación, las medidas de la resistencia a la penetración mostraron que el lote testigo presentó una resistencia mucho mayor que los sometidos a laboreo reducido y a labranza cero, durante 6 años; a 25 cm de profundidad presentó una resistencia de 50 kg, evidenciando una compactación considerable.

La compactación del lote testigo, sin embargo, fue menor que la que tuvo el lote con labranza convencional durante 6 años, confirmándose, de paso, lo nocivo que es aquel sistema de laboreo (Herrera et al, 1991); puede verse la Tabla 11.3 para corroborar lo dicho.

Herrera et al (1993) compararon sistemas de labranza con sistemas de pastoreo en suelos de los Llanos Orientales de Colombia y encontraron que bajo el sistema de pastoreo continuo, durante 12 años, el efecto del pisoteo del ganado es menor cuando se tienen potreros con pastos mejorados que cuando se tiene sabana nativa, debido a que aquellos tienen una mayor producción de biomasa que genera agregados de mayor tamaño y más estables y a que el mayor volumen de raíces que producen mejora la aireación y el movimiento de agua en el suelo.

Perea et al (1991) estudiaron el efecto del tiempo de uso de un determinado sistema de pastoreo en un suelo franco arcillo arenoso, en relieve escarpado; los resultados obtenidos en ésta investigación, para los primeros 5 cm del suelo, se presentan en la Tabla 11.8.

TABLA 11.8. Efecto de diferentes tiempos de pastoreo sobre algunas propiedades de los primeros 5 cm de un suelo franco arcillo arenoso, en relieve escarpado, de la cuenca alta de la quebrada Las Ceibas (Huila). (Resultados de Perea et al, 1991).

TRATAMIENTO*	MATERIA ORGÁNICA (%)	Da (Mg m ⁻³)	POROSIDAD TOTAL (%)	RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN (lb ft ⁻²)	INFILTRACIÓN BÁSICA (cm h ⁻¹)	BIOMASA RADICULAR (t ha ⁻¹)
TESTIGO	4.8	1.6	38	7.3	13.1	11.0
GRUPO I	6.3	1.6	39	5.9	11.9	9.5
GRUPO II	10.3	1.4	42	3.7	29.4	11.1
GRUPO III	14.2	1.3	50	3.5	36.5	13.5

* Pastos elefante (*Pennisetum purpureum*) y king grass (*Saccharum sinense*) en los grupos y puntero (*Hyparrhenia rufa*) en el testigo. En los grupos, pastoreo 24 horas cada 20 a 35 días, durante 3 o menos años (grupo I), entre 4 y 6 años (grupo II) y entre 7 y 10 años en el grupo III; en el testigo pastoreo intensivo y tradicional más de 20 años

En la Tabla 11.8 se aprecia como, al utilizar adecuadamente el tipo de pastoreo y los tiempos de recuperación de los potreros, se obtienen mejoras sustanciales en las propiedades físicas de los suelos que están siendo sometidos a explotación ganadera.

Otros efectos nocivos que pueden generarse con el uso inadecuado de la ganadería están relacionados con los movimientos en masa que llegan a producirse a partir de las **terracetas** formadas por el tráfico del ganado, a través de la dirección de la vertiente.

Las terracetas mencionadas van formando un escalonamiento en las laderas cuya parte plana (zona de tráfico) se va compactando y va perdiendo capacidad de infiltración; el agua en la terraceta se infiltra entonces por el respaldo y, si el suelo es poco profundo o tiene un horizonte de textura pesada y contrastante a poca profundidad, llega a saturarse en su horizonte superficial, pudiendo originar **deslizamientos, solifluxión o reptación**, dependiendo del gradiente de las pendientes y del suelo.

1.3. EL RIEGO

Esta práctica consiste en suministrarle a la planta el agua que le hace falta, debido a que las condiciones de precipitación en la región no alcanzan a satisfacer su demanda hídrica. El agua se le puede suministrar a la planta de diversas maneras, las cuales dependen, fundamentalmente, del clima, del cultivo y del suelo.

1.3.1. Sistemas de riego

Aunque hay bastantes variantes, los sistemas de riego pueden agruparse en tres categorías básicas: superficial, por aspersión y localizado.

1.3.1.1. Riego superficial

En este sistema, el agua se coloca en la superficie del suelo corriendo o estancada, dejándola en contacto con él un determinado tiempo, de modo que pueda penetrar. El más común es el que se aplica con agua corriente en surcos. A éste sistema se refiere la información que se presenta a continuación.

1.3.1.1.1. Características

Las principales condiciones para la aplicación de este sistema de riego son:

- Pendiente < 1%.
- Unidades de riego grandes.
- No recomendable para suelos arenosos o arcillosos.
- Preferible en suelos profundos.
- Aplicable en cualquier cultivo, excepto arroz.
- Requiere regadores bien adiestrados.

1.3.1.1.2. Ventajas

Con este sistema:

- Se pueden regar campos largos.
- Se requieren pocas zanjas.
- El drenaje superficial es fácil.
- Hay poca pérdida de tierra utilizable.
- Puede utilizarse más eficientemente la maquinaria.

1.3.1.1.3. Desventajas

- Requiere personal con buenas habilidades.
- Tiene un riesgo considerable de producir erosión.
- Puede tener pérdidas altas de agua por escorrentía y por percolación.
- Requiere buena nivelación del terreno.
- Requiere de altos caudales disponibles.

1.3.1.2. Riego por aspersión

Según Hernández (1992), con este sistema se trata de aplicar el agua simulando una lluvia; tiene las características, ventajas y desventajas que se apuntan a continuación.

1.3.1.2.1. Características

- Muy adecuado para suelos livianos, pero puede aplicarse en cualquier tipo de suelo, aunque en suelos pesados no es muy satisfactorio.
- Aplicable a todos los cultivos, excepto arroz; en cultivos susceptibles a enfermedades fungosas, favorecidas por la alta humedad del aire, tampoco es recomendable.
- Adecuado para zonas con agua escasa.
- Su eficiencia disminuye bastante por la presencia de vientos fuertes y/o alta evaporación.

1.3.1.2.2. Ventajas

Con respecto al riego superficial presenta las siguientes:

- Tiene mayor eficiencia de aplicación y mejor uniformidad en la penetración del agua en el suelo.
- Aplicable a suelos con alta infiltración o poco profundos.

- Menor peligro de erosión.
- No requiere nivelación y soporta mayor pendiente y más irregularidades en la superficie del terreno.
- Permite la aplicación de abonos líquidos o solubles con él.
- Requiere menos mano de obra.
- Hay mejor distribución de agua en el cultivo.
- No hay escorrentía.
- Tiene bajos costos de operación.

Con respecto a los sistemas localizados, tiene las siguientes:

- Menor costo inicial.
- Mayor versatilidad de los equipos.
- Impone menos obstáculos sobre el terreno, facilitando las labores mecanizadas.

1.3.1.2.3. Desventajas

En relación con los sistemas superficiales:

- Tiene elevado costo inicial.
- Hay mayor pérdida de agua por evaporación.
- En zonas con vientos fuertes, puede ser menos eficiente la aplicación y distribución del agua.
- Puede favorecer enfermedades fungosas en la planta.
- Exigente en calidad de agua: No debe tener materiales en suspensión.

Comparado con los sistemas localizados:

- Presenta mayor consumo de agua.
- Tiene mayores requerimientos de presión para su funcionamiento, lo que aumenta el consumo de energía y el riesgo de averías.

1.3.1.3. Riego localizado

Pérez (1982) incluye, en este tipo de riego, todos aquellos sistemas que aplican el agua sólo a aquella porción del suelo ocupada por las raíces; el riego por goteo es el más conocido de este sistema.

1.3.1.3.1. Características

- Utiliza bajos caudales.
- Tiene alta frecuencia de riego.

1.3.1.3.2. Ventajas

- Alto rendimiento por trabajador.
- Se ajusta a cualquier pendiente.
- Aplicable a casi todos los suelos, excepto los arenosos.
- Es el método más eficiente en el uso del agua.

- Propicia un buen control de malezas en el cultivo.
- Se ajusta a cualquier cultivo que se siembre en hileras.
- En algunos cultivos se puede aumentar la densidad de siembra, si se utiliza este sistema de riego.

1.3.1.3.3. Desventajas

- Requiere personal calificado para su manejo.
- Es el sistema más costoso en equipos por hectárea regada.
- Requiere una alta frecuencia de riego.
- Es de alta rigidez en las instalaciones.

1.3.2. Efectos nocivos del riego en el suelo

Como el riego se aplica con la finalidad de mejorar las condiciones nutricionales del cultivo, al suministrarle la cantidad de agua que no es capaz de suplir la precipitación, se espera que se mejore la producción de aquél; sin embargo, los resultados de Santamaría y Gallardo (1992) expuestos en la Tabla 11.9, muestran que no siempre se logra este objetivo.

TABLA 11.9. Efecto del riego sobre algunas propiedades relacionadas con la producción de soya, variedad Valluna 5, en un suelo del Valle del Cauca (Resultados de Santamaría y Gallardo, 1992).

NIVEL DE RIEGO*	CONSUMO DE AGUA EN 110 DÍAS (mm)	RENDIMIENTO (kg ha^{-1})	PESO DE 100 SEMILLAS (g)
1	361.18 a**	2837.3 a	21.14 a
2	335.03 b	2120.8 b	17.50 b
3	300.51 c	1766.2 b	15.81 b

* La cantidad aplicada aumenta de 1 a 3.

** Valores seguidos por la misma letra no presentan diferencia significativa estadísticamente entre ellos.

Los efectos nocivos que puede tener el riego sobre algunas de las propiedades del suelo y/o sobre el rendimiento de los cultivos, pueden ser ocasionados por errores de diseño del sistema (incluyendo el drenaje inadecuado) o por el uso de aguas inadecuadas para llevar a cabo esta práctica.

Los errores de diseño pueden estar relacionados con errores en los cálculos de la cantidad de agua que se debe aplicar (ésto puede explicar parte de los resultados de la Tabla 11.9). Un exceso de agua aplicado al suelo puede elevar el nivel freático del mismo, lo cual puede conllevar incrementos en el aporte de sales y/o sodio a la zona donde se encuentran las raíces de las plantas; los problemas relacionados con dichos incrementos se exponen en el Capítulo 14.

También, la aplicación excesiva de agua al suelo, dependiendo del sistema de riego que se utilice, puede incrementar la percolación profunda de agua. Ésta produce una intensa lixiviación, o puede generar unos altos excedentes que se evacuan superficialmente, como escorrentía, que aumentan los riesgos de erosión del suelo.

Por el contrario, si se aplica menor cantidad de agua de la requerida, aparte de que la planta va a sufrir estrés hídrico, en el suelo habrá solubilización de sales y de otros compuestos que no

podrán ser lavados de él y que se irán acumulando a cierta profundidad generando horizontes salinos, sódicos, gíspicos, etc., que pueden convertirse en limitantes químicos para el desarrollo radicular.

Otro error, relacionado con los riegos, es no considerar el drenaje en su diseño; es indispensable diseñar aquellas obras que permitan eliminar los excesos de agua que se apliquen al suelo, así como las láminas de agua que se aplican para el lavado de las sales que se disuelven con él.

Con respecto a la calidad de las aguas que se utilicen para riego, García (1991) recopila los criterios propuestos por la FAO para hacer la evaluación de aquella, como se muestra en la Tabla 11.10.

TABLA 11.10. Algunos criterios propuestos por la FAO para evaluar la calidad de las aguas para riego. (Tomada parcialmente de García, 1991).

PROPIEDAD*	UNIDADES	GRADO DE RESTRICCIÓN PARA EL USO		
		NINGUNO	LEVE A MODERADO	SEVERO
CE	dS m ⁻¹	< 0.7	0.7 a 3	> 3
TDS	Mg L ⁻¹	< 450	450 a 2000	> 2000
TOXICIDADES				
Con Na ⁺				
Riego Superficial	meq L ⁻¹	< 3	3 a 9	> 9
Riego Aspersión	meq L ⁻¹	< 3	> 3**	-
Con Cl ⁻				
Riego Superficial	meq L ⁻¹	< 4	4 a 10	> 10
Riego Aspersión	meq L ⁻¹	< 3	> 3**	-
Con Boro	meq L ⁻¹	< 0.7	0.7 a 3	> 3
Con NO ₃ ⁻	meq L ⁻¹	< 5	5 a 30	> 30
Con HCO ₃ ⁻	meq L ⁻¹	< 1.5	1.5 a 8.5	> 8.5
pH: Rango Normal			6.5 a 8.4	

* CE: Conductividad eléctrica (ver numeral 3.3.1 del Capítulo 14). TDS: Total de sólidos disueltos.

** Con esta condición se producen daños en el follaje (quemazón), no en el suelo.

1.4. EL DRENAJE

Gavande (1987) define el drenaje como aquel conjunto de técnicas que permiten eliminar en forma rápida y segura el agua libre de la superficie del suelo y/o de la zona radicular del mismo, para evitar daños a la planta y mantener unas condiciones adecuadas en el suelo.

Cuando se elimina el exceso de agua que se aplicó en un riego o que cayó en un aguacero y que quedó estancada en la superficie del terreno, se está haciendo drenaje **superficial**; cuando se quiere controlar el nivel freático del suelo, se hace drenaje **subterráneo**.

1.4.1. Efectos del mal drenaje

Pizarro (1978) comenta los siguientes efectos producidos por la deficiencia de drenaje en el suelo:

- Aireación deficiente, reduciéndose el O₂ y aumentando el CO₂, lo que reduce la respiración de la planta y, por ende, la absorción y traslocación de nutrientes y de agua.

- Transformación de algunos elementos y compuestos a formas tóxicas para plantas y microorganismos.
- Alteración de la población microbiana.
- Incremento en las pérdidas de nitrógeno por volatilización.
- Deterioro de la estructura del suelo porque se dificulta la cementación de los agregados; ésto, a su vez, facilita la compactación y reduce el desarrollo radicular y la permeabilidad.
- Los suelos húmedos son más fríos; ésto reduce la germinación de semillas y el desarrollo radicular.

1.4.2. Beneficios del drenaje

Aparte de mejorarse las propiedades que se afectan cuando el drenaje es malo, como las enumeradas anteriormente, Gavande (1987) anota los siguientes beneficios del buen drenaje:

- Se facilita el laboreo del suelo.
- Se aumenta el tiempo de uso del suelo en explotación.
- Aumenta el volumen aprovechable del suelo.
- Ayuda a eliminar sales del perfil y se evita su ascenso futuro por capilaridad.
- Mejoran las condiciones fitosanitarias de los cultivos.

1.5. EL USO DE LA TIERRA

El suelo va evolucionando bajo el control de unos determinados factores de formación, entre los cuales se cuenta la vegetación. Dichos factores le van imprimiendo una serie de características, las cuales sufren cambios importantes cuando alguno de los factores es alterado con respecto a su situación original.

Los cambios que se generan en el suelo, al cambiar su cobertura vegetal original por otra, se producen en las propiedades químicas y en las físicas del mismo, como lo demuestran los resultados obtenidos por Ordóñez et al (1992) al evaluar las propiedades de suelos del Guaviare (Colombia), cuando cambiaron su cobertura original de bosque por cultivos o por pastos.

Según los resultados de Ordóñez et al (1992), la densidad aparente se incrementa y la porosidad total y el almacenamiento de agua disminuyen, al comparar los valores obtenidos en suelos bajo bosque con los mismos suelos con cultivos y, en mayor proporción, cuando se comparan con suelos de potreros de más de 5 años de establecidos, con pastoreo continuo; el efecto nocivo del uso pecuario fue mucho mayor que el de los cultivos en estos suelos, en todos los paisajes estudiados.

Ejemplos del efecto protector que tiene la cobertura de bosque sobre las propiedades físicas del suelo los suministran Escobar et al (1993), quienes encontraron los resultados que se presentan en la Figura 11.6 y en la Tabla 11.11; obsérvese la baja escorrentía que se genera en el suelo bajo bosque, así como las pocas pérdidas de suelo y agua que se producen en él, en comparación con las originadas en suelo desnudo.

En la Figura 11.6 se aprecia como el bosque es la cobertura que le da mayor infiltración y menor escorrentía al suelo, situación que también se refleja en las menores pérdidas de suelo y de agua que se presentan bajo esta cobertura.

Los resultados de los trabajos de Amézquita et al (1997b) también ponen de manifiesto la importancia de la cobertura vegetal natural en el mantenimiento de unas adecuadas condiciones físicas en el suelo.

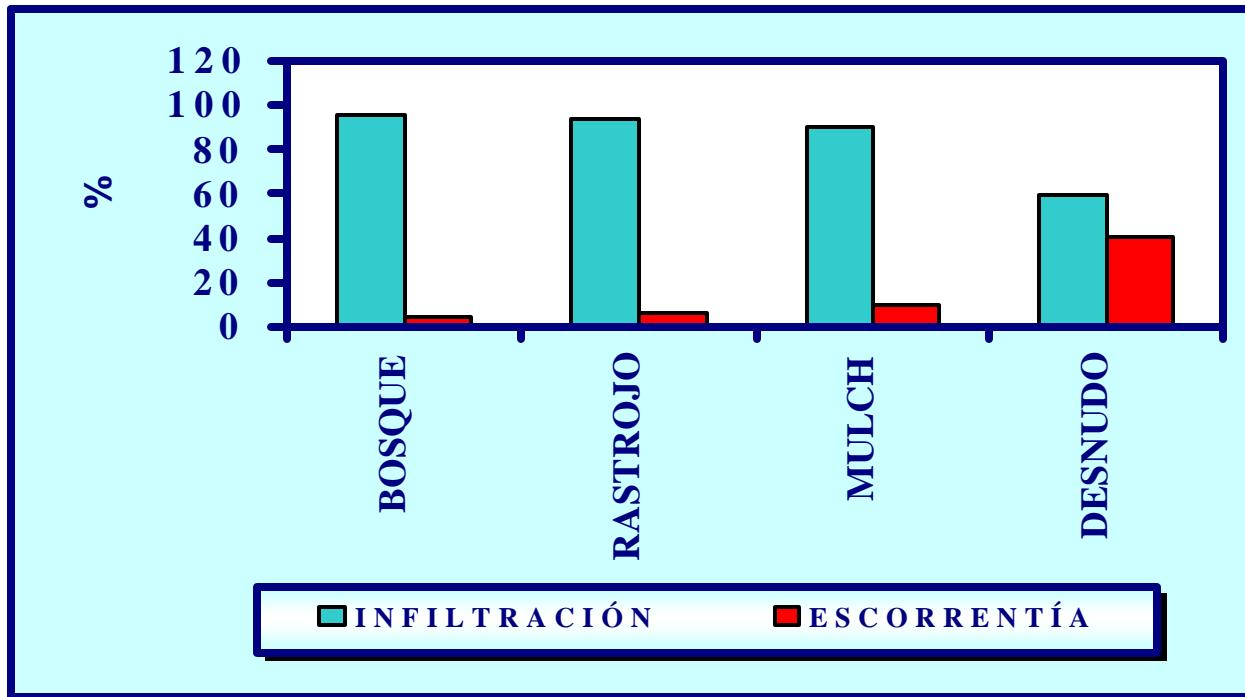


FIGURA 11.6. Efecto de la cobertura de un Ultisol de Florencia (Caquetá) sobre su relación infiltración – escorrentía, con respecto a la precipitación promedia anual (2900 mm); promedios de 12 años de observaciones. (Con base en resultados de Escobar et al, 1993).

TABLA 11.11. Efecto de la cobertura del suelo sobre las pérdidas de material sólido y de agua en un Ultisol del Caquetá (Colombia); promedio anual con 12 años de registro. (Resultados de Escobar et al, 1993).

COBERTURA	PÉRDIDA DE SUELO ($t \text{ ha}^{-1}$)	PÉRDIDA DE AGUA POR ESCORRENTÍA (mm)
Bosque	0.281	135
Rastrojo	0.327	187
Suelo + mulch*	1	281
Suelo desnudo	27.7	1176

* **Mulch:** Ver numeral 2.3 del Capítulo 17.

En un Typic Haplustox caolinítico isohipertérmico de los Llanos Orientales de Colombia, sometido al mismo manejo durante 7 años, Amézquita et al (1997b) estudiaron la distribución de agregados y su estabilidad en los primeros 25 cm del suelo. Encontraron los resultados que se presentan en las Figuras 11.7 y 11.8.

La Figura 11.7 muestra la distribución que presentaron los agregados mayores y menores a 2 mm de diámetro, como resultado de los diferentes manejos del suelo; se observa como en el tratamiento testigo (sabana natural) hay un equilibrio en la distribución de los tamaños de los agregados, lo que favorece un adecuado espacio poroso y unas buenas relaciones hídricas en los suelos que estaban bajo este sistema de manejo.

Por el contrario, cuando se implantó en aquel suelo el monocultivo del arroz, la proporción de agregados mayores a 2 mm decreció drásticamente, dando paso a la dominancia de agregados finos en el suelo que no garantizan un adecuado funcionamiento de la porosidad en aquel; efectos similares a los anteriores ha reportado Castro (1995) para suelos del valle del Magdalena, en el Tolima, como consecuencia del monocultivo del arroz en esa región.

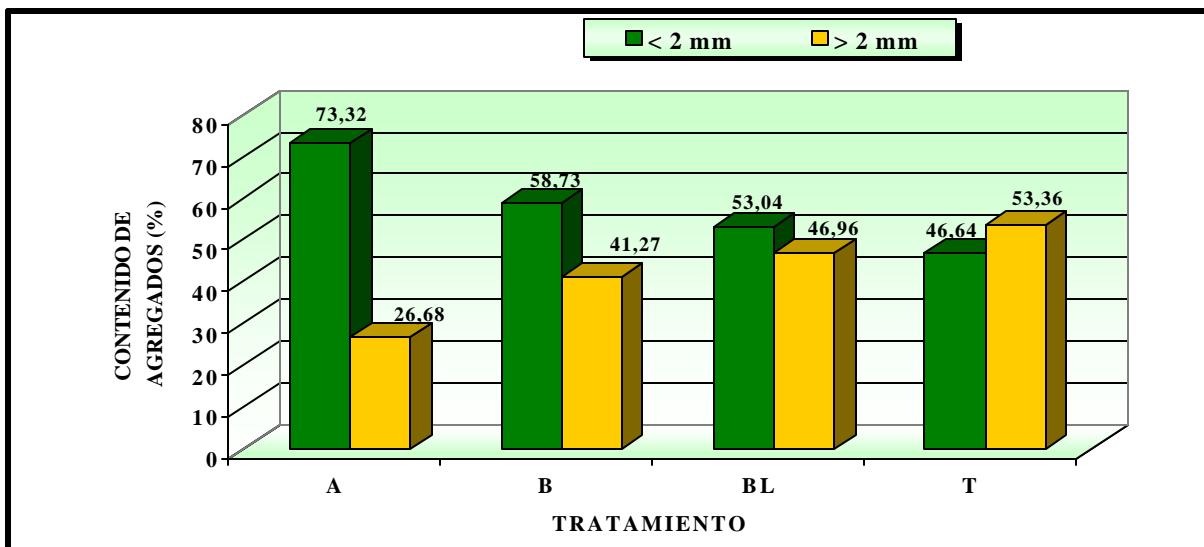


FIGURA 11.7. Contenido de agregados mayores y menores de 2 mm en un Typic Haplustox caolinítico, isohipertérmico de los Llanos Orientales de Colombia, después de 7 años de estar sometidos al mismo sistema de manejo. A: Arroz continuo. B: Brachiaria solo. BL: Brachiaria con leguminosas y rastrillada dos veces. T: Sabana nativa como testigo. (Con base en resultados de Amézquita et al, 1997b).

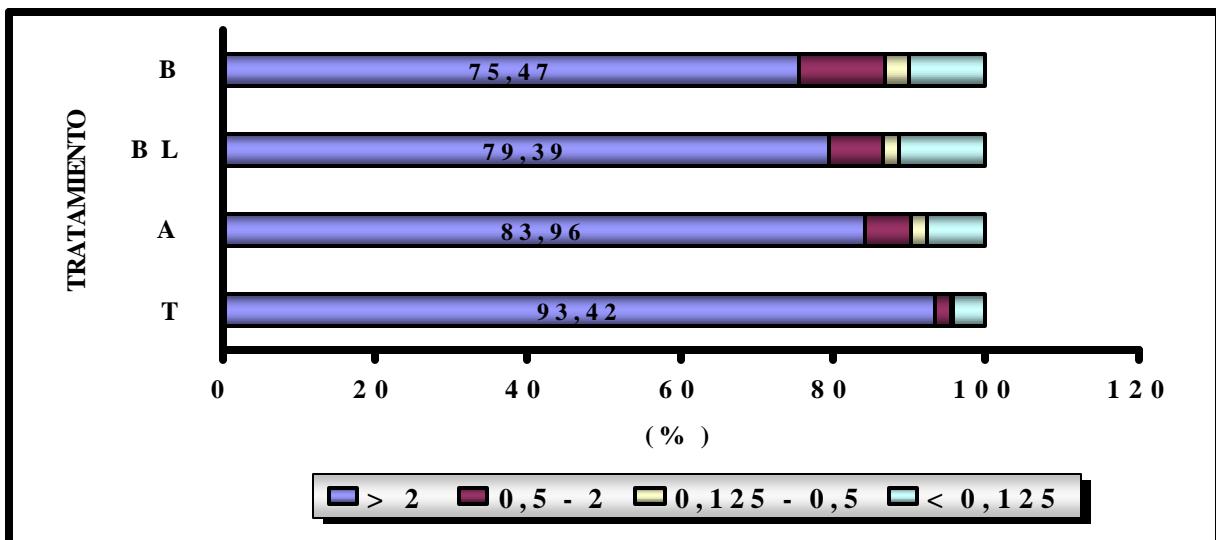


FIGURA 11.8. Estabilidad de los agregados de un Typic Haplustox caolinítico isohipertérmico de los Llanos Orientales de Colombia, después de 7 años de estar sometido al mismo manejo. Para el significado de los tratamientos, ver Figura 11.7. (Con base en resultados de Amézquita et al 1997b).

Al evaluar la estabilidad de los agregados, la Figura 11.8 muestra con claridad la gran estabilidad estructural que presentan los suelos que se encuentran bajo sabana nativa, evidenciando que este sistema de manejo, no sólo produce el mejor equilibrio en la distribución de los agregados, sino que, además, dichos agregados son resistentes al agua.

Forero et al (1998) estudiaron el efecto de 7 sistemas de uso de la tierra sobre algunas propiedades físicas de los primeros 10 cm del suelo en un área aproximada de 20000 ha en el departamento del Meta (Colombia); obtuvieron los resultados que se exponen en la Tabla 11.12. Los usos evaluados fueron:

- BS: Bosque secundario de más de 15 años
- PM: Pradera mejorada de 4 años
- AB: Arroz – barbecho; 2 años de descanso y 5 años de arroz antes
- AP: Arroz con pastoreo de soca durante 20 años
- LA: Lotes abandonados 4 años; antes arroz por más de 20 años; al hacer el trabajo estaban con ganadería intensiva con gramas nativas
- AR1: Arroz riego monocultivo por 10 años
- AR2: Arroz riego monocultivo por 20 años

TABLA 11.12. Efecto de diferentes tipos de uso de la tierra sobre algunas propiedades físicas en los primeros 10 cm de suelos del departamento del Meta (Resultados de Forero et al, 1998).

PROPIEDAD	SISTEMA DE MANEJO						
	BS	PM	AB	AP	LA	AR1	AR2
Da ($Mg\ m^{-3}$)	1.18	1.24	1.22	1.42	1.55	1.19	1.51
Ksat ($cm\ h^{-1}$)	17.5	3.28	0.58	0.78	0.21	0.60	0.32
Porosidad total (%)	56.13	54.07	54.14	47.71	42.16	55.26	42.37
Macroporos (%)	16.34	14.22	22.33	11.14	1.43	11.29	0.69
Mesoporos (%)	15.94	3.22	2.79	2.96	6.12	5.28	5.89
Microporos (%)	23.85	36.63	29.02	33.31	34.61	38.69	35.79

En la Tabla 11.12 se observa como los usos intensivos en arroz durante más de 10 años son los que mayor daño han hecho a los suelos estudiados. También es notable el mejoramiento de las propiedades físicas de los suelos que han estado bajo vegetación de bosque durante los 15 años anteriores al estudio.

Ortiz (1998) estudió el efecto que tenía el cambio de cobertura vegetal y de uso, de bosque de 20 años a caña de azúcar, sobre algunas propiedades físicas de un Ferrasol de Cuba y obtuvo los resultados de la Tabla 11.13. Se aprecia en ella como se incrementa la susceptibilidad del suelo a la erosión por efecto del intenso laboreo a que es sometido cuando se usa en cultivo.

Finalmente, es bueno destacar como se van extendiendo, en área, los cambios que se producen por el efecto del uso del suelo bajo los mismos sistemas de manejo durante períodos de tiempo prolongados; Torrente et al (1998) estudiaron los cambios que se han producido en algunas propiedades de los suelos del distrito de riegos del Juncal, departamento del Huila; calificaron el estado de las propiedades analizadas y determinaron el área ocupada por cada clase de propiedad. Compararon estos resultados con las condiciones iniciales de los suelos y encontraron los resultados que se exponen en la Tabla 11.14.

TABLA 11.13. Cambios en algunas propiedades físicas de un Ferrasol de Cuba, por efecto del cambio de bosque a cultivo de caña de azúcar (Resultados de Ortiz, 1998).

PROPIEDAD	BOSQUE DE 20 AÑOS	CAÑA DE AZÚCAR
Coeficiente de dispersión (%)	18.55	32.56
Agregados estables al agua > 0.25 mm (%)	90.14	72.60
Capacidad de campo (%)	35.77	27.00
Límite líquido (%)	40.12	33.28
Límite plástico (%)	29.79	23.05
Da ($Mg\ m^{-3}$)	1.15	1.32

El distrito de riegos del Juncal tiene un área de 3965 ha; el uso de la tierra antes de él era ganadería extensiva y después cambió a cultivos intensivos, principalmente de arroz en monocultivo; hay unas pequeñas áreas que se explotan con arroz en rotación con sorgo, maíz y/o algodón. La fuente de agua para el distrito es el río Magdalena, del cual se toma mediante bombeo. Los resultados expuestos en la Tabla 11.14 muestran los cambios producidos después de 25 años de funcionamiento del distrito (Torrente et al, 1998).

TABLA 11.14. Algunos cambios producidos en propiedades físico – químicas de suelos del distrito de riegos del Juncal, departamento del Huila, por efecto del uso de prácticas de manejo de suelos y de aguas intensivas, después de 25 años (Con base en resultados de Torrente et al, 1998).

PROPIEDAD	CONDICIÓN	ÁREA AFECTADA (%)	
		INICIAL (EN 1968)	EN 1994
Textura	Media	9.8	40.9
	Pesada	90.2	59.1
Infiltración	Moderada	21.9	0
	Lenta	78.1	100
Ksat	Moderada	10.8	7.0
	Lenta	89.2	93.0
Da	Alta (> 1.6)	93.0	100
	Baja (< 1.0)	7.0	0
Agua aprovechable	Muy baja	14.5	76.2
	Baja	75.7	0
	Media	9.8	23.8
pH	Extremadamente ácido	36.7	0
	Muy fuertemente ácido	41.9	0
	Medianamente ácido	21.4	30.6
	Ligeramente ácido	0	34.4
	Neutro	0	35.0
Contenido de materia orgánica	Alto	0	7.4
	Medio	0	57.6
	Bajo	100	35.0

En la Tabla 11.14 se observa una tendencia en los suelos a tornarse de texturas más gruesas, probablemente debido a la pérdida de partículas finas por erosión y/o al aporte de partículas gruesas en el agua de riego. Se aprecia, además, que la densidad aparente ha incrementado con el tiempo, evidenciando procesos de compactación en los suelos, lo que concuerda, también, con el deterioro en la infiltración y en la conductividad hidráulica y con la pérdida de capacidad de almacenamiento de agua en ellos.

Desde el punto de vista químico, se ha producido un mejoramiento en la reacción de los suelos puesto que aquellos más ácidos han pasado a otras categorías más cercanas a la neutralidad; este comportamiento obedece, probablemente, a la adición continua de enmiendas a los suelos como parte del manejo de su fertilidad. También se ha mejorado el nivel de materia orgánica en los suelos, posiblemente debido a un manejo adecuado de los residuos de cosecha, mediante su incorporación a los suelos.

RECORDAR

- Las causas más frecuentes de deterioro físico del suelo son la mecanización, el pastoreo, el riego, el drenaje y el uso de la tierra, obviamente cuando se hacen inadecuadamente.
- Los tipos de labranza más comunes son: convencional, reducida, mínima y cero.
- Los problemas más comunes producidos por mala labranza son: aumento de la Da; pérdida de macroporosidad; compactación; reducción en la infiltración, la conductividad hidráulica, el almacenamiento de agua y en la estabilidad estructural; aumento de la escorrentía y de la erosión.
- Antes de seleccionar un sistema de labranza se debe hacer un estudio de los suelos que se van a laborar.
- La labranza mínima y la cero exigen suelos con buenas propiedades físicas y son más adecuadas para suelos livianos y/o bien estructurados; en los suelos pesados se requiere labranza completa.
- El principal efecto nocivo del pastoreo es la compactación del suelo y, en zonas de pendientes pronunciadas, es el incremento de la susceptibilidad del suelo a los movimientos en masa.
- Hay 3 sistemas básicos de riego: superficial, por aspersión y localizado; la selección de cualesquiera de ellos exige estudios de suelos, de aguas y de costos, así como conocimiento del cultivo a regar.
- Los errores que pueden cometerse con el riego, que afecten el suelo, son de diseño, incluyendo mal diseño u omisión del drenaje, y de calidad de agua.
- El monocultivo intensivo por tiempo prolongado es una causa importante de deterioro físico del suelo.
- El cambio de cobertura vegetal del suelo, de bosque natural a uso agropecuario, disminuye la calidad del medio físico edáfico.

2. RECUPERACIÓN DEL MEDIO FÍSICO EDÁFICO

Para mantener un adecuado medio físico en el suelo, se deben implementar aquellas prácticas de manejo que garanticen que no se va a hacer un uso abusivo del mismo. Éstas se refieren a la utilización de la labranza y a la selección adecuada de los implementos de acuerdo con el suelo y el cultivo; además, llevarla a cabo en las condiciones de humedad óptimas para el suelo y en la cantidad justa. El mantenimiento de las condiciones de humedad apropiadas para el cultivo se logra con la ayuda de sistemas adecuados de riego y drenaje, así como con el manejo de coberturas en el suelo, etc.

Existen prácticas que favorecen la permanencia de la materia orgánica del suelo en él: evitar la erosión, las quemas, el sobrepastoreo, la sobremecanización, etcétera. Además, aquellas prácticas que aportan este valioso material al suelo deben llevarse a cabo; a continuación se analizan brevemente algunos manejos de suelos que ayudan a mantener y/o recuperar la estructura del mismo, propiedad que es indispensable para tener un medio físico adecuado en el suelo.

2.1. ROTACIÓN DE CULTIVOS

Esta práctica consiste en sembrar diferentes cultivos alternadamente en el mismo suelo. Es una manera de manejar racionalmente la fertilización, cuando para la rotación se seleccionan los cultivos teniendo en cuenta sus diferentes exigencias nutricionales. Aparte de los beneficios que se obtienen sobre la fertilidad, las rotaciones también generan mejoras en algunas propiedades físicas del suelo, como puede apreciarse en las Figuras 11.9 y 11.10.

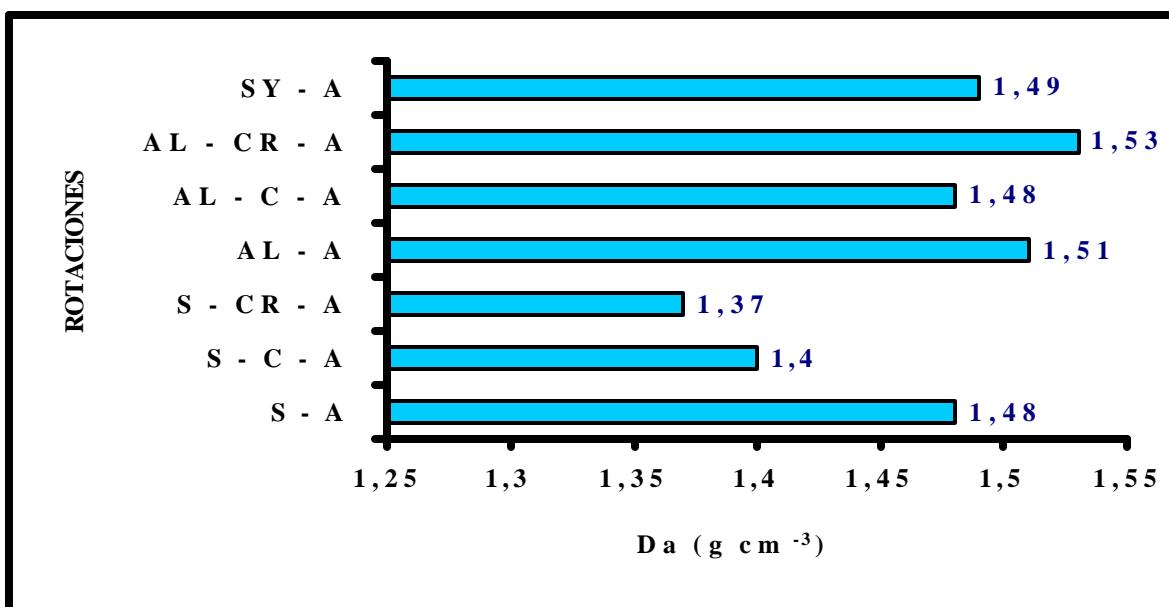


FIGURA 11.9. Efecto de diferentes rotaciones de cultivos sobre la densidad aparente del horizonte A de un Arenic Haplustalf de El Espinal (Tolima), después de dos años de establecidas. A: Arroz; AL: Algodón; C: Caupí; CR: Crotalaria; S: Sorgo; SY: Soya. (Con base en resultados de Gutiérrez, 1988).

En la Figura 11.9 es notable la reducción que se presenta en el valor de la densidad aparente del suelo después de que estuvo sometido a 2 años de rotación con una leguminosa incorporada en ella como abono verde (tratamiento S – CR – A); téngase en cuenta que la densidad aparente inicial del suelo era de 1.65 Mg m⁻³.

Se observa también en la Figura 11.9 que el efecto de la leguminosa está condicionado por los cultivos con los cuales se acompaña en la rotación, pues cuando ésta fue con algodón en lugar de sorgo, la densidad aparente obtenida fue la mayor de todas (AL – CR – A).

En la Figura 11.10 se observa que también el tratamiento S – CR – A es el que le da al suelo la mayor porosidad total, situación perfectamente lógica debido a la dependencia que tiene esta

propiedad de la densidad aparente; también en esta figura se presentan las inconsistencias mencionadas, con respecto al comportamiento de las leguminosas, en el párrafo anterior; Castro (1996) obtuvo resultados erráticos con la aplicación de abonos verdes de leguminosas en los mismos suelos, lo que pone de manifiesto la necesidad de estudiar mejor esta práctica de manejo de suelos con deterioro físico.

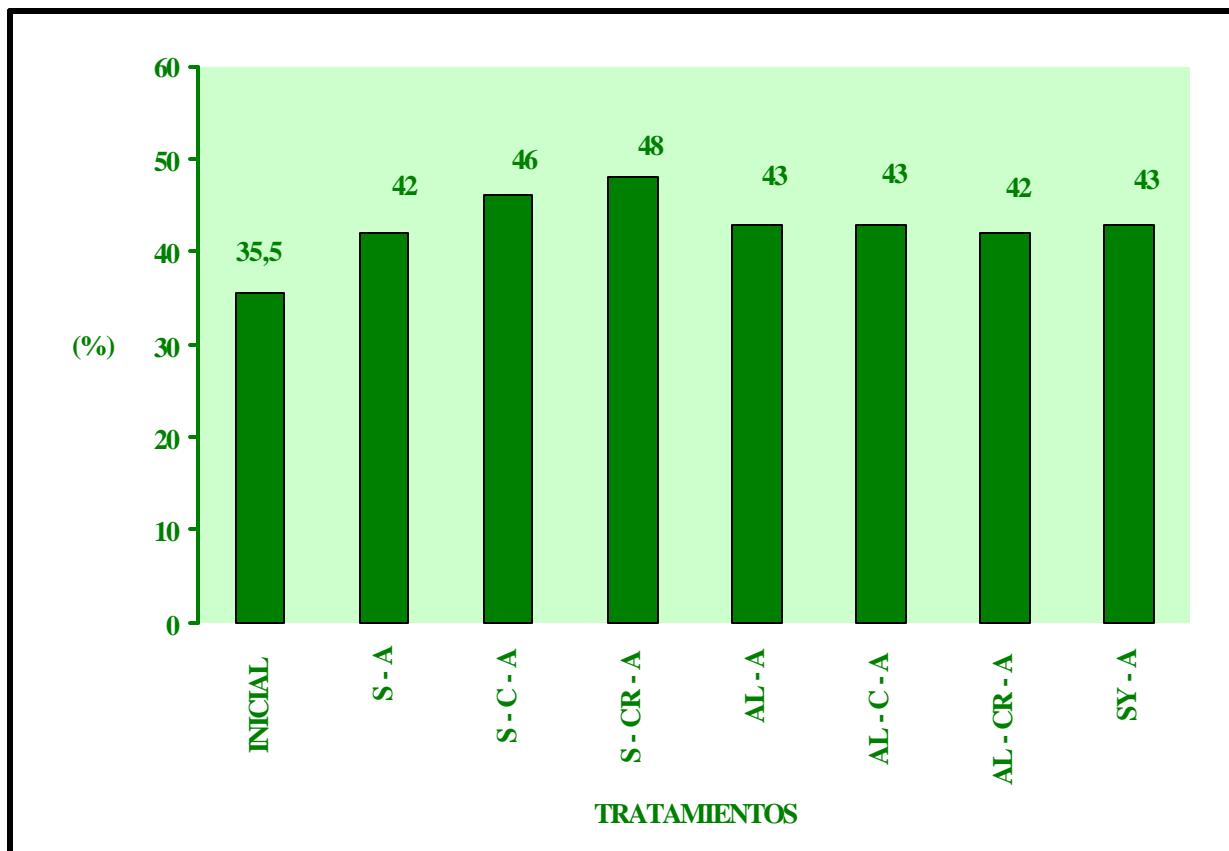


FIGURA 11.10. Efecto de diferentes rotaciones de cultivos sobre la porosidad total del horizonte A de un Arenic Haplustalf de El Espinal (Tolima), después de 2 años de establecidas. Para significado de símbolos, ver Figura 11.9. (Con base en resultados de Gutiérrez, 1988).

Si se observan los resultados de las Tablas 11.5 y 11.6 también se obtienen buenos ejemplos de lo que podría ser una alternativa de manejo de suelos compactados a poca profundidad; si se establecen rotaciones con diferentes hortalizas, teniendo en cuenta las diferencias en sus sistemas radiculares, puede obtenerse una recuperación paulatina del medio físico del suelo.

2.2. USO DE ACONDICIONADORES FÍSICOS

Los acondicionadores físicos de suelos son compuestos o materiales que se le adicionan a aquel para que formen agregados y contribuyan a estructurarlo, mejorando, de paso, aquellas propiedades del suelo relacionadas con la porosidad. Los acondicionadores pueden ser naturales o sintéticos.

2.2.1. Acondicionadores físicos naturales

A este grupo pertenecen aquellos materiales inorgánicos como las arcillas y las sales floculantes, así como una gran variedad de elementos y compuestos orgánicos que tienen una capacidad de humificación relativamente alta. Entre todos los componentes posibles de utilizar, los que más frecuentemente se usan son los orgánicos y, en términos generales, se pueden considerar en éste grupo la mayoría de los materiales orgánicos descritos en el Capítulo 17.

El efecto de algunos acondicionadores naturales orgánicos puede verse en los resultados que se presentan en las Tablas 11.15 y 11.16, las cuales recogen la información obtenida por Castro (1988) acerca del efecto de mezclar diferentes dosis de cisco de café, tamo de arroz, cascarilla de arroz, cascarilla de maní y estiércol de vacuno con materiales provenientes de los lodos volcánicos de Armero, sobre la percolación y la producción de forraje verde de arroz en ensayos preliminares de invernadero. Se observa en todos los casos que la percolación del agua y la producción de forraje fue muy superior a lo obtenido en el testigo. En este caso, la mejora se dio en porosidad ya que el tiempo de duración de los ensayos no fue suficiente para generar estructura.

TABLA 11.15. Efecto de diferentes materiales orgánicos sobre la percolación de agua en lodos volcánicos de Armero en ensayos de invernadero. (Con base en resultados de Castro, 1988).

MATERIAL	MEJOR DOSIS (t ha ⁻¹)	PERCOLACIÓN (mm h ⁻¹)
Tamo de arroz	50	58
Cisco de café	50	58
Cascarilla de arroz	200	58
Cascarilla de maní	12.5	38
Estiércol de vacuno	200	22
Testigo	-	3

TABLA 11.16. Efecto de diferentes materiales orgánicos sobre la producción de forraje verde de arroz en 30 días, en lodos volcánicos de Armero, en invernadero. (Con base en resultados de Castro, 1988).

MATERIAL	MEJOR DOSIS (t ha ⁻¹)	PRODUCCIÓN FORRAJE (t h ⁻¹)
Cascarilla de maní	200	5.65
Estiércol de vacuno	100	5.38
Cascarilla de arroz	200	4.88
Tamo de arroz	25	4.15
Cisco de café	12.5	3.1
Testigo	-	1.7
Producción de un cultivo de arroz en un suelo normal de la zona		9

La caracterización física de los lodos volcánicos de Armero, realizada en 1986 por Frye (1993), estableció que estos materiales presentaban una textura franco arenosa, con 40 a 50 % de gravas y cascajos; masivos (sin estructura); con bajas infiltración y permeabilidad y baja capacidad de retención de humedad; como se ve, son materiales con serias limitaciones físicas para su uso agropecuario.

2.2.2. Acondicionadores físicos sintéticos

Son sustancias que cumplen el papel de mejorar las condiciones físicas del suelo y que se producen artificialmente o que son subproductos industriales; los efectos más importantes que producen en el suelo son evitar el encostramiento superficial, producir y mantener estructura, mejorar la infiltración y, en general, mejorar aquellas propiedades que se relacionan con la estructura.

Los productos que más comúnmente se utilizan como acondicionadores sintéticos son **polímeros orgánicos de alto peso molecular**, existiendo también **emulsiones, espumas** y algunos **silicatos amorfos** y otras **sales inorgánicas**. Además, se producen con características **hidrofílicas** o **hidrofóbicas, catiónicas o aniónicas**; entre el primer grupo, los más conocidos son las **poliacrilamidas (PAM)**, el **alcohol polivinílico (PVA)** y el **acetato de polivinilo (PVAc)**; entre las emulsiones son comunes las **asfálticas o bitúmenes**; los mecanismos por los cuales interactúan con los sólidos del suelo comprenden la formación de enlaces o puentes, adsorción, reacción química o formación de complejos.

Estos materiales se pueden aplicar al suelo en seco, mezclando ambos con maquinaria, o en solución, adicionándolo a la superficie con el agua de riego e incorporándolo 1 ó 2 días después, siendo este último el método más común; los acondicionadores sintéticos actúan en el suelo a concentraciones tan bajas como del **0.1%**, con base en el peso del suelo.

Varios investigadores han encontrado que la aplicación **diluida en el agua de riego** es más eficiente que la aplicación del material seco (Mitchell, 1986; Wallace et al, 1986b); sin embargo, Madriñán y González (1991) encontraron que dicho comportamiento era cierto en suelos de texturas livianas del Valle del Cauca, pero que operaba al contrario cuando los suelos se tornaban de textura media a fina; Wallace y Wallace (1986) tampoco encontraron consistencia en sus resultados al cambiar el sistema de aplicación del acondicionador.

Madriñán y González (1991) establecen algunas ventajas de los acondicionadores sintéticos, frente a los naturales, como:

- Efecto inmediato.
- Efecto residual largo.
- Se deben utilizar en dosis muy bajas, lo cual disminuye costos de transporte y aplicación.
- Hay una reducción considerable en el consumo de agua.

La principal desventaja de estos materiales es su **elevado costo**, el cual ha hecho, hasta la fecha, que no sea un material de uso común en los procesos de recuperación o de mejoramiento físico de los suelos, aparte de que explica, al menos parcialmente, la falta de investigación que hay sobre este tema.

Terry y Nelson (1986) aplicaron PAM en un suelo franco arcilloso (Calcic Argixerolls franco fino, mezclado, méxico), a razón de 650 kg ha⁻¹ y al cabo de 10 y 60 días de iniciado el experimento encontraron los resultados que se muestran en la Tabla 11.17. En dicha tabla se ve como los efectos nocivos que puede tener el riego por inundación sobre el medio físico del suelo, pueden ser contrarrestados por la aplicación de riego por aspersión o por la aplicación de acondicionadores físicos de suelos.

TABLA 11.17. Efecto de la aplicación de PAM y del sistema de riego sobre algunas propiedades físicas de los primeros 5 cm de un suelo franco arcilloso de Utah (USA). (Resultados de Terry y Nelson, 1986).

Acondicionador	Riego	Da ($Mg\ m^{-3}$)		Resistencia a la penetración ($Mg\ m^{-2}$)	
		12 de Julio	30 de Agosto	12 de Julio	30 de Agosto
Ninguno	Inundación	1.17	1.20	10.7	19.6
PAM	Inundación	1.06	1.02	1.0	5.3
Ninguno	Aspersión	1.08	1.05	6.0	4.5

En el trabajo citado en la Tabla 11.17 también se encontró que la estabilidad de los agregados, de los suelos que recibieron PAM, fue de 3 a 4 veces mayor que la de aquellos suelos que no recibieron el acondicionador y que la infiltración, después de 130 minutos, en los suelos con PAM y con riego por aspersión fue aproximadamente el doble de la del testigo.

Wallace y Wallace (1986) lograron reducir las pérdidas de suelo por erosión, en más del 90%, en un Xerorthent franco de California (USA), mediante la aplicación de PAM, en dosis tan bajas como de $11.2\ kg\ ha^{-1}$, dependiendo de la forma de aplicación y del tipo de poliacrilamida que utilizaron.

Wallace et al (1986b) aplicaron una poliacrilamida aniónica a un suelo franco de Los Ángeles (California, USA), en una concentración de 0.044% del peso del suelo seco, equivalente a $977\ kg\ ha^{-1}$ de material y obtuvieron los resultados que se aprecian en la Tabla 11.18.

TABLA 11.18. Efecto de la aplicación de PAM aniónica en algunas propiedades físicas de los primeros 15 cm de un suelo franco de Los Ángeles (USA). (Tomados parcialmente de Wallace et al, 1986b).

PROPIEDAD	SUELO SIN TRATAR	SUELO TRATADO
Da ($Mg\ m^{-3}$)	1.95	1.24
Porosidad total (%)	24.4	51.9
Rata de infiltración de agua ($mm\ h^{-1}$)	41	328

Wallace et al (1986a) lograron mejorar las condiciones físicas de un suelo sódico (Natrargid) mediante la adición de PAM aniónica; como consecuencia de este mejoramiento, se incrementó la emergencia y la producción de materia seca de plantas de tomate sembradas en él; en la Tabla 11.19 se aprecia el efecto de la aplicación del acondicionador sobre la capacidad de infiltración de agua en el suelo.

TABLA 11.19. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de PAM aniónica sobre la capacidad de infiltración de agua de un suelo sódico de California (USA). (Tomada parcialmente de Wallace et al, 1986a).

DOSIS DE PAM ($kg\ ha^{-1}$)	TIEMPO PARA INFILTRAR 25 mL DE AGUA EN 25 g DE SUELO (s)
0	270
28	95
56	70
112	45
168	45
224	45

No siempre la aplicación de acondicionadores sintéticos produce mejoras en el suelo en el cual se aplican; Hartmann et al (1976) encontraron que la aplicación de PAM, de PVA y de emulsiones

asfálticas, en suelos arenosos, produjo decrecimientos en la infiltración y en la penetración del frente de humedecimiento en ellos, debido a que le imprimieron algún grado de hidrofobicidad al suelo, el cual afectó sus relaciones hídricas.

La evidencia del comportamiento expuesto en el párrafo anterior la obtuvieron al calcular el ángulo de contacto entre el agua en ascenso capilar y el suelo contenido en columnas de vidrio, como se muestra en la Tabla 11.20; este comportamiento obedeció a un efecto de superficie específica, pues al cambiar el suelo a uno de textura franco limosa la hidrofobicidad no fue inducida por los acondicionadores.

TABLA 11.20. Ángulo de contacto (grados) entre el agua y dos suelos arenosos tratados con acondicionadores físicos sintéticos, en columnas de ascenso capilar. (Tomada parcialmente de Hartmann et al, 1976).

MUESTRA	TESTIGO	CON PVA	CON PAM
SUELO 1	38	60	76
SUELO 2	54	57	81

* Con emulsión asfáltica no se pudo medir el ángulo porque el suelo se tornó completamente repelente al agua.

Para ilustrar el empleo de acondicionadores sintéticos en Colombia, se pueden mencionar los resultados obtenidos por Fandiño et al (1993) en un Andisol de la Sabana de Bogotá sometido a laboreo convencional durante 9 años, con emulsiones asfálticas ácidas y catiónicas; en la Tabla 11.21 se presenta la distribución de macro y microagregados en el suelo por efecto de la aplicación de diferentes dosis de emulsión, evaluados en diferentes tiempos después de la incorporación de aquella.

TABLA 11.21. Cambios en el contenido de macro y microagregados de un Dystric Haplustand medial isomésico de la Sabana de Bogotá, producidos en 3 meses, después de la aplicación de diferentes dosis de emulsiones asfálticas. (Resultados de Fandiño et al, 1993).

DIÁME- TRO DE AGRE- GADOS (mm)	CONCENTRACIÓN DE LA EMULSIÓN (%)								
	0.5 SEMANA			1 SEMANA			1.5 SEMANA		
	0	1	12	0	1	12	0	1	12
	8 – 4	8.64	16.26	43.06	9.41	26.66	41.61	10.05	27.71
4 – 2	7.85	10.02	9.68	6.83	10.81	8.03	7.32	10.16	7.62
< 0.25	63.47	52.98	34.56	66.15	45.73	39.80	65.17	47.92	44.21

En la Tabla 11.21 se observa como se va incrementando la cantidad de agregados grandes en el suelo, a medida que transcurre el tiempo de acción de la emulsión, en todas las concentraciones utilizadas. Así mismo, hay una reducción importante en el contenido de microagregados; cabe aclarar que no se obtuvieron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos, en la formación de agregados mayores de 2 mm.

En los mismos suelos, del trabajo mencionado en el párrafo anterior, González et al (1993) evaluaron el efecto que tenía la aplicación de las emulsiones asfálticas sobre las pérdidas de suelo por erosión y de agua por escorrentía, obteniendo los resultados que se exponen en las Figuras 11.11 y 11.12.

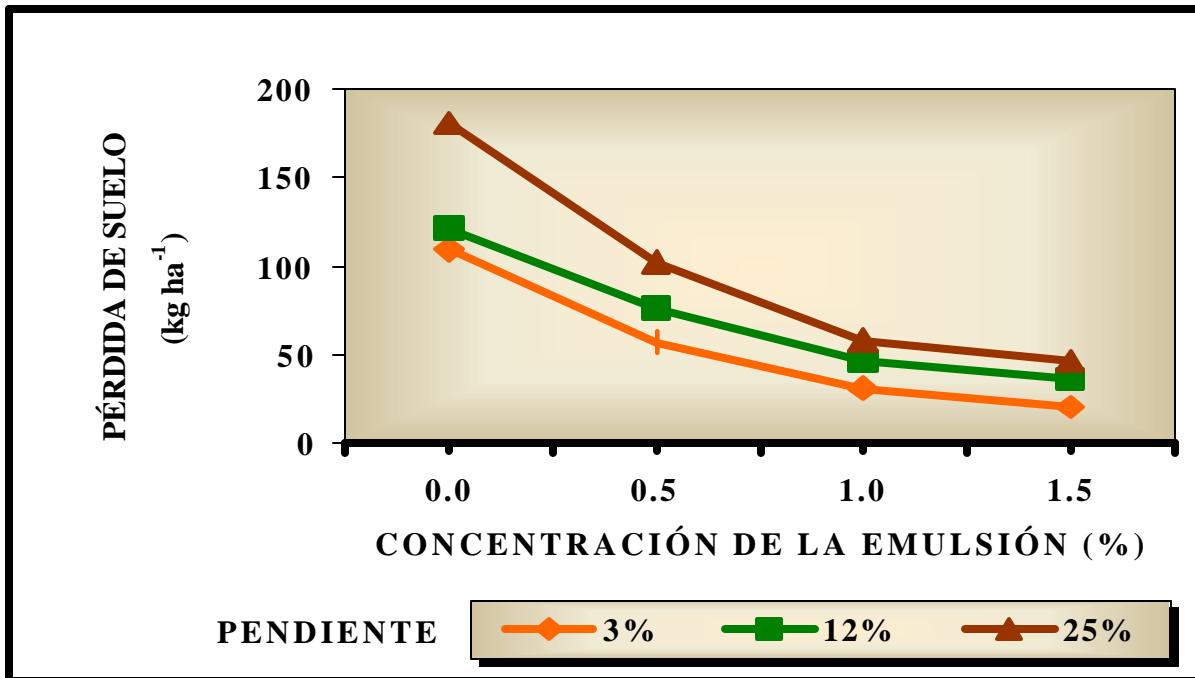


FIGURA 11.11. Efecto de la aplicación de emulsión asfáltica en la pérdida de suelo por escorrentía superficial en un Dystric Haplustand medial isomésico de la Sabana de Bogotá, sometido a una lluvia artificial de 68 mm h⁻¹ de intensidad, durante 30 minutos. (Con base en resultados de González et al, 1993).

Para el estudio mencionado en el párrafo anterior se utilizó un simulador de lluvia que suministró un aguacero con una intensidad de 68 mm h⁻¹ durante 30 minutos; además, se estudiaron tres pendientes diferentes para hacer las evaluaciones.

En la Figura 11.11, como era de esperarse, se presentaron las menores pérdidas de suelo cuando se presentaba la menor pendiente, en cualesquiera de los tratamientos; también se observa que a medida que se incrementa la concentración de emulsión aplicada, se reduce la pérdida de suelo. Es claro, también, en dicha figura, que al irse incrementando la concentración de la emulsión, el peso que tiene la pendiente en la pérdida de suelo también disminuye.

En la Figura 11.12 también es evidente el efecto que tiene la pendiente sobre las pérdidas de agua por escorrentía, pero, además, también lo es el efecto que ejerce la aplicación de las emulsiones en reducir dichas pérdidas.

La reducción observada en las pérdidas de suelo y de agua de los suelos analizados en el último párrafo obedece al mejoramiento que ha tenido la estructura del suelo por la adición de los acondicionadores y, de paso, a la adecuación que ganaron, como consecuencia, la porosidad total y la macroporosidad del mismo, lo que mejoró la resistencia de los agregados al impacto de las gotas de lluvia y la capacidad de infiltración del agua.

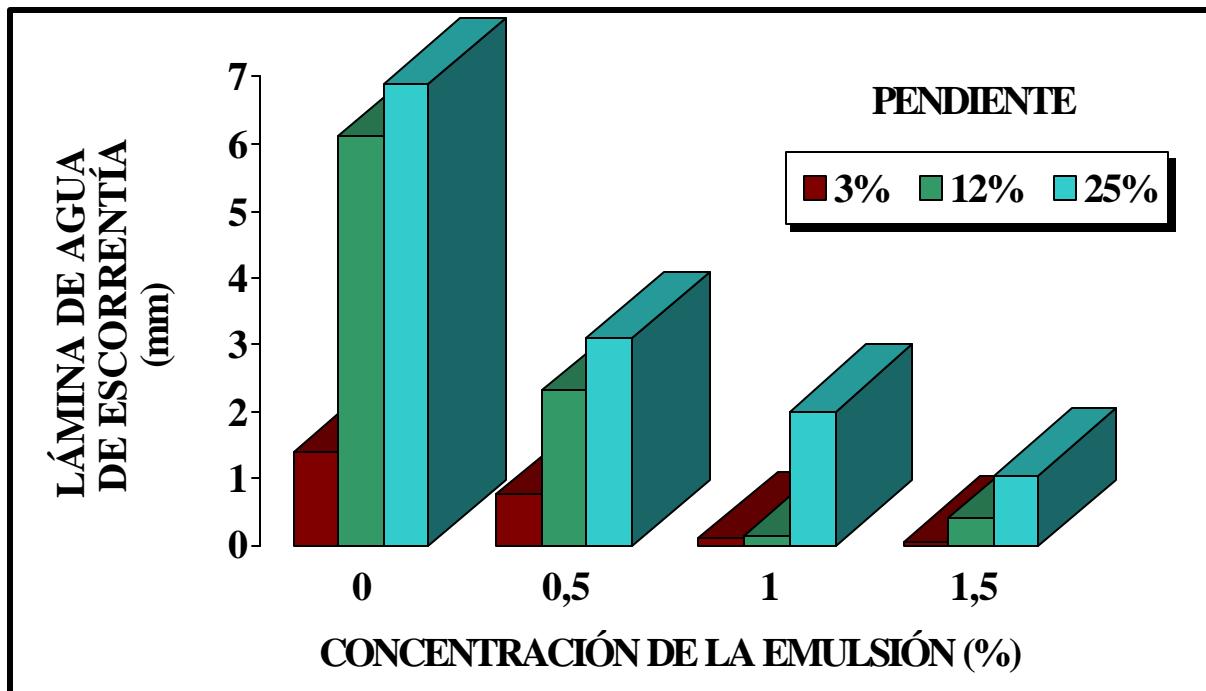


FIGURA 11.12. Efecto de la aplicación de emulsiones asfálticas sobre la cantidad de escorrentía producida en un Dystric Haplustand medial isomésico de la Sabana de Bogotá, sometido a una lluvia artificial de 68 mm h^{-1} de intensidad, durante 30 min. (Con base en resultados de González et al, 1993).

RECORDAR

- Para mantener un adecuado medio físico en el suelo, las prácticas de manejo del mismo deben hacerse en la cantidad justa y en las condiciones de humedad adecuadas para el suelo.
- Las prácticas que promuevan la acumulación de materia orgánica en el suelo deben llevarse a cabo: evitar erosión, quemas, sobrepastoreo, sobremecanización; utilizar el suelo según sus posibilidades de uso.
- Cuando el medio físico edáfico está deteriorado, la rotación de cultivos y/o la adición de acondicionadores físicos son alternativas disponibles para recuperar dicha calidad física.
- Los acondicionadores físicos que se utilizan con más frecuencia son de composición orgánica, tanto si son naturales como si son sintéticos.
- El principal efecto de los acondicionadores físicos consiste en aglutinar y mantener unidas partículas de suelo y formar una pseudoestructura que, a su vez, mejora la infiltración y la resistencia a la erosión.
- El uso de los acondicionadores sintéticos se ve limitado por los altos costos que tienen, aunque tienen un efecto inmediato y relativamente duradero.

BIBLIOGRAFÍA

- ALFARO, R. R.; H. MONTENEGRO y E. AMÉZQUITA. 1995. Respuesta de un suelo compactado a cuatro tratamientos de labranza en el Valle del Alto Magdalena. *Suelos Ecuatoriales* 25: 67-76.
- ALMANSA, E. y O. ARGÜELLO. 1998. Efecto de la labranza en la pérdida de suelo y de nutrientes en la producción de arroz en la orinoquia colombiana. **En:** Memorias Encuentro Nacional de Labranza de Conservación. Romero G. et al editores. Villavicencio. pp: 501 – 511.
- AMÉZQUITA, E. 1998. Propiedades físicas de los suelos de los llanos orientales y sus requerimientos de labranza. **En:** Memorias Encuentro Nacional de Labranza de Conservación. Romero G. et al editores. Villavicencio. pp: 145 – 174.
- AMÉZQUITA, E.; E. HERNÁNDEZ y O. J. MORENO. 1997a. Influencia de la profundidad de la compactación en la productividad de hortalizas en un suelo ándico de la Sabana de Bogotá. *Suelos Ecuatoriales* 27: 157-162.
- AMÉZQUITA, E. et al. 1997b. Características estructurales de los suelos de los Llanos Orientales de Colombia sometidos a varios sistemas de manejo. *Suelos Ecuatoriales* 27: 151-156.
- CASTRO, H. 1996. Bases técnicas para el conocimiento y manejo de los suelos del Valle cálido del Alto Magdalena. Corpoica Regional 6. Ibagué. 107 p.
- CASTRO, H. 1995. Producción sostenible de cultivos utilizando técnicas biológicas y conservacionistas: “Un modelo aplicable al trópico cálido colombiano”. *Suelos Ecuatoriales* 25: 94-100.
- CASTRO, H. 1988. Avances de investigación en la zona de Armero afectada por lodos volcánicos. *Suelos Ecuatoriales* 18 (2): 87-92.
- CASTRO, H. y E. AMÉZQUITA. 1991. Sistemas de labranza y producción de cultivos en suelos con limitantes físicos. *Suelos Ecuatoriales* 21 (1): 21-28.
- CHAN, K. Y. 1992. Development of seasonal water repellence under direct drilling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 326-329.
- ESCOBAR, C. J.; E. AMÉZQUITA y J. NAVAS. 1993. Pérdida de suelo y agua por erosión bajo diferentes manejos en un Ultisol del piedemonte amazónico (Caquetá-Colombia). *Suelos Ecuatoriales* 23 (1-2): 180-184.
- FANDIÑO, J.; C. GONZÁLEZ y E. AMÉZQUITA. 1993. Efecto de la aplicación de una emulsión asfáltica de tipo catiónico en la estabilidad estructural de un suelo degradado estructuralmente. *Suelos Ecuatoriales* 23 (1-2): 162-168.
- FENALCE. 1987. La mecanización y el manejo de suelos en Colombia. Ponencia al XII Congreso Nacional Cerealista. Bogotá. 63 p.
- FORERO, H.; M. CORTÉS y D. ARISTIZABAL. 1998. Diagnóstico de la degradación física de suelos en sistemas intensivos de uso bajo arroz riego en San Carlos de Guaraoa. **En:** Memorias Encuentro Nacional de Labranza de Conservación. Romero G. et al editores. Villavicencio. pp: 367 – 387.
- FRYE, A. 1993. Características de los lodos fluvio-volcánicos de Armero y comportamiento de especies vegetales en ellos. *Suelos Ecuatoriales* 23 (1-2): 45-50.
- GARCÍA, J. 1991. Efectos del laboreo en algunas propiedades físicas de los suelos algodoneros del Valle Medio del Sinú. *Suelos Ecuatoriales* 21 (1): 51-54.

- GARCÍA, J. y R. DURÁN. 1998. Evaluación de varios sistemas de labranza en un suelo algodonero del Valle del Cesar. En: Memorias Encuentro Nacional de Labranza de Conservación. Romero G. et al editores. Villavicencio. pp: 241 – 257.
- GAVANDE, S. 1987. Física de suelos: Principios y aplicaciones. Editorial Limusa S. A. México. 351 p.
- GONZÁLEZ, E.; J. FANDIÑO y E. AMÉZQUITA. 1993. Emulsiones asfálticas para control de erosión y conservación de suelos. Suelos Ecuatoriales 23 (1-2): 169-174.
- GUTIÉRREZ, D. 1988. Efecto de la rotación de cultivos y los abonos verdes sobre la producción de arroz (*Oriza sativa* L). Suelos Ecuatoriales 18 (1): 160-165.
- HARTMANN, R.; H. VERPLANCKE and M. DE BOODT. 1976. The influence of soil conditioners on the liquid-solid contact angles of sands and silt loams. Soil Science 121 (6): 346-352.
- HERNÁNDEZ, O. 1992. Manual de riego por aspersión. Universidad Central de Venezuela. Caracas. 139 p.
- HERRERA, P.; E. AMÉZQUITA; L. GUERRERO y L. RESTREPO. 1991. Efecto de la labranza en algunas propiedades físicas de un suelo andino. Suelos Ecuatoriales 21 (1): 68-75.
- JEN, S. y R. QUINTERO. 1987. Efecto de los métodos de preparación del suelo en el desarrollo y producción de la caña de azúcar en el Valle del Cauca. Suelos Ecuatoriales 17 (2): 64-71.
- MADRIÑÁN, R. y A. GONZÁLEZ. 1991. Influencia de acondicionadores físicos y orgánicos en cuatro suelos del Valle del Cauca. Suelos Ecuatoriales 21 (1): 29-38.
- MITCHELL, A. R. 1986. Polyacrylamide application in irrigation water to increase infiltration. Soil Science 141 (5): 353- 358.
- MONTENEGRO, H. y D. MALAGÓN. 1990. Propiedades físicas de los suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá. 813 p.
- ORDÓÑEZ, N.; E. LÓPEZ y P. BOTERO. 1992. Cambios en las propiedades de los suelos, relacionados con la colonización del bosque natural, en un área del Guaviare. Colombia Amazónica 6 (1): 37-64.
- ORTIZ, R. 1998. Física de suelos, un enfoque moderno en la agricultura actual. El caso de la degradación física por efectos de la mecanización. En: Memorias Encuentro Nacional de Labranza de Conservación. Romero G. et al editores. Villavicencio. pp: 39 – 60.
- PEREA, J.; R. PACHÓN y A. FIERRO. 1991. Efecto del pastoreo en pastos de corte (*Saccharum sinense* y *Pennisetum purpureum*) en algunas propiedades físicas y químicas del suelo, subcuenca Las Ceibas, Alto Magdalena. Suelos Ecuatoriales 21 (1): 94-98.
- PÉREZ, F. 1982. Manual de riego localizado. Universidad Central de Venezuela. Maracay. 128 p.
- PIZARRO, F. 1978. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Editora Agrícola Española S. A. Madrid. 521 p.
- PRECIADO, G. 1998. Influencia del tiempo de uso del suelo en las propiedades físicas, en la productividad y sostenibilidad del cultivo de arroz en Casanare. En: Memorias Encuentro Nacional de Labranza de Conservación. Romero G. et al editores. Villavicencio. pp: 513 – 532.
- SANTAMARÍA, H. y C. GALLARDO. 1992. Efecto del riego y profundidad de compactación en la producción de soya variedad valluna 5. Acta Agronómica 42 (1-4): 23 – 31.

TERRY, R. E. and S. D. NELSON. 1986. Effects of polyacrylamide and irrigation method on soil physical properties. *Soil Science* 141 (5): 317-320.

TORRENTE, A.; J. PEREA y F. SALINAS. 1998. Efecto del uso y manejo del suelo y agua sobre algunas propiedades físico – químicas en suelos seleccionados de la cuenca alta del río Magdalena. *Suelos Ecuatoriales* 28: 200 – 204.

WALLACE, G. A. and A. WALLACE. 1986. Control of soil erosion by polymeric soil conditioners. *Soil Science* 141 (5): 363- 367.

WALLACE, A.; G. A. WALLACE and A. M. ABOUZAMZAM. 1986a. Amelioration of sodic soils with polymers. *Soil Science* 141 (5):359-362.

WALLACE, A.; G. A. WALLACE and A. M. ABOUZAMZAM. 1986b. Effects of soil conditioners on water relationships in soils. *Soil Science* 141 (5): 346-352.

AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Cuándo se dice que un suelo está degradado?.
2. Diga cuatro causas de deterioro físico del suelo.
3. ¿Para qué se somete un suelo a laboreo?.
4. ¿Cuáles son las principales operaciones de labranza de un suelo?. ¿En qué consisten?.
5. ¿Cuáles son los principales tipos de labranza que se aplican al suelo y en qué consiste cada uno?.
6. ¿Cuándo es recomendable el uso de la labranza cero?.
7. ¿Cuáles propiedades del suelo se deben caracterizar para seleccionar un determinado sistema de labranza en él?.
8. Enumere 7 problemas que se pueden ocasionar en el suelo por efecto de una mala labranza.
9. ¿Por qué la sobremecanización puede producir encostramiento superficial en el suelo?.
10. Enumere los sistemas de pastoreo descritos en el texto y diga en qué consiste cada uno.
11. Mencionar dos acciones de manejo que ayuden a disminuir los riesgos de deterioro del suelo por el pastoreo.
12. Enumere los sistemas de riego descritos y diga en qué condiciones se debe utilizar cada uno.
13. ¿Qué puede suceder en el suelo si se aplica exceso de riego?. ¿Y si se aplica menor cantidad de la requerida?.
14. ¿A qué se llama drenaje en suelos?.
15. Enumere 5 efectos que tenga el mal drenaje en el suelo.
16. Enumere cuatro prácticas de manejo del suelo que ayuden a recuperarlo físicamente.
17. ¿En qué consiste la rotación de cultivos?.
18. ¿Qué son acondicionadores físicos de suelos?. ¿Qué origen tienen?.
19. ¿Qué ventajas tienen los acondicionadores físicos sintéticos sobre los naturales?.
20. ¿Cuál es el principal limitante para utilizar los acondicionadores físicos sintéticos?. ¿Su aplicación debe hacerse en altas dosis?.

EVALUACIÓN

1. Con los datos que se dan a continuación establezca a qué profundidad se presenta la mayor restricción para el desarrollo radicular de la planta, teniendo en cuenta lo relacionado con la humedad y con la aireación; sustente su respuesta y presente los cálculos necesarios.

Prof. (cm)	Mg m ⁻³		Contenido de (%)			% W a las atm				
	Da	Dr	A	L	Ar	0.1	0.3	5	10	15
0 - 17	1.1	2.5	30	29	41	49	40	26	23	21
17 - 37	1.6	2.7	58	17	25	34	24	13	12	11
37 - 45	1.6	2.7	64	28	8	18	13	6	5	4
45 - 95	1.0	2.6	47	40	13	47	35	23	19	19

(R: El horizonte más limitante para el desarrollo radicular es el segundo ya que tiene la menor cantidad de agua aprovechable: 13% y la menor macroporosidad: 2.3%. Además, tiene una Da muy alta con relación a la textura que presenta, lo que implica una alta probabilidad de que ese horizonte esté compactado).

2. Si en el suelo anterior se van a sembrar árboles frutales, ¿qué prácticas recomendaría hacer para que esta siembra tuviera éxito?. Se debe consultar bibliografía.
3. Analizar los resultados expuestos en la Figura 11.9 y explicar por qué ellos son mejores en las rotaciones en las cuales interviene el sorgo, en comparación con aquellas en las cuales el sorgo es reemplazado por algodón.

LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO

PARTE 4

LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO

PRINCIPIOS DE QUÍMICA Y COLOIDES DEL SUELO

- ❖ Conceptos básicos
- ❖ Soluciones
- ❖ El enlace químico
- ❖ Los coloides del suelo

EL INTERCAMBIO IÓNICO

- ❖ Factores que controlan el intercambio iónico
- ❖ Capacidad de intercambio catiónico (CIC)
- ❖ Capacidad de intercambio aniónico (CIA)
- ❖ Adsorción específica o selectiva
- ❖ La doble capa difusa

LA REACCIÓN DEL SUELO

- ❖ El pH
- ❖ Suelos ácidos
- ❖ Suelos básicos

F

assbender (1982)¹ define la química de suelos como aquella parte de la ciencia del suelo que estudia la composición, las propiedades y las reacciones químicas de los suelos.

Los esfuerzos mayores de aplicación de esta parte de la ciencia del suelo han estado dirigidos a tratar de explicar y/o resolver problemas relacionados con la dinámica de los nutrientes vegetales y con la fertilidad del suelo. Estos aspectos escapan al alcance de este texto, que está dedicado a explorar áreas más básicas del conocimiento de los suelos, por lo cual no debe esperarse que aquí se resuelvan dichos problemas.

¹ FASSBENDER, H. W. 1982. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. IICA. San José. Costa Rica. 398p.

PRINCIPIOS DE QUÍMICA Y COLOIDES DEL SUELO

CAPÍTULO 12

CONTENIDO

- ❖ Conceptos básicos
- ❖ Soluciones
 - Concentración de una solución
 - Porcentaje (%)
 - Molaridad
 - Molalidad
 - Normalidad
 - Partes por millón o por billón
 - Solvatación
- ❖ El enlace químico
 - Enlace iónico
 - Enlace covalente
 - Enlace de van der Waals
- ❖ Los coloides del suelo
 - La carga permanente
 - La carga variable
 - Importancia de la carga de los coloides del suelo

OBJETIVOS

- ❖ Repasar algunos conceptos básicos de química
- ❖ Entender el comportamiento de los coloides en el suelo

S

e hará, en esta parte, el repaso de algunos conceptos fundamentales de la química aplicables al estudio de las propiedades químicas del suelo.

1. CONCEPTOS BÁSICOS

De Keenan y Wood (1971) se extraen las siguientes definiciones:

- **Átomo:** Es la mínima parte de un elemento que conserva las propiedades de éste; el átomo está compuesto de partículas subatómicas, de las cuales las más conocidas son los **electrones**: Partículas cargadas negativamente; los **protones**: Partículas cargadas positivamente y los **neutrones**: Partículas neutras.
- **Ión:** Son átomos o moléculas que pierden o ganan electrones por lo cual adquieren una determinada carga; si ganan electrones, adquieren carga negativa y se denominan **aniones** (Cl^- , NO_3^-); si pierden electrones, adquieren carga positiva y se llaman **cationes** (Na^+ , NH_4^+).

Los principales **cationes** que se encuentran en el suelo, en orden ascendente de magnitud de su carga, son: H^+ , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , Si^{4+} . Los **aniones** más frecuentes en el suelo, también en orden ascendente de la magnitud de su carga, son: OH^- , NO_3^- , Cl^- , HCO_3^- , H_2PO_4^- , H_2BO_3^- , F^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HPO_4^{2-} , MoO_4^{2-} , SeO_4^{2-} .

- **Molécula:** Es la mínima parte de una sustancia que está compuesta de un arreglo específico de átomos.
- **Sustancia iónica:** Sustancia que está compuesta de un arreglo específico de iones (Restrepo, 2001).
- **Número de oxidación :** También llamado **valencia**, es una medida de la capacidad que tiene un átomo para combinarse; su valor para un determinado átomo puede establecerse como el número de hidrógenos con los cuales se puede combinar o como el número de hidrógenos que fueron reemplazados en la molécula por otros átomos; por ejemplo, en el HCl , el Cl tiene un número de oxidación de -1 puesto que está combinado con un solo hidrógeno.
- **Mol:** Es el equivalente de tener 6.02×10^{23} unidades: átomos, iones o moléculas, de una sustancia; para expresarlas en unidades de masa, se hace igual al peso atómico, al peso fórmula o al peso molecular, respectivamente, expresados en gramos.
- **Peso atómico:** Es el peso promedio de todos los isótopos que tiene un átomo; se encuentra definido en la tabla periódica de los elementos químicos; se acepta que el peso de un átomo es igual al de los iones que forma, ya que la masa de los electrones es despreciable.
- **Peso fórmula:** Es la suma de los pesos atómicos de los iones que componen una sustancia iónica, expresado en gramos; si la sustancia es una molécula, el peso fórmula se llama **peso molecular** (Restrepo, 2001).
- **Equivalente:** Es el peso atómico o iónico, en gramos, dividido por el número de oxidación del átomo o del ión correspondiente; por ejemplo, el peso de un equivalente de Ca^{2+} es: 40 (peso atómico) $\div 2$ (número de oxidación) = 20 g.

En la Tabla 12.1 se presentan los valores de algunas de las propiedades definidas anteriormente, para los principales iones que se encuentran en el suelo.

TABLA 12.1. Algunas características químicas de los iones más frecuentes del suelo.

SÍMBOLO	ION	NÚMERO DE OXIDACIÓN	IÓNICO	PESO (g) DE 1 EQUIVALENTE
H_3O^+ , (H^+)	Hidronio	1	1.00	1.00
K^+	Potasio	1	39.10	39.10
Na^+	Sodio	1	22.99	22.99
NH_4^+	Amonio	1	18.00	18.00
Ca^{2+}	Calcio	2	40.08	20.04
Mg^{2+}	Magnesio	2	24.31	12.16
Mn^{2+}	Manganoso (II)	2	54.94	27.47
Cu^{2+}	Cobre (II) o Cúprico	2	63.54	31.77
Zn^{2+}	(Zinc) Cinc (II)	2	65.37	32.69
Fe^{2+}	Hierro (II) o Ferroso	2	55.85	27.93
Al^{3+}	Aluminio	3	26.98	8.99
Fe^{3+}	Hierro (III) o Férrico	3	55.85	18.62
Si^{4+}	Sílice	4	28.09	7.02
OH^-	Hidroxilo	1	16.99	16.99
NO_3^-	Nitrato	1	62.00	62.00
Cl^-	Cloruro	1	35.45	35.45
HCO_3^-	Bicarbonato	1	61.01	61.01
F^-	Fluoruro	1	19.00	19.00
SO_4^{2-}	Sulfato	2	96.06	48.03
CO_3^{2-}	Carbonato	2	60.01	30.01
BO_3^{3-}	Borato	3	58.81	19.60
PO_4^{3-}	Fosfato	3	94.97	31.66

2. SOLUCIONES

La química del suelo se desarrolla fundamentalmente obedeciendo a los principios de las soluciones. Una solución es una **mezcla homogénea** de moléculas, átomos o iones de dos o más sustancias diferentes; el hecho de que sea una mezcla homogénea implica que sus componentes no se separan en fases y que, por lo tanto, no pueden identificarse a simple vista.

Las soluciones adquieren propiedades diferentes a las de los componentes individuales que las formaron, aunque pueden conservar semejanzas con algunas de las propiedades del componente principal de la solución.

Las soluciones más comunes son las binarias, es decir, formadas por dos componentes; en ellas se presentan dos sustancias básicas: El soluto y el solvente; el **soluto** es la sustancia que se está disolviendo y el **solvente** es la sustancia que disuelve el soluto, es decir, es el medio de dispersión de la solución.

2.1. CONCENTRACIÓN DE UNA SOLUCIÓN

Una de las características que hay que definir de una solución es su concentración, es decir, determinar la cantidad de soluto que hay en una determinada cantidad de solvente; esta relación puede expresarse en términos gravimétricos (en peso) o volumétricos y hay varias formas de hacerlo.

2.1.1. Porcentaje (%)

Expresado **gravimétricamente (P/P)**, establece el peso que hay de soluto, con respecto al peso que se requiere de solvente, para ajustar un peso de 100; en una solución acuosa de NaCl al 10%, por peso, habrán 10 g de NaCl disueltos en 90 gramos de agua, por cada 100 g de solución.

Volumétricamente (V/V), es el método más empleado para hacer soluciones con sustancias líquidas, ya que es más fácil medir sus volúmenes que sus pesos; en este caso, el porcentaje indica el volumen de soluto que hay en 100 volúmenes de solución; por ejemplo, en una solución acuosa de isopropanol al 10% hay 10 mL de alcohol por cada 100 mL de solución.

También se pueden expresar los porcentajes combinando peso y volumen. Se expresa como (P/V) o como (V/P); en el primer caso es el peso de soluto por 100 volúmenes de solución: por ejemplo, una solución de NaCl al 10% (P/V) indica que hay 10 g de la sal en 100 mL de solución. La relación (V/P) indica que hay un determinado volumen de soluto por 100 g de solución: una solución de ácido acético al 10% (V/P) dice que hay 10 mL de ácido en 100 g de solución.

2.1.2. Molaridad (M)

Determina la concentración como el número de moles de soluto que hay en un litro de solución; en una solución acuosa 1 *M* de NaCl hay 1 mol de NaCl por litro de solución, es decir, hay 58.44 g de sal en un litro de solución; también puede decirse que en ese litro de solución se encuentran disueltos 6.02×10^{23} moléculas de NaCl o 6.02×10^{23} iones de Na^+ y 6.02×10^{23} iones de Cl⁻.

2.1.3. Molalidad (m)

Determina la concentración como el número de moles de soluto que hay disueltas en un kilogramo de solvente. En una solución acuosa 1 *m* de NaCl hay 1 mol (58.44 g) de NaCl disuelta en 1 kg de agua que es el solvente.

2.1.4 Normalidad (N)

Indica los equivalentes de soluto que hay disueltos en un litro de solución; una solución acuosa 1 *N* de NaCl tendrá 1 equivalente (58.44 g) de sal disuelto en 1 L de solución. Una solución acuosa 1 *N* de CaCl₂ tiene 1 equivalente ($110.98 \text{ g} \div 2 = 55.49 \text{ g}$) de cloruro por cada litro de solución.

2.1.5. Partes por millón (*ppm*) o por billón (*ppb*)

Estas unidades se utilizan para expresar bajas concentraciones; ellas implican que hay un determinado número de partes de soluto por un millón (10^6) o por un billón (10^{12}) de partes de solución; si en un suelo hay 10 ppm de fósforo, quiere decir que hay 10 kg de fósforo en 10^6 kg de suelo. En soluciones acuosas, ppm es equivalente a mg L⁻¹; si se tiene una solución acuosa con 2 ppm de KCl, se tienen 2 mg de KCl disueltos en 1 L de solución.

2.2. SOLVATACIÓN

Éste es el fenómeno mediante el cual interactúan las moléculas del solvente con las del soluto en una solución para formar unos arreglos cuyos componentes no están unidos muy firmemente; este mecanismo de formación de soluciones es muy importante en compuestos que forman iones al dissociarse o en moléculas **polares**: moléculas con un extremo con carga + y el otro con carga -.

Cuando se está trabajando con soluciones acuosas, el fenómeno de solvatación se conoce como **hidratación**, pudiéndose considerar un ión hidratado como una esfera rodeada por una capa de moléculas de agua.

Según Fassbender (1982), la cantidad de moléculas de agua que atrae un ión al hidratarse depende del tamaño de su carga (a mayor cantidad de cargas, mayor cantidad de hidratación) y, dentro de un grupo de iones con igual cantidad de cargas, el radio iónico define la cantidad de moléculas de hidratación que puede tener el ión, siendo mayor el número de moléculas en aquellos iones de menor tamaño, como puede comprobarse con los datos de la Tabla 12.2.

TABLA 12.2. Tamaño de diferentes iones y cantidad de agua de hidratación que pueden retener.

ION	RADIO (nm)*	MOLÉCULAS DE AGUA POR ION**	ION	RADIO (nm)*	MOLÉCULAS DE AGUA POR ION**
Li ⁺	0.068	6	Mg ²⁺	0.066	9 a 13
Na ⁺	0.097	4	Ca ²⁺	0.099	8 a 10
K ⁺	0.133	2.5	Ba ²⁺	0.134	6 a 8

* Tomados de Bohn et al (1993). ** Tomados de Scheffer y Schachtschabel, citados por Fassbender (1982).

El proceso de hidratación de los iones convierte la solución del suelo en una fina película acuosa que rodea las partículas sólidas del mismo, teniendo importantes efectos sobre los procesos de intercambio ya que, como puntualiza Fassbender (1982), a mayor agua de hidratación, menor es la fuerza de atracción que pueden ejercer los cambiadores (coloides) sobre los iones.

3. EL ENLACE QUÍMICO

Como se mencionó al principio de este capítulo, los átomos están compuestos de electrones, protones y neutrones, principalmente; debido a la presencia de cargas eléctricas diferentes en aquellas partículas, ellas se distribuyen ordenadamente en el átomo: En el centro (núcleo) se encuentran los protones y neutrones y, girando alrededor de ese núcleo, los electrones.

Los electrones se distribuyen alrededor del núcleo ocupando regiones específicas que se conocen como **niveles de energía**, los cuales son 7 como máximo; los niveles se subdividen en **subniveles** que se identifican con las letras minúsculas **s, p, d y f**; cada subnivel está compuesto por un número variable de **orbitales**, cuya cantidad máxima es 1, 3, 5 y 7 respectivamente; el número máximo de electrones que pueden acomodarse en cada subnivel es 2, 6, 10 ó 14, respectivamente (Keenan y Wood, 1971). Según Restrepo (2001), un orbital es la región del espacio donde hay una alta probabilidad de encontrar un electrón; él tiene energía y forma características.

Los electrones van ocupando los subniveles de adentro hacia fuera, completando los cupos máximos permisibles en cada uno de ellos y solamente los gases nobles: Helio (He), Neón (Ne), Argón (Ar), Criptón (Kr), Xenón (Xe) y Radón (Rn) tienen su último subnivel lleno con el número máximo de electrones permisible, característica que los hace prácticamente inertes desde el punto de vista de su reactividad química.

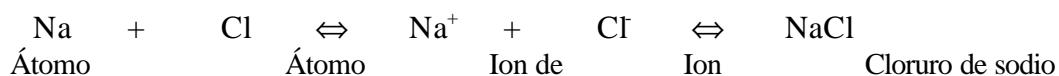
Con los demás átomos, quedan subniveles externos que no alcanzan a completar el número de electrones permisible, por lo cual tienen la posibilidad de reaccionar con otros átomos por medio de estos electrones externos; esta interacción de electrones genera unas fuerzas de atracción conocidas como **enlaces químicos**, que son las que mantienen unidos los átomos en los compuestos; los electrones involucrados en el enlace se llaman **electrones de valencia** (Restrepo, 2001).

Cuando dos átomos se combinan se genera una interacción entre los electrones de sus orbitales externos, lo cual conduce a la formación de un compuesto con mayor estabilidad química que la de sus componentes individuales; para lograr esta estabilidad, los átomos pueden compartir o pueden transferir los electrones externos, produciendo diferentes tipos de enlaces.

3.1. ENLACE IÓNICO

Es el enlace químico que se produce por transferencia de electrones de un ion a otro, es decir, que un ion pierde electrones y el otro los gana, con lo cual se genera la sustancia iónica final; también se le llama **electrovalente**, ya que su formación obedece a la diferencia de carga eléctrica.

Según Keenan y Wood (1971), cuando un elemento metálico se combina con uno no metálico, los átomos del metal pierden los electrones y los del no metal los ganan. En la formación de NaCl, desde el punto de vista de los enlaces químicos, se puede escribir la siguiente reacción:



de sodio de cloro sodio cloruro (con enlace
iónico)

Según Bohn et al (1993), la fuerza de estos enlaces es alta y carece de orientación, es decir, que se ejerce uniformemente en todas las direcciones; además, este tipo de enlace predomina en una alta cantidad de cristales inorgánicos. Según Besoain (1985) este tipo de enlace es frecuente en filosilicatos que presentan carga negativa que se encuentra balanceada por cationes ubicados en la entrecapa, como en las micas que tienen K^+ o Ca^{2+} en dicho espacio.

Bohn et al (1993) establecen una variante de los enlaces iónicos cuando en este enlace participa el hidrógeno con otros dos átomos de alta **electronegatividad** (capacidad de un átomo para atraer electrones) como oxígeno, fluor o nitrógeno, por ejemplo. Este enlace, llamado **enlace de hidrógeno**, es débil y participa en las estructuras cristalinas de los filosilicatos uniendo láminas de tetraedros con las de octaedros ubicándose entre los planos de los oxígenos y de los OH (Besoain, 1985).

3.2. ENLACE COVALENTE

Es el tipo de enlace que se forma entre átomos que comparten electrones; este enlace se produce, según Bohn et al (1993), entre átomos iguales, como en el caso del F_2 , o entre átomos de características eléctricas similares, como en FCl .

Bohn et al (1993) también apuntan que el enlace covalente es fuerte y que tiene orientación; además, aquellas moléculas unidas por este tipo de enlace tienen poca tendencia a ionizarse, aunque es común en radicales iónicos, como por ejemplo en el SO_4^{2-}

3.3. ENLACE DE van der WAALS

Éste es un enlace más entre moléculas que entre átomos. Se presenta entre moléculas que están en contacto pero que no están químicamente entrelazadas y es importante sólo cuando las moléculas están muy cercanas unas de otras: distancia $< 5\text{\AA}$ (Besoain, 1985).

Según Bohn et al (1993) es un enlace débil que se origina por cargas residuales de las moléculas; es frecuente entre moléculas orgánicas y es escaso entre los minerales del suelo, aunque puede presentarse en algunos filosilicatos uniendo las láminas que los componen.

Bohn et al (1993) y Besoain (1985) coinciden en afirmar que en la naturaleza se presentan, aparte de los enlaces definidos anteriormente, todas las posibles combinaciones entre ellos; además, la combinación de enlaces es la manera como se definen las estructuras de los minerales.

4. LOS COLOIDES DEL SUELO

Una partícula coloidal es aquella que posee un tamaño menor de 0.001 mm de diámetro (1000 nm), dimensiones responsables de la alta **superficie específica** que las caracteriza; poseen, además, **carga eléctrica** que les confiere una alta reactividad química.

La superficie específica de un cuerpo es el área total que expone, es decir, es el área externa que posee ese cuerpo por unidad de peso del mismo; así, la superficie específica de un cubo de 1 g de peso, será la suma de las áreas de las seis caras externas que posee ese cubo: $6L^2$ ($\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$), donde L es el lado del cubo.

En el suelo, los coloides están representados por las **partículas de tamaño arcilla** y por los **compuestos húmicos**. Son los responsables de la actividad química que se desarrolla en aquel, así como de buena parte de su comportamiento físico.

Los coloides del suelo pueden poseer dos tipos de carga: **Permanente** o **Variable**, mediante la acción de diferentes mecanismos y, según Yu (1997), los componentes del suelo que pueden aportar carga superficial son los minerales silicatados laminares, los óxidos libres y el humus. Los silicatos aportan principalmente carga permanente y negativa, excepto cuando son del tipo de arcillas 1:1; los óxidos de Fe, Al y Mn aportan carga variable, tanto negativa como positiva y el humus aporta carga variable, principalmente negativa.

4.1. LA CARGA PERMANENTE

La carga permanente es aquella carga que está presente siempre en el coloide, sin importar las condiciones del medio en el cual se encuentre, debido a que dicha carga la adquiere durante su proceso de formación.

El mecanismo que interviene en la producción de este tipo de carga es el de la **sustitución isomórfica**, el cual consiste en reemplazar el catión central de las unidades estructurales básicas de los filosilicatos (tetraedros y octaedros) por otros cationes de tamaño similar. La carga se genera cuando la sustitución se hace por un ion que tiene menor carga que el que es reemplazado.

Según Bohn et al (1993), la sustitución isomórfica se presenta entre iones cuya diferencia de tamaño entre los respectivos radios iónicos está entre 10 y 15%. Según Yu (1997), las sustituciones más frecuentes son las de Si^{4+} por Al^{3+} en tetraedros y las de Al^{3+} por Mg^{2+} , Fe^{2+} o por Fe^{3+} , en los octaedros.

Se observa, en el párrafo anterior, que en algunas sustituciones el catión sustituido tiene mayor carga que el catión que lo reemplazó, generándose un remanente de carga en la unidad estructural que fue sometida al proceso de sustitución, como se aclaró antes.

La carga permanente es el tipo de carga que predomina en los silicatos laminares 2:1 y 2:1:1, estando prácticamente ausente en los 1:1 y en los demás coloides del suelo. El tipo de minerales que produce carga permanente es dominante en los suelos de regiones templadas y, en estas regiones son escasos los contenidos de óxidos y de humus por lo que los suelos son de carga permanente. Este tipo de carga es característico de suelos de los órdenes Vertisol, Mollisol y de buena parte de los Alfisoles.

A continuación se ilustra con un ejemplo la producción de carga en un filosilicato mediante el mecanismo de la sustitución isomórfica producida en media celda unitaria de pirofilita (filosilicato 2:1 dioctaédrico), cuya fórmula para media celda unitaria es: $\text{Al}_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$. Si se realiza el balance de cargas del mineral anterior, se tiene:

ION	CARGA UNITARIA DEL ION	CARGA TOTAL POR ION	CARGA TOTAL POR MEDIA CELDA
Al_2	3+	6+	
Si_4	4+	16+	22+ (carga por cationes)
O_{10}	2-	20-	
$(\text{OH})_2$	1-	2-	22- (carga por aniones)
TOTAL			0 (carga neta por media celda)

Se aprecia en el balance anterior que la pirofilita es un mineral que no presenta ningún tipo de carga; si en este mineral se produce una sustitución isomórfica del 25 % del Al por Mg, se obtiene un nuevo mineral que corresponde a la siguiente composición:



Realizando nuevamente el balance de cargas se obtiene lo siguiente:

ION	CARGA UNITARIA DEL ION	CARGA TOTAL POR ION	CARGA TOTAL POR MEDIA CELDA
$\text{Al}_{1.5}$	3+	4.5+	
$\text{Mg}_{0.5}$	2+	1+	
Si_4	4+	16+	21.5+ (carga por cationes)
O_{10}	2-	20-	
$(\text{OH})_2$	1-	2-	22- (carga por aniones)
TOTAL			0.5- (carga neta por media celda)

El balance anterior muestra como el hecho de sustituir 25 % del Al presente en los octaedros de media celda de pirofilita produce un mineral con 0.5 cargas negativas en esa mitad de celda. De acuerdo con el tamaño y ubicación de la carga acumulada, el mineral resultante corresponde a una montmorillonita, filosilicato de tipo 2:1 del grupo de las esmectitas (ver Figura 1.9).

Aunque existe la posibilidad de que la sustitución isomórfica genere cualquier tipo de carga en los coloides en los cuales se produce, lo más común es que produzca una **carga neta negativa** en ellos.

4.2. LA CARGA VARIABLE

Este tipo de carga corresponde a aquella que se desarrolla en el coloide cuando cambian las condiciones ambientales del medio en el cual se encuentra.

La propiedad que más afecta los coloides del suelo, con respecto a su carga, es el **pH** por lo cual a esta carga variable también se la conoce como **carga dependiente del pH**, pues son los cambios en él los que la generan en mayor proporción.

En este tipo de carga hay también la posibilidad de generar cargas positivas o negativas, dependiendo del valor de pH que haya en el medio (solución del suelo), con respecto a un determinado valor de pH en el cual las partículas sólidas del suelo de carga superficial variable, no tienen carga neta; el valor del pH que produce dicha condición de carga se llama **punto de carga cero: PCC** o, en literatura en inglés, **PZC** (Juo y Adams, 1986; Zhang y Zhao, 1997).

La variación de la carga superficial de coloides de carga superficial variable se estudia mediante titulaciones potenciométricas como una función del pH y de la concentración de electrolitos; al graficar los resultados obtenidos con las titulaciones anteriores se obtienen curvas como las que se representan en la Figura 12.1.

En la Figura 12.1, el valor de pH que corresponde al punto de intersección entre las dos curvas de pH – Carga, se denomina **Punto de cero efecto de sales (PCES)** y, el pH que corresponde con la intersección de las curvas con el eje de cero carga se llama **Punto de carga neta cero (PCNC)**.

En los sistemas donde no hay coloides con carga permanente, no hay efecto de la concentración de los electrolitos y la intersección de las dos curvas pH – carga se produce sobre el eje de carga cero, con lo que se obtiene el PCC (Figura 12.1 b). Cuando en el sistema hay presencia de coloides con carga permanente, positiva o negativa, el punto de intersección se desplaza por encima o por debajo de dicho eje (Figuras 12.1a y 12.1c); en estos casos, Juo y Adams (1986) proponen llamar al PCES como **PCC “aparente”**. Según Zhang y Zhao (1997), entre mayor sea la diferencia entre los valores de PCNC y PCC, mayor cantidad de carga superficial permanente hay en el sistema.

Si el pH del medio se encuentra por encima del PCC, los coloides generarán cargas negativas y, si el pH es menor que el PCC, entonces se producirán cargas positivas en los coloides.

La carga variable es la que predomina en los minerales silicatados de tipo 1:1, en los sesquióxidos de Fe y de Al, en los aluminosilicatos no cristalinos y en los coloides orgánicos. Por lo anterior, es dominante, en general, en los órdenes Oxisol, Ultisol, Andisol y Espodosol; en Colombia también es frecuente en los Inceptisoles.

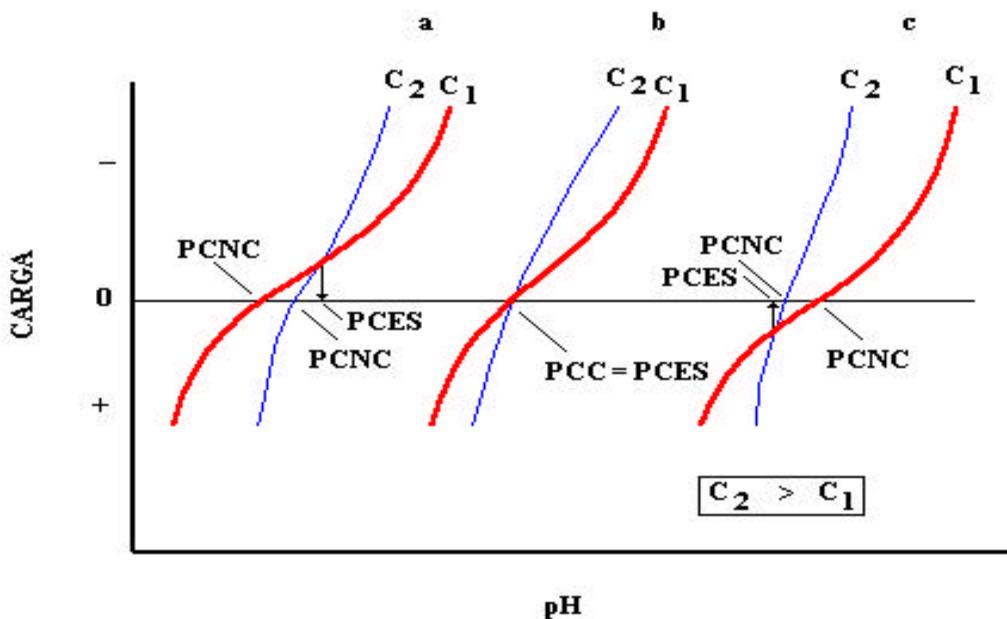


FIGURA 12.1. Representación de diferentes puntos de carga cero en el suelo (C: Concentración del electrolito) (Adaptada de Sposito, citado por Juo y Adams, 1986).

Según Zhang y Zhao (1997), la carga variable puede producirse mediante los siguientes mecanismos:

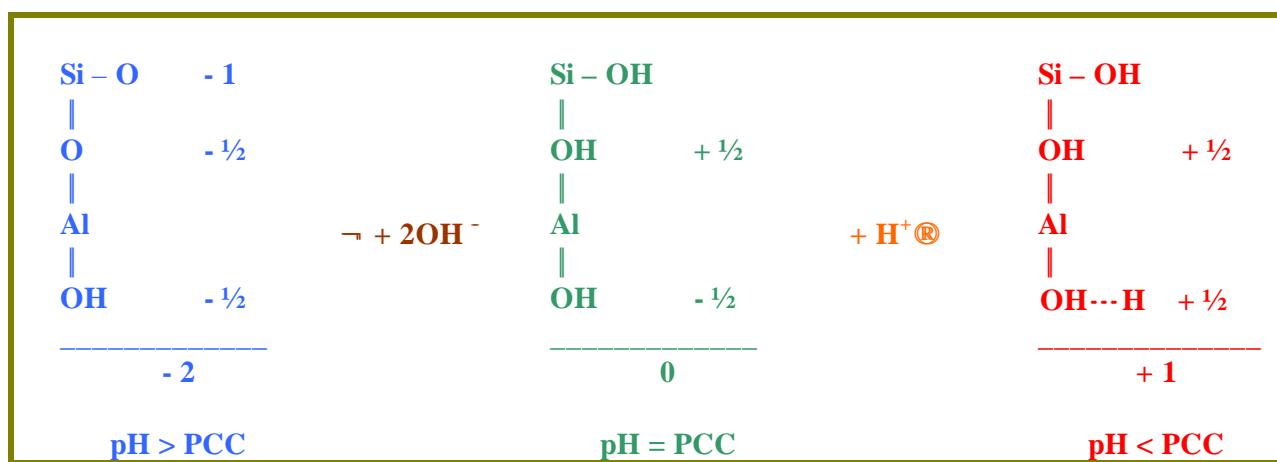
- En el humus, los grupos carboxilo e hidroxilo representan alrededor de 50% y 30% de los grupos funcionales totales, respectivamente y la carga que produce el humus es predominantemente variable y negativa, debida a la disociación de dichos grupos. Cuando el suelo presenta pH alto se puede presentar un aporte adicional de carga negativa por disociación de grupos amino.
- Las superficies de óxidos y de óxidos hidratados de Fe, Al y Si, poseen grupos hidroxilo unidos directamente al Fe, al Al o al Si, formando los grupos **ferrol** ($\text{Fe} - \text{OH}$), **aluminol** ($\text{Al} - \text{OH}$) y **silanol** ($\text{Si} - \text{OH}$), respectivamente, o pueden estar unidos a moléculas de agua mediante enlaces de hidrógeno. La carga superficial en dichos óxidos e hidróxidos se genera por disociación y pérdida del H^+ de los grupos hidroxilo: carga negativa, o por combinación de los grupos hidroxilo con iones H^+ de la solución del suelo: carga positiva.
- El alofano puede generar carga superficial negativa a altos valores de pH, por disociación de iones H^+ de los grupos silanol, así como carga superficial positiva, a bajo pH, por protonación de grupos aluminol. La ferrihidrita puede producir carga positiva por protonación de los grupos ferrol a pH bajo (Wada, citado por Nanzyo et al, 1993).
- En silicatos laminares tipo 1:1 (arcillas LAC, Capítulo 1), en los bordes y en las superficies externas de las láminas se puede generar carga variable, positiva o negativa. Bajo condiciones de $\text{pH} < \text{PCC}$, los grupos aluminol se protonan generándose una carga positiva por cada grupo. Bajo condiciones de $\text{pH} > \text{PCC}$, los dos OH unidos al Si se disocian produciendo dos cargas

negativas. En la Figura 12.2, se representan los mecanismos de producción de carga variable descritos anteriormente.

De todos los coloides que generan carga predominantemente variable, los coloides orgánicos son los que producen una mayor cantidad de carga, la cual es netamente negativa; con respecto a los coloides minerales, los aluminosilicatos no cristalinos son los coloides de mayor producción de carga variable, la cual es también netamente negativa; los sesquióxidos de Fe y de Al son los que menos carga variable negativa desarrollan, sobre todo si son cristalinos, pero son los que más carga positiva aportan al suelo, aunque con amplias variaciones en la cantidad debidas a la composición y al grado de cristalinidad que tengan.

Zhang y Zhao (1997) y Juo y Adams (1986) reportan los valores de PCC para algunos coloides inorgánicos comunes del suelo, los cuales se presentan en la Tabla 12.3. Obsérvese como en los sesquióxidos de Fe y de Al es relativamente fácil producir carga positiva, puesto que su PCC tiene valores que se encuentran muy por encima de los valores de pH que se presentan en los suelos donde ellos son comunes. Caso contrario ocurre con las esmectitas, pues el valor de PCC que tienen prácticamente no se obtiene en suelos minerales y, menos aun, en los que ellas se presentan en altas cantidades.

Los suelos con carga predominantemente variable son característicos de las regiones tropicales y de algunas subtropicales. En éstos predominan las canditas entre los filosilicatos y se presentan altas cantidades de óxidos de Fe y de Al, así como de humus, que aportan altas cantidades de carga variable.



a. Generación de carga variable de borde, en sistemas de silicatos laminares tipo 1:1 (Adaptado de Zhang y Zhao, 1997).



$\text{Al} - \text{O}^-$	- 1	$\rightarrow + \text{OH}^-$	$\text{Al} - \text{OH}$	0	$+ \text{H}^+ \circledR$	$\text{Al} - \text{OH} \cdots \text{H}^+$	+ 1
$\text{Fe} - \text{O}^-$	- 1		$\text{Fe} - \text{OH}$	0		$\text{Fe} - \text{OH} \cdots \text{H}^+$	+ 1
$\text{pH} > \text{PCC}$			$\text{pH} = \text{PCC}$			$\text{pH} < \text{PCC}$	

b. Generación de carga variable en sesquióxidos (Adaptado de Zhang y Zhao, 1997).

$\text{R} - \text{COO}^-$	- 1	$\text{R} - \text{COOH}$	0	Generalmente no produce carga +			
$\text{R} - \text{O}^-$	- 1	$\rightarrow + \text{OH}^-$	$\text{R} - \text{OH}$	0	+ $\text{H}^+ \circledR$	Generalmente no produce carga +	
$\text{R} - \text{NH}^-$	- 1		$\text{R} - \text{NH}_2$	0		$\text{R} - \text{NH}_2 \cdots \text{H}^+$	+ 1
$\text{pH} > \text{PCC}$			$\text{pH} = \text{PCC}$		$\text{pH} < \text{PCC}$		

c. Generación de carga variable en compuestos húmicos. **R** representa el resto de la molécula orgánica.

FIGURA 12.2. Representación esquemática de los mecanismos de producción de carga variable en los coloides del suelo.

4.3. IMPORTANCIA DE LA CARGA DE LOS COLOIDES DEL SUELO

En primer lugar, la presencia de cargas electrostáticas en la superficie de las partículas coloidales del suelo hace que éstas traten de neutralizarse atrayendo iones con carga contraria a la suya de la solución del suelo; con este mecanismo se evita que dichos iones sean lavados del suelo y, en el caso de que sean nutrientes para la planta, se le garantiza a ésta un buen abastecimiento nutricional.

Zhang y Zhao (1997) apuntan que las características de la carga superficial de los suelos afectan procesos del mismo como migración de iones, dispersión, floculación, hinchamiento y contracción.

TABLA 12.3. Punto de carga cero de algunos coloides inorgánicos comunes en el suelo, según varios autores citados por Zhang y Zhao (1997) y por Juo y Adams (1986).

COLOIDE	PCC
Gibsite	9.5
Goetita	8.1
Hematita	7.5
Ferrihidrita	6.9
Alofano	6.5
Caolinita	4.6
TiO_2	4.5
MnO_2	4
Esmectita	2.5
SiO_2	2

Tratando específicamente de los suelos de carga variable, Yu (1997) sostiene que estos suelos tienen la capacidad de retener aniones como nitratos y sulfatos, protegiéndolos contra la lixiviación, cosa que no es posible en los suelos de carga permanente.

Al observar los valores de PCC de los óxidos y de los aluminosilicatos no cristalinos en la Tabla 12.3 se puede apreciar que estos coloides generan principalmente carga positiva en las condiciones comunes de pH de la mayoría de los suelos; este comportamiento se encuentra relacionado con la fijación de algunos aniones como fosfatos, en los suelos en que son predominantes dichos coloides. Nótese también lo difícil que es producir carga positiva en un suelo dominado por arcillas 2:1.

Finalmente, las cargas electrostáticas superficiales presentes en los coloides del suelo no siempre son neutralizadas con iones benéficos para las plantas y/o los otros organismos que viven en o del suelo. Algunas veces son retenidos, por efecto de esas cargas, iones que pueden llegar a ser tóxicos para aquellos organismos como Cu, Pb, Ni, Cd, Co y V, hecho confirmado en suelos de la Sabana de Bogotá por Matamoros et al (1999), o como Se y Mo observados por García et al (1999) en suelos del municipio de Puerto Salgar, Cundinamarca.

RECORDAR

- Un anión es un ion que tiene carga negativa y un catión es un ion que tiene carga positiva.
- Las formas más frecuentes de expresar la concentración de las soluciones, en la ciencia del suelo, son: normalidad, ppm, molaridad y porcentaje.

- En los componentes del suelo se presentan enlaces iónicos, covalentes, de hidrógeno y de van der Waals.
- Los coloides del suelo corresponden a las partículas de tamaño arcilla y pueden ser de composición orgánica (humus) o inorgánica (minerales de arcilla y sesquióxidos de varios metales).
- Las propiedades más importantes de los coloides son: poseer alta superficie específica y tener carga superficial.
- La carga de los coloides del suelo puede ser permanente o variable.
- La carga permanente es principalmente negativa y es característica de filosilicatos tipo 2:1 y 2:1:1; es el tipo de carga dominante en Vertisoles, Mollisoles y muchos Alfisoles.
- La carga variable depende del pH del medio, puede ser negativa o positiva, es característica de filosilicatos tipo 1:1, de sesquióxidos, de aluminosilicatos no cristalinos y del humus y es el tipo de carga dominante en Oxisoles, Ultisoles, Andisoles, Espodosoles y muchos Inceptisoles.

BIBLIOGRAFÍA

BESOAIN, E. 1985. Mineralogía de arcillas de suelos. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José. Costa Rica. 1205 p.

BOHN, H.L., B.L. McNEAL y G.A. O'CONNOR. 1993. Química del suelo. Limusa. México. 370 p.

FASSBENDER, H. W. 1982. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. IICA. San José. Costa Rica. 398 p.

GARCÍA, C.; D. CABRERA; L. MEJÍA y A. ROJAS. 1999. Evaluación del contenido de selenio y molibdeno en suelos y pastos de dos fincas ganaderas de Puerto Salgar (Cundinamarca) y de sus posibles efectos en la población pecuaria. Suelos Ecuatoriales 29 (2): 150-154.

JUO, A. S. R. and F. ADAMS. 1986. Chemistry of LAC soils. In: Proceedings of a Symposium on Low Activity Clay (LAC) Soils. SMSS Technical Monograph N° 14. Las Vegas. pp: 37-62.

KEENAN, CH. W. y J. H. WOOD. 1971. Química general universitaria. Compañía Editorial Continental S. A. México. 951 p.

MATAMOROS, A.; O. VARGAS y L. MEJÍA. 1999. Especiación química del Pb, Ni, Cr, Cu, Cd, Co y V en dos suelos naturales y en un antrosol agrícolas contaminados por riego con las aguas del río Bogotá en su cuenca alta. Suelos Ecuatoriales 29 (2): 143-149.

NANZYO, M.; R. DAHLGREN and S. SHOJI. 1993. Chemical characteristics of volcanic ash soils. In: Volvanic ash soils: Genesis, Properties and Utilization. Developments in Soil Science 21. Elsevier. Amsterdan. pp . 145-187.

RESTREPO, J. 2001. Fundamentos de química general. 1^a Ed. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 200 p.

YU, T. R. 1997. Introduction. In: Chemistry of Variable Charge Soils. Yu T. R. editor. Oxford University Press Inc. New York. pp: 3-16.

ZHANG, X. N. y A. Z. ZHAO. 1997. Surface charge. In: Chemistry of Variable Charge Soils. Yu T. R. editor. Oxford University Press Inc. New York. pp: 17-63.

AUTOEVALUACIÓN

1. Enumere 5 aniones y 5 cationes del suelo.
2. ¿Cuál es la diferencia entre elemento y molécula?.
3. ¿Qué es una solución?. ¿Cuál es su principal característica y qué implica ella?.
4. Definir molaridad, normalidad y partes por millón.
5. ¿Cuándo una solución normal y una molar, de los mismos solutos y solventes, tienen iguales cantidades de soluto en un determinado volumen de solución?.
6. ¿De qué depende la cantidad de moléculas de hidratación que pueda tener un ión?.
7. Definir los tres tipos generales de enlace químico descritos.
8. ¿Qué es un coloide y cuáles son sus propiedades más importantes?.
9. ¿Qué es la sustitución isomórfica y cuál es su importancia en los coloides del suelo?.
10. ¿Qué es el punto de carga cero?.
11. ¿Cómo se relaciona el pH del medio con la formación de carga positiva en los coloides del suelo?.
12. ¿Cuáles coloides del suelo presentan carga permanente y cuáles carga variable?.
13. ¿Qué mecanismos producen carga variable en los coloides del suelo?.
14. ¿Cuál grupo de coloides del suelo es el que produce mayor cantidad de carga variable?.
15. Diga tres órdenes de suelos donde sea importante la carga variable y dos donde lo sea la carga permanente.

EVALUACIÓN

1. ¿Cuál es el peso molecular del ácido sulfúrico?. (R: 98 g).
2. Una solución acuosa contiene 4 g de H_2SO_4 en 200 mL. ¿Cuál es la molaridad y la normalidad de dicha solución? (R: 0.2 M, 0.41 N).
3. ¿Cuál es la molaridad de una solución 0.15 N de H_3PO_4 y la de una solución 0.15 N de H_2PO_4^- ? (R: 0.05 M, 0.075 M, respectivamente).
4. ¿Cuántos mL de etanol comercial se deben utilizar para preparar 500 mL de una solución de etanol 5 M?. (R: 145.5696 mL).
5. De una solución 10 M de etanol, ¿cuántos mL se deben tomar para preparar 300 mL de una nueva solución de etanol 6 M?. (R: 180 mL).
6. ¿Cuántos gramos de urea se deben pesar para preparar 600 L de una solución al 4 % de N?. (R: 51428.6 g).
7. En los primeros 20 cm de un Andisol ($\text{Da} = 0.8 \text{ Mg m}^{-3}$), ¿cuántos kg ha^{-1} hay de P si el análisis de laboratorio reporta un contenido de 16 ppm de P_2O_5 ? (R: 11.1714 kg).
8. Un Andisol ($\text{Da} = 0.8 \text{ Mg m}^{-3}$) se caracteriza por una muy alta capacidad de fijar el fósforo, a tal punto que para un cultivo retirar 10 a 15 kg de este nutriente, se requieren fertilizaciones hasta de 400 kg ha^{-1} ó más. ¿En cuánto cambia la cantidad de P disponible en el suelo, en los primeros 20 cm, cuando se aplican 400 kg de ácido fosfórico (H_3PO_4), si el poder de fijación de fósforo del mismo es del 95 %?. (R: Se incrementa en 3.9514 ppm).
9. Calcular el incremento en superficie específica que se produce al fraccionar una partícula de arena, de forma cúbica, con 2 mm de lado, hasta llevarla a partículas de tamaño arcilla, también cúbicas, con 2 μm de lado. (R: 23 976 mm^2). Realizar el mismo cálculo pero tomando las partículas esféricas, con diámetro de 2 mm y 2 μm para la arena y la arcilla, respectivamente. (R: 12 553.4336 mm^2).

EL INTERCAMBIO IÓNICO

CAPÍTULO 13

CONTENIDO

- ❖ Factores que controlan el intercambio iónico
 - Las propiedades del cambiador
 - Las propiedades del ión
- ❖ Capacidad de intercambio catiónico (CIC)
 - Determinación de la CIC del suelo
 - Determinación de la CIC a pH 8.2
 - Determinación de la CIC a pH 7
 - Determinación de la CIC al pH del suelo
 - Determinación de la CIC por colorimetría
 - Aplicaciones de la CIC del suelo
 - En la caracterización general de la carga del suelo
 - En la fertilidad de suelos
 - En la clasificación de suelos
- ❖ Capacidad de intercambio aniónico (CIA)
- ❖ Adsorción específica o selectiva
- ❖ La doble capa difusa

OBJETIVOS

- ❖ Conocer el fenómeno del intercambio iónico en los suelos
- ❖ Conocer los métodos más utilizados para evaluar la CIC del suelo
- ❖ Aprender a manipular información relacionada con la CIC del suelo y con sus aplicaciones

E

l intercambio iónico es un proceso **reversible, estequiométrico y rápido** mediante el cual la fase sólida retira y retiene algunos iones de la solución del suelo, al tiempo que le entrega cantidades equivalentes de otros, para establecer un nuevo equilibrio entre las 2 fases.

Los procesos de intercambio mencionados se dan tanto con cationes como con aniones y la retención se lleva a cabo debido a la presencia de cargas electrostáticas en los coloides del suelo y en los iones presentes en la solución del mismo, los cuales se atraen hacia los sitios de carga contraria para neutralizarse. Este tipo de atracción electrostática se llama **adsorción**.

1. FACTORES QUE CONTROLAN EL INTERCAMBIO IÓNICO

La cantidad de iones que pueden adsorber los coloides del suelo depende de la cantidad de carga superficial que ellos tengan y la fuerza con que son retenidos depende de la densidad de carga del coloide (Zhang y Zhao, 1997). Recuérdese, además, del capítulo anterior cómo el pH controla la carga superficial generada por los coloides del suelo. Los procesos de intercambio iónico se ven afectados, tanto por las propiedades del cambiador, como por las del ion.

1.1. LAS PROPIEDADES DEL CAMBIADOR

El cambiador en el suelo corresponde a las partículas sólidas del mismo que tienen la posibilidad de intervenir en los procesos de intercambio, es decir, a los coloides minerales y orgánicos de aquél.

Las propiedades de los coloides que afectan el intercambio iónico en el suelo son, según Zhang y Zhao (1997):

- Cantidad y Tipo de aquellos presentes en el suelo, es decir, la cantidad (concepto textural) y tipo de arcilla (concepto mineralógico) y la cantidad y tipo de materia orgánica activa del mismo. Lo relacionado con estos tópicos se ampliará en numerales posteriores.
- Superficie específica que presenten los coloides.
- Densidad de carga de los coloides.

La superficie específica, como se vio en el Capítulo 12, es función directa del tamaño de las partículas, lo que supone que los coloides deben presentar un alto valor en esta propiedad; el efecto que tiene el tamaño de las diferentes partículas del suelo en sus propiedades fue analizado en el Capítulo 7: la textura del suelo.

La densidad de carga, o sea la cantidad de carga que tiene una partícula por unidad de superficie que posea (Fassbender, 1982; Zhang y Zhao, 1997), se determina con la siguiente relación:

$$\text{Densidad de carga} = \frac{\text{Cantidad de carga}}{\text{Superficie específica}}$$

[13.1]

Las unidades en las cuales se expresa la densidad de carga son: **cmol m⁻²** o **meq m⁻²**. En la Tabla 13.1 se presentan los valores de cantidad de carga y de superficie específica que presentan algunos componentes coloidales comunes en el suelo, tomados de Fassbender (1982), de Bohn et al (1993) y de Zhang y Zhao (1997).

TABLA 13.1. Valores de cantidad de carga, superficie específica y densidad de carga (la más frecuente) de algunos coloides del suelo. (Tomados de Fassbender, 1982; Bohn et al, 1993 y Zhang y Zhao, 1997).

COLOIDE	CANTIDAD DE CARGA*	SUPERFICIE ESPECÍFICA	DENSIDAD DE CARGA (cmol m ⁻²)x10 ⁻⁷
	[cmol kg ⁻¹]	(m ² g ⁻¹)	
Caolinita	9	7 a 30	1.286 a 0.3
Montmorillonita	100	766 a 810	0.131 a 0.124
Vermiculita	125	~ 750	0.167
Illita	30	67 a 100	0.448 a 0.3
Clorita	30	~ 100	0.3
Alofano	80	260 a 450	0.308 a 0.178

* Puede tomarse como promedio y en los coloides mencionados la carga es negativa.

Zhang y Zhao (1997) diferencian dos tipos de superficies en las que se pueden ubicar las cargas de los coloides: una interna, que corresponde a la superficie de las caras de las láminas de los paquetes cristalinos de minerales de arcilla expansibles y otra externa, que corresponde a las superficies de los otros sólidos del suelo. La cantidad de superficie interna puede ser tan grande como 700 m² g⁻¹ de material, en la montmorillonita o 400 m² g⁻¹ en la halloysita hidratada. La superficie activa de los filosilicatos de tipo 1:1, de la illita y del alofano es toda externa.

1.2. LAS PROPIEDADES DEL IÓN

Ji y Li (1997) destacan que la fuerza de atracción entre una superficie cargada y un ión es directamente proporcional a la carga del ión e inversamente proporcional a la distancia al cuadrado que hay entre la superficie adsorbente y el centro del ión. Además, llaman la atención acerca del hecho de que los iones en el suelo se encuentran hidratados y que, por lo tanto, la cantidad de moléculas de agua que rodea el ión puede alterar el comportamiento de la fuerza de adsorción que ejerce la superficie cargada sobre el ión.

La energía de hidratación en un ión es directamente proporcional al cuadrado de la carga del ión e inversamente proporcional a su tamaño (Ji y Li, 1997). De lo expuesto anteriormente se puede decir entonces que las propiedades de los iones que más intervienen en los procesos de intercambio son:

- La carga del ión: Aquellos iones con carga mayor son retenidos con mayor firmeza por los cambiadores del suelo, cuando tienen igual tamaño.
- El tamaño del radio hidratado del ión: Al aumentar la cantidad de moléculas de agua que rodean el ión disminuye la fuerza de la retención que ejerce sobre él el coloide.
- El tamaño del radio cristalográfico del ión: Hay una relación inversa entre este tamaño y el tamaño del ión hidratado por lo cual, a mayor tamaño del ión deshidratado, mayor es la fuerza con la cual es retenido el ión, puesto que hay menor cantidad de moléculas de agua interpuestas

entre el cambiador y el ión; el radio cristalográfico de algunos iones comunes en el suelo se presenta en la Tabla 13.2.

- Adicionalmente, la concentración del ión: Debido a la ley de acción de masas, aquel ión que se encuentre en mayor cantidad, será el que se retendrá preferencialmente en el suelo, en ausencia de adsorción selectiva.

TABLA 13.2. Radio cristalográfico y radio hidratado de algunos iones comunes en el suelo (Tomados de Bohn et al, 1993 y de Ji y Li, 1997).

IÓN	RADIO CRISTALOGRÁFICO (nm)	RADIO HIDRATADO (nm)
Na ⁺	0.097	0.358
K ⁺	0.133	0.331
NH ₄ ⁺	0.143	-
Mg ²⁺	0.072	0.428
Fe ²⁺	0.076	-
Ca ²⁺	0.099	0.412
Al ³⁺	0.054	0.475
Fe ³⁺	0.064	-
Si ⁴⁺	0.042	-
O ²⁻	0.132	-
F ⁻	0.136	0.352
Cl ⁻	0.181	0.332
NO ₃ ⁻	0.264	0.335
SO ₄ ²⁻	0.290	0.379

2. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO (CIC)

Es la medida de la capacidad que posee un suelo de adsorber cationes y es equivalente a la carga negativa del suelo. Esta propiedad es la que define la cantidad de sitios disponibles para almacenar los cationes en el suelo. Los cationes que son sometidos a esta retención quedan protegidos contra los procesos que tratan de evacuarlos del suelo, como la **lixiviación**, evitando así que se pierdan nutrientes para las plantas. Además, como la retención se hace superficialmente obedeciendo a diferencias de carga electrostática, los cationes adsorbidos pueden ser intercambiados por otros de la solución del suelo, convirtiéndose en **cationes intercambiables**, necesarios en los procesos de nutrición de la planta.

Los cationes más importantes en los procesos de intercambio catiónico, por las cantidades de ellos que participan en dichos procesos, son Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ y Na⁺ (las **bases del suelo**) y NH₄⁺; en suelos ácidos, a partir de ciertos valores de pH, como se verá más adelante, el Al³⁺ juega un papel muy importante en el complejo de intercambio catiónico del suelo constituyendo, junto con el H⁺, la **acidez intercambiable** del mismo.

La CIC del suelo se expresa en **cmol (+) kg⁻¹ de suelo** o en **meq (100 g de suelo)⁻¹** (ambas unidades son numéricamente iguales) y depende de la cantidad y tipo de coloides que tiene:

$$\text{CIC del suelo} = \text{CIC de la arcilla} + \text{CIC de la materia orgánica}$$

Como puede verse en la Tabla 13.3, la CIC de los diferentes coloides del suelo es muy variable. El efecto mencionado se observa al comparar las Figuras 13.1 y 13.2, las cuales representan la cantidad y tipos de CIC evaluadas en dos suelos: un Mollisol (Fluventic Haplustoll) y un Andisol (Typic Placudand), respectivamente; el Mollisol es de clima cálido seco (Santafé de Antioquia), con alto contenido de esmectitas y bajo contenido de materia orgánica, en tanto que el Andisol es de clima frío húmedo (Alto de Minas, Antioquia), con abundante alofano y alto contenido de materia orgánica.

El valor que toma la CIC de un suelo también está fuertemente afectado por el valor del pH al cual se hace la determinación, aumentando el valor de aquella al aumentar el pH, como puede verse en la Figura 13.3 y en la Tabla 13.4; Uehara y Keng (1974) encontraron que cuando el contenido de arcilla y de sesquióxidos de Fe y Al aumenta en el suelo, hay un mayor aumento de la CIC del mismo por unidad de cambio que se da en el pH por encima del PCC.

TABLA 13.3. Valores de CIC de diferentes coloides comunes en suelos (Datos tomados de Sánchez, 1981; Fassbender, 1982; Galiano, 1991 y Bohn et al 1993).

COLOIDE	CIC [cmol (+) kg ⁻¹ de material]	
	RANGO DE VALORES	VALOR PROMEDIO
Vermiculita	100 - 150	125
Montmorillonita	80 - 120	100
Ilita	20 - 40	30
Clorita	10 - 50	30
Caolinita	3 - 15	9
Haloisita	5 - 10	7.5
Sesquióxidos de Fe y Al amorfos	3 - 10	6.5
Alofano	10 - 150	80
Coloide orgánico	100 - 300	200

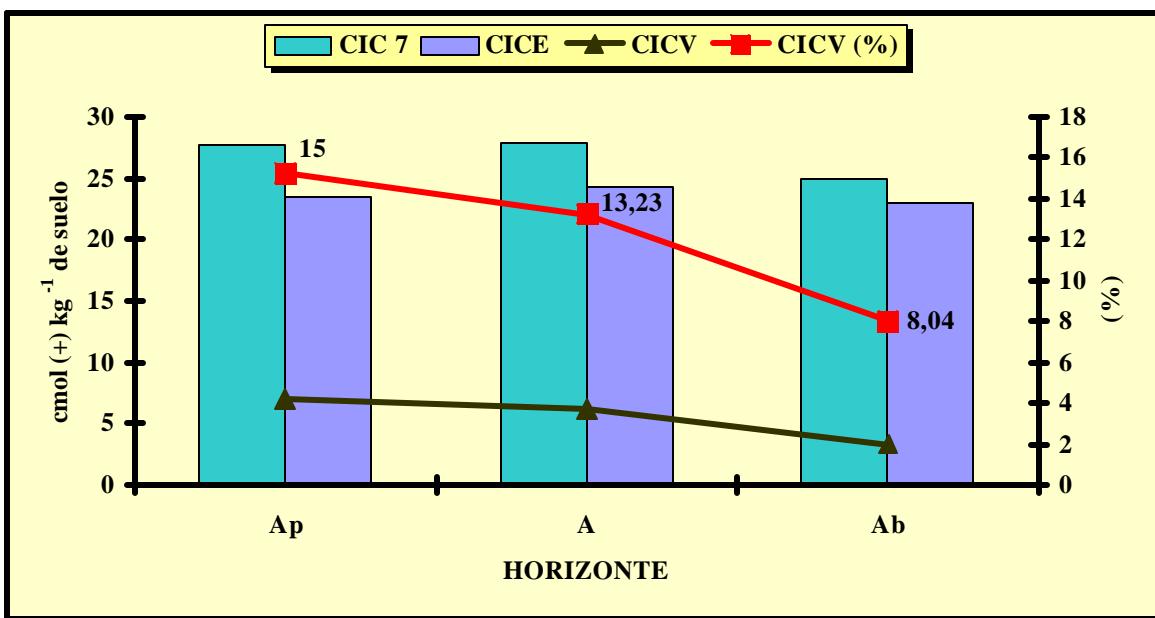


FIGURA 13.1. Caracterización de la capacidad de intercambio catiónico de un Fluventic Haplustoll de clima cálido seco en el departamento de Antioquia (Resultados de Jaramillo, D. F. 1998, sin publicar).

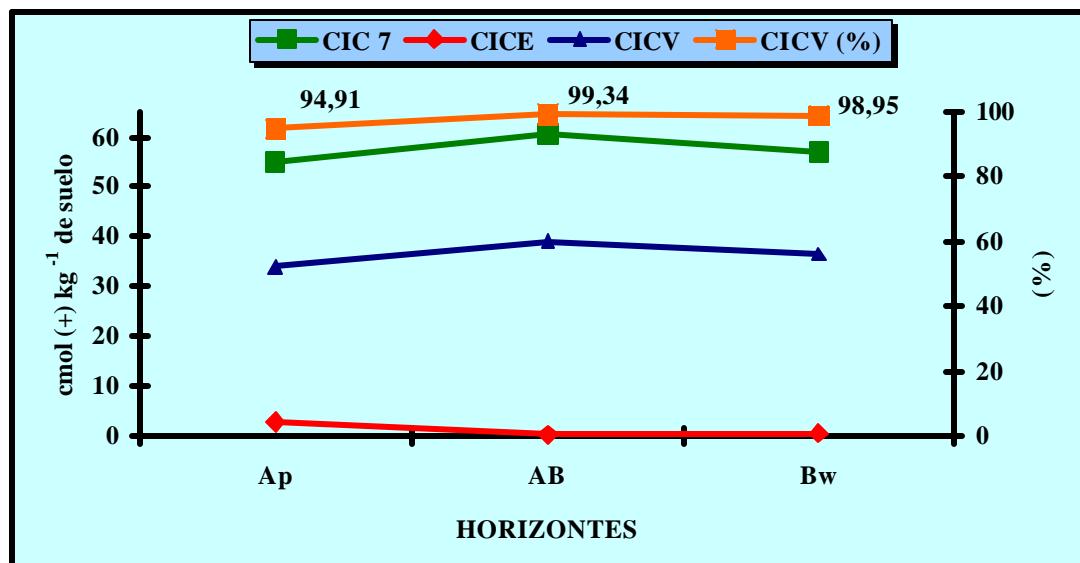


FIGURA 13.2. Caracterización de la capacidad de intercambio catiónico de un Typic Placudand de clima frío húmedo del departamento de Antioquia (Resultados de Jaramillo, D. F. 1998, sin publicar).

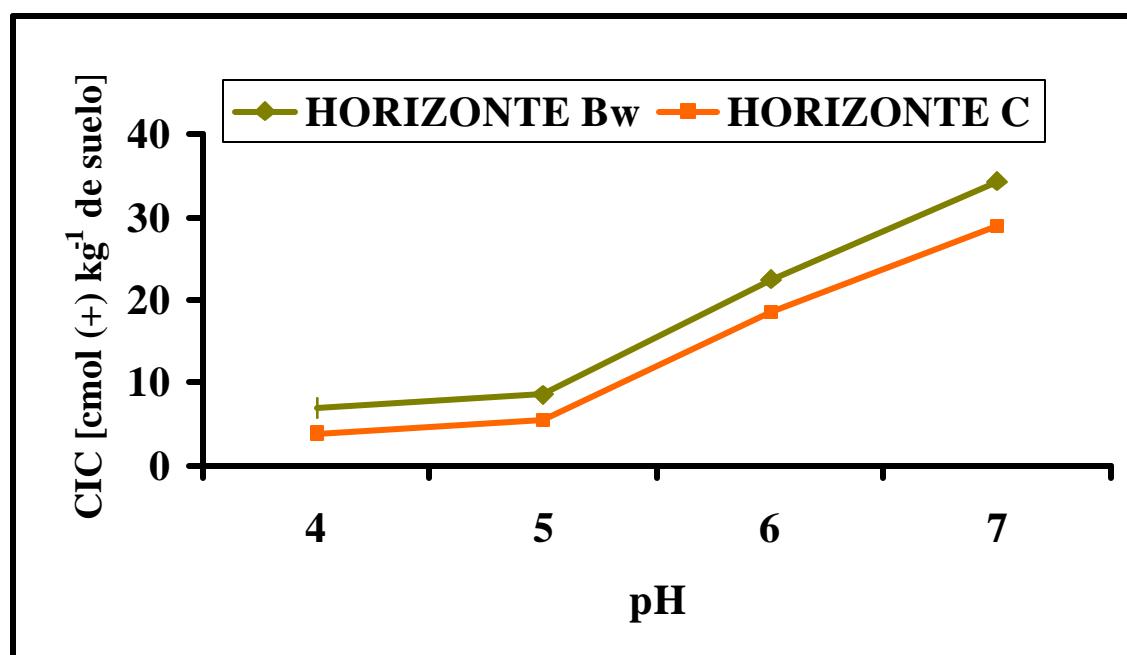


FIGURA 13.3. Valores de CIC de los horizontes Bw (28% de Ar y 0.8% de materia orgánica) y C (17% de Ar y 0.2% de materia orgánica) de un Typic Eutropepts isotérmico derivado de anfibolita, determinados con NH₄OAc 1N, a diferentes valores de pH (promedios de 3 determinaciones) (Resultados de Jaramillo, D. F. 1990, sin publicar).

Al observar las gráficas de las Figuras 13.1 y 13.2 se puede apreciar la gran diferencia que hay entre las cargas variables que presentan los suelos analizados; mientras que en el Mollisol la carga variable representa, en el peor de los casos, un 15% de la CIC 7 del suelo, en el Andisol ese porcentaje es mayor al 95% en todos los horizontes.

En la Tabla 13.4 puede verse el efecto simultáneo que tienen el tipo y contenido de coloides y el cambio de pH en el comportamiento de la CIC del suelo. Como se demostró antes, la CIC del suelo es afectada fuertemente por el pH al cual se hace la determinación, razón por la cual se han estandarizado varios métodos para evaluar esta propiedad.

TABLA 13.4. Relación entre la CIC y el pH en un Typic Hapludults arcilloso fino, mezclado, isohipertérmico de la Amazonia colombiana (Resultados inéditos suministrados por el doctor Leonidas Mejía, quien fue uno de los que describieron el perfil del suelo en 1972).

PROFUN- DIDAD (cm)	pHEN AGUA 1:1 V:V	CONTENIDO (%) DE :		TIPO DE ARCILLA*	CIC [cmol (+) kg ⁻¹ de suelo] AL pH:		
		Arcilla	Materia orgánica		Del suelo**	7.0	8.2
0 - 13	4.4	23.5	2.43	K3M1V1	6.5	9.2	12.7
13 - 52	4.6	23.6	0.50	K4M1V1	5.0	6.2	8.0
52 - 105	4.7	40.9	0.22	K3M1V1	9.7	11.5	13.2
105 - 142	4.8	46.3	0.17	K3M1V1	13.3	16.0	17.2
142 - 200	5.0	38.6	0.12	K3M2V1	16.9	19.5	20.4

* K: Caolinita
M: Montmorillonita
V: Vermiculita

1: < 10 %
2: 10 - 25 %
3: 25 - 50 %
4: > 50 %

** Equivale a la CICE.

2.1. DETERMINACIÓN DE LA CIC DEL SUELO

Como se mencionó anteriormente, hay una fuerte dependencia de la CIC del pH del suelo y, por lo tanto, en el ámbito del laboratorio, del pH de la solución con la cual se hace la saturación inicial del suelo. Para obviar este problema se han estandarizado varios métodos para determinar la CIC del suelo, tratando de tener alternativas para la amplia variedad de suelos que se pueden encontrar.

Fundamentalmente se han establecido tres condiciones para hacer la determinación de la CIC del suelo, dependiendo de su pH:

- A pH 8.2, útil para suelos alcalinos.
- A pH 7, para suelos que presentan una reacción entre ligeramente ácida y ligeramente alcalina, muy adecuada para suelos con carga permanente.
- Al pH del suelo para aquellos suelos que son ácidos y cuya carga es predominantemente variable.

En la determinación de la CIC del suelo, con cualesquiera de los métodos disponibles, se siguen fundamentalmente tres etapas en todos los métodos (García, 1989):

- Etapa de saturación del suelo con soluciones salinas de un determinado catión.
- Etapa de lavado del exceso de la solución saturadora.

- Etapa de determinación del catión indicador extraído del suelo.

2.1.1. Determinación de la CIC a pH 8.2

Con esta determinación se evalúa la **CIC total del suelo** (Sánchez, 1981). Hay varias alternativas analíticas para llevar a cabo esta evaluación, entre las que pueden destacarse el método del acetato de sodio (García, 1989; Motta et al, 1990), el método de Polemio y Rhoades (García, 1989) y el método por suma de cationes (Soil Survey Laboratory, SSL, 1996).

De los métodos enunciados en el párrafo anterior, a continuación se detalla el método de la suma de cationes, el cual consiste en sumar la cantidad de bases extraídas del suelo mediante lavado con acetato de amonio (NH_4OAc) 1N a pH 7, con la acidez extraída con cloruro de bario-trietanolamina ($\text{BaCl}_2\text{-TEA}$) tamponada a pH 8.2.

Los pasos a seguir para determinar el contenido de bases del suelo, según Motta et al (1990), son:

- Se pesan 5 g de suelo seco al aire y tamizado a 2 mm.
- Se coloca la muestra de suelo en un erlenmeyer de 100 mL, se le adicionan 25 mL de NH_4OAc 1N a pH 7 y se agita el conjunto por 30 min.
- Se deja reposar 10 a 15 min el material preparado en el paso anterior. Se filtra, se lava con pequeñas porciones de acetato y se recoge el filtrado en un balón de 200 mL.
- En el filtrado se determinan los contenidos de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ , según los métodos descritos por Motta et al (1990).
- Se calcula el contenido de bases totales (BT) con la Fórmula [13.2].

$$BT = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+ \quad [13.2]$$

Para establecer la acidez extractable, se llevan a cabo las siguientes acciones, según Motta et al (1990):

- Se pesan 5 g de suelo seco al aire y tamizado a 2 mm.
- Se coloca la muestra en un erlenmeyer de 125 mL. Se le adicionan 15 mL de solución amortiguadora ($\text{BaCl}_2\text{-TEA}$ a pH 8.2). Se tapa y se deja en reposo el conjunto durante 30 min, agitando ocasionalmente.
- Se filtra lo anterior, utilizando 35 mL de solución amortiguadora para transferir todo el suelo al embudo.
- Se lava el suelo en el embudo con 100 mL de solución de reemplazo (solución amortiguadora enriquecida en BaCl_2), adicionándola en pequeñas porciones sin dejar secar el suelo. Se recoge este filtrado, junto con el anterior.

- Se prepara un blanco con 100 mL de solución de reemplazo, 50 mL de solución amortiguadora, 2 gotas de bromocresol verde y 10 gotas de indicador mixto.
- Se titula el blanco con HCl 0.2N, escogiendo el punto final de la titulación entre el verde y el púrpura.

- Se agregan al filtrado del suelo las mismas cantidades de indicador que al blanco y se titula como se hizo con éste.
- Se calcula la acidez extractable (AE) con la Fórmula [13.3].
- Se calcula la CIC a pH 8.2, mediante la ecuación [13.4].

$$AE = \frac{V - V_1}{\text{peso muestra}} \times N \times 100 \quad [13.3]$$

Donde: V: mL HCl gastados en la titulación del blanco.

V₁: mL de HCl gastados en la titulación de la muestra.

N: normalidad del HCl.

$$CIC\ 8.2 = BT + AE \quad [13.4]$$

Para suelos alcalinos se ha recomendado el método del acetato de sodio a pH 8.2, el cual fue evaluado en suelos salinos y sódicos de Valle del Cauca por Gómez y García (1994), quienes encontraron que fue el mejor de los métodos evaluados para determinar la CIC en este tipo de suelos. García (1989) describe el método como sigue:

- Se pesan 5 g de suelo seco al aire y tamizado a 2 mm y se colocan en un erlenmeyer de 200 mL.
- Se agregan 30 mL de una solución de acetato de sodio (NaOAc) 1M a pH de 8.2 y se agita 10 minutos el conjunto, luego se filtra.
- Se lava el suelo 5 veces con porciones de 20 mL de NaOAc 1M y se descarta el filtrado.
- Luego, se lava el suelo 10 veces con porciones de 5 mL de etanol al 95%.
- Se vuelve a lavar el suelo 5 veces con porciones de 20 mL de NH₄OAc 1M a pH 7, recolectando el filtrado en un balón de 250 mL y se completa el volumen con agua destilada.
- Se determina el contenido de Na en el filtrado por absorción atómica.
- Se calcula la CIC del suelo con la relación [13.5].

$$CIC\ 8.2 = \frac{LC \times 250}{\text{peso muestra} \times 10 \times 23} \quad [13.5]$$

Donde LC: lectura en el equipo de absorción atómica en mg L⁻¹.

El IGAC describe una variante del método del acetato de sodio en la cual el contenido de Na se determina por fotometría de llama (Motta et al, 1990).

2.1.2. Determinación de la CIC a pH 7

Ésta es la determinación de la CIC que más se ha utilizado en los análisis de caracterización estándar de suelos.

Para esta evaluación hay también varias alternativas analíticas propuestas por el Laboratorio de Levantamiento de Suelos del USDA (SSL, 1996), aunque el método del NH₄OAc 1N y neutro es el más utilizado y, por esta razón, se describe a continuación.

Motta et al (1990) plantean los siguientes procedimientos para llevar a cabo la determinación de esta CIC:

- Se pesan 5 g de suelo seco al aire y tamizado a 2 mm.
- Se coloca la muestra de suelo en un erlenmeyer de 100 mL, se le agregan 25 mL de NH₄OAc 1N a pH 7 y se agita 30 min el conjunto.
- Se filtra el conjunto anterior haciendo pequeños lavados con acetato; si se quieren determinar las bases intercambiables, se recoge el filtrado en un balón de 200 mL y se procesa aparte con ese fin.
- Se lava el exceso de amonio con 50 mL de alcohol etílico, aplicando 5 porciones de 10 mL al suelo; los filtrados que se producen en esta etapa se desechan.
- Se lava nuevamente el suelo con 5 porciones de 10 mL de NaCl al 10 % y se recoge el filtrado.
- Se le agregan al filtrado 10 mL de formol del 40% y unas gotas de fenolftaleína; paralelamente, se prepara un blanco con agua destilada, NaCl y formol.
- Se titulan el filtrado y el blanco con NaOH 0.1 N, hasta obtener una coloración rosada pálida.
- Se calcula la CIC del suelo con la Fórmula [13.6].

$$CIC\ 7.0 = \frac{(mLm - mLb) N \times 100}{Peso\ muestra} \quad [13.6]$$

Donde: mLm: mL de NaOH gastados en la titulación del extracto de la muestra.

mLb: mL de NaOH gastados en la titulación del blanco.

N: normalidad del NaOH.

2.1.3. Determinación de la CIC al pH del suelo

Es llamada CIC permanente del suelo por Sánchez (1981) y **CIC real o efectiva (CICE)** por varios autores citados por Galiano (1991). Se puede medir desarrollando el método del NH₄OAc 1N, pero ajustando el pH de la solución al valor del pH del suelo.

El procedimiento anterior implica una gran limitación para su uso, pues impone la necesidad de preparar una gran cantidad de soluciones con diversos valores de pH, situación que no es práctica sobre todo si se piensa en la gran cantidad de análisis que puede llevar a cabo un laboratorio comercial.

Debido a dicho inconveniente, la capacidad de intercambio catiónico se hace igual a la suma de las bases extraídas con NH₄OAc 1N a pH 7 (BT), más la acidez intercambiable (AI) extraída con KCl 1N. Los métodos analíticos para hacer estas determinaciones se encuentran descritos en Motta et al (1990). La siguiente relación recoge lo dicho antes:

$$CICE = BT + AI = (Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+) + (Al^{3+} + H^+) \quad [13.7]$$

Éste es el método más recomendable para determinar la CIC en suelos que tengan **carga variable**.

2.1.4. Determinación de la CIC por colorimetría

Con este método se cuantifica la capacidad que tiene el suelo de intercambiar cationes, con base en el cambio de color que sufre una solución de cobre al pasar a través del suelo, cambio que está directamente relacionado con la cantidad de cobre que fue retenido por el suelo. Las acciones a seguir en esta cuantificación son las siguientes:

- Se prepara una solución de acetato de cobre 0.1M; se hacen 2 o 3 diluciones sucesivas de una alícuota de esta solución patrón; se le calcula la concentración final a cada dilución, así como a la solución patrón y a todas se les determina la absorbancia en un colorímetro a 660 nm.
- Con los resultados del paso anterior, se construye una gráfica de calibración que contenga concentración de cobre vs absorbancia.
- Se pesan 5 g de suelo seco al aire y tamizado a 2 mm y se colocan en un erlenmeyer de 100 mL.
- Se adicionan a la muestra 50 mL de la solución de acetato de cobre 0.1M y se deja en reposo 1 hora, agitando periódicamente.
- Se filtra la suspensión anterior y se lava el exceso de acetato de cobre con 5 o más porciones de 10 mL de alcohol etílico, hasta que no se detecte presencia de cobre en el filtrado que sale del suelo.
- Se retira el erlenmeyer en que se ha venido trabajando y se coloca el embudo con el suelo lavado en un balón volumétrico de 100 mL; se lava nuevamente el suelo con 5 porciones de 10 mL de una solución de cloruro de sodio al 10 %, recogiendo los lavados en el balón.
- Se determina la absorbancia del filtrado recogido a 660 nm en el colorímetro y se determina la concentración de cobre que tiene éste con ayuda de la gráfica de calibración que se hizo al principio del análisis.
- Se calcula la CIC del suelo mediante la relación [13.8].

$$CIC = \frac{\text{Conc. final} \times \text{Vol.}}{\text{peso muestra}} \quad [13.8]$$

Donde: Conc. final: Concentración de cobre en el filtrado, después del desplazamiento con sodio.

Vol.: Volumen de solución de NaCl adicionado a la muestra.

Con el método descrito también es posible estimar la CIC del suelo sin reemplazar el cobre por sodio: después de adicionar la solución de acetato de cobre se hace la filtración y se recoge el filtrado y en éste se hace la lectura en el colorímetro; se lleva el valor leído a la curva de calibración y se establece la concentración de cobre que tiene; el valor de concentración obtenido para el filtrado se le resta al valor de la concentración de la solución inicial de cobre y la diferencia obtenida es la cantidad de cobre que fue retenida por el suelo.

Para calcular la CIC del suelo se utiliza también la Fórmula 13.8, pero tomando como concentración final la obtenida por diferencia entre la inicial y la del filtrado y como volumen de referencia el volumen de solución de acetato de cobre adicionado a la muestra para llevar a cabo el reemplazamiento de los cationes intercambiables del suelo por el Cu²⁺.

Esta variante del método anterior puede ser una alternativa adecuada para utilizarla en suelos que tengan altos contenidos de materia orgánica o de aluminosilicatos no cristalinos, ya que ellos presentan adsorción selectiva de Cu²⁺, haciendo muy difícil su reemplazo por el Na⁺.

2.2. APLICACIONES DE LA CIC DEL SUELO

2.2.1. En la caracterización general de la carga del suelo

La magnitud de la carga variable que tenga un suelo puede ser establecida conociendo el valor de la CIC del mismo, determinada a pH 7 y al pH del suelo, mediante la siguiente relación:

$$CICV = CIC\ 7 - CICE \quad [13.9]$$

Estrictamente, según lo que se expuso en el numeral anterior, esta carga variable debe calcularse teniendo como base la CIC determinada a pH 8.2, como lo han hecho Mehlich y Theisen, investigadores citados por Sánchez (1981), de quienes se ha tomado la información que se presenta en la Tabla 13.5.

TABLA 13.5. Caracterización de la CIC de algunos coloides de suelos de Kenia (Adaptada y complementada de resultados de Mehlich y Theisen, citados por Sánchez, 1981).

CIC [cmol (+) kg ⁻¹ de arcilla]	CICV
	329

COLOIDE	A pH 8.2	CICE	CICV	(% DE LA CIC TOTAL)
Montmorillonita	118	112	6	5.1
Vermiculita	85	85	0	0
Illita	19	11	8	42.1
Haloisita	18	6	12	6.7
Caolinita	4	1	3	75
Gibsite	5	0	5	100
Goetita	4	0	4	100
Alofano	51	10	41	80.4

En los resultados expuestos en la tabla anterior puede comprobarse que se cumple lo que se dijo en párrafos anteriores, pues las arcillas 2:1 prácticamente no presentan carga variable, en tanto que los sesquióxidos de Fe y Al y el alofano presentan casi toda (toda en algunos casos) su carga como dependiente del pH.

Es de destacarse de la Tabla 13.5 la alta cantidad de carga variable que genera el alofano, en términos absolutos; estos valores de carga variable se incrementan mucho más en Andisoles poco evolucionados que tengan un alto contenido de materia orgánica.

Jaramillo (1995), tomando como base para los cálculos la CIC 7 ante la escasez de datos de CIC 8.2, encontró en 36 Andisoles del oriente antioqueño con contenido promedio de materia orgánica de 21.89%, valores de CICV promedios de 57.92 cmol (+) kg⁻¹ de suelo, los cuales correspondieron a un promedio del 93.15% de la CIC 7.

Benavides (1984, 1987) y Benavides y González (1988) también encontraron, en muchos Andisoles de Colombia, una CICV que representaba más del 70 % de la CIC 7 obtenida en esos suelos.

2.2.2. En la fertilidad de suelos

Para estimar la capacidad que tiene un suelo de suministrarle algunos nutrientes a las plantas, algunos autores (ICA, 1992; Galiano, 1991) prefieren utilizar el porcentaje de saturación que tienen esos nutrientes en el complejo de intercambio del suelo. Conviene aclarar que ese porcentaje es un valor relativo y no expresa la reserva del elemento que hay en el suelo.

En la situación expuesta en el párrafo anterior se encuentran las bases del suelo, siendo necesario calcular las saturaciones de cada una de ellas, así como la saturación total de las mismas. Para llevar a cabo este cálculo se requiere conocer el valor de la capacidad de intercambio catiónico del suelo, de modo que se pueda resolver la siguiente relación:

$$\text{Saturación con } (C^+) = \frac{(C^+)}{\text{CIC7 ó CICE}} \times 100 \quad [13.10]$$

En la ecuación anterior, (C⁺) representa el catión del cual se quiere conocer su saturación o la suma de bases en el caso de querer conocer la saturación de bases totales del suelo. Obsérvese en la Fórmula 13.10 que en el denominador aparecen dos valores alternativos diferentes de la capacidad de

intercambio catiónico del suelo; el valor a utilizar depende del tipo de carga que predomine en el suelo, lo cual puede establecerse evaluando el pH de éste.

Cuando se está trabajando con suelos cuyo pH tiene valores cercanos a 7.0, la saturación debe calcularse con base en la CIC 7; si el suelo presenta un pH ácido, su carga es fundamentalmente dependiente del pH y por lo tanto, según Uehara y Keng (1974) y Moormann (1986) entre otros, las saturaciones deben calcularse teniendo como base la CICE; en algunos casos especiales, la saturación de bases se calcula con respecto a la CIC 8.2, los cuales se dan en el próximo numeral.

De todas formas, cuando se va a utilizar la saturación como índice de disponibilidad de algún elemento se tiene que conocer la CIC que se tomó como base para calcularla y evitar así hacer interpretaciones erradas de los valores (Estrada, 2001).

Otro parámetro importante en el manejo de la fertilidad del suelo es la saturación con Al intercambiable, especialmente en suelos con $\text{pH} < 5.5$; esta determinación ayuda a definir la posibilidad de tener toxicidad de Al en un cultivo específico y se realiza utilizando en el numerador de la Fórmula 13.10 el valor del contenido de Al intercambiable y en el denominador la CICE del suelo en cuestión (Sánchez, 1981; Sánchez y Salinas, 1983).

2.2.3. En la clasificación de suelos

En la definición de suelos sódicos se utiliza el porcentaje de sodio intercambiable (**PSI**), es decir, la saturación con este catión, como criterio diferencial. El PSI se calcula con la Fórmula 13.10 colocando en el numerador el contenido de Na^+ y en el denominador, por tratarse de suelos alcalinos, la CIC 7; el valor crítico para considerar el suelo como sódico es un $\text{PSI} > 15\%$, según SSS (1999, 1998), aunque otros autores como Pizarro (1978) sostienen que algunos suelos con PSI de 7 % ya presentan problemas relacionados con exceso de Na^+ en el complejo de intercambio.

En el sistema de clasificación taxonómica de suelos del USDA (SSS, 1975, 1998, 1999), la capacidad de intercambio catiónico del suelo o propiedades relacionadas con ella, son ampliamente utilizadas en la definición de algunos de sus taxas. Algunos ejemplos sobresalientes son:

- La separación entre Alfisoles y Ultisoles se hace teniendo en cuenta la saturación de bases que presente el horizonte argílico (Capítulo 20), respecto a la CIC 8.2: si es $> 35\%$, el suelo es Alfisol pero si es $< 35\%$, entonces es Ultisol. Algunos investigadores, como McClelland (1985), han encontrado que el valor de la saturación de bases mayor a 50 %, con CIC 7, es equivalente a un valor de saturación mayor a 35 %, con CIC 8.2, facilitándose la separación de estos dos órdenes de suelos pues el método de determinación de la CIC 7 está estandarizado en la mayoría de los laboratorios de suelos.
- La diferencia entre un epipedón mólico y uno úmbrico está en que el primero tiene una saturación de bases, con la CIC 7, de más de 50 %, en tanto que en el segundo, dicha saturación es menor a ese valor.
- La saturación de bases menor de 50 %, con base en la CIC 7, caracteriza el endopedón sómbrico; así mismo, aquellos suelos distróficos identificados por la partícula Dys, al nivel de gran grupo, tienen una saturación de bases menor de 60 % con base en la CIC 7. Aquellos que

tienen saturación de bases mayor al 60 % se identifican por partícula Eu, a este mismo nivel, en la taxonomía.

- Los horizontes kándico y óxico se caracterizan por presentar una CIC $7 \leq 16 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$ de suelo y una CICE $\leq 12 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$ de suelo.
- Un horizonte diagnóstico argílico se clasifica como nátrico cuando presenta un PSI $> 15\%$.
- Los subgrupos Acrudoxic de varios órdenes taxonómicos se caracterizan por poseer una CICE $< 2 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$ de suelo.

A parte de lo anterior, Moormann (1986) definió que las **arcillas LAC** en el suelo eran candidatas con mezclas variables de sesquióxidos de Fe y Al, cuya principal característica es que presentan una CIC $7 < 16 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$ de suelo o una CICE $< 12 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$ de suelo.

3. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO ANIÓNICO (CIA)

Es la medida de la capacidad que posee un suelo de adsorber aniones intercambiables y es equivalente a la carga positiva del mismo. Según Sánchez (1981), esta capacidad es importante en aquellos suelos con altos contenidos de sesquióxidos de Fe y Al; Moormann (1986) y Bohn et al (1993) también han establecido que este tipo de intercambio es de magnitud importante en suelos tropicales fuertemente intemperizados, sobre todo a pH bajo.

Este tipo de intercambio es importante en el suelo porque afecta algunos nutrientes para la planta que se presentan en forma aniónica como son NO_3^- , SO_4^{2-} , HPO_4^{2-} , H_2BO_3^- y MoO_4^{2-} ; además, Bohn et al (1993) establecen que los procesos de intercambio aniónico son muy importantes en problemas de **contaminación de suelos**, puesto que algunos pesticidas, como el 2,4,5-T y el 2,4-D, así como algunos metales pesados como el Cr y el As, se presentan en formas aniónicas en el suelo.

Como ocurre con la CIC, la CIA también está afectada por el valor del pH del medio, aunque en este caso el incremento de carga positiva depende de la disminución del pH: mientras mayor es la acidez del suelo (menor pH), mayor es la cantidad de un determinado anión que es retenida por él.

Según Bohn et al (1993) y Porta et al (1994), los aniones que mejor se ajustan al concepto de intercambio originado en cargas electrostáticas en el suelo son: Cl⁻, NO₃⁻ y SO₄²⁻; otros aniones importantes en el suelo, como los fosfatos, están sometidos a procesos de **retención específica**, en la cual las reacciones de intercambio se producen en el interior de los cristales; uno de los efectos más conocidos de la retención específica en suelos es la **fijación** (retención en forma no intercambiable y por lo tanto no disponibles para la planta) de fósforo que se presenta en muchos de ellos, sobre todo cuando son ácidos y presentan alta actividad del Al³⁺ y del Fe³⁺.

Sánchez (1981) cita varios trabajos en los cuales se sostiene que Oxisoles y Andepts (Andisoles) pueden retener cantidades apreciables de nitratos y de sulfatos en forma intercambiable y que, además, aniones como sulfatos, fosfatos y silicatos pueden ser adsorbidos fuertemente (fijados) por las superficies de sesquióxidos.

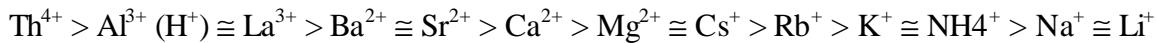
Con respecto a la importancia que tiene el fenómeno de fijación en algunos suelos cabe destacar el hecho de que la fijación de fosfatos es una de las características diagnósticas que definen las propiedades ándicas de los suelos. Un suelo que posea dichas propiedades tiene, entre otras, una capacidad de fijación de fosfatos mayor o igual a 85% (SSS, 1999, 1998). Nótese que lo anterior tiene serias implicaciones en el manejo de estos suelos pues, de cada 100 kg de fósforo que se apliquen como fertilizante, la planta podrá aprovechar sólo 15 kg como máximo, el resto quedará retenido en el suelo.

4. ADSORCIÓN ESPECÍFICA O SELECTIVA

Tanto con los cationes como con los aniones, el enfoque exclusivamente electrostático no siempre explica satisfactoriamente el comportamiento observado en los procesos de intercambio; Bohn et al (1993) dicen que la selectividad observada en algunos coloides por determinados iones se relaciona con los tamaños relativos de los iones hidratados, con la energía de hidratación y con el grado de hidratación de los iones disponibles para el intercambio.

Teniendo en cuenta que en los coloides del suelo se han observado preferencias en la adsorción de los iones que se encuentran en él, se han establecido series en las cuales se ordenan los iones de acuerdo con la facilidad o dificultad con la cual son retenidos por los coloides; estas series se han denominado **series liotrópicas**.

Con base en el tamaño del radio iónico y el de la carga de los cationes, Bohn et al (1993) han propuesto la siguiente serie liotrópica teórica para el intercambio catiónico en el suelo: En el orden en que se exponen los cationes disminuye la fuerza con la cual son retenidos por el coloide:



Fassbender (1982) reporta varias series liotrópicas para cationes, de acuerdo con el tipo de coloide en el cual se esté llevando a cabo el intercambio. Aunque el autor no lo reporta, las series expuestas tienen validez sólo para determinados rangos de pH en cada coloide. Es interesante notar que en todas las series reportadas, el Na^+ es el catión de menor preferencia en el proceso; las series son:

Illita	$\text{Al}^{3+} > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$
Caolinita	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Al}^{3+} > \text{Na}^+$
Montmorillonita	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{H}^+ > \text{K}^+ > \text{Na}^+$
Materia orgánica	$\text{Mn}^{2+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Na}^+$

Torres y García (1991), estudiando el intercambio $\text{Mg}^{2+} - \text{Ca}^{2+}$ en presencia de Na^+ , en suelos montmorilloníticos del Valle del Cauca con alta saturación de Mg^{2+} , encontraron indicios de selectividad por el Ca^{2+} en la mayoría de los suelos que estudiaron. Observaron que la selectividad en el intercambio estuvo afectada por el contenido de materia orgánica, el contenido de carbonatos, el grado de salinidad y la concentración de los cationes. No encontraron efecto del PSI sobre dicha selectividad.

Ayarza y Sánchez (1991) encontraron selectividad en la adsorción de K^+ , NH_4^+ y H^+ en Ultisoles del Perú y atribuyeron esta selectividad a la presencia de esmectitas interestratificadas con hidróxidos de aluminio, lo cual reducía su expansibilidad no permitiendo la adsorción de otros iones de mayor tamaño.

El autor de este documento no pudo desplazar el Cu^{2+} por Na^+ en los horizontes A y B de Andisoles del departamento de Caldas, durante la determinación de la CIC de aquellos por el método del acetato de cobre. Atribuyó este comportamiento a la presencia de selectividad por el Cu^{2+} en dichos suelos (resultados sin publicar).

Yu et al (1997), sostienen que los sesquióxidos de Fe, Al y Mn son los principales responsables de la adsorción selectiva de cationes en el suelo y que los cationes que más frecuentemente se ven sometidos a estos procesos son los metales alcalinos y los metales pesados Zn, Co y Cd; concluyeron que la adsorción era selectiva porque observaron que ella se produce a valores de pH entre 3 y 7 y, sabiendo que el PCC de los sesquióxidos involucrados está alrededor de 8, es decir, cuando la carga neta que se está produciendo es cero o es positiva, por lo que la atracción simplemente electrostática no explica la adsorción de los cationes.

Yu et al (1997) dicen que la adsorción selectiva de cationes en el suelo puede producir acumulación de metales pesados como Mn, Cu, Co, Ni, Zn, Pb, Cr y V en ciertas fracciones granulométricas del suelo y llaman la atención sobre el hecho de que los cationes adsorbidos selectivamente no participan en los procesos de intercambio catiónico, por lo que juegan un importante papel en el control de la disponibilidad y de la toxicidad de iones metálicos para la planta.

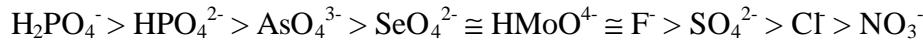
Con respecto a la selectividad en el intercambio aniónico, Fassbender (1982) expone la siguiente serie liotrópica general:



El mismo autor citado en el párrafo anterior reporta una serie de adsorción que se encontró como consecuencia del efecto de la presencia de diferentes iones complementarios en la adsorción de sulfatos, aunque no especifica el suelo en el cual se realizó el estudio:



Moormann (1986) establece que los suelos LAC (de baja actividad) oxídicos presentan la siguiente secuencia de afinidad por el intercambio aniónico:



Zhang y Zhao (1997) afirman que la adsorción específica de aniones, en suelos de carga variable, incrementa la cantidad de carga superficial negativa y/o disminuye la cantidad de carga superficial positiva y que, además, estos procesos son de gran importancia en la retención de fosfatos, sulfatos y silicatos en dichos suelos.

5. LA DOBLE CAPA DIFUSA

Para tratar de explicar la distribución de los iones alrededor de las superficies cargadas electrostáticamente de los coloides del suelo, se ha diseñado la teoría de la Doble Capa Difusa (**DCD**); con este objetivo se han propuesto diferentes modelos como el de Helmholtz, el de Chapman y Guoy y el de Stern.

El modelo de Helmholtz considera que la distribución de las cargas se hace en dos capas eléctricas paralelas y rígidas: una capa de cargas negativas en la superficie del coloide y otra de cationes fuertemente adsorbidos a ellas, neutralizándolas; el modelo de Chapman y Guoy considera que hay una capa eléctrica negativa y rígida en la superficie de los coloides, la cual está seguida y equilibrada por una capa difusa de iones; el modelo de **Stern** considera las dos capas del modelo de Chapman y Guoy, pero considera que están separadas entre sí por un plano que define una **capa interna rígida** de cationes o **capa de Stern**, como la de Helmholtz y una **capa externa difusa** de iones, como la Chapman y Guoy (ver Figura 13.4). Los dos últimos modelos son los que mejor explican la mayoría de los procesos de intercambio en el suelo, aunque ninguno es satisfactorio para todos los casos, según Porta et al (1994).

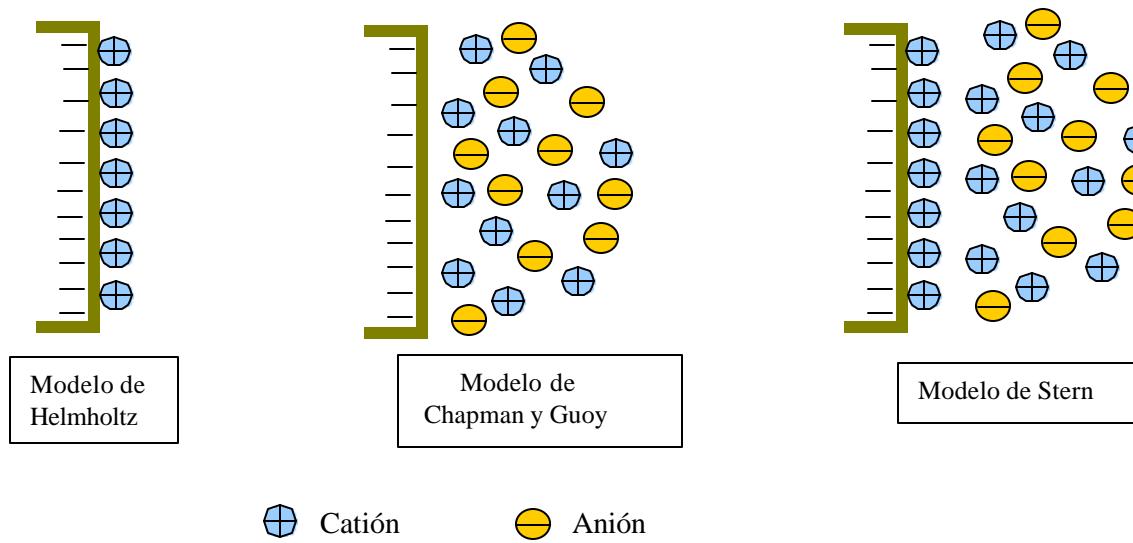


FIGURA 13.4. Diferentes modelos de Doble Capa Difusa.

Según Fassbender (1982), el espesor de la DCD depende primordialmente de la carga de los iones involucrados y de la concentración de la solución del suelo. Entre mayor sea la carga de los iones, menor será el espesor de la DCD (Figura 13.5) y, mientras menor sea la concentración de la solución del suelo, más se extiende la DCD (Figura 13.6).

El espesor de la DCD define la distancia hasta la cual actúan las fuerzas de retención del coloide sobre los iones del suelo, estableciéndose así el espacio que tiene el suelo para acumular los iones

intercambiables; aquellos iones que quedan por fuera de la DCD constituyen la **solución externa** o **solución del suelo** y son los iones solubles que están disponibles para la planta o para ser lixiviados de éste, causando pérdidas de nutrientes en él.

La DCD tiene efectos sobre varias propiedades del suelo como la floculación y la dispersión de coloides y por tanto en la estructura del mismo; además, afecta la determinación del **pH** (se tratará en el siguiente capítulo) y el comportamiento de su fertilidad; de otro lado, prácticas de manejo de suelos como fertilización, encalamiento, aplicación de enmiendas y/o riego, alteran las características geométricas de la DCD.

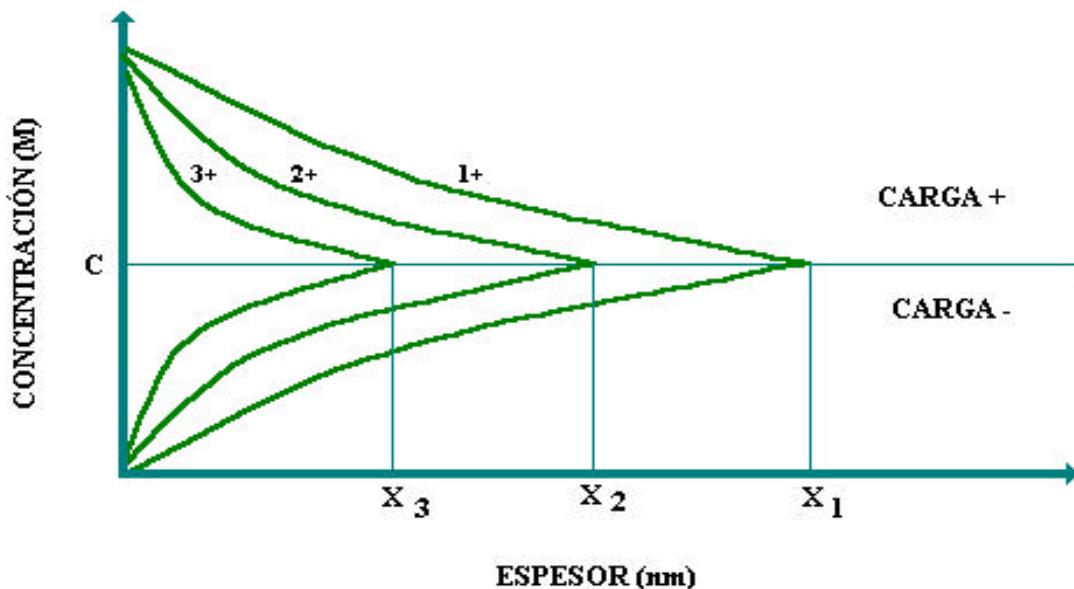


FIGURA 13.5. Efecto de la carga del ión sobre el espesor de la DCD (Tomada de Fassbender, 1982).

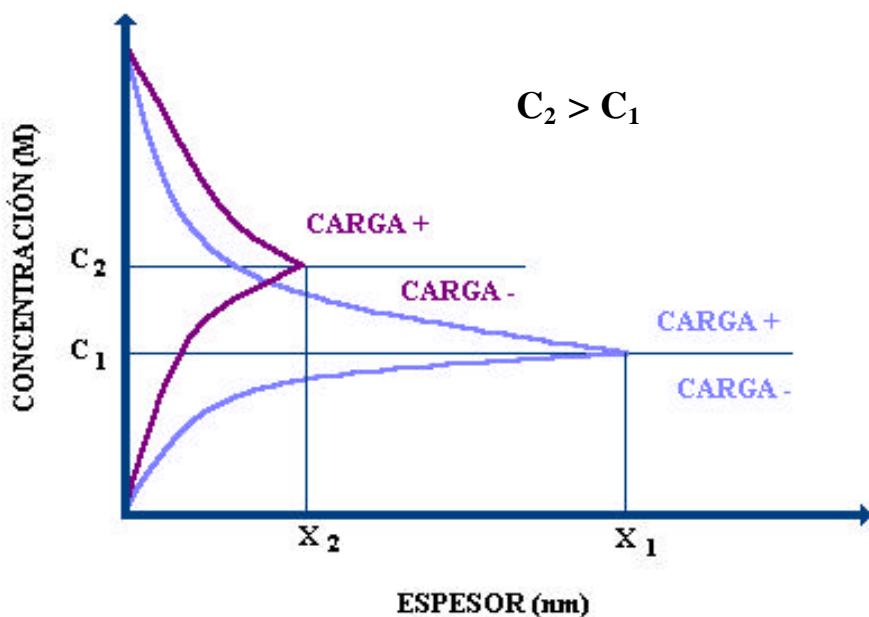


FIGURA 13.6. Efecto de la concentración de la solución del suelo sobre el espesor de la DCD (Tomada de Fassbender, 1982).

Baver et al (1973) sostienen que cuando en los suelos se contrae la DCD se presenta **floculación** de sus coloides, lo que explica porque los suelos salino-sódicos no pierden su estructura a pesar de presentar altos contenidos de Na^+ intercambiable; lo anterior se debe a que las sales en exceso no dejan expandir la DCD y, por lo tanto, no se generan fuerzas de repulsión entre los coloides que los dispersen.

El poder dispersante de los cationes monovalentes decrece en el siguiente orden: $\text{Li}^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+$; Schainberg y Kemper (1966) demostraron que en el orden en que aparecen los cationes aumenta la cantidad de ellos que es retenida en la capa interna o de Stern de la DCD y disminuye la cantidad en que se presentan en la zona difusa de la DCD; los cationes de menor tamaño son capaces de retener mayor cantidad de agua de hidratación que los más grandes.

La secuencia que se presentó en el párrafo anterior, en el orden en que está, coincide con el orden en que aumenta el radio iónico de los cationes ($\text{Na}^+ > \text{Li}^+$), por lo que el Li^+ será el que mayor radio iónico hidratado tendrá; la mayor hidratación expande la DCD creando traslape entre varias DCD y, por tanto, repulsión entre coloides, causando su dispersión.

Cuando se aplica algún tipo de enmienda al suelo, se incrementa la concentración de su solución y, por lo tanto, se contrae la DCD de los coloides; esta situación reduce el espesor de la solución interna y aumenta las posibilidades de tener pérdidas de nutrientes en el suelo por **lixiviación**, sobre todo cuando se tiene un suelo con una baja CIC; la aplicación de riego produce el efecto contrario pues diluye la solución del suelo y expande la DCD.

RECORDAR

- El intercambio iónico es un proceso rápido, estequiométrico y reversible.
 - El intercambio iónico depende del contenido y tipo de coloides, de la superficie específica, de la densidad de carga superficial, del tipo de ión y de la concentración de los iones en la solución del suelo.
 - La cantidad de cationes que puede intercambiar un suelo se llama Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y la de intercambiar aniones es la Capacidad de Intercambio Aniónico (CIA).
 - La CIC se expresa en términos de cmol (+) kg⁻¹ de suelo.
 - Los procesos de intercambio iónico previenen la pérdida de nutrientes del suelo por lixiviación.
 - La CIC se altera por el pH del medio en el que se mide. Los métodos estándar más utilizados para medir la CIC de suelos de carga permanente son el de suma de cationes, a pH 8.2 y el del acetato de amonio normal y neutro, a pH 7.
 - En suelos de carga variable los métodos anteriores sobreestiman la CIC. En éstos se usa la CIC efectiva (CICE), obtenida como la suma de las bases más la acidez, intercambiables.
 - La CIC es una propiedad ampliamente utilizada en fertilidad y en taxonomía de suelos.
 - En los suelos se presentan fenómenos de retención de iones que no se explican por la presencia de cargas electrostáticas. Éstos se conocen como adsorción selectiva o específica.
-
- Los iones retenidos por adsorción selectiva no participan en los procesos de intercambio y son causantes de pérdidas de nutrientes por fijación y de la acumulación tóxica de iones metálicos pesados en el suelo. El caso más importante de fijación es el del fósforo.
 - La doble capa difusa (DCD) es un modelo teórico para explicar los mecanismos involucrados en el intercambio iónico. El espesor de la DCD depende de la concentración de la solución del suelo y de la carga de los iones.

BIBLIOGRAFÍA

- AYARZA, M. A. y P. S. SÁNCHEZ. 1991. Importancia de los minerales 2:1 interestratificados en la retención de potasio en un Ultisol de la Amazonia peruana. *Suelos Ecuatoriales* 21 (2): 65-68.
- BAVER, L. D., W. H. GARDNER y W. R. GARDNER. 1973. Física de suelos. U.T.H.E.A. México. 529 p.
- BENAVIDES, G. 1984. Cuantificación del material amorfo en algunos suelos derivados de cenizas volcánicas y su relación con los parámetros de la taxonomía de suelos. *Suelos Ecuatoriales* 14 (1): 272-279.
- BENAVIDES, G. 1987. Determinación de las propiedades ándicas en algunos suelos de Colombia. *Suelos Ecuatoriales* 17 (2): 332-337.

- BENAVIDES, G. y E. GONZÁLEZ. 1988. Determinación de las propiedades ándicas y clasificación de algunos suelos de páramo. *Suelos Ecuatoriales* 18 (1): 58-64.
- BOHN, H. L., B. L. MCNEAL y G. A. O'CONNOR. 1993. Química del suelo. Limusa. México. 370 p.
- ESTRADA, G. 2001. Disponibilidad de calcio, magnesio y azufre, su análisis en suelos y plantas y su interpretación. **En:** Los elementos secundarios (Ca, Mg, S) y el silicio en la agricultura. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS). Bogotá. pp 85-104.
- FASSBENDER, H. W. 1982. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José. Costa Rica. 398 p.
- GALIANO, F. 1991. Capacidad de intercambio catiónico y aniónico, bases de cambio y saturaciones. **En:** Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego. SCCS. Bogotá. pp 164-185.
- GARCÍA, A. 1989. Capacidad de intercambio catiónico. **En:** El análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Manual de asistencia técnica No. 47. ICA. Bogotá. pp 59-73.
- GÓMEZ, C. y A. GARCÍA. 1994. Evaluación de métodos para la determinación de la capacidad de intercambio catiónico en suelos salinos y/o sódicos del valle geográfico del río Cauca. *Suelos Ecuatoriales* 24: 55-59.
- INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO (ICA). 1992. Fertilización en diversos cultivos. 5^a. aproximación. Manual de asistencia técnica No. 25. ICA. Bogotá. 64 p.
- JARAMILLO, D. F 1995. Los Andisoles del Oriente Antioqueño. Propiedades químicas y fertilidad. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 35 p.
- JI, G. L. and H. Y. LI. 1997. Electrostatic adsorption of cations. **In:** Chemistry of Variable Charge Soils. Yu T. R. editor. Oxford University Press Inc. New York. pp: 64-111.
- McCLELLAND, J. 1985. Circular letter No. 4, august 1976 ICOMLAC. **In:** Excerpts from the circular letters of ICOMLAC 1985. Technical monograph No. 8 SMSS. University of Hawaii. Washington. pp 40.
- MOORMANN, F. R. 1986. Classification of Alfisols and Ultisols with low activity clays. **In:** Proceedings of a Symposium on Low Activity Clay (LAC) soils. SMSS technical monograph No. 14. Las Vegas. pp 1-12.
- MOTTA de M. B. et al. 1990. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. 5^a. Ed. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá. 502 p.
- PIZARRO, F. 1978. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Editora Agrícola Española S. A. Madrid. 521 p.
- PORTA, J.; M. LÓPEZ – ACEVEDO y C. ROQUERO. 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi Prensa. Madrid. 807 p.
- SÁNCHEZ, P. 1981. Suelos del trópico: Características y manejo. IICA. San José. Costa Rica. 534 p.
- SÁNCHEZ, P. y J. SALINAS. 1983. Suelos ácidos: Estrategias para su manejo con bajos insumos en América Tropical. SCCS. Bogotá. 93 p.
- SCHAINBERG, I and W. D. KEMPER. 1966. Hydration status of adsorbed cations. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30: 707-713.
- SOIL SURVEY LABORATORY (SSL). 1996. Soil survey laboratory methods manual. Soil survey investigations report Nº. 42, version 3.0. United States Department of Agriculture (USDA). 693 p.

SOIL SURVEY STAFF (SSS). 1975. Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Agricultural handbook No. 436. USDA. Washington. 754 p.

SOIL SURVEY STAFF. (SSS) 1999. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2^a. Ed. Agriculture Handbook Nº 436. Soil Survey Staff. Washington D. C. 869 p.

SOIL SURVEY STAFF (SSS). 1998. Keys to soil Taxonomy. 8^a. Ed. Washington D. C. 326 p.

TORRES, J. y A. GARCÍA. 1991. Intercambio catiónico magnesio-sodio en algunos suelos del Valle del Cauca. Suelos Ecuatoriales 21 (2): 33-38.

UEHARA, G. y J. KENG. 1974. Relaciones entre la mineralogía y el manejo de los suelos en la América Latina. In: Manejo de suelos en la América Tropical. North Carolina State University. Raleigh. pp 357-370.

YU, T. R.; H. Y. SUN and H. ZHANG. 1997. Specific adsorption of cations. In: Chemistry of Variable Charge Soils. Oxford Yu T. R. editor. University Press Inc. New York. pp: 140-174.

ZHANG, X. N. and A. Z. ZHAO. 1997. Surface charge. In: Chemistry of Variable Charge Soils. Yu T. R. editor. Oxford University Press Inc. New York. pp: 17-63.

AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Cuáles son las propiedades del cambiador que controlan el intercambio iónico en el suelo?. ¿Cuáles las del ión?.
2. Confirmar las unidades de densidad de carga de la Tabla 13.1.
3. ¿Cómo interviene el tamaño de los iones en los procesos de intercambio del suelo?.
4. ¿Qué significa adsorber?.
5. ¿Por qué es importante el intercambio iónico en el suelo?.
6. ¿Cuáles son las bases del suelo?.
7. ¿Qué significa la abreviatura CIC?. ¿En qué unidades se expresa la CIC?.
8. ¿Cuál grupo de filosilicatos posee los mayores valores de CIC?.
9. ¿Qué importancia tiene el coloide orgánico en la CIC del suelo?.
10. ¿Cómo se relacionan la CIC y el pH del suelo?.
11. Diga los métodos que se han estandarizado para medir la CIC del suelo. ¿En qué condiciones se recomienda el uso de cada uno de ellos?.
12. En la mayoría de los Andisoles de Colombia, ¿cuál es el método más recomendable para evaluar la capacidad de intercambio catiónico que poseen?. ¿Por qué?.
13. ¿Un suelo FAr tiene mayor capacidad de intercambio catiónico que uno FA, si ambos tienen igual contenido de materia orgánica?.
14. Dos suelos que tengan iguales contenidos de arcilla y de materia orgánica ¿tienen igual CIC?.
15. Mencionar 3 casos específicos en los cuales la CIC es aplicada en la clasificación de suelos.
16. ¿Qué es CIA?. Diga un nutriente que sea especialmente afectado por ella. ¿En qué orden de suelo es importante la fijación de fósforo?.
17. ¿Qué le pasará al espesor de la DCD del suelo cuando éste es fertilizado?. ¿Y cuando es regado?. ¿Por qué?.

EVALUACIÓN

1. Discuta la relación que puede haber entre la CIC y el punto de carga cero del suelo.

2. Las reacciones de intercambio en el suelo son estequiométricamente equivalentes. ¿Cuántos gramos de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Al^{3+} y Fe^{3+} se requieren para intercambiar 2 meq de Na^+ en el suelo, asumiendo una eficiencia del 100 %?. (R: 0.04 g, 0.0243 g, 0.0782 g, 0.018 g, 0.0372 g, respectivamente).
 3. Diez gramos de suelo se lavan con 100 mL de una solución 1 N de acetato de amonio y en el filtrado se obtienen 0.4 mg L^{-1} de Ca^{2+} . ¿A cuántas cmol (+) kg^{-1} de suelo corresponde ese contenido de Ca^{2+} ? (R: 0.02 cmol (+) kg^{-1} de suelo).
 4. ¿Cuánta es la CIC de un suelo que presenta 70 % de caolinita y 10 % de materia orgánica? (R: 26.3 cmol (+) kg^{-1} de suelo).
 5. Un suelo que presentó una CIC total de 30 cmol (+) kg^{-1} de suelo, tiene 8 % de materia orgánica; ¿cuánta es la contribución de la arcilla a la CIC de ese suelo? (R: 14 cmol (+) kg^{-1} de suelo).
 6. Un suelo con 42 % de arcilla y 7 % de materia orgánica, presenta la siguiente composición de la arcilla: 30 % de Montmorillonita, 25 % de Vermiculita, 20 % de Ilita, 15 % de Clorita y 10% de Caolinita. ¿Cuál es el valor de la CIC de ese suelo? (R: 41.68 cmol (+) kg^{-1} de suelo).
 7. Los análisis de laboratorio de los primeros 30 cm de un suelo dieron los siguientes resultados:
 - a. CIC 7: 34.5 cmol. kg^{-1} de suelo
 - b. Al^{3+} : 4.8 meq (100 g de suelo) $^{-1}$
 - c. Ca^{2+} : 1.2 meq (100 g de suelo) $^{-1}$
 - d. Mg^{2+} : 0.7 meq (100 g de suelo) $^{-1}$
 - e. K^+ : 0.2 meq (100 g de suelo) $^{-1}$
 - f. Na^+ : 0.02 meq (100 g de suelo) $^{-1}$
 - g. Densidad aparente: 1.2 Mg m^{-3}
- Calcular:
- i. CICE. (R: 6.92 cmol (+) kg^{-1} de suelo).
 - ii. CICV. (R: 27.58 cmol (+) kg^{-1} de suelo).
 - iii. Saturación de bases. (R: 30.64 %).
 - iv. Saturación con aluminio. (R: 69.36 %).
 - v. PSI. (R: 0.29 %).
 - vi. Kg ha^{-1} de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ que hay en el suelo. (R: 864, 306.31, 16.56, 281.52, respectivamente).

8. Cien gramos de suelo presentaron un contenido de 4 meq de K^+ , 6 meq de Ca^{2+} y 2 meq de Mg^{2+} . ¿Cuál es la CIC de ese suelo en mmol (+) kg^{-1} de suelo? (R: 120 mmoles (+) kg^{-1} de suelo).
9. Para que un suelo sea clasificado como Oxic Dystrudept, debe cumplir, entre otros requisitos, que tenga una CIC, medida en acetato de amonio 1 N a pH 7, menor a 24 cmol (+) kg^{-1} de arcilla; los análisis de laboratorio de un suelo reportan una CIC de 18 cmol (+) kg^{-1} de suelo y contenidos de 5 % de materia orgánica y 12 % de arcilla; suponiendo que todos los otros requisitos se cumplen. ¿Dicho suelo se clasificará como Oxic Dystrudept? Sustentar la respuesta con los cálculos correspondientes. (R: No, tiene una CIC de 66.67 cmol (+) kg^{-1} de arcilla).
10. Para los primeros 30 cm de un suelo se obtuvieron los siguientes resultados en los análisis de laboratorio a los cuales se sometió:
 - a. Contenido de arcilla: 35 %.
 - b. Contenido de materia orgánica: 12.5%.
 - c. Al^{3+} : 3.1 meq (100 g de suelo) $^{-1}$.
 - d. Ca^{2+} : 2.2 meq (100 g de suelo) $^{-1}$.
 - e. Mg^{2+} : 1.3 meq (100 g de suelo) $^{-1}$.
 - f. K^+ : 0.9 meq (100 g de suelo) $^{-1}$.
 - g. Densidad aparente: 1.2 Mg m^{-3} .
 - h. CIC 7: 21.2 cmol (+) kg^{-1} de suelo.

Se desea:

- i. Expresar los contenidos de bases en kg de óxido ha^{-1} . (R: 2 217 kg CaO ha^{-1} , 936 kg MgO ha^{-1} , 1 522.80 kg K₂O ha^{-1}).
 - ii. Determinar la relación Ca: Mg: K, con base en la saturación de los cationes. (R: 2.4: 1.4: 1).
 - iii. Conocer cuál es el tipo de arcilla más probable en este suelo. Sustentar la respuesta con los cálculos correspondientes. (R: Caolinita).
 - iv. Saber cuántos kg ha^{-1} de KCl comercial (60% de K₂O) deben aplicarse al suelo para llevar su contenido de K⁺ a un valor de 2 cmol (+) kg^{-1} de suelo. (R: 3 100 kg).
 - v. Conocer la nueva relación Ca: Mg: K del suelo, después de aplicarle el anterior producto. (R: 1.69: 1: 1.34).
11. De un suelo que presentó una CIC 7.0 de 34.3 cmol (+) kg^{-1} de suelo y una CICE de 33.2 cmol (+) kg^{-1} de suelo, ¿qué puede decirse acerca de su pH? Su mineralogía? Su tipo de carga?. Explique.
12. ¿Cuál es el valor de la CIC de un suelo, medida por el método colorimétrico, si en el proceso de medida se obtuvo la siguiente información:
- Curva de calibración:
- | Concentración de Cu ²⁺ (mol L ⁻¹) | Absorbancia |
|--|-------------|
| 0.10 | 0.225 |
| 0.08 | 0.194 |
| 0.04 | 0.167 |
| 0.02 | 0.092 |
- b. Absorbancia a 660 nm en el extracto de la última filtración: 0.115. (R: 11.4 cmol (+) kg^{-1} de suelo).
13. El horizonte A (25 cm) de un suelo tiene una densidad aparente de 1.2 Mg m⁻³ y unos contenidos de Ca²⁺ de 300 ppm, de Mg²⁺ de 120 ppm, de K⁺ de 80 ppm, de Na⁺ de 20 ppm y de Al de 2 meq/100 g de suelo. ¿Cuál es la CICE de ese suelo?. (R: 4.7752 cmol (+) kg^{-1} de suelo).

LA REACCIÓN DEL SUELO

CAPÍTULO 14

CONTENIDO

- ❖ El pH
 - Determinación del pH del suelo
 - Método potenciométrico
 - Métodos colorimétricos
 - Factores que afectan la medida del pH
 - Efecto de dilución
 - Efecto de las sales
 - Efecto del contenido de CO₂
 - Variaciones estacionales
 - Calificación del pH del suelo
 - Importancia del pH en el suelo
 - En la disponibilidad de nutrientes
 - En la identificación del tipo de carga de los coloides
 - En la taxonomía de suelos
 - Para detectar coloides inorgánicos no cristalinos
 - Capacidad buffer del suelo
- ❖ Suelos ácidos
 - Fuentes de acidez en el suelo
 - Grupos ácidos de los coloides inorgánicos del suelo
 - Grupos ácidos de la materia orgánica
 - Ácidos solubles
 - Formación de suelos ácidos
 - Tipos de acidez en el suelo
 - Acidez activa
 - Acidez intercambiable
 - Acidez titulable o potencial
 - Acidez total

- Grupos y propiedades de suelos ácidos
 - Suelos minerales con $\text{pH} < 4.5$
 - Suelos minerales con pH entre 4.5 y 5.5
 - Suelos minerales con pH entre 5.5 y 6.5
 - Suelos orgánicos
- Interpretación de la reacción en suelos ácidos y neutros
 - El pH
 - La acidez intercambiable
- Manejo de los suelos ácidos minerales
 - Suelos con pH entre 5.5 y 6.0
 - Suelos con $\text{pH} < 5.5$
- Clasificación taxonómica de suelos ácidos

- ❖ Suelos básicos
 - Fuentes de alcalinidad en el suelo
 - Formación de suelos básicos
 - Grupos y propiedades de los suelos básicos
 - Suelos salinos
 - Suelos sódicos
 - Suelos salino – sódicos
 - Otros suelos básicos
 - Manejo de los suelos básicos
 - Suelos salinos
 - Suelos sódicos
 - Suelos salino – sódicos
 - Clasificación taxonómica de los suelos básicos

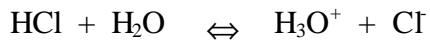
OBJETIVOS

- ❖ Aprender a manejar el pH como indicador del grado de acidez o de basicidad que tiene el suelo
- ❖ Conocer los métodos más comunes para medir el pH del suelo
- ❖ Conocer los diferentes grupos de suelos que se pueden formar, de acuerdo con el pH que tengan
- ❖ Conocer cómo se forman, las propiedades, el manejo y la clasificación taxonómica de los suelos ácidos y básicos

L

a reacción del suelo es aquella propiedad que establece el grado de **acidez** o de **alcalinidad** que él presenta y tiene una gran influencia en muchas de sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Por esta razón, es una de sus propiedades más importantes.

En términos generales, una sustancia es considerada como un **ácido** cuando tiene la capacidad de **ceder protones** al disociarse, para formar **hidronio (H_3O^+)**. Análogamente, una sustancia se considera como una **base** cuando al disociarse **recibe protones** del agua, que actúa como ácido, y origina iones **hidróxido (OH^-)**; las siguientes reacciones ilustran lo anterior:



En las reacciones anteriores, el HCl es un ácido y el NH_3 es una base; obsérvese que el agua tiene la capacidad de actuar como una base, en la primera reacción, o como un ácido en la segunda; el ácido y la base que se producen después de la reacción con el agua se llaman **conjugados**; así, el H_3O^+ es el ácido conjugado del H_2O y el Cl^- es la base conjugada del HCl, en la primera reacción; en la segunda reacción, el NH_4^+ es el ácido conjugado del NH_3 y el OH^- es la base conjugada del H_2O .

1. EL pH

La reacción del suelo se evalúa al determinar el pH del mismo, es decir, al establecer el logaritmo del inverso de la concentración de H_3O^+ que hay en la solución del mismo:

$$pH = Log \frac{1}{[H_3O^+]} = -Log [H_3O^+] \quad [14.1]$$

El pH, según Fassbender (1982), es una relación entre los contenidos de protones y de iones OH^- , por lo cual se cumple que en agua pura **pH + pOH = 14**; la relación anterior implica entonces que una solución tendrá una condición **neutra** ($pH = pOH$) cuando su pH sea igual a **7.0**.

1.1. DETERMINACIÓN DEL pH DEL SUELO

El pH en el suelo se mide en una suspensión de suelo en agua o en soluciones salinas y puede llevarse a cabo esta determinación en forma colorimétrica o potenciométrica, como se detalla más adelante.

1.1.1. Método potenciométrico

Es el método utilizado en el laboratorio. Lo más frecuente es determinar el pH en una suspensión suelo: agua, en proporción de 1:1, en peso aunque, por facilidad se utiliza comúnmente hacer una relación volumétrica 1:1. El procedimiento, según el Soil Survey Laboratory (SSL, 1996), consiste en:

- Se calibra el potenciómetro (ver Figura 14.1) con las soluciones buffer que se tienen para este efecto, a pHs de 4 y de 7.
- Se toma una muestra de 20 g de suelo seco al aire, se coloca la muestra en un beaker de volumen adecuado al tamaño de ella y se le adicionan 20 g de agua destilada (20 mL son equivalentes); si se va a utilizar la relación con volumen, se toma la muestra de suelo con una cuchara volumétrica, enrasándola bien en el borde de la misma y, con la misma cuchara, se toma un volumen de agua destilada igual al volumen de la muestra de suelo; se deja la suspensión en reposo durante 1 hora, agitándola ocasionalmente.
- Se introduce el electrodo de vidrio del potenciómetro en la suspensión, teniendo la precaución de que quede en contacto con el suelo y se hace la lectura correspondiente.
- Chequear la calibración del potenciómetro, cada cierto número de muestras (12 por ejemplo).

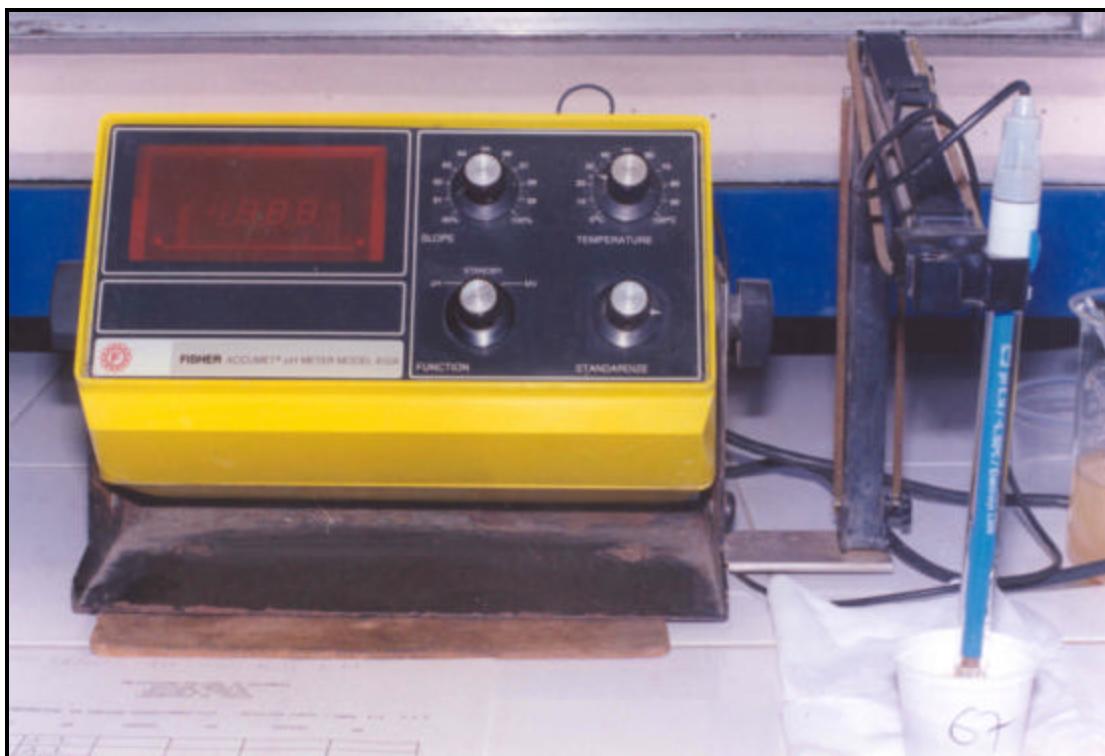


FIGURA 14.1. Un modelo de potenciómetro.

En algunos casos, se hace necesario ampliar la proporción suelo-agua para hacer la suspensión; ésto es común cuando se trabaja con suelos que tienen altos contenidos de materia orgánica, con suelos orgánicos o con algunos Andisoles. Las variantes más comunes son las que utilizan relaciones volumétricas 1:2 o 1:5, suelo-agua; el procedimiento con estas variantes es igual al descrito anteriormente.

Otras variaciones que se utilizan en el método potenciométrico consisten en cambiar el agua por soluciones de KCl 1N o de CaCl₂ 0.01M para hacer las suspensiones; en estos casos, las relaciones suelo-agua son peso-volumen. Las relaciones más comunes son 1:1 peso-volumen en solución de KCl (20 g de suelo en 20 mL de solución) y 1:2 peso-volumen en solución de CaCl₂ (10 g de suelo en 20 mL de solución). La determinación del pH se hace siguiendo también el método descrito al comienzo de este numeral.

Fassbender (1982) sostiene que el pH medido en agua es más variable que aquel que se mide en soluciones, razón por la cual se ha recomendado el mecanismo de hacer la suspensión de suelo en soluciones para estabilizar los valores de pH del suelo.

1.1.2. Métodos colorimétricos

Son métodos menos precisos que los potenciométricos pero de más fácil aplicación. Son métodos que se utilizan en el campo (cabe aclarar que hay potenciómetros de bolsillo para usar en campo) y se basan en el principio de los **indicadores** que son sustancias que producen o cambian a un determinado color cuando el medio en el cual se encuentran adquiere un determinado valor de pH.

En las determinaciones colorimétricas del pH se debe tener mucho cuidado al hacer la preparación de la pasta de suelo, así como al hacer la comparación del color desarrollado en ella con los colores de referencia para establecer el valor del pH, puesto que, como ocurre con la determinación de la textura al tacto, se requiere entrenamiento para hacer una buena aproximación al valor real, máxime cuando los colores representan rangos de valores relativamente amplios.

Para confirmar lo expuesto en el párrafo anterior, se hicieron 71 determinaciones de pH con muestras de horizontes A y 42 con muestras de horizontes B de suelos, todas colorimétricas (Hellige-Truog) y llevadas a cabo por tres personas que tomaron las muestras al azar y sin replicar ninguna, que no tenían mayor experiencia en este tipo de determinaciones. También se determinó el pH en agua 1:1 v:v, por el método potenciométrico, a todas las muestras y se compararon los resultados obtenidos. La variación en las determinaciones realizadas se presenta en la Tabla 14.1.

Se aprecia en la Tabla 14.1 que el error en la apreciación colorimétrica puede ser considerablemente grande, tanto por encima como por debajo del valor potenciométrico obtenido. Además, los errores de apreciación son más variables en el horizonte A, probablemente por enmascaramiento del color por parte de la materia orgánica presente en ese horizonte.

TABLA 14.1. Distribución de frecuencia de las diferencias de pH obtenidas entre los métodos potenciométrico y colorimétrico, realizadas por personas sin entrenamiento suficiente, en horizontes A de 71 suelos y en horizontes B de 42 suelos (Resultados de Jaramillo, 1999, sin publicar).

RANGO DE LA DIFERENCIA*	NÚMERO DE MUESTRAS	FRECUENCIA RELATIVA (%)	FRECUENCIA ACUMULADA (%)
HORIZONTES A			
-1.8 a -1.3	4	5.63	5.63
-1.3 a -0.8	23	32.39	38.03
-0.8 a -0.3	17	23.94	61.97
-0.3 a 0.2	17	23.94	85.92
0.2 a 0.7	5	7.04	92.96
0.7 a 1.2	4	5.63	98.59
1.2 a 1.7	0	0	98.59
1.7 a 2.2	1	1.41	100
HORIZONTES B			
-1.9 a -1.33	3	7.14	7.14
-1.33 a -0.76	11	26.19	33.33
-0.76 a -0.19	16	38.10	71.43
-0.19 a 0.39	7	16.67	88.10
0.39 a 0.96	3	7.14	95.24
0.96 a 1.53	2	4.76	100

* La diferencia corresponde a: pH potenciométrico – pH colorimétrico.

Un método muy utilizado en suelos es el de **Hellige-Truog**, el cual tiene un rango de medida de pH entre 4 y 8.5; se usa un reactivo compuesto por tres indicadores diferentes; para hacer las determinaciones con este método, se procede de la siguiente forma:

- Se coloca una muestra de suelo de tamaño adecuado en una de las copitas del soporte de plástico.
- Se adicionan gotas del reactivo triple (líquido) de manera que pueda formarse una pasta saturada con el suelo. Se revuelve la mezcla 1 ó 2 minutos y al cabo de este tiempo se deja una superficie pulida en el suelo de la copa.
- Sobre la superficie pulida se espolvorea el otro reactivo (polvo blanco) y se deja reaccionar 2 minutos; transcurrido este tiempo, se compara el color desarrollado con la tabla de colores que trae el equipo y se determina el pH que le corresponde a ese color.

1.2. FACTORES QUE AFECTAN LA MEDIDA DEL pH

Los valores que toma el pH pueden variar de acuerdo a ciertas circunstancias bajo las cuales se hace la determinación. Los principales factores que afectan estas medidas se discuten a continuación y se ilustran con los resultados expuestos en la Tabla 14.2 y en la Figura 14.2.

1.2.1. Efecto de dilución

La proporción suelo - agua o solución con la cual se prepare la suspensión para medir el pH afecta esta medida. Si la relación 1:1 se altera, adicionando más agua o solución, el valor del pH se aumenta, debido a que se diluye la solución del suelo y se expande la doble capa difusa (DCD). Por esta razón, varios protones pueden pasar a la capa difusa, desde la solución externa (por fuera de la DCD) del suelo, retirando parte de la acidez de ella y, por lo tanto, haciéndola más básica.

TABLA 14.2. Valores de pH de varios suelos seleccionados de Antioquia medidos bajo diferentes circunstancias. (Resultados de Jaramillo, 1999, sin publicar).

HORIZONTE	pH agua v:v			pH KCl 1N p:v			pH CaCl ₂ 0.01M p:v			pH NaF
	1:1	1:2.5	1:5	1:1	1:2.5	1:5	1:1	1:2.5	1:5	1:50
Vertic Haplustept fino esmectítico isohipertérmico (SSS; 1998) (Promedio de 3 determinaciones)										
A	7.3	7.68	7.69	5.12	5.56	5.56	6.40	6.69	6.73	-
Bw1	7.5	7.82	7.88	-	5.39	5.41	6.60	6.76	6.87	-
Bw2	7.6	7.85	7.89	-	5.33	5.36	6.70	6.87	6.99	-
Bw3	7.5	7.86	8.02	4.38	5.27	5.30	6.40	6.89	6.91	-
BC	7.5	7.89	7.99	4.70	5.10	5.11	6.40	6.84	6.85	-
Dystrudept isotérmico (SSS; 1998) (Promedio de 3 determinaciones)										
A	4.20*	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bw	5.23	5.4	5.52	-	-	-	-	-	-	-
C	3.96	-	4.37	2.89	-	3.11	-	-	-	-
Thaptic Hapludand isomésico (SSS; 1998) (Promedio de 3 determinaciones)										
Ap	4.9	-	-	3.9	-	-	-	-	-	11.2
AC	5.1	-	-	4.2	-	-	-	-	-	11.4
C	5.4	-	-	4.5	-	-	-	-	-	10.5
Ab	4.9	-	-	4.3	-	-	-	-	-	-
A/Bb	5.2	-	-	4.0	-	-	-	-	-	11.4
Bgb	5.2	-	-	3.8	-	-	-	-	-	11.2

* Se hizo esta determinación también en una suspensión 1:1 pero p:v; el valor promedio encontrado fue de 4.4, diferencia que no fue significativa estadísticamente (al 95%) con respecto al de la suspensión volumétrica.

1.2.2. Efecto de las sales

Cuando el pH del suelo se mide en una suspensión hecha con una solución salina adquiere un menor valor (es más ácido) que cuando se determina en una suspensión hecha en agua. La adición de sal incrementa la concentración de la solución del suelo con lo cual se contrae la DCD. Parte de los cationes (H_3O^+ y otros) que estaban saturando el coloide son desplazados por el catión de la sal y

pasan a la solución externa, lo cual hace que el pH baje al aumentar la concentración de H_3O^+ en dicha solución.

Con respecto a la medida del pH en suspensiones salinas, se presenta un caso especial en el sentido que se produce incremento en el valor del pH; éste es el caso en el cual la determinación se lleva a cabo en una suspensión hecha en NaF, en proporción 1:50 peso-volumen (1 g de suelo en 50 mL de solución); en este caso, el F desplaza iones OH de las superficies de los coloides no cristalinos que pasan a la solución del suelo incrementando su alcalinidad y, por tanto, subiendo el pH.

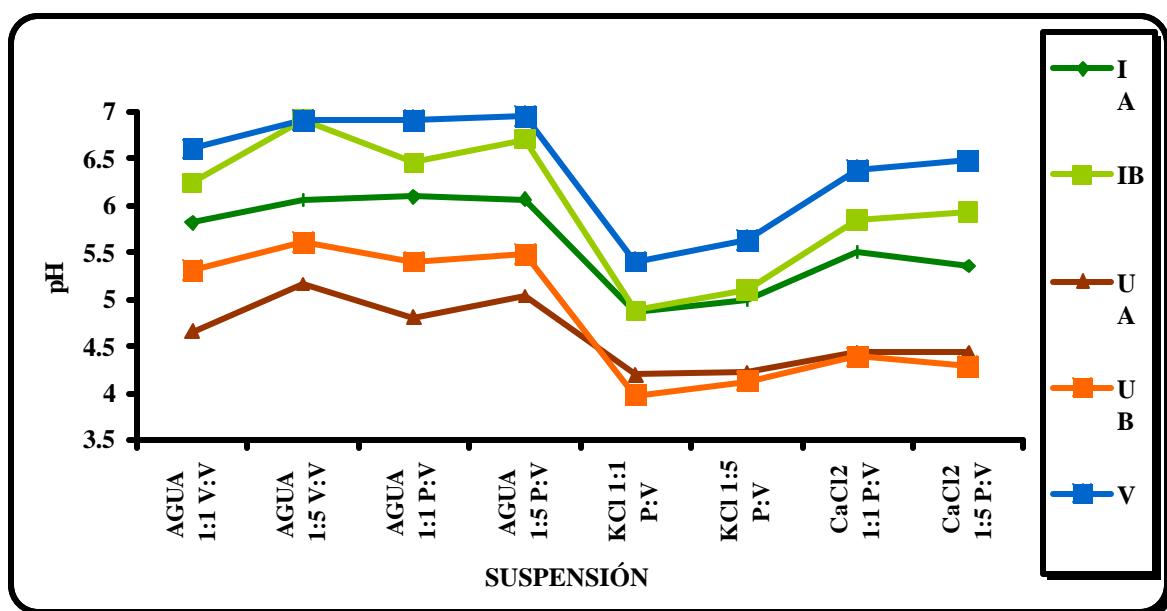


FIGURA 14.2. Efecto de dilución y de sales sobre el pH de algunos suelos seleccionados de Antioquia: IA e IB: Horizontes A y B, respectivamente de un Dystric Eutrudept fino mezclado isotérmico; UA y UB: Horizontes A y B, respectivamente, de un Typic Kandiudult fino caolinítico isotérmico; V: Horizonte A de un Vertic Haplustoll fino esmectítico isohipertérmico. (Clasificación según Soil Survey Staff, SSS, 1998; promedios de 3 determinaciones). (Resultados de Jaramillo, 1999, sin publicar).

1.2.3. Efecto del contenido de CO₂

Según Fassbender (1982), al aumentar la concentración de CO₂ en la suspensión el pH disminuye debido a la formación de ácido carbónico, en una primera etapa, y a la liberación de protones, en una posterior, según la siguiente reacción:



1.2.4. Variaciones estacionales

Se presentan variaciones en el pH, al ser medido en diferentes épocas del año, por efecto de cambios que se producen, a través del tiempo, en el efecto de dilución, en el contenido de sales y/o en el aporte

de CO₂ debido a la actividad biológica de los organismos en el suelo. En términos generales, en períodos de clima seco, el pH del suelo es menor (más ácido) que en las épocas húmedas.

En todos los casos expuestos, tanto en la Tabla 14.2 como en la Figura 14.2, se observa que los menores valores de pH se obtienen cuando éste se determina en una solución de KCl 1N, en proporción peso de suelo a volumen de solución de 1:1.

En la Figura 14.2 se aprecia que cuando los suelos tienen una mineralogía que les proporciona carga permanente: el Mollisol con propiedades vérticas y el Inceptisol eutrófico, el efecto del cloruro de calcio sobre el pH no es tan marcado, comparado con la medida hecha en agua y contrasta bastante con la medida que se obtiene en KCl; este comportamiento también se observa en el Inceptisol con propiedades vérticas de la Tabla 14.2. En el Ultisol, donde predomina la carga variable, la diferencia entre las medidas hechas con KCl y CaCl₂ no es muy amplia pero sí lo son con respecto a las que se hicieron en agua.

En el Andisol de la Tabla 14.2 se confirma también el fuerte impacto que tiene el KCl sobre el valor del pH del suelo; además, se presentan los valores de pH que se obtienen en estos suelos cuando se hace la suspensión en NaF.

Los resultados de Abril y Ortiz (1996), respaldan lo expuesto anteriormente; estos autores encontraron valores promedios de 4.33, 3.78 y 10.46 para el pH en agua 1:1 v:v, en KCl 1N 1:1 p:v y en NaF 1:50 p:v, respectivamente, medidos en 82 muestras de Andisoles del oriente antioqueño, bajo cobertura de *Pinus patula*.

1.3. CALIFICACIÓN DEL pH DEL SUELO

De acuerdo con el valor de pH que presenten y con el método utilizado para determinarlo, los suelos se califican de varias maneras, según diferentes autores, como puede apreciarse en la Tabla 14.3.

TABLA 14.3. Calificación del pH del suelo para dos métodos de determinación.

pH DETERMINADO EN AGUA 1:1		pH DETERMINADO EN KCl 1:1, P:V	
VALOR	CALIFICACIÓN *	VALOR	CALIFICACIÓN **
<3.5	Ultra ácido	<4.0	Extremadamente ácido
3.5 - 4.4	Extremadamente ácido	4.0 - 4.9	Fuertemente ácido
4.5 - 5.0	Muy fuertemente ácido	5.0 - 5.9	Moderadamente ácido
5.1 - 5.5	Fuertemente ácido	6.0 - 6.9	Ligeramente ácido
5.6 - 6.0	Moderadamente ácido	7.0	Neutro
6.1 - 6.5	Ligeramente ácido	7.1 - 8.0	Ligeramente alcalino
6.6 - 7.3	Neutro	8.1 - 9.0	Moderadamente alcalino
7.4 - 7.8	Ligeramente alcalino	9.1 - 10.0	Fuertemente alcalino
7.9 - 8.4	Moderadamente alcalino	> 10.1	Extremadamente alcalino
8.5 - 9.0	Fuertemente alcalino		
>9.0	Muy fuertemente alcalino		

* Según Soil Survey Division Staff (SSDS, 1993).

** Según Fassbender (1982).

En términos generales puede considerarse que desde el punto de vista del pH, los suelos se pueden agrupar en tres grandes categorías: **Suelos ácidos** los que presentan $\text{pH} < 6.5$; **Suelos neutros** los que tienen pH entre 6.5 y 7.3 y **Suelos básicos** aquellos que exhiben valores de $\text{pH} > 7.3$. Más adelante se ampliará esta concepción.

1.4. IMPORTANCIA DEL pH EN EL SUELO

1.4.1. En la disponibilidad de nutrientes

Prácticamente la disponibilidad de todos los nutrientes de la planta está controlada por el pH del suelo, como se aprecia en la Tabla 14.4. En ésta se presenta la solubilidad de los nutrientes en el suelo en relación con el pH del mismo. Además, también se incluye el valor de pH que produce la mayor solubilidad de otros elementos que, aunque no son nutrientes vegetales, sí pueden afectar el desarrollo de la planta.

TABLA 14.4. Efecto del pH sobre la solubilidad de algunos elementos que pueden afectar el desarrollo de la planta, así como sobre algunos procesos relacionados con la nutrición vegetal.

ELEMENTO O PROCESO	pH DE MÁXIMA DISPONIBILIDAD	FUENTE
N	6 – 8	Guerrero, M. (1991)
P	5.6 – 6.6*	Guerrero, M. (1991)
K y S	> 6	Guerrero, M. (1991)
Ca y Mg	> 6.5	Guerrero, M. (1991)
Fe	< 6	Guerrero, M. (1991)
Mn	< 5.5	Sánchez y Salinas (1983)
Cu y Zn	5 – 7	Guerrero, M. (1991)
B	5 – 7 y > 9	Guerrero, M. (1991)
Al	< 5.5	Bohn et al (1993)
Na	> 8.5	Porta et al (1994)
Nitrificación	6 – 8	Orozco (1999)
Desnitrificación	6 – 8	Orozco (1999)

* En Andisoles y en suelos LAC, entre 5.5 y 6.0.

1.4.2. En la identificación del tipo de carga de los coloides

Uehara y Keng (1974) establecieron que el tipo de carga que presenta el suelo se puede detectar obteniendo el valor del delta de pH (ΔpH), haciendo la diferencia entre los valores de pH determinados en KCl y en agua, según la siguiente relación:

$$\Delta\text{pH} = \text{pH en KCl} - \text{pH en agua} \quad [14.2]$$

Cuando el ΔpH adquiere signo negativo, en el suelo predomina este tipo de carga y es intercambiador catiónico; cuando el signo es positivo, el tipo de carga que predomina en el suelo es el positivo y éste es intercambiador neto de aniones.

1.4.3. En taxonomía de suelos

En la taxonomía de suelos del USDA (SSS, 1999, 1998) están definidas varias propiedades diagnósticas con base en el pH. Los materiales espódicos del suelo y el horizonte sulfúrico, presentan pH en agua 1:1 \leq 5.9 y \leq 3.5, respectivamente.

El pH en KCl se utiliza como criterio diferencial al nivel de gran grupo en los Oxisoles: Cuando su valor es de 5.0 o más, caracteriza taxones con las partículas Acr o Acro.

Las familias Ácida y No ácida de suelos minerales están definidas por tener pH en CaCl_2 0.01M (1:2) $<$ 5.0 y \geq 5.0, respectivamente; también las familias Euic y Dysic de los Histosoles y de los Histel se diferencian por dicho valor de pH: \geq 4.5 y $<$ 4.5, respectivamente.

El ΔpH cuando es igual a cero o cuando es positivo en ciertas partes del suelo, identifica subgrupos Anionic en los Oxisoles.

1.4.4. Para detectar coloides inorgánicos no cristalinos

La determinación del pH en NaF 1:50, p:v, se utiliza para detectar la presencia de **coloides inorgánicos no cristalinos** en el suelo: Si el pH $>$ 9.0, aquellos coloides están presentes en cantidades mayores a 5 % en el suelo (Fieldes y Perrott, 1966).

1.5. CAPACIDAD BUFFER DEL SUELO

Es la resistencia del suelo a cambiar el pH al adicionarle ácidos o bases, dentro de un determinado rango de valores de pH; esta capacidad es de especial magnitud en Andisoles, como lo muestran las gráficas de la Figura 14.3.

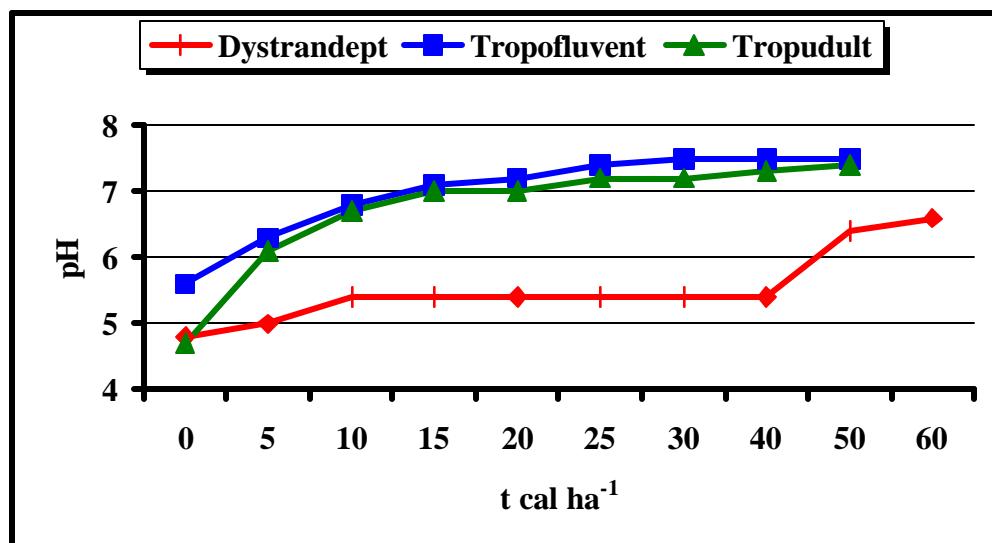
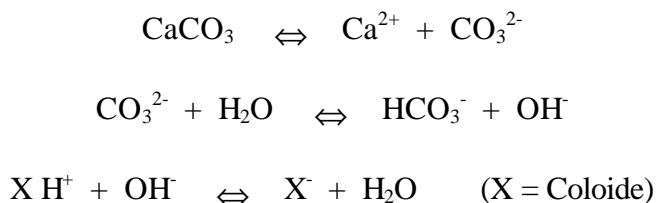


FIGURA 14.3. Capacidad buffer de algunos suelos de Antioquia (Con base en datos de Muñoz, 1984).

La importancia de esta propiedad radica en que dificulta el cambio del pH del suelo, cuando se quiere adecuar éste a un determinado valor, mediante la adición de sustancias ácidas o básicas. Ésta es una de las razones por las cuales, hoy en día, el encalamiento no se realiza con el objetivo primordial de producir dicho cambio de pH.

La capacidad buffer del suelo depende fundamentalmente del contenido y de la naturaleza de los coloides que éste posea, así como de los cationes básicos intercambiables que tenga. Los cationes básicos intercambiables ejercen un control importante en la capacidad buffer de los suelos que tienen carga permanente y, en los suelos de carga variable son de especial importancia los óxidos de hierro, sobretodo en el control de la acidificación del suelo, debido a que son los principales aceptores de protones en estos suelos (Zhang y Yu, 1997; Kong et al, 1997). Además de lo anterior, altos contenidos de materia orgánica y de alofano incrementan fuertemente la capacidad buffer de los suelos.

Espinosa (1994) sostiene que en los Andisoles se presenta tan alta capacidad buffer debido a la alta superficie reactiva que poseen sus coloides, la cual impide que el pH aumente porque los OH producidos por la hidrólisis del CO_3^{2-} , en el proceso de encalamiento, en lugar de quedar retenidos reaccionan con ellos deprotonándolos y formando agua, con lo cual el pH no cambia; las reacciones siguientes ilustran este efecto:



De las reacciones anteriores se concluye que el pH no cambia pero que la deprotonación que sufren los coloides involucrados produce cargas negativas en el suelo, es decir, aumenta su CIC, la cual, para el caso, es variable.

2. SUELOS ÁCIDOS

Como se indicó anteriormente, a este grupo pertenecen aquellos suelos que presentan valores de pH menores a 6.5; este tipo de suelos es muy importante en Colombia pues, según datos del IGAC, reportados por Jaramillo et al (1994), **más del 85 % del área del país** está ocupada por suelos de este grupo de reacción.

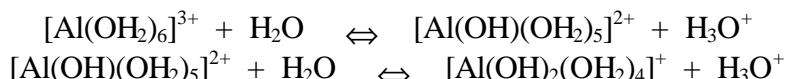
2.1. FUENTES DE ACIDEZ EN EL SUELO

Para que se genere un suelo ácido se requiere, en primera instancia, la presencia de diferentes sustancias capaces de suministrar protones. Las principales fuentes de estos protones en el suelo son, según Bohn et al (1993) y Kong et al (1997):

2.1.1. Grupos ácidos de los coloides inorgánicos del suelo

Se presentan varias fuentes de protones en estos materiales:

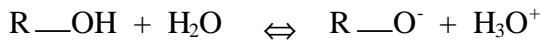
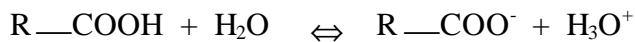
- En primer lugar, los iones de Al intercambiable hidratados, los cuales en su proceso de neutralización se hidrolizan y liberan iones H_3O^+ , según las siguientes reacciones:



- Iones H_3O^+ provenientes de la deprotonación de grupos terminales FeOH , AlOH y SiOH de las estructuras básicas de los minerales.
- Iones H_3O^+ intercambiables de la superficie de los coloides, aunque éstos sólo son importantes, en cantidad, cuando el pH es menor a 4.

2.1.2. Grupos ácidos de la materia orgánica

Según Fassbender (1982) las moléculas orgánicas del suelo presentan en su periferia radicales activos carboxílicos y fenólicos (los carboxílicos son ácidos más fuertes que los fenólicos) que son fuente de protones al disociarse de acuerdo con las reacciones (R representa el resto de la molécula orgánica):



2.1.3. Ácidos solubles

En los suelos se encuentran ácidos solubles que se producen en diversas cantidades por actividad biológica o por prácticas agrícolas. Las principales fuentes de estos ácidos son:

- Aplicaciones intensivas de fertilizantes amoniacales y de urea (Orozco, 1999).
- Oxidación de pirita (FeS_2) por drenaje que puede producir ácido sulfúrico, común en Histosoles.
- Mineralización de la materia orgánica que puede producir ácidos orgánicos solubles.

2.2. FORMACIÓN DE SUELOS ÁCIDOS

A parte de que en el suelo existen las fuentes de acidez expuestas en el numeral anterior, hay algunos factores que favorecen la formación de suelos ácidos como:

- Unas condiciones climáticas en las cuales se presente un exceso permanente de la precipitación sobre la evapotranspiración potencial que genere excedentes de agua que, en suelos con una condición adecuada de drenaje, puede causar altas pérdidas de bases por lixiviación, reduciendo su participación en el complejo de intercambio y favoreciendo la acumulación de Al, Fe y otros cationes de carácter ácido.
- Los procesos de alteración de los minerales del suelo, bien sea por meteorización o por pedogénesis, van liberando de sus estructuras cationes que pasan a la solución del suelo; entre los cationes que se liberan, los básicos son los más solubles y, por lo tanto, los que más fácil se pierden por lixiviación, acumulándose los de carácter ácido; este mecanismo de acidificación del suelo se expresa fuertemente en suelos como los Oxisoles y Ultisoles.
- Algunos materiales parentales en su composición mineralógica no poseen materia prima para que el suelo que se desarrolle de ellos tenga un adecuado contenido de bases, como es el caso de las areniscas cuarcíticas y las cuarcitas, entre otros; también es conocido el caso de los suelos de la altillanura colombiana, donde se han producido Oxisoles, favorecidos, en parte, por la pobreza del material parental sedimentario que les dio origen, producto de la erosión en la cordillera, que llegó ya meteorizado y, por tanto, empobrecido, a estos paisajes.
- El consumo de bases por parte de las plantas también ayuda a desbalancear el equilibrio entre cationes básicos y ácidos, favoreciendo la acumulación de los ácidos.
- Las prácticas de manejo de suelos, como fertilización continua e intensiva con ciertos fertilizantes de efecto residual ácido, favorecen la acidificación del suelo; el drenaje excesivo de los suelos también puede ayudar eficientemente a su acidificación al incrementarse la lixiviación de bases en él.

2.3. TIPOS DE ACIDEZ EN EL SUELO

En el suelo se distinguen varios tipos de acidez, dependiendo de los iones que la producen, los cuales requieren diferentes métodos para cuantificarlas.

2.3.1. Acidez activa

Es la acidez que se evalúa cuando se mide el **pH** del suelo; es la que está determinando las condiciones de acidez actual del suelo e involucra los iones H_3O^+ disociados en la solución de éste.

2.3.2. Acidez intercambiable

Es la acidez que está asociada al Al^{3+} , Al(OH)^{2+} y al Al(OH)_2^+ y se establece determinando la cantidad de aluminio intercambiable que tiene el suelo al lavarlo con una solución de KCl 1N; el método para realizar esta determinación puede verse en Motta et al (1990); este tipo de acidez es la más importante en suelos que tienen $\text{pH} < 5.5$, ya que a partir de este valor empieza a aumentar la solubilidad del aluminio, en forma exponencial.

2.3.3. Acidez titulable o potencial

Espinosa (1994) la define como la acidez dependiente del pH que se extrae con BaCl₂-TEA a pH de 8.2 (ver método en el numeral 2.1.1 del Capítulo 13). Es muy alta porque incluye H₃O⁺ no intercambiable proveniente de la materia orgánica (fenol y carboxilo) y de sesquióxidos hidratados de Fe y Al.

2.3.4. Acidez total

Comprende la sumatoria de la acidez intercambiable más la acidez titulable; tanto este tipo de acidez como la titulable no tienen ninguna importancia práctica en el manejo de suelos. En la Tabla 14.5 se presentan algunos ejemplos de valores de los diferentes tipos de acidez en algunos suelos de Colombia, reportados por Guerrero (1991).

TABLA 14.5. Valores comunes de los diferentes tipos de acidez en algunos suelos de Colombia (Tomados de Guerrero, 1991).

SUELOS (ORDEN)	REGIÓN	pH	TIPO DE ACIDEZ [cmol (+) Kg ⁻¹ de suelo]		
			INTER- CAMBIABLE	TITULABLE	TOTAL
Inceptisol	Sabana de Bogotá	4.5	4.0	41.0	45.0
Inceptisol	Sabana de Bogotá	5.2	0.5	18.7	19.2
Andisol	Chinchiná - Caldas	5.5	0.4	20.6	21.0
Oxisol	Llanos Orientales	4.4	5.0	8.7	13.7

2.4. GRUPOS Y PROPIEDADES DE SUELOS ÁCIDOS

Los diferentes valores de pH en el rango ácido presentan diferencias entre los cationes que controlan la acidez. Ésto genera propiedades y problemas de manejo diferentes; por lo anterior pueden separarse 4 grupos de suelos ácidos. Las propiedades más sobresalientes de dichos grupos se resumen de Sánchez y Salinas (1983) y de Bohn et al (1993).

2.4.1. Suelos minerales con pH < 4.5

En este grupo de suelos predominan las formas de aluminio intercambiable del Al³⁺; también en éste es apreciable el contenido y solubilidad de iones como H₃O⁺ y de Mn²⁺, por lo cual tienen altas probabilidades de que se presenten **toxicidades** con ellos; los procesos de transformación de amoníaco a nitrato son muy lentos, pudiendo causar **deficiencias de nitrógeno** en plantas que no sean hábiles en la utilización del amonio.

Los contenidos de **bases intercambiables** y de **molibdeno** son **muy bajos**, en tanto que los de los demás elementos menores pueden ser bajos. La **disponibilidad de fósforo** puede ser muy baja en estos suelos debido a que frecuentemente hay una **alta fijación** de este elemento que lo lleva a formar compuestos completamente insolubles.

2.4.2. Suelos minerales con pH entre 4.5 y 5.5

En estos suelos actúan las formas de aluminio intercambiable Al(OH)_2^+ y Al^{3+} ; en este rango de pH no es significativo el contenido de H_3O^+ y los demás problemas expuestos para los suelos del grupo anterior también se presentan en este grupo, aunque con menor intensidad que en aquel.

2.4.3. Suelos minerales con pH entre 5.5 y 6.5

En este grupo de suelos ya no hay ningún contenido de acidez intercambiable por lo que desaparece la posibilidad de toxicidad con Al^{3+} , H_3O^+ o Mn^{2+} . Hay una mejora en la actividad biológica bacteriana con respecto a la de los suelos con los valores de pH anteriores; el suministro de bases, de molibdeno y de fósforo se mejora llegando a ser óptimo para muchas plantas en el límite superior del rango de pH que define este grupo.

En términos generales, puede decirse que los suelos minerales ácidos, descritos en los numerales anteriores, poseen **buenas propiedades físicas**. Tienen una buena estructura debido a la presencia de los sesquióxidos de Fe y Al que la estabilizan, aunque se pueden producir cementaciones extremas o formación de concreciones indeseables, bajo ciertas condiciones de manejo, como lo observaron Ordóñez et al (1992) en la amazonia colombiana.

Sánchez y Salinas (1983) han encontrado que muchos Oxisoles y Ultisoles tropicales tienen una baja capacidad de almacenamiento de agua para la planta, debido al tipo de coloide inorgánico que domina en ellos y al bajo contenido de materia orgánica.

2.4.4. Suelos orgánicos

En general, todos los suelos orgánicos presentan reacción ácida y normalmente más ácida que la de los suelos minerales, generada por los ácidos orgánicos que se acumulan en él, sobre todo cuando están saturados con hidrógeno; los valores de pH de estos suelos pueden llegar a ser menores de 3.0, en el caso de que presenten oxidación intensa de compuestos de azufre en estado de reducción.

En estudios hechos en el Putumayo y en el altiplano de Boyacá (Colombia), con este tipo de suelos, López y Cortés (1978) encontraron que aquellos tenían alta CIC, alta acidez y contenidos bajos a medios de bases y de fósforo, reflejándose una baja fertilidad en ellos; características similares encontró Jaramillo (1992) en suelos orgánicos en el altiplano de Amalfi, nordeste antioqueño; otras propiedades de estos suelos se detallan en el Capítulo 18.

2.5. INTERPRETACIÓN DE LA REACCIÓN EN SUELOS ÁCIDOS Y NEUTROS

Como se recuerda, la reacción del suelo se evalúa con dos parámetros: el **pH** y la **acidez intercambiable**; con base en estos dos también se establecen las interpretaciones correspondientes.

2.5.1. El pH

Para evaluar esta medida, hay que tener en cuenta el cultivo que se piensa plantar en el suelo que se estudia, pues cada planta tiene un valor de pH óptimo y un rango de tolerancia para su desarrollo; por ejemplo, Valencia y Carrillo (1983) encontraron que el café puede establecerse en suelos con un rango de pH entre 4.0 y 6.5, pero que el rango óptimo para su desarrollo está entre 5.0 y 5.5.

Guerrero (1991) sostiene que agronómicamente la mayoría de elementos esenciales y de cultivos se comportan bien a pHs entre 5.5 y 6.7 y que probablemente el pH óptimo está entre 6.2 y 6.5. Herrón (2001) aclara que en Andisoles este rango está entre 5.5 y 6.0¹. El ICA (1992) reporta algunos rangos de tolerancia de pH para algunas plantas de cultivo así:

- Plantas con rango entre 4.8 y 5.5: **Piña, yuca, papa y pastos gordura, braquiaria y puntero.**
- Plantas con rango de pH entre 5.6 y 6.4: Arroz, maíz, tomate, trigo, frijol.
- Plantas con rango de pH entre 6.5 y 7.3: **Alfalfa, trébol, algodón, coliflor, caña de azúcar.**

Tablas con una gran cantidad de especies con su pH óptimo y su rango de tolerancia se encuentran publicadas en Fassbender (1982) y en Porta et al (1994).

2.5.2. La acidez intercambiable

Para interpretar esta propiedad también se requiere conocer la especie vegetal que se pretende tener pues no todas las plantas toleran las mismas cantidades de aluminio en el suelo; para evaluar el estado de la acidez intercambiable en el suelo, Sánchez y Salinas (1983) han propuesto utilizar la saturación con aluminio intercambiable con los siguientes niveles críticos generales, aunque cabe repetir que cuando se conoce la planta que se quiere tener, para la interpretación debe conocerse su susceptibilidad a la saturación propuesta:

Nivel de saturación con aluminio intercambiable	Valor de la saturación (%)
BAJO	< 40
MEDIO	40 - 60
ALTO	60 - 80
MUY ALTO	> 80

Sánchez y Salinas (1983) establecen una lista abundante de plantas con su grado de tolerancia a la saturación con aluminio, de la cual se extraen los siguientes ejemplos de plantas de cultivo comunes:

- Plantas susceptibles (Saturación < 20%): **Algodón, girasol, frijol, soya.**
- Plantas tolerantes (Saturación entre 40 y 60%): Arroz, tabaco, trigo, sorgo, papa, avena.
- Plantas muy tolerantes (Saturación > 60%): **Yuca, piña, café, pasto braquiaria.**

¹ Herrón F. (2001). Exprofesor Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. Asesor particular en fertilidad de suelos. Comunicación personal.

En los Andisoles hay que tener mucha precaución en la interpretación de la saturación con Al, respecto a la posibilidad de toxicidad con él, ya que Gartner (1994) demostró que el KCl 1M es capaz de extraer Al unido a la materia orgánica, el cual no está en forma tóxica para las plantas.

2.6. MANEJO DE LOS SUELOS ÁCIDOS MINERALES

Se tratará únicamente el manejo que corresponde a los suelos minerales debido a que en el Capítulo 18 de este texto se incluye lo correspondiente a los suelos orgánicos; los suelos se tratarán en dos grupos: uno de suelos con pH entre 5.5 y 6.5 y el otro con los suelos de pH < 5.5.

2.6.1. Suelos con pH entre 5.5 y 6.5

Los suelos con pH entre 6.1 y 6.5 presentan las condiciones casi óptimas para la nutrición de la mayoría de las plantas. En los suelos con pH entre 5.5 y 6.0 los principales limitantes para su uso agropecuario se relacionan con problemas de nutrición ocasionados por **desbalances** entre nutrientes o por **deficiencia** de ellos en el suelo.

En el caso del nitrógeno, este elemento puede suplirse aplicando materia orgánica al suelo (ver Capítulo 17) o por medio de fertilizantes químicos; el fósforo y el potasio, en caso de que sean deficientes, se aplican al suelo en forma de fertilizantes, en las dosis que corresponda de acuerdo con el nivel de deficiencia y con la exigencia del cultivo.

Si en el suelo se presentan deficiencias de las otras bases (Ca y Mg), éstas se aplican al suelo en las cantidades requeridas a partir de cales agrícolas (si se requiere sólo Ca) o de cales dolomíticas (si se requieren Ca y Mg); estos materiales se aplican con los métodos y precauciones que se utilizan para los fertilizantes, pues se están usando como si fueran uno de ellos.

Cualquier otro problema de deficiencias nutricionales, que se presente en estos suelos, debe ser resuelto siguiendo las pautas dadas para los elementos anteriores, es decir, medir las cantidades que posee el suelo, establecer el requerimiento de la planta y si el suelo es deficiente, calcular la cantidad que falta y aplicarla en forma de fertilizante; cabe aclarar que los métodos utilizados para hacer los cálculos de fertilizantes a aplicar escapan a los objetivos de este texto.

2.6.2. Suelos con pH < 5.5

Como se indicó anteriormente, en estos suelos la posibilidad de que se presenten **toxicidades**, principalmente por aluminio, es alta. Éste es el primer problema que se debe evaluar y tratar de resolver.

Para estimar la posibilidad de toxicidad con aluminio, se debe establecer el valor de la saturación que se presenta en el suelo con este catión y comparar esa saturación con la que es capaz de tolerar el cultivo que se desea plantar. Si hay más aluminio del que la planta tolera, se debe **neutralizar** (llevar a formas insolubles) el exceso mediante prácticas de **encalamiento**.

Los materiales más utilizados para llevar a cabo el encalamiento en los suelos son la **cal agrícola**: CaCO_3 y la **cal dolomítica**: $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$; en Colombia la cal agrícola contiene entre 70% y 80% de CaCO_3 y la dolomítica contiene entre 40% y 70% de CaCO_3 y entre 8 y 36% de MgCO_3 ; aparte de los anteriores materiales, se pueden utilizar otros para encalar el suelo como la cal viva (CaO), la cal apagada [Ca(OH)_2] y roca fosfórica.

El propósito fundamental del encalamiento es neutralizar la acidez intercambiable que hay en exceso en el suelo para una determinada especie vegetal; sin embargo, con esta práctica se obtienen otros beneficios colaterales: se reduce la toxicidad de Al, Mn y Fe; se eleva el pH; se aumenta la disponibilidad del fósforo y del molibdeno; se mejora el suministro de Ca y/o de Mg, así como de N; se mejora la actividad microbiológica en el suelo, especialmente de las bacterias; si no hay buena estructuración en el suelo, el encalamiento puede mejorárla.

Con relación a las dosis de cal que deben aplicarse al suelo, hay varios criterios para establecerlas como lo muestran Fassbender (1982) y Guerrero (1991), entre otros autores; para fines prácticos puede tomarse la recomendación del ICA (1992) que establece que por cada miliequivalente de Al^{3+} por 100 gramos de suelo que haya que neutralizar, se deben aplicar 1.5 toneladas por hectárea de cal agrícola con 80% de CaCO_3 , si el suelo tiene menos de 10% de materia orgánica y $\text{pH} < 5.5$ o más de 10% de materia orgánica y $\text{pH} < 5.0$.

Cochrane et al, citados por Sánchez y Salinas (1983), establecieron la siguiente relación para calcular los requerimientos de cal agrícola del suelo, teniendo como base el porcentaje de saturación con aluminio que tenga:

$$t \text{ } \text{CaCO}_3 \text{ } ha^{-1} = 1.8 \left[Al - \frac{RAS (Al + Ca + Mg)}{100} \right] \quad [14.3]$$

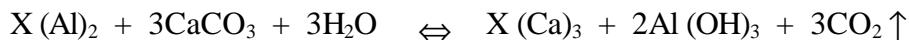
Donde RAS representa el porcentaje de saturación con aluminio tolerable por el cultivo a establecer y Al, Ca y Mg son las cantidades de aluminio, calcio y magnesio que tiene el suelo, en meq (100 g de suelo) $^{-1}$ o en cmol (+) kg^{-1} de suelo.

Como ejemplo de la aplicación de esta fórmula se tiene un suelo con contenidos de Al, Ca y Mg de 3.1, 2.2 y 1.3 cmol (+) kg^{-1} de suelo, respectivamente. Se quiere saber cuántas toneladas por hectárea de cal agrícola se le deben aplicar a dicho suelo para dejar la saturación con Al en un valor de 20%, que es la máxima tolerable por el cultivo que se va a establecer en él:

$$t (\text{CaCO}_3) \text{ } ha^{-1} = 1.8 \left[3.1 - \frac{20 (3.1 + 2.2 + 1.3)}{100} \right] = 3.204 \text{ } t$$

La cal necesaria se aplica al **voleo** (esparcida en forma continua sobre la superficie del suelo) y se incorpora a la capa arable del mismo con un mes de anticipación a la siembra del cultivo por lo menos, para que haya tiempo suficiente de reacción y sea eficiente la neutralización del Al^{3+} . Ésta se presenta

según la siguiente reacción, resumida con base en las de Guerrero (1991) y de Espinosa (1994) (la X representa el coloide del suelo):



Después de haber corregido, en este grupo de suelos, el problema de la acidez intercambiable, se procede a solucionar los otros problemas nutricionales que se presenten. Para ésto se tienen en cuenta las consideraciones expuestas en el primer grupo de suelos ácidos del numeral anterior.

Otras prácticas de manejo, para estos suelos, discutidas ampliamente por Sánchez y Salinas (1983), consisten en cambiar el sentido tradicional del manejo de la fertilidad del suelo. En lugar de llevar a cabo una serie de acciones tendientes a adecuar el suelo a unos requerimientos que tiene la planta, se buscan plantas que se adapten a las condiciones que presenta el suelo en su condición natural.

En términos generales, las leguminosas son más tolerantes que las gramíneas a la acidez y al bajo suministro de fósforo, en tanto que las gramíneas son más tolerantes a excesos de manganeso que las leguminosas.

Con aquellos sistemas de evaluación y selección de material vegetal adaptado a determinadas condiciones de suelo, Sánchez y Salinas (1983) reportan gran cantidad de trabajos en los cuales se han obtenido plantas alimenticias para el hombre, pastos y leguminosas forrajeras y otros tipos de plantas resistentes a la toxicidad con aluminio o con manganeso; con estas plantas, se pueden obtener producciones relativamente buenas, utilizando eficientemente las bajas cantidades de insumos que se requieren con estos sistemas de manejo.

El Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) desarrolló algunas variedades de **plantas tolerantes a la acidez** para los suelos ácidos de los Llanos Orientales de Colombia, como puede verse en la Tabla 14.6.

TABLA 14.6. Variedades de algunas plantas de cultivo tolerantes a diferentes condiciones de acidez, desarrolladas por el ICA para los suelos de los Llanos Orientales de Colombia, según información de Valencia y Leal (1996).

CULTIVO	VARIEDAD	SATURACIÓN CON AL QUE TOLERAN (%)	PRODUCCIÓN (kg ha ⁻¹)
Arroz	Oryzica Sabana 6	90	3220
Soya	Soyica Altillanura 2	70	2100
Maíz	Sikuani V-110	55	2930
	Icaravan 1	60	2478
Sorgo	Sorghica Real 60	60	3109
	Sorghica Real 40	40	3090

2.7. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA DE SUELOS ÁCIDOS

Según el sistema taxonómico americano (SSS, 1999, 1998), los suelos ácidos se encuentran distribuidos en casi todos los órdenes del sistema; sin embargo, hay algunos órdenes en los cuales son los suelos dominantes.

Los suelos de los órdenes Oxisoles y Ultisoles (suelos tropicales típicos) agrupan sólo suelos ácidos, los cuales se caracterizan por presentar una evolución avanzada, alta lixiviación de bases, bajo contenido de minerales meteorizables y predominio de sesquióxidos de Fe y Al en la fracción arcilla.

El orden de los Espodosoles también agrupa suelos ácidos originados por alta lixiviación de bases y por procesos de eluviación - iluviación de materia orgánica, arcilla y/o sesquióxidos de Fe y Al o por la acumulación de materiales espódicos; estos suelos se originan principalmente en climas húmedos y con materiales parentales muy permeables.

Algunos órdenes presentan taxones donde los suelos son ácidos; en Colombia, los suelos ácidos más frecuentes se identifican mediante los siguientes elementos formativos:

- Inceptisoles: Sulf, Hum, Dystr, al nivel de gran grupo; Sulfic, Aquandic, Cumulic, Humic, Histic, Plinthic, Andic, Oxic, Dystric, al nivel de subgrupo.
- Entisoles: Sulf, en gran grupo y Sulfic, Humaqueptic, Andic, al nivel de subgrupo.
- Andisoles: La mayoría de ellos en el país son ácidos.
- Alfisoles, Mollisoles y Vertisoles: En algunos se pueden presentar suelos ligeramente ácidos a casi neutros como Kandi, Kanapl, Umbr, Dystr, en gran grupo y Umbric, Histic, Oxic, Plinthic, Andic, Ultic, Kandic, Alic, en subgrupo.
- Histosols: Como se mencionó anteriormente, en este orden se agrupan los suelos orgánicos, los cuales son suelos ácidos.

Al nivel de familia se definen algunos taxa cuyos suelos pueden presentar condiciones de acidez:

- Familias por clase mineralógica para órdenes diferentes a Oxisoles e Histosoles: Ferrítica, Gibbsítica, Oxídica, Halloysítica, Caolinítica y algunas Mezcladas.
- Familias por reacción: Ácida, Álica.

3. SUELOS BÁSICOS

Se incluyen en este grupo aquellos suelos que presentan valores de pH > 7.3.

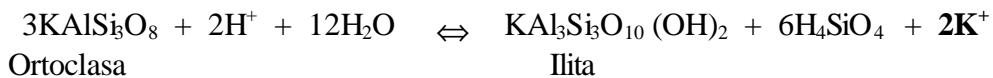
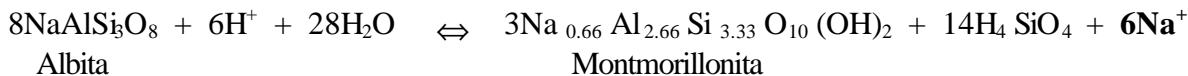
3.1. FUENTES DE ALCALINIDAD EN EL SUELO

En el suelo funcionan como fuentes de alcalinidad aquellas sustancias que al reaccionar con el agua producen iones hidroxilo; en este sentido, los cationes alcalinos del suelo están constituidos por las bases, es decir, por los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ .

3.2. FORMACIÓN DE SUELOS BÁSICOS

Algunos de los factores que favorecen la formación de suelos básicos son:

- Los procesos de alteración de minerales por meteorización o por pedogénesis liberan cationes de las estructuras mineralógicas, los cuales pasan a la solución del suelo y permanecen en él si las condiciones climáticas lo permiten; un ejemplo de este mecanismo lo dan las siguientes reacciones:



- Unas condiciones climáticas en las cuales la evapotranspiración potencial sea mayor que la precipitación generan déficit de agua en el suelo y, por lo tanto, no hay lavado de bases y/o sales, sino que éstas se acumulan en aquél. Ésto hace que los suelos básicos sean más comunes en regiones áridas y semiáridas.
- Sedimentos acumulados bajo áreas marinas o bajo cuerpos de agua salada, como lagos y lagunas, son enriquecidos en sales por efecto de la evaporación de las aguas; cuando estos depósitos quedan expuestos en la superficie del terreno, dan origen a suelos básicos.
- Áreas bajas, con relieve plano-cóncavos, tienen drenaje restringido y, por lo tanto, no son sometidas a procesos de lavado de sus bases; por el contrario, pueden incluso sufrir aporte de ellas por el nivel freático.
- Zonas con nivel freático alto y contaminado con sales provenientes de aguas subterráneas salobres, pueden alcalinizar el suelo por ascenso capilar de sales a partir de aquél.
- También en este caso, como en el de los suelos ácidos, el mal manejo del suelo puede generar condiciones de alcalinidad en él; las actividades que con mayor frecuencia producen estos problemas en el suelo son las malas prácticas de riego: los malos diseños, el drenaje insuficiente o el uso de aguas de mala calidad; también, el uso continuo de fertilizantes con efecto residual alcalino.

3.3. GRUPOS Y PROPIEDADES DE LOS SUELOS BÁSICOS

Como en el caso de los suelos ácidos, en los suelos básicos también se pueden separar diferentes grupos teniendo en cuenta su tipo de basicidad y las propiedades que de ellas se derivan.

3.3.1. Suelos salinos

Son suelos que presentan una **conductividad eléctrica** (capacidad de una solución de transmitir la electricidad, la cual está en relación directa con su contenido de sales) en el extracto de saturación de 4 o más dSm^{-1} , un $\text{PSI} < 15\%$ y generalmente su pH es menor a 8.5. Con frecuencia estos suelos

presentan costras salinas blancas en la superficie por lo que son llamados **ácali blanco** (Laboratorio de Salinidad, 1974).

Las propiedades de estos suelos dependen de su contenido de sales el cual controla el **potencial osmótico** de la solución del suelo y, por lo tanto, buena parte de la disponibilidad de agua para las plantas; además, este contenido también controla la posibilidad de que se presente toxicidad en ellas; los contenidos de bases son relativamente altos pero su balance es muy variable; los aniones más comunes, en estos suelos, son los **cloruros** y los **sulfatos**, aunque, a veces, es importante el contenido de nitratos (Laboratorio de Salinidad, 1974).

Como estos suelos generalmente se desarrollan en condiciones de climas secos, su contenido de materia orgánica es bajo y, por tanto, hay deficiencia de nitrógeno; en las condiciones de pH que predominan en estos suelos también son comunes las deficiencias en fósforo y en elementos menores, exceptuando el molibdeno; los contenidos de bases son generalmente altos, pero son frecuentes los desbalances entre ellas, pudiendo ocasionar deficiencias en las plantas por antagonismo; normalmente, tienen buenas propiedades físicas.

3.3.2. Suelos sódicos

Según el Laboratorio de Salinidad (1974) estos suelos poseen un $\text{PSI} > 15\%$, una conductividad eléctrica $< 4 \text{ dSm}^{-1}$ y generalmente presentan $\text{pH} > 8.5$; se les da el nombre común de **ácali negro** porque normalmente presentan acumulación de materia orgánica dispersa en la superficie por lo cual adquieren una película de color oscuro en ella (ver Figura 14.4).



FIGURA 14.4. Costras superficiales formadas en suelos sódicos (ácali negro).

En estos suelos, el alto contenido de **sodio intercambiable** genera problemas importantes de porosidad y permeabilidad originados por la dispersión de los coloides, aparte de que este elemento también puede producir toxicidad en plantas susceptibles.

Con relación a sus propiedades nutricionales, estos suelos presentan las mismas limitaciones que los salinos, aunque en un grado mayor que aquellos, debido a que los sódicos presentan mayores valores de pH; García (1991) encontró que en la mayoría de los suelos sódicos del Valle del Cauca el anión predominante es el **sulfato**.

3.3.3. Suelos salino - sódicos

Son suelos que presentan conductividad eléctrica mayor a 4 dSm⁻¹ y PSI > 15% (Laboratorio de Salinidad, 1974); generalmente su pH es menor a 8.5 debido a la presencia de exceso de sales; esta misma condición de alta salinidad no deja que la estructura del suelo se colapse al impedir la dispersión de los coloides, por lo cual estos suelos no presentan los problemas físicos de los suelos sódicos.

La eliminación de las sales antes que el Na⁺, en estos suelos, los transforma en sódicos. Los limitantes de fertilidad que presentan se encuentran en una situación intermedia entre los dos grupos anteriores de suelos básicos.

3.3.4. Otros suelos básicos

Aparte de los grupos anteriores, se definen otros grupos de suelos que, debido a los componentes que acumulan, adquieren reacción básica; ellos son:

- **Suelos magnésicos:** Aquellos que presentan alta saturación con Mg²⁺ en el complejo de intercambio; García (1991) enumera varios trabajos en los cuales se sostiene que altas cantidades de Mg²⁺ (la cual no está definida explícitamente) tienen efectos similares a los que tiene el Na⁺ en el suelo, cuando éste está saturando más de 15% de la CIC del mismo; pese a lo anterior, Sarria y García (1991) y Mendoza y García (1991) no encontraron ningún efecto de las altas concentraciones de Mg²⁺ sobre las propiedades físicas de los Vertisoles del Valle del Cauca que trabajaron.

El autor de este texto encontró encostramiento superficial y poco desarrollo estructural, con fuerte tendencia a estructura columnar, en Inceptisoles de laderas del Valle de Aburrá, derivados de duníta (roca ultrabásica, ver Capítulo 1, página 23), con pH > 6.5 y saturación con Mg²⁺ > 30%.

En trabajos más recientes e intensivos de caracterización de suelos magnésicos en el Valle del Cauca, Borrero et al (1998) definieron varios grupos de este tipo de suelos, teniendo en cuenta la relación que presentaban entre los contenidos de sus bases intercambiables. Adoptaron, como límite crítico para definir el carácter magnésico, una saturación con Mg intercambiable de la CIC 7.0, mayor o igual a 30% y, de sus observaciones de campo, concluyeron que los suelos magnésicos de esta región son altamente plásticos y pegajosos, muy duros al secarse, que retienen humedad con una fuerza extraordinaria y que presentan fuerte deterioro de sus propiedades físicas.

Borrero et al (1998) encontraron, además, una relación entre el grupo de suelo magnésico definido y el paisaje fisiográfico en el cual se ubicaban y un área total afectada por dichos suelos de 116869 ha; de esta área, 24597 ha se ubicaron en la llanura aluvial del río Cauca y 79440 ha en la llanura aluvial de piedemonte.

- **Suelos calcáreos:** Son suelos con alto contenido de carbonato de calcio libre, por lo cual reaccionan con HCl diluido, produciendo efervescencia; estos suelos presentan pH > 8.4. Pulido (2000) encontró que estos suelos se distribuyen ampliamente en la zona caribe colombiana, afectando alrededor de 758200 ha y, en la mayoría de los casos, afectados también con otras sales y con sodio.

3.4. MANEJO DE LOS SUELOS BÁSICOS

Escapa al alcance de este documento hacer un análisis detallado de las prácticas que se llevan a cabo para recuperar estos suelos con el fin de desarrollar en ellos actividades agropecuarias; sin embargo, debe hacerse un esbozo de las principales actividades que se deben llevar a cabo para adecuar estos suelos, sobre todo para llamar la atención acerca de la complejidad que está involucrada en ella, aparte de los altos costos en insumos y tiempo que requieren: hasta más de 3 ó 4 años, dependiendo del problema específico que se tenga.

3.4.1. Suelos Salinos

En este grupo de suelos, la principal acción a desarrollar para recuperarlos consiste en eliminar las sales que se encuentran en exceso en él; lo anterior se logra haciendo pasar a través del suelo una cantidad adecuada de agua, generalmente aplicada con algún sistema de riego; Pizarro (1978) sostiene que el método más eficiente de hacer los **lavados** es fraccionando la dosis en varias aplicaciones en lugar de aplicarla en un solo riego.

Para garantizar que las sales disueltas en el agua realmente sean eliminadas del suelo, debe proveerse un adecuado sistema de **drenaje** que las reciba y las exporte del lote que está en recuperación.

Generalmente, después de que se han eliminado las sales perjudiciales del suelo con los lavados, es necesario hacer unos lavados de mantenimiento, los cuales pueden hacerse periódicamente e independientes del riego convencional para el cultivo o pueden hacerse en estos riegos, aplicando un exceso de agua en cada uno de ellos

3.4.2. Suelos sódicos

Estos suelos son más difíciles de recuperar debido al deterioro de sus propiedades físicas; en este caso se requiere remover del suelo el Na^+ que está ocupando los sitios de intercambio.

La remoción del Na^+ del complejo de intercambio se hace adicionando al suelo **enmiendas** químicas que aporten Ca^{2+} o que activen el que hay en el suelo para que lo reemplace. Una vez removido el Na^+

se aplican **riegos** para lavar. En este punto es donde se presenta la mayoría de complicaciones para la recuperación, pues el suelo ha perdido su estructura y, por tanto, su espacio poroso y su permeabilidad, dificultando los lavados.

Se hace necesario mejorar las propiedades físicas del suelo para mejorar la eficiencia de los lavados; estas mejoras pueden hacerse de varias formas:

- Mecánicamente, mediante aradas profundas para romper discontinuidades hidráulicas entre horizontes del suelo o con subsolado para romper horizontes y/o capas compactadas o cementadas.
- Adicionando arena a suelos arcillosos para cambiar su textura y, por tanto, sus propiedades hidrológicas (Pizarro, 1978).
- Aplicando materia orgánica para mejorar la estructura del suelo y las propiedades relacionadas con ella; los productos de la descomposición de este material pueden mejorar la solubilidad de ciertas sales de calcio en el suelo y favorecer la sustitución de Na^+ por Ca^{2+} .

Con respecto al uso de las **enmiendas**, Pizarro (1978) y el Laboratorio de Salinidad (1974) llaman la atención en el sentido de que no todas sirven en todos los suelos. Agrupan los suelos sódicos en tres clases, de acuerdo con algunas propiedades que tienen que ver con su recuperación:

- 1. Suelos que contienen carbonatos alcalinotérreos.
- 2. Suelos casi sin carbonatos alcalinotérreos y con $\text{pH} > 7.5$.
- 3. Suelos casi sin carbonatos alcalinotérreos y con $\text{pH} < 7.5$.

El Laboratorio de Salinidad (1974) y Pizarro (1978) establecen la utilidad de varias enmiendas que se aplican en la recuperación de suelos sódicos, teniendo en cuenta las categorías establecidas en el párrafo anterior, como se muestra en la Tabla 14.7.

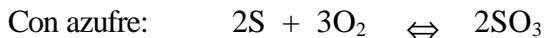
TABLA 14.7. Utilidad de varias enmiendas en la recuperación de suelos sódicos, según el tipo de suelo (Tomada de Pizarro, 1978).

ENMIENDA	TIPO DE SUELO		
	1*	2*	3*
Yeso	Adecuado	Adecuado	Adecuado
CaCl_2	Adecuado	Adecuado	Adecuado
Azufre	Muy adecuado	Adecuado	Restringido
H_2SO_4	Muy adecuado	Adecuado	Restringido
Sulfatos de Fe y Al	Muy adecuado	Adecuado	Restringido
CaCO_3	Inútil	Poco útil	Adecuado
Polisulfuro de Ca	Muy adecuado	Adecuado	Restringido

* Definiciones del párrafo anterior.

A continuación se presentan algunos ejemplos de las reacciones que se producen entre diferentes enmiendas con suelos sódicos de variadas características (X representa los coloides del suelo):





Después de aplicar las enmiendas, se hacen los **lavados** correspondientes, por lo cual, aquí, como en el caso de los suelos salinos, es indispensable un buen sistema de **drenaje** para su recuperación.

3.4.3. Suelos salino - sódicos

En este grupo de suelos, primero, se debe resolver el problema del exceso de Na^+ y, luego, el de las sales; si se hace el proceso contrario, se transforma un suelo salino - sódico en sódico, dificultándose enormemente su recuperación.

De acuerdo con lo anterior, inicialmente se deben aplicar enmiendas para desplazar Na^+ , como en los suelos sódicos y luego se hacen los lavados, tanto para eliminar el Na^+ como las sales, teniendo en cuenta que el lavado de las sales es más eficiente que el del Na^+ .

En todos los suelos básicos se puede cultivar durante el proceso de recuperación con el fin de ir mejorando su medio físico y de aumentar su contenido de materia orgánica; hay que seleccionar bien los cultivos de acuerdo con la tolerancia que tengan frente al Na^+ y/o a las sales. En la Tabla 14.8 se presentan algunas especies vegetales con su respectiva tolerancia a Na^+ y a las sales, tomadas de amplias listas elaboradas por el Laboratorio de Salinidad (1974), Pizarro (1978) y Bohn et al (1993).

Aparte de las prácticas analizadas anteriormente, en la mayor parte de los suelos básicos se presentan problemas nutricionales que pueden ser resueltos mediante:

- **Fertilización edáfica:** según los requerimientos del cultivo y los contenidos en el suelo se aplican fertilizantes que suministren nitrógeno, fósforo y potasio.
- **Fertilización foliar:** haciendo un seguimiento juicioso al desarrollo de los cultivos, pueden detectarse deficiencias de elementos menores en la planta que pueden ser resueltas por medio de aplicaciones foliares de los fertilizantes que los posean.
- La **adición de materia orgánica**, aparte de ir mejorando el medio físico, puede aportar algunos nutrientes a las plantas, sobre todo si se aplican ciertos tipos de ella (ver Capítulo 17).

TABLA 14.8. Tolerancia* de algunas especies vegetales comunes, a diferentes condiciones de basicidad del suelo, según varios autores (ver texto).

TOLERANCIA A LA SALINIDAD (dS m^{-1})				TOLERANCIA AL PSI (%)			
ALTA (CE** 18 - 10)	MEDIA (CE 9 - 6)	BAJA (CE 5 - 2)	MUY ALTA PSI > 40	ALTA PSI 40 - 20	MEDIA PSI 20 - 10	BAJA PSI 10 - 2	
Palma datilera	Tomate	Pera	Tomate	Zanahoria	Habichuela	Casi todos	
Remolacha	Repollo	Manzana	Trigo	Trébol	Maíz	los frutales	
Espárrago	Coliflor	Naranja	Alfalfa	Lechuga		y los cítricos	
Pasto Bermuda	Lechuga	Fresa	Cebada	Avena			
Cebada	Zanahoria	Rábano	Remolacha	Cebolla			
Algodón	Cebolla	Apio	Algodón	Rábano			
	Trigo	Habichuela		Arroz			
	Avena	Habas		Sorgo			
	Arroz			Espinaca			
	Sorgo						
	Maíz						
	Girasol						

* Con respecto a la tolerancia a salinidad, los cultivos están ordenados de mayor a menor grado de tolerancia en la respectiva columna, dentro del rango establecido en ella.

** Conductividad eléctrica.

3.5. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA DE LOS SUELOS BÁSICOS

En el sistema de clasificación de suelos del USDA (SSS, 1999, 1998), hay varios órdenes donde los suelos son predominantemente básicos en su reacción.

En el orden Aridisol, prácticamente todos los suelos presentan reacción neutra o básica, predominando esta última; las condiciones climáticas bajo las cuales se desarrollan estos suelos son las adecuadas para que no se presente lixiviación en el suelo y para que se acumulen los productos de la meteorización y/o de la pedogénesis en ellos, generando características básicas; esta condición climática se presenta en la península de la Guajira y en algunas zonas desérticas del interior del país, como el desierto de la Candelaria en Boyacá y el de La Tatacoa en el Huila.

En los Vertisoles, aunque se presentan unos pocos taxonómicos donde se encuentran suelos ligeramente ácidos, la gran mayoría de los suelos que se clasifican dentro de este orden son neutros o básicos, favorecido esto por el tipo de arcillas que presentan; en este orden son frecuentes los suelos sódicos, salinos y magnésicos en Colombia.

Muy buena parte de los suelos de los órdenes Mollisoles y Alfisoles presentan condiciones de reacción básica; en los Mollisoles son comunes los suelos calcáreos en el Valle del Cauca y en los Alfisoles se presentan algunos suelos sódicos de la Costa Atlántica, el Altiplano Cundiboyacense y el Valle del Cauca.

En los órdenes Inceptisoles, Andisoles y Entisoles, pueden encontrarse suelos básicos en algunos niveles taxonómicos identificados con partículas como Calci, Eutro y Hal en gran grupo y Alfic, Calcic, Eutric, Salidic, Sodic y Mollic, en los subgrupos, aunque no son muy frecuentes en Colombia.

Algunas partículas que se usan en las categorías altas de la taxonomía que implican problemas específicos de basicidad en los suelos son:

- Sal, al nivel de suborden; Sal o Sali en el gran grupo y Salidic o Halic, al nivel de subgrupo, indican presencia de sales en por lo menos un horizonte del suelo.
- Calc, en suborden; Calci, en gran grupo y Calcic o Petrocalcic en el subgrupo, indican la presencia de carbonato de calcio libre en el suelo, en alguno o todos sus horizontes.
- Natr en gran grupo y Natric o Sodic en subgrupo, indican la presencia de por lo menos un horizonte nátrico (sódico) en el suelo; en algunos casos, la partícula Arg también puede implicar la presencia de este horizonte.

Al nivel de familia, la taxonomía también define algunos taxa que pueden tener condiciones de reacción básica; esta situación la presentan:

- Familias por mineralogía: Carbonática, Gypsica, Esmectítica, Vermiculítica e Ilítica.
- Familias por reacción: Calcárea.

RECORDAR

- La reacción del suelo se mide con el pH.
- El método estándar para determinar el pH del suelo es el potenciométrico en agua, con relación volumétrica suelo: agua 1:1.
- Si el pH se mide en suspensiones hechas con soluciones salinas de KCl o de CaCl₂, su valor es menor que si se hace en agua.
- Los suelos poseen capacidad buffer, la cual es muy alta en Andisoles.
- Los suelos, según su pH, se pueden agrupar en 3 grandes categorías: Ácidos, con pH < 6.5; Neutros, con pH entre 6.5 y 7.3 y Básicos, con pH > 7.3.
- En Colombia predominan ampliamente los suelos ácidos.
- En los suelos minerales, la acidez está más controlada por el aluminio intercambiable, especialmente cuando su pH es menor a 5.5.
- Los suelos ácidos presentan baja disponibilidad de bases, de fósforo y de molibdeno y pueden presentar toxicidad con Al, Mn o Fe.
- Las prácticas de manejo más frecuentes en suelos ácidos son fertilización y encalamiento.
- Los órdenes taxonómicos que agrupan mayor cantidad de suelos ácidos, en Colombia, son: Oxisol, Ultisol, Andisol, Histosol e Inceptisol.
- Los suelos básicos, en Colombia, se encuentran principalmente en la Guajira, Valle del Cauca, Costa Atlántica y altiplano cundiboyacense.
- Entre los suelos básicos hay tres grupos que presentan problemas especiales: los suelos salinos, los suelos sódicos y los suelos salino-sódicos.
- Los suelos básicos de Colombia presentan bajo contenido de materia orgánica y de fósforo disponible, así como deficiencia de elementos menores, excepto Mo; dependiendo de situaciones particulares, también pueden presentar toxicidad con sales y/o con Na y fuerte deterioro de sus propiedades físicas.

- Las principales prácticas de manejo en los suelos básicos incluyen fertilización, aplicaciones de materia orgánica, riego y drenaje.
- Los órdenes taxonómicos que más suelos básicos agrupan, en Colombia, son Vertisol, Mollisol y Alfisol.

BIBLIOGRAFÍA

- ABRIL, M. y B. ORTIZ. 1996. Variabilidad espacial de algunas propiedades físico – químicas del horizonte A de Andisoles hidrofóbicos, bajo plantaciones de *Pinus patula*. Tesis Ingeniería Agronómica. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 75 p.
- BOHN, H. L., B. L. MCNEAL y G. A. O'CONNOR. 1993. Química del suelo. Limusa. México. 370 p.
- BORRERO, J.; A. GARCÍA y C. GÓMEZ. 1998. Suelos afectados por magnesio en el valle del río Cauca. Suelos Ecuatoriales 28: 104-111.
- ESPINOSA, J. 1994. Acidez y encalado de los suelos. En: Fertilidad de suelos: Diagnóstico y control. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS). Bogotá. pp 113-128.
- FASSBENDER, H. W. 1982. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José. Costa Rica. 398 p.
- FIELDES, M. y K. W. PERROTT. 1966. The nature of allophane in soils. III. Rapid field and laboratory test for allophane. New Zealand J. of Sci. 9: 599-607.
- GARCÍA, A. 1991. La salinidad en el suelo: Como evaluarla. En: Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego. SCCS. Bogotá. pp 247-256.
- GARTNER, C. 1994. Determinación del aluminio tóxico en dos suelos ácidos. Tesis Química. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Antioquia. Medellín. 55 p.
- GUERRERO, R. 1991. La acidez del suelo: Su naturaleza, sus implicaciones y su manejo. En: Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego. SCCS. Bogotá. pp 141-163.
- INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO (ICA). 1992. Fertilización en diversos cultivos. 5^a. aproximación. Manual de asistencia técnica No. 25. ICA. Bogotá. 64 p.
- JARAMILLO, D. F. 1992. Relación fisiografía-suelos en el valle del río Riachón y paisajes adyacentes. Boletín de Ciencias de la Tierra. No. 11: 105-126.
- JARAMILLO, D. F.; L. N. PARRA y L. H. GONZÁLEZ. 1994. El recurso suelo en Colombia: Distribución y evaluación. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 88 p.
- KONG, X. L.; X. N. ZHANG; J. H. WANG. y T. R. YU. 1997. Acidity. In: Chemistry of Variable Charge Soils. Yu T. R. editor. Oxford University Press Inc. New York. pp: 368-406.
- LABORATORIO DE SALINIDAD. 1974. Suelos salinos y sódicos. Diagnóstico y rehabilitación. United States Department of Agriculture (USDA). Ed. Limusa. México. 172 p.
- LÓPEZ, A. y A. CORTÉS. 1978. Los suelos orgánicos de Colombia: Su origen, constitución y clasificación. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá. 190 p.

- MENDOZA, O. y A. GARCÍA. 1991. Efectos del magnesio intercambiable sobre algunas propiedades físicas de varios suelos del Valle del Cauca. *Suelos Ecuatoriales* 21 (1): 17-20.
- MOTTA de M. B. et al. 1990. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. 5^a. Ed. IGAC. Bogotá. 502 p.
- MUÑOZ, R. 1984. La acidez y encalamiento de los suelos. En: *Curso Fertilización Racional del Suelo*. SCCS. Medellín. pp. 69-93.
- ORDÓÑEZ, N., E. LÓPEZ y P. BOTERO. 1992. Cambios en las propiedades de los suelos relacionados con la colonización del bosque natural en un área del Guaviare. *Colombia Amazónica* 6 (1): 37-64.
- OROZCO, F. H. 1999. Biología del nitrógeno. Conceptos básicos sobre sus transformaciones biológicas. Tomo I. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín. 231 p.
- PIZARRO, F. 1978. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Editora Agrícola Española S. A. Madrid. 521 p.
- PORTA, J.; M. LÓPEZ – ACEVEDO y C. ROQUERO. 1994. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundi Prensa. Madrid. 807 p.
- PULIDO, C. 2000. Distribución geográfica de sales solubles, sodio intercambiable y carbonato de calcio en la región del caribe colombiano. *Suelos Ecuatoriales* 30(1): 44-49.
- SÁNCHEZ, P. y J. SALINAS. 1983. Suelos ácidos: Estrategias para su manejo con bajos insumos en América Tropical. SCCS. Bogotá. 93 p.
- SARRIA, M. del C. y A. GARCÍA. 1991. Efecto de varias enmiendas sobre las propiedades químicas y físicas de un suelo con alta saturación de magnesio intercambiable. *Suelos Ecuatoriales* 21 (2): 27-32.
- SOIL SURVEY DIVISION STAFF (SSDS). 1993. Soil survey manual. Handbook Nº. 18. USDA. Washington D. C. 437 p.
- SOIL SURVEY LABORATORY (SSL). 1996. Soil survey laboratory methods manual. Soil survey investigations report Nº. 42, version 3.0. USDA. 693 p.
- SOIL SURVEY STAFF. (SSS) 1999. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2^a. Ed. Agriculture Handbook Nº 436. USDA. Washington D. C. 869 p.
- SOIL SURVEY STAFF (SSS). 1998. Keys to soil Taxonomy. 8^a. Ed. Washington D. C. 326 p.
- UEHARA, G. y J. KENG. 1974. Relaciones entre la mineralogía y el manejo de los suelos en la América Latina. En: Manejo de suelos en la América Tropical. North Carolina State University. Raleigh. pp 357-370.
- VALENCIA, G. y I. CARRILLO. 1983. Interpretación de análisis de suelos para café. Avances técnicos Cenicafé No. 115. Federacafé. Chinchiná. 6 p.
- VALENCIA, R. y D. LEAL. 1996. Alternativas genéticas para sistemas de producción en sabanas ácidas de la orinoquia colombiana. *Suelos Ecuatoriales* 26 (1): 35-43.
- ZHANG, F. S. y T. R. YU. 1997. Reactions with hydrogen ions. In: *Chemistry of Variable Charge Soils*. Yu T. R. editor. Oxford University Press Inc. New York. pp: 339-367.

AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Cuándo se considera una sustancia como ácido?. ¿Cuándo como base?.
2. ¿Qué es pH?.
3. ¿Cuáles factores afectan la determinación del pH del suelo?.
4. ¿Por qué el pH medido en una solución de KCl es menor que el pH medido en agua?.
5. ¿En qué rango de valores de pH se considera el suelo neutro?.
6. ¿Cuál es el rango de pH en el cual se presenta mejor disponibilidad de nutrientes para la planta?.
7. ¿Cómo se utiliza el pH para detectar la presencia de materiales inorgánicos no cristalinos en el suelo?.
8. ¿En qué circunstancias es importante la capacidad buffer del suelo?.
9. Analizar 4 mecanismos que lleven a la formación de suelos ácidos.
10. ¿Cuál es la acidez intercambiable del suelo y porqué es importante?. ¿En qué condiciones de suelos se presenta?.
11. Establecer las diferencias más importantes entre los 3 grupos de suelos ácidos minerales definidos.
12. Diga dos plantas que se adapten bien a suelos muy fuerte a fuertemente ácidos y dos muy susceptibles a la saturación con aluminio.
13. ¿En qué consiste la práctica de encalar el suelo?. ¿En qué tipo de suelos es más frecuente hacerla?. ¿Para qué se hace?.
14. Enumere 5 efectos benéficos del encalamiento del suelo.
15. ¿Cuáles son los órdenes taxonómicos en los cuales todos los suelos son ácidos?.
16. Analizar 5 mecanismos por los cuales se desarrollen suelos básicos.
17. ¿Cómo puede el hombre contribuir a formar suelos básicos?.
18. Definir suelo salino, suelo sódico, suelo salino – sódico y suelo magnésico.
19. Enumerar todas las prácticas que se llevan a cabo para el manejo de los suelos sódicos.
20. ¿Para la recuperación de un suelo sódico sirve cualquier enmienda?. Explique.
21. Diga dos órdenes de suelos donde sean comunes los suelos básicos.

EVALUACIÓN

1. Establecer una relación general entre el clima y el pH del suelo.
2. ¿Por qué los suelos tropicales típicos (Oxisoles y Ultisoles) son ácidos?.
3. Para una solución con pH = 10.4, calcular:
 - a. pOH. (R: 3.6).
 - b. Concentración de H⁺. (R: 3.98 x 10⁻¹¹ M).
 - c. Concentración de OH⁻. (R: 2.51 x 10⁻⁴ M).
4. ¿Qué tipo de intercambio (catiónico o aniónico) se presentará en un suelo que tuvo un pH en agua de 4.26 y en KCl de 4.66?.
5. Para el suelo del problema N° 7 de la evaluación del Capítulo 13, ¿cuántas toneladas de cal agrícola por hectárea será necesario aplicar para llevar la saturación con aluminio al 10%?. (R: 7.434 t de CaCO₃ ha⁻¹).
6. Para el suelo del problema N° 10 de la evaluación del Capítulo 13, responder:
 - a. Cuántos kg ha⁻¹ de cal dolomítica (70% CaCO₃ y 15% MgCO₃) se deben aplicar para reducir su saturación de aluminio al 20 %. (R: 3124 kg ha⁻¹).
 - b. Si la dolomita tiene 18 % de Mg²⁺ y 20 % de Ca²⁺, cuál será el nuevo valor de estos cationes en el suelo, después de aplicar la cal dolomítica recomendada en el punto anterior. (R: Ca: 3.0678 cmol (+) kg⁻¹ de suelo; Mg: 2.58 cmol (+) kg⁻¹ de suelo).
7. En un suelo que presenta un PSI = 15 % se requiere rebajar este valor al 8 % para poder establecer un cultivo X. Si dicho suelo tiene una densidad aparente de 1.2 Mg m⁻³ y un contenido de Na⁺ de 8 cmol (+) kg⁻¹ de suelo, ¿cuánto azufre hay que aplicar a los primeros 20 cm del suelo, por hectárea, para

producir la condición indicada, asumiendo que no hay pérdidas de azufre en el suelo?. (R: 1 432.32 kg ha⁻¹).

8. En el suelo del punto anterior, ¿cuántas t ha⁻¹ de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) se deben aplicar para suministrar el azufre requerido?.(R: 7.7 t ha⁻¹).
9. Se va a hacer un ensayo de incubación con el suelo del problema N° 10 de la evaluación del Capítulo 13, en el cual se va a aplicar cal agrícola para neutralizar media vez, una vez y una vez y media su contenido de Al^{3+} . ¿Cuántos gramos de cal agrícola se deben aplicar a una masa de 5 kg de suelo, para aportarle las dosis de cal que se requieren para llevar a cabo las neutralizaciones propuestas, asumiendo para la cal empleada un poder de neutralización de 90 %?. (R: 4.3056 g, 8.61 g y 12.9168 g, respectivamente).

LAS PROPIEDADES BIO-ORGÁNICAS DEL SUELO

PARTE 5

LAS PROPIEDADES BIO-ORGÁNICAS DEL SUELO

LA BIOTA Y EL MANEJO DEL SUELO

- ❖ Importancia de los meso y macroorganismos
- ❖ Algunos efectos del manejo del suelo sobre su meso y macrofauna
- ❖ Importancia de los microorganismos
- ❖ La rizosfera
- ❖ Fijación biológica de nitrógeno
- ❖ Micorrizas
- ❖ Algunos efectos del manejo del suelo sobre sus microorganismos

LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

- ❖ Importancia de la materia orgánica en el suelo
- ❖ Contenido y distribución de la materia orgánica en el suelo
- ❖ Evaluación de la materia orgánica del suelo

ENMIENDAS ORGÁNICAS

- ❖ Caracterización
- ❖ Abonos orgánicos más utilizados

SUELOS ORGÁNICOS

- ❖ Origen de los suelos orgánicos
- ❖ Propiedades de los suelos orgánicos
- ❖ Uso y manejo de los suelos orgánicos
- ❖ Clasificación taxonómica de los suelos orgánicos
- ❖ Distribución de los suelos orgánicos en Colombia

E

n el Capítulo 1 se trataron varios aspectos relacionados con la Biología del suelo, orientados más hacia la parte de ella que se relaciona con la Pedogénesis. Por esta razón, no se analizaron en él aspectos relacionados con el manejo del componente orgánico del suelo.

En esta parte se tratarán aspectos relacionados con la participación del componente biótico y orgánico del suelo en su productividad y con los efectos que a su vez tiene el manejo del suelo sobre ellos, así como con aquellas prácticas que se llevan a cabo para mantener en él un nivel adecuado de materia orgánica.

LA BIOTA Y EL MANEJO DEL SUELO

CAPÍTULO 15

CONTENIDO

- ❖ Importancia de los meso y macroorganismos
- ❖ Algunos efectos del manejo del suelo sobre su meso y macrofauna
- ❖ Importancia de los microorganismos
- ❖ La rizosfera
 - Generalidades
 - Propiedades
 - Interacciones rizosfera-microorganismos
 - Asociaciones o interacciones neutras
 - Interacciones nocivas
 - Interacciones benéficas
- ❖ Fijación biológica de nitrógeno
 - Fijación de nitrógeno en forma libre
 - Fijación de nitrógeno por asociación
 - Fijación simbiótica de nitrógeno
 - Importancia de la fijación biológica de nitrógeno
 - Condiciones que afectan a los fijadores de nitrógeno
 - Inoculación de semillas con fijadores de nitrógeno
- ❖ Micorrizas
 - Tipos de micorrizas
 - Ectomicorrizas
 - Endomicorrizas
 - Ectendomicorrizas
 - Condiciones que afectan su desarrollo
 - Importancia de las micorrizas
 - Inoculación con micorrizas

- Endomicorizas
 - Ectomicorizas
- ❖ Algunos efectos del manejo del suelo sobre sus microorganismos
 - Cambio de cobertura
 - El laboreo del suelo
 - El uso de agroquímicos

OBJETIVOS

- ❖ Conocer como afecta el manejo del suelo a su componente biótico
- ❖ Conocer ciertas asociaciones que se dan con algunos microorganismos y la importancia de ellas en procesos nutricionales de las plantas

E

l suelo es, según el United States Department of Agriculture (USDA, 1998), “**la parte más diversa, biológicamente, de la tierra**”. Los organismos vivos del suelo mejoran la entrada y el almacenamiento de agua, la resistencia a la erosión, la nutrición de las plantas y la descomposición de la materia orgánica en él. La biodiversidad del suelo, el tamaño de las poblaciones de organismos en él y su actividad dependen de prácticas de manejo como laboreo, controles fitosanitarios y manejo de residuos de cosecha, así como de la cobertura y de la fertilidad que tenga aquél.

1. IMPORTANCIA DE LOS MESO Y MACROORGANISMOS

Aparte de ser una fuente importante de materia orgánica para el suelo y de poderse convertir en plagas para las plantas, la fauna del suelo lleva a cabo varias acciones que, a largo plazo, mejoran las condiciones del mismo:

- Aumentan la disponibilidad de algunos nutrientes para las plantas como lo reporta IGAC (1986), con lo cual se mejora el aporte de biomasa:
 - Lombriz incrementa disponibilidad de P, K y C.
 - Hormigas mejoran disponibilidad de Ca y Mg.
 - Termitas aumentan la disponibilidad de Ca, Mg, K, Na, C y P.
- Algunos organismos como ciempiés, arañas, escorpiones, coleópteros y colémbolos son predatores y mantienen en equilibrio las poblaciones de otros organismos.
- Los macroinvertebrados crean galerías y huecos dentro del suelo que mejoran su aireación y su permeabilidad. Además, las termitas y las hormigas seleccionan materiales finos para hacer sus nidos en superficie, con lo que van afinando la textura del suelo (Decaëns et al, 1998).
- Algunos efectos no son benéficos como lo observó Chamorro (1990) en suelos del páramo de Sumapaz: se presentó incremento en la disponibilidad de Al que estuvo asociado con la presencia de lombrices y termitas en ellos.

Con respecto a la lombriz de tierra, el Soil Quality Institute (SQI, 1999) sostiene que ellas mejoran la calidad del suelo debido a que:

- Incrementan la disponibilidad de nutrientes, especialmente N, P y K.
- Aceleran la descomposición de la materia orgánica al incorporar litter al suelo y activar procesos de mineralización y de humificación.
- Mejoran la agregación y la porosidad.
- Suprimen del medio varios organismos peligrosos o enfermos.
- Incrementan la actividad de microorganismos benéficos.

2. ALGUNOS EFECTOS DEL MANEJO DEL SUELO SOBRE SU MESO Y MACROFAUNA

En Andisoles del páramo de Chisacá, Cundinamarca, Zerda y Chamorro (1990) encontraron que hubo 120 veces más Collémbola en el suelo cuando estaba sometido a uso agropecuario, que cuando estaba bajo vegetación natural.

En otros páramos de la misma región citada en el párrafo anterior, Chamorro (1989) obtuvo la secuencia de distribución relativa de la meso y macrofauna de Andisoles e Histosoles bajo uso agropecuario: Collémbola (> 40%) > Díptera (\approx 35%) > Arachnida > Coleóptera > Orthóptera; en la Figura 15.1 se presentan otros resultados que ilustran este punto. Son muy evidentes los cambios que sufre el suelo cuando se cambia la cobertura que tenía, particularmente, el incremento que sufre el orden Collémbola, como ya se había registrado.

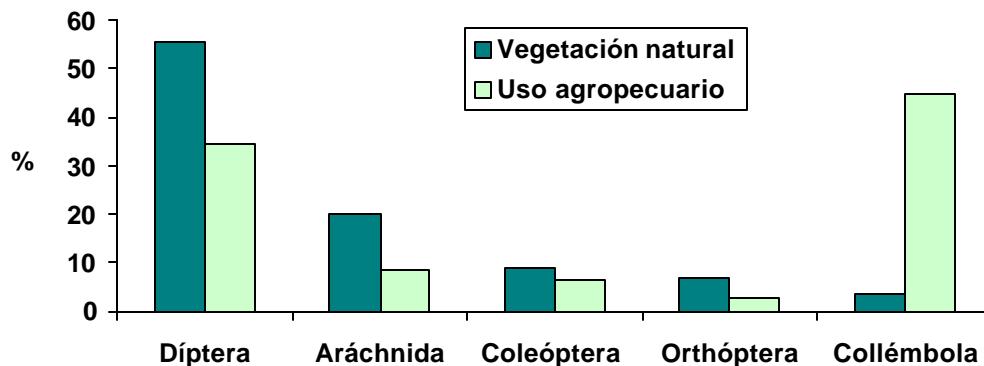


FIGURA 15.1. Distribución relativa de los órdenes de meso y macrofauna dominantes en la capa de litter de un Inceptisol del páramo de Chingaza (Cundinamarca) bajo vegetación nativa y uso agropecuario, con base en resultados de Infante y Chamorro (1990).

Los resultados expuestos en los párrafos anteriores ilustran la diferencia que hay en la distribución de organismos al interior del suelo, así como los cambios que ella sufre cuando se cambia la cobertura vegetal y/o el uso del mismo; además, evidencian que los organismos del orden Collémbola pueden llegar a ser importantes indicadores de alteraciones en el suelo, por lo menos en los climas fríos de alta montaña.

Infante y Chamorro (1990) agruparon la meso y macrofauna del suelo que trabajaron, según sus hábitos alimenticios. Los resultados que encontraron se presentan en la Tabla 15.1. En esta tabla se observan diferencias en la población animal del suelo, debidas a la ubicación dentro de él y a las diferencias en su cobertura vegetal y uso. En el horizonte A se pueden haber mejorado las condiciones alimentarias para los herbívoros y para los predadores, cuando el suelo fue intervenido con las prácticas del manejo agropecuario.

TABLA 15.1. Distribución relativa (%) de meso y macrofauna en un Inceptisol del páramo de Chingaza (Cundinamarca), bajo vegetación natural y uso agropecuario, agrupada por hábitos alimenticios (Resultados de Infante y Chamorro, 1990).

TIPO DE ORGANISMO	LITTER		HORIZONTE A	
	NATURAL	INTERVENIDO	NATURAL	INTERVENIDO
HERBÍVOROS	43	42	47	53.0
SAPRÓVOROS	36	39	31	23.5
PREDADORES	21	19	22	23.5

Zuluaga et al (1995), también ilustran algunas de las relaciones expuestas en párrafos anteriores, con los resultados que obtuvieron en Entisoles e Inceptisoles de Caño Limón (Arauca). Ellos encontraron que en áreas donde predominaban los pastos, dominaba el orden Diplópoda, en tanto que donde había diversidad florística, los órdenes dominantes eran Coleóptera y Díptera; además, encontraron que el 88.9% de la fauna se presentó en la capa de litter, el 8.4% en el horizonte A y solo el 1.7% se ubicó en el horizonte B (por debajo de 20 cm de profundidad).

Chamorro (1989), estudiando el efecto de la cobertura vegetal sobre la composición de la fauna de Andisoles e Histosoles de los páramos cercanos a Bogotá, encontró que las menores poblaciones de meso y macrofauna se presentaron en el litter de las plantaciones forestales, con el siguiente orden decreciente de abundancia: Eucalipto > Ciprés > Pino.

Cortés et al (1990) encontraron resultados similares, a los citados en el párrafo anterior, en Andisoles de la Sabana de Bogotá, como lo muestra la Figura 15.2; además, en los suelos que estaban bajo plantaciones forestales no se observó presencia de lombrices de tierra, las cuales sí estuvieron presentes en suelos bajo bosque nativo y bajo pradera.

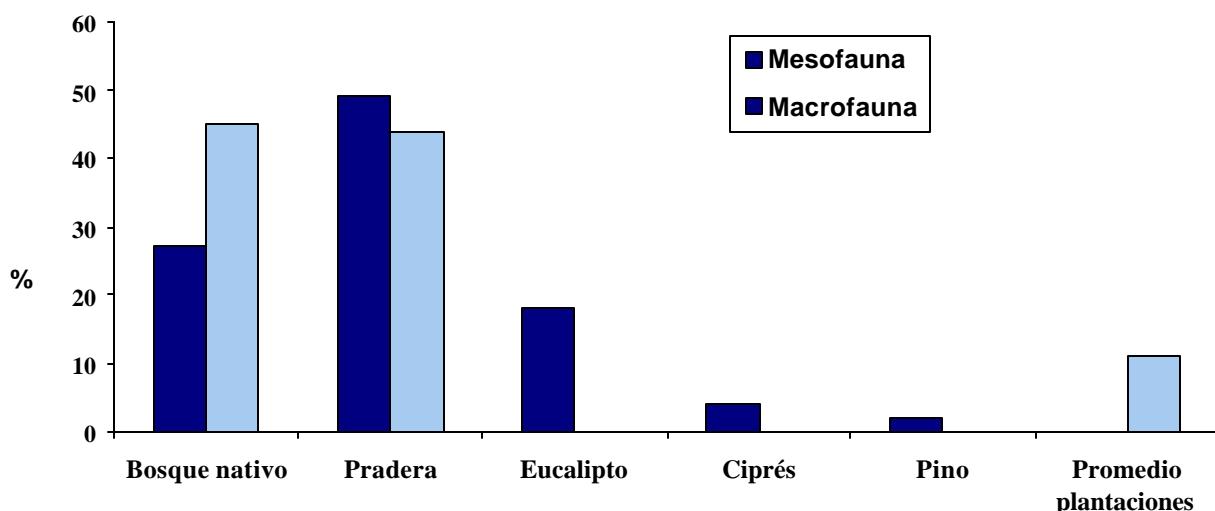


FIGURA 15.2. Distribución relativa de la meso y macrofauna en Andisoles de la Sabana de Bogotá, bajo diferentes coberturas vegetales, con base en resultados de Cortés et al (1990).

En la Figura 15.2, se observa que las diferencias entre la fauna del suelo en las diferentes coberturas son bastante notorias, así como la desventaja en cantidad que presentan los suelos bajo plantaciones forestales, con respecto a aquellos que están bajo cobertura natural; los autores del trabajo atribuyen las diferencias a cambios importantes que se producen en el régimen hídrico y la estructura del suelo, originados en el cambio de cobertura vegetal.

Coral y Bonilla (1998) también encontraron cambios importantes en diversidad, biomasa y abundancia de la macrofauna de suelos de clima frío húmedo del departamento de Nariño, debidos al cambio en la cobertura vegetal. Tanto la diversidad como la abundancia y la biomasa fueron mayores en la selva

secundaria que en pastizal de kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y en cultivo de cebolla (*Allium fistulosum*). En la abundancia y en la producción de biomasa se presentaron diferencias importantes en el tipo de organismos involucrados, como puede verse en la Tabla 15.2.

TABLA 15.2. Abundancia y biomasa de la macrofauna en los primeros 30 cm de suelos de la cuenca alta del lago Guamues, Nariño, Colombia, bajo diferentes sistemas de uso. (Tomados de Coral y Bonilla, 1998).

ORGANISMO	ABUNDANCIA (%)			BIOMASA (%)		
	SELVA	KIKUYO	CEBOLLA	SELVA	KIKUYO	CEBOLLA
Miriápidos	45.09	-	31.15	52.04	-	12.84
Coleópteros	19.91	-	17.97	18.71	12.83	26.42
Dípteros	7.44	-	-	-	-	-
Lombrices	5.35	89.62	45.99	8.43	68.60	31.70
Isópodos	4.35	-	-	-	17.08	-
Gasterópodos	0.58	-	-	-	-	17.30
Otros	17.23	-	-	-	-	-
Total (%)	99.95	89.62	95.11	79.18	98.51	93.03
Total (Indiv.m ⁻²)	19120	5088	11040	-	-	-

Se observa en la tabla anterior que la pradera y el cultivo favorecen el desarrollo de las lombrices, posiblemente debido a que en estos dos sistemas de uso hay un mayor aporte subsuperficial de materia orgánica al suelo. También se observó en el estudio citado que cuando se analizó la distribución vertical de la macrofauna, la mayor densidad de población se obtuvo en la profundidad de 0 a 10 cm, excepto con los miriápidos en la selva que tuvieron mayor densidad de población en la capa de litter.

Con respecto a las propiedades del suelo que influyen en la distribución de la fauna del mismo, Zuluaga et al (1995) encontraron, en suelos de los Llanos Orientales de Colombia, que la densidad aparente, la porosidad y la microporosidad controlaban significativamente el establecimiento de la meso y macrofauna en ellos; el efecto de la densidad aparente fue inverso, en tanto que el de las otras dos propiedades fue directo.

Decaëns et al (1998) encontraron que la variedad y la biomasa de la macrofauna en Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia eran fuertemente influenciadas por el uso y el manejo de los suelos; es así como reportan que:

- La producción de biomasa (g materia fresca m⁻²) se presentó en el siguiente orden de cantidades decrecientes: Potreros con pastizales mejorados (pasto Brachiaria con leguminosas) > sabana natural pastoreada > sabana natural sin pastoreo > cultivo de arroz.
- En todos los casos las lombrices fueron los organismos que mayor cantidad de biomasa aportaron, seguidas por las termitas y las hormigas.
- En el cultivo de arroz fue donde encontraron el menor número de especies y de familias de macroinvertebrados, así como el menor número de especies de lombrices. Atribuyen este comportamiento al laboreo, al uso de pesticidas y a disminución de la reserva de carbono orgánico disponible en el suelo.

El Soil Quality Institute (SQI, 1999) considera la presencia de lombrices en el suelo como un indicador de buena calidad del mismo y sostiene que un número adecuado de ellas, en un suelo agrícola, está por encima de **100 individuos m²**, con base en 30 cm de profundidad. Además, este instituto expone algunos de los factores que más afectan las poblaciones de lombrices en el suelo, tomándolos de Curry (1998), así:

- **Laboreo:** El laboreo del suelo puede destruir hasta el 25% de la población de lombrices existente en el suelo y, además, tiene otros efectos negativos indirectos sobre la población que sobrevive a esta práctica como incrementar la temperatura superficial, reducir la humedad y el aporte de litter y acelerar la oxidación (descomposición) de los residuos de cosecha.
- **Propiedades del suelo:** Son óptimas las siguientes condiciones: texturas medias, pH entre 5.0 y 7.4 y temperatura entre 10 y 20°C.
- **Disturbación:** La población de lombrices es más alta en sistemas sin disturbar. El tamaño de la población depende de la severidad y de la frecuencia con que se haga la disturbación.
- **Uso de agroquímicos:** Especialmente los insecticidas **órganofosforados** y **carbamatos**, son bastante tóxicos para las lombrices y pueden afectar fuertemente sus poblaciones en el suelo, lo mismo que los fungicidas basados en carbamatos. La mayoría de los herbicidas de **triazina** son ligeramente tóxicos para ellas. Muchos nematicidas se han reportado como tóxicos para las lombrices.

3. IMPORTANCIA DE LOS MICROORGANISMOS

Los microorganismos del suelo, aparte de suministrarle una buena cantidad de biomasa al mismo y de causar, en algunos casos, problemas fitosanitarios en los cultivos, intervienen activa y directamente en ciclos geoquímicos como el del C, el del N, el del P y el del S, que son los más conocidos. También toman parte en una buena cantidad de procesos y reacciones que tienen que ver con la nutrición vegetal.

En el ciclo del carbono, los hongos juegan un papel fundamental puesto que son los organismos responsables de transformar alrededor del 80% de la celulosa que se produce y ésta es la mayor reserva de carbono en el mundo y el polisacárido más abundante en la naturaleza, con una producción que se estima en 1.4 billones de t año⁻¹, según Markham y Bazin, citados por Cabrera (2000).

La degradación de la celulosa se hace por las celulasas producidas por los microorganismos que la transforman a glucosa libre o a oligosacáridos. Cabrera (2000) encontró en Ultisoles y Oxisoles de los alrededores de Leticia, Amazonas (Colombia), especies de **Trichoderma**, **Penicillium** y **Clonostachys** con alta actividad celulolítica, aunque también encontró especies de **Aspergillus**, **Fusarium**, **Verticilium**, **Beauveria**, **Chaetomium**, **Lentinus** y **Poria** que también presentaban algún grado de dicha actividad.

Otro compuesto importante en la naturaleza es la quitina, por las cantidades que se producen de él: alrededor de 100000 millones de t año⁻¹ y por la cantidad de N que almacena (6%), según Hodge et al, citados por Cabrera (2000); éste es uno de los principales componentes de la pared celular de los hongos y del exoesqueleto de muchos invertebrados y es el segundo polímero natural más abundante en el mundo.

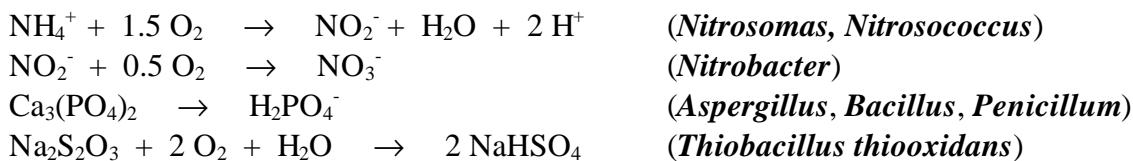
La hidrólisis de la quitina la hacen las quitinasas y Cabrera (2000) encontró especies de los hongos *Trichoderma*, *Metarhizium*, *Penicillium*, *Gliocladium* y *Beauveria* que presentaban una intensa actividad quitinolítica en Ultisoles y Oxisoles de la amazonia colombiana.

En el ciclo del fósforo hay algunos microorganismos, principalmente hongos y bacterias, que son capaces de solubilizar compuestos insolubles de P con Fe (estrengita), con Al (variscita) o con Ca (fósфato trícálcico o fósфato ortocálcico), según Brady y Weil, citados por Cabrera (2000).

Parece que los microorganismos capaces de solubilizar este fósforo lo hacen mediante la acidificación del medio liberando a él protones y/o ácidos orgánicos como cítrico, oxálico o succínico. Cabrera (2000) encontró especies de hongos *Penicillium*, *Aspergillus*, *Scytalidium* y *Paecilomyces* presentando una alta actividad solubilizadora de fósforo en Ultisoles y Oxisoles de la amazonia colombiana.

Osorio (2000) evaluó la actividad solubilizadora de P *in vitro* de 32 microorganismos aislados de la rizosfera de *Leucaena leucocephala* creciendo en Andisoles, Oxisoles y Vertisoles de Hawái y encontró que las bacterias fueron los solubilizadores más abundantes, aunque el organismo que mostró más alta actividad solubilizadora fue una especie del hongo *Mortierella*.

En los procesos de nutrición vegetal varios microorganismos transforman elementos o compuestos químicos a formas asimilables por las plantas, como ocurre en las siguientes reacciones (entre paréntesis, el agente causal de la reacción), (Munévar, 1991; Subba Rao, 1992):



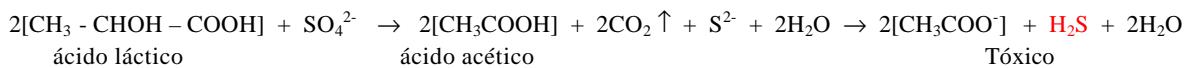
Algunas bacterias (*Bacillus*, *Clostridium*, *Nocardia*, *Streptomyces*) y algunos hongos (*Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*) ayudan a reducir la acumulación de agroquímicos en el suelo, ya que pueden utilizar algunos de ellos como fuente de carbono (Burbano, 1989).

Ciertos microorganismos pueden asociarse con plantas mejorando su nutrición, como en los casos de las micorrizas y de la fijación biológica de nitrógeno, los cuales son los casos más conocidos y estudiados hasta el momento y se detallarán más adelante.

Algunos microorganismos ejercen control sobre otros macro y microorganismos, manteniendo un equilibrio entre las poblaciones. Ejemplo de ésto son los controles que ejercen *Trichoderma* sobre otros hongos y *Streptomyces* sobre otras bacterias.

No todos los efectos que producen los microorganismos del suelo son benéficos: Algunos hongos y bacterias compiten con la planta por nutrientes, produciendo la inmovilización temporal de éstos, como en el caso de PO_4^{3-} , NH_3 o NO_3^- .

Pueden realizar transformaciones a compuestos tóxicos, como en las siguientes reacciones, las cuales se llevan a cabo en presencia de la bacteria *Desulfovibrio* (Burbano, 1989):



Pueden producir pérdidas de elementos o de compuestos en el suelo, como las ocasionadas por los procesos de desnitrificación, los cuales causan pérdidas de nitrógeno por volatilización; este proceso lo hacen muchas especies de bacterias. Entre los géneros que más especies denitrificadoras poseen están *Pseudomonas* y *Thiobacillus* (Munévar, 1991).

Finalmente, algunos microorganismos del suelo pueden producir patogenicidad en plantas o animales, llegando a producir enfermedades en ellos, como es el caso, para las plantas, de hongos como *Fusarium* y *Phytophthora* y de bacterias como *Pseudomonas*.

La actividad de los microorganismos del suelo puede ser evaluada midiendo algunas respuestas metabólicas como respiración (consumo de O₂), emisión de CO₂ o la producción de calor. La actividad de ciertos grupos de organismos se estima midiendo los productos de las transformaciones específicas que ellos realizan (Burbano, 1989).

En relación con la actividad específica de ciertos microorganismos, Gómez (1997) evaluó la producción de catalasa, de ureasa, de proteasa, de amilasa, de indol y de H₂S por parte de los microorganismos que aisló en suelos arenosos de Pivijay, departamento del Magdalena, Colombia, sometidos a diferentes sistemas de manejo bajo cultivo de yuca, encontrando los resultados que se presentan en la Figura 15.3, en la cual se aprecia que sólo la producción de ácido sulfídrico está dominada por las bacterias mientras que todas las otras actividades las dominan los hongos.

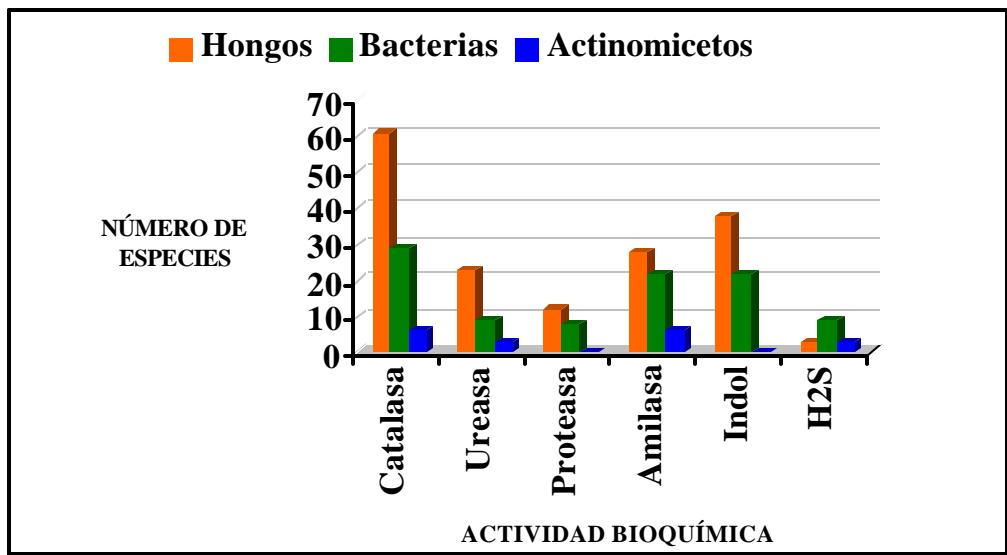


FIGURA 15.3. Cantidad de microorganismos por actividad específica encontrados en un suelo arenoso de Pivijay, departamento del Magdalena, Colombia. Con base en resultados de Gómez (1997).

La actividad de los organismos consume O₂ y produce CO₂ por lo que la medida del CO₂ producido en una determinada cantidad de suelo es un buen indicador de la actividad que están desarrollando los organismos presentes en él. Esta estimación es prácticamente una medida de la mineralización del carbono orgánico que posee el suelo.

La producción de CO₂ en el suelo es un buen índice de actividad biótica (incluye los micro, meso y los macroorganismos que viven en él y aun las raíces vivas) y es considerado por el SQI (1999) como uno de los índices para evaluar la calidad del mismo. Sin embargo, éste mismo instituto llama la atención acerca de que es una propiedad con una alta variabilidad espacio-temporal, lo que dificulta su interpretación.

El SQI (1999) puntualiza que la tasa de respiración del suelo es fuertemente afectada por la humedad y por la temperatura, no sólo del suelo sino también ambientales. Además, prácticas de manejo como el laboreo, el riego, el drenaje o la adición de materiales orgánicos pueden alterarla dramáticamente en el corto plazo después de llevarlas a cabo. Las condiciones anteriores han llevado a que se formulen algunas recomendaciones para hacer un buen muestreo y una adecuada interpretación de los resultados que se obtengan con esta propiedad como:

- Las muestras no se deben tomar inmediatamente después de hacer las prácticas de manejo mencionadas, así como tampoco después de un aguacero o en suelos que llevan mucho tiempo secos.
- No tomar muestras en suelos que llevan mucho tiempo con condiciones de humedad por encima de capacidad de campo.
- Cuando hay cultivos establecidos y el suelo está seco, la mayor tasa de respiración se presenta cerca de las plantas y la menor en los entresurcos.
- Cuando los entresurcos están compactados, la tasa de respiración es menor en ellos que en el surco de la planta.
- La respiración es un reflejo de la degradación de la materia orgánica del suelo; si ella es alta y está consumiéndose la materia orgánica estable del suelo, se pueden llegar a presentar problemas de deterioro físico del mismo.
- El color del suelo ayuda a interpretar su tasa de respiración: alta tasa en suelo claro puede indicar que se están presentando pérdidas importantes de materia orgánica en él pero, si el suelo es oscuro, puede indicar una condición saludable del mismo.

La mayor parte de reacciones e interacciones que ejercen los microorganismos del suelo con la planta y con otros organismos se presentan en la inmediata vecindad de la raíz, es decir, en la **rizosfera**. Por tal razón, a continuación se hace una corta discusión sobre este tema.

4. LA RIZOSFERA

4.1. GENERALIDADES

Según Lee y Pankhurst (1992) las raíces de las plantas viven todo el tiempo en estrecha asociación con los organismos del suelo, en condiciones normales de crecimiento. Esta asociación se conoce como **rizocenosis** y se lleva a cabo en la rizosfera.

La rizosfera es la zona del suelo adyacente a la raíz que está bajo la influencia de su actividad. Lee y Pankhurst (1992) y Bowen (1993) diferencian tres partes en ella (ver Figura 15.4):

- **Endorrizosfera** o rizosfera interna, que comprende la **corteza** de la raíz, es decir, el tejido que se encuentra entre la endodermis y la epidermis.
- **Rizoplano**, que es la superficie de la raíz.
- **Exorrizosfera**, ectorrizosfera o rizosfera externa, que es el suelo que está en íntimo contacto con la superficie de la raíz y que por ello es llamado también **suelo rizosférico**.

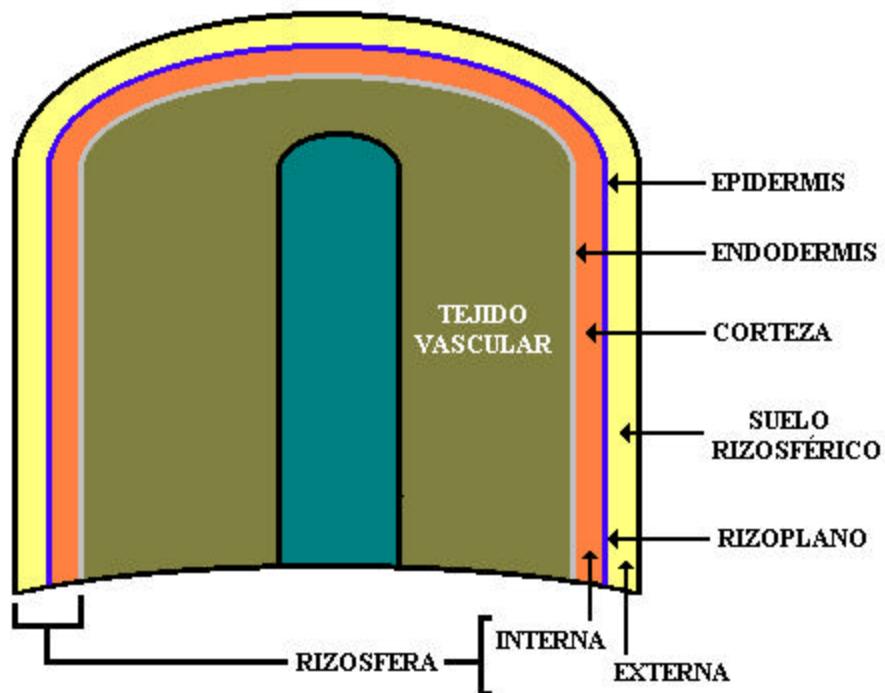


FIGURA 15.4. Representación esquemática de los componentes de la rizosfera.

Aunque es difícil establecer la extensión de la rizosfera, debido a su alta variabilidad, ya que depende de los factores del suelo que afectan la difusión de solutos y de gases desde la raíz, cosa que ha dificultado su estudio y entendimiento, se acepta que tiene entre 1 y 10 mm de espesor y que la rizosfera interna, la de más intenso cambio, puede tener entre 15 y 20 μm (Bowen, 1993).

4.2 PROPIEDADES

La principal característica que tiene la rizosfera es su riqueza energética representada por la gran cantidad de sustancias orgánicas transferidas por la raíz como producto de su metabolismo. Según Lee y Pankhurst (1992) los exudados radiculares y los tejidos de las raíces muertas pueden aportar 30 ó 40% de las entradas de materia orgánica al suelo y ellos son dispuestos directamente en la rizosfera.

Pritchett (1991) anota que el proceso de respiración de la raíz puede aumentar la acidez de la rizosfera y acelerar así la solubilización de compuestos inorgánicos poco solubles, aumentando su disponibilidad, como en el caso del P, K, Mg y Ca.

Según Bowen (1993) se presentan considerables diferencias en el pH y la concentración de aniones y de cationes entre la rizosfera y el resto del suelo. Los iones que son absorbidos rápidamente por la raíz pueden quedar en bajas cantidades en la superficie de ella mientras que aquellos que son excluidos de la absorción pueden acumularse en altas concentraciones, precipitándose alrededor de la raíz como por ejemplo el Ca en algunos casos o los óxidos de hierro en suelos inundados.

Cuando los cationes son absorbidos por la raíz, pueden ser reemplazados por H^+ con lo que se puede reducir el pH hasta valores de 4 ó 5 en la rizosfera. El pH de la rizosfera también puede ascender como consecuencia de la absorción de aniones como nitrato, por ejemplo (Bowen, 1993). El menor valor de pH en la rizosfera, con respecto al resto del suelo, también fue observado por Viteri et al (2000) en suelos de La Dorada, Caldas.

Con respecto a los materiales que se escapan de las raíces a la rizosfera, Bowen (1993) reporta la clasificación que hicieron de ellos Rovira et al en 1979, la cual se presenta a continuación con algunas modificaciones propuestas por Bowen:

- **Exudados:** Son materiales que salen pasivamente de las células jóvenes e intactas de la raíz; tienen bajo peso molecular, son una fuente inmediata de energía para los microorganismos e incluyen azúcares, ácidos orgánicos y aminoácidos, entre otros compuestos. Las proporciones en que se presenten dependen de la composición del citoplasma.
- **Secreciones:** Son compuestos de alto peso molecular que son expulsados activamente por las células jóvenes e intactas de la raíz. Generalmente son polisacáridos. Pueden mezclarse con polisacáridos de origen bacterial y recubrir la raíz con un mucílago que se conoce como **mucigel**.
- **Lisatos:** Son un conjunto de compuestos orgánicos que son liberados al suelo por la “*lisís*” (destrucción) de los componentes de algunas células envejecidas de la raíz y/o de las células muertas y desprendidas de ella. La magnitud de su aporte crece a medida que aumenta la edad y/o la madurez de las células radiculares.

4.3. INTERACCIONES RIZOSFERA-MICROORGANISMOS

La rizosfera, gracias a su ambiente rico en energía y nutrientes, alberga grandes poblaciones de la mayor parte de los grupos de microorganismos del suelo. Lee y Pankhurst (1992) sostienen que en ella se presenta una alta población de bacterias, así como la mayor parte de los protozoarios y de los nemátodos de vida libre del suelo.

Pritchett (1991) reporta que los principales grupos de microorganismos son 10 a 100 veces más abundantes en la rizosfera que en el suelo adyacente, debido a que las sustancias que se producen en ella estimulan su crecimiento. Este autor puntualiza que:

- En la rizosfera se presenta una gran cantidad de bacterias amonificantes, estimuladas por la presencia de nitrógeno orgánico.
- La fijación de N₂ por bacterias libres es mayor en la rizosfera de plantas no leguminosas que en el suelo adyacente.
- Algunas estructuras de hongos son estimuladas a germinar por las excreciones radiculares.
- Algunos exudados y/o secreciones de la raíz de ciertas plantas tienen efectos alelopáticos pero también este efecto puede ser producido por microorganismos de la rizosfera que alteran los exudados y forman compuestos tóxicos.
- La microflora de la rizosfera protege la raíz contra patógenos que viven en el suelo y produce cantidades considerables de sustancias estimulantes del crecimiento vegetal como ácido indolacético, giberelinas y citocininas.

Viteri et al (2000) encontraron en suelos de La Dorada, Caldas (Colombia), con cobertura de pastos, que la variación de las poblaciones de *Trichoderma* spp es considerablemente alta: en el suelo no rizosférico variaron entre 5.7×10^2 y 6.4×10^3 UFC g⁻¹ de suelo, mientras que en el rizoplano la variación fue entre 7.4×10^3 y 25×10^3 UFC g⁻¹ de suelo. Además notaron que en más del 70% del terreno estudiado la población de hongos en el rizoplano fue casi 4 veces mayor que la del suelo no rizosférico.

UFC g⁻¹ de suelo, es decir, Unidades Formadoras de Colonia por gramo de suelo, es una de las unidades en que se expresa la población de microorganismos encontrados en el suelo. Puede definirse, según Orozco¹ (2001), como la cantidad de colonias que se desarrollan sobre un medio de cultivo sólido (agar, principalmente) provenientes de la siembra en él de un extracto (lavado) de suelo con una determinada dilución, contadas en un plato de Petri en el que se puedan contar fácilmente entre 30 y 300 colonias individuales. El valor correspondiente a UFC es el número de colonias contadas multiplicado por la potencia de 10 positiva de la dilución en la que se hizo el conteo. Por ejemplo, si se contaron 8 colonias en la caja correspondiente a la dilución de 10⁻⁶, hay 8×10^6 UFC. En Motta et al (1990) se encuentran descritos los métodos empleados en laboratorio para hacer éstos y otros conteos.

Burbano (1989) indica que es frecuente el uso de la relación R/S para expresar el efecto de la rizosfera sobre los microorganismos. R es el número de organismos contados en la rizosfera y S el número de organismos presente en el suelo no rizosférico. En la Tabla 15.3 se presentan algunas relaciones R/S

¹ Orozco, H. (2001). Profesor Universidad Nacional de Colombia. Medellín. Comunicación personal.

para varios grupos de microorganismos, reportadas por varios autores citados por Burbano (1989). Puede apreciarse en esta tabla la magnitud del efecto que tiene la rizosfera sobre las bacterias y los hongos, así como lo precaria que es la población de algas en ella. Lee y Pankhurst (1992) agrupan las interacciones que se dan en la rizosfera en tres categorías: Asociaciones o interacciones neutras, interacciones nocivas e interacciones benéficas.

4.3.1. Asociaciones o interacciones neutras

Estas interacciones son aquellas que se derivan de la actividad de microorganismos saprofitos de la rizosfera. Estos organismos pueden alterar directamente la disponibilidad y la absorción de nutrientes por la raíz de la planta, bien sea compitiendo directamente por ellos con la planta o, indirectamente, liberando iones H^+ , agentes quelatantes, hormonas o toxinas que afectan la permeabilidad de la raíz (Lee y Pankhurst, 1992).

TABLA 15.3. Relaciones R/S para algunos grupos de microorganismos presentes en la rizosfera de trigo y en el suelo adyacente, según varios autores citados por Burbano (1989).

GRUPO	RELACIÓN R/S APROXIMADA
Bacterias	23:1
Hongos	12:1
Protozoarios	2:1
Algas	0.2:1

Son parte de estas interacciones las asociaciones que se dan con bacterias fijadoras de N_2 como *Azospirillum* o *Beijerinckia*. También la desnitrificación por bacterias pertenece a este tipo de interacciones. Aparte del nitrógeno, la dinámica de solubilización y de absorción del fósforo por las plantas puede ser favorecida por la presencia de ciertas bacterias en la rizosfera.

Se han observado efectos directos de los microorganismos de la rizosfera sobre el crecimiento de las plantas, estimulándolo o reduciéndolo, mediante la producción de reguladores de crecimiento o de fitotoxinas, respectivamente. Los metabolitos fitotóxicos producidos por algunos hongos y bacterias creciendo en la rizosfera o en los detritos de la planta incluyen ácidos alifáticos de cadena corta, ácidos fenólicos, H_2S y HCN (Lee y Pankhurst, 1992).

4.3.2. Interacciones nocivas

Son aquellas relaciones que producen daños o enfermedades en la raíz de la planta. La mayoría de los patógenos de la raíz la infectan vía heridas o aberturas presentes en su superficie y, una vez instalados, pueden causar desde pequeñas lesiones localizadas o malformaciones en los tejidos, hasta la muerte de la planta.

Bowen y Rovira, citados por Lee y Pankhurst (1992), sostienen que la rizosfera es una barrera formidable para la mayoría de los patógenos de la raíz y dicen que la producción de nutrientes orgánicos en ella es tan importante para los patógenos como para los organismos antagónicos a ellos

que pueden reducir su población, según Bowen (1993) mediante antibiosis, competencia, parasitismo o predación. Los autores citados creen que el entendimiento de la dinámica de las poblaciones en la rizosfera y de sus interacciones es fundamental para llevar a cabo un control adecuado de las enfermedades radiculares.

Prácticas de manejo de cultivos que alteren el ambiente de la rizosfera como el laboreo, la rotación de cultivos y la adición de materia orgánica, o la aplicación de organismos antagonistas al suelo, pueden ayudar a hacer un buen control de los patógenos de la raíz establecidos en la rizosfera.

4.3.3. Interacciones benéficas

Las interacciones benéficas más importantes que se dan entre las raíces de las plantas y los microorganismos son aquellas representadas por la nodulación producida en las raíces de las leguminosas por las bacterias fijadoras de nitrógeno y el establecimiento de los hongos micorrizógenos en la raíz de la mayoría de las plantas (Lee y Pankhurst, 1992; Burbano, 1989). Debido a la importancia que tienen estas interacciones, ellas serán tratadas a continuación separadamente.

5. FIJACIÓN BIOLÓGICA DE NITRÓGENO

Según Subba Rao (1992) y Brock y Madigan (1991), algunas bacterias producen nitrogenasa que es una enzima que reduce el N_2 de la atmósfera a NH_3 ; esta capacidad se conoce como fijación biológica de nitrógeno o **diazotrofismo** y puede ser llevada a cabo, según Rodríguez et al (1985) y Orozco (1999), mediante tres sistemas: en forma **libre**, por **asociación** con una planta o en **simbiosis**, también con alguna planta.

5.1. FIJACIÓN DE NITRÓGENO EN FORMA LIBRE

Las bacterias que fijan el nitrógeno mediante este sistema, son frecuentes en todo tipo de suelo y se encuentran, principalmente, en la rizosfera de las plantas superiores. Pueden ser heterótrofas, cuando utilizan como fuente de energía (carbono orgánico) restos vegetales o, autótrofas, cuando son capaces de obtener el carbono del CO_2 atmosférico, mediante la fotosíntesis. También se presentan organismos aeróbicos y anaeróbicos en este grupo de fijadores (Orozco, 1999). Según Rodríguez et al (1985), entre las bacterias fijadoras libres, las más numerosas y eficaces son las aeróbicas.

Según información presentada por Valero (2000) las bacterias diazótrofas de vida libre suelen establecerse en ambientes donde hay un buen suministro de carbono disponible como en la rizosfera o en la superficie de los tejidos externos de la planta (raíces, hojas, tallos, etc.), pero también se presentan frecuentemente en el interior de dichos tejidos (bacterias endófitas), sobretodo en los elementos vasculares y en los espacios intercelulares dejados por células muertas en las raíces.

Valero (2000) aisló, en plantas de caña panelera de cultivos tradicionales del occidente de Cundinamarca que nunca habían sido fertilizados, 11 cepas de microorganismos diazótrofos de vida libre endófitos y 7 cepas rizosféricas. Los endófitos fueron aislados de las partes basal, media y apical

del tallo y de las raíces y pertenecieron a los géneros *Acetobacter*, *Azospirillum* y *Herbaspirillum*. Los rizosféricos correspondieron a los géneros *Azotobacter*, *Azospirillum* y *Beijerinckia*.

Brock y Madigan (1991) presentan una extensa discusión acerca de las bacterias de este grupo de fijadoras de nitrógeno y destacan algunos de los géneros que se dan en la Tabla 15.4, como los que más frecuentemente se presentan en el suelo.

TABLA 15.4. Algunos géneros de bacterias fijadoras de nitrógeno en forma libre, comunes en el suelo. (Tomados de Brock y Madigan, 1991 y de Orozco, 1999).

AERÓMICOS		
ORGANÓTROFOS	FOTÓTROFOS	LITÓTROFOS
Azospirillum**	Anabaena	Thiobacillus
Azotobacter	Nostoc	Alcaligenes
Bacillus**		
Beijerinckia		
Citrobacter*		
Dexia		
Klebsiella*		
Mycobacterium		
ANAERÓMICOS		
Clostridium	Chlorobium	Methanococcus
Desulfovibrio	Chromatium	Methanosarcina
	Helio bacterium	
	Rhodobacter	
	Rhodomicrobium	
	Rhodospirilum	
	Rhodopseudomonas	

* También pueden fijar nitrógeno en condiciones anaeróbicas (Facultativos).

** También pueden fijar nitrógeno en el sistema de asociación.

5.2. FIJACIÓN DE NITRÓGENO POR ASOCIACIÓN

Se produce por bacterias que se encuentran en la rizosfera de las plantas, principalmente gramíneas, con cuyas raíces forma asociaciones no simbióticas, pues no se llega a la formación de estructuras especializadas por parte de los organismos asociados (Rodríguez et al, 1985).

La principal fuente de energía para las bacterias que trabajan con este sistema de fijación la componen los exudados radiculares de la planta. Según Orozco (1999), este sistema de fijación de nitrógeno es especialmente importante, en el trópico, en cultivos de caña de azúcar, arroz, maíz, sorgo, trigo, cebada y pastos.

Orozco (1999) reporta que las asociaciones que se encuentran con mayor frecuencia se dan con especies de los géneros *Azospirillum* (la más conocida), *Bacillus*, *Acetobacter*, *Herbaspirillum* y *Pseudomonas*.

De los anteriores microorganismos, el *Azospirillum* se produce comercialmente; el inóculo de esta bacteria, preparado en materiales como turba, carbón, lignito, compost, residuos de establos o suelo, puede ser viable hasta los 180 días de almacenamiento, dependiendo del portador. La máxima población de microorganismos se tiene a los 30 días de almacenamiento a temperaturas entre 30 y 35°C, con todos los portadores (Subba Rao, 1992).

5.3. FIJACIÓN SIMBIÓTICA DE NITRÓGENO

En la fijación simbiótica, en el caso más común, el microorganismo infecta la raíz de la planta con la cual va a asociarse, formando unos nódulos (estructuras especializadas de las que no se forman en la simple asociación) que, cuando están activos en la fijación (**nódulos efectivos**), presentan una coloración roja en su interior, debido a la presencia de **leghemoglobina**, pigmento similar a la hemoglobina del cuerpo humano.

Los nódulos efectivos son grandes y se encuentran llenos de **bacteroides** que son estados no móviles de la bacteria y los cuales se presentan sólo en los nódulos. Estos bacteroides son los que fijan el nitrógeno y los nódulos son estructuras de protección para ellos (Subba Rao, 1992).

Las relaciones simbióticas más conocidas son aquellas que se presentan entre plantas leguminosas y bacterias de los géneros *Rhizobium* y *Bradyrhizobium*. Subba Rao (1992) hace notar la potencialidad que tiene este mecanismo de fijación de N al señalar que las familias Ceasalpinaceae, Mimosaceae y Fabaceae, agrupan alrededor de 700 géneros y de 14000 especies, aunque aclara que solamente se ha estudiado entre el 10 y el 12% de las especies, desde el punto de vista de la formación de nódulos radiculares; la familia en la cual se ha encontrado el menor número de especies formando nódulos radiculares es la Ceasalpinaceae.

Las relaciones simbióticas son muy específicas para la mayoría de las bacterias, es decir, que la simbiosis se establece entre una planta con muy pocas especies, y a veces razas, de la bacteria (Rodríguez et al, 1985 y Orozco, 1999); Paul y Clark (1989) destacan las siguientes relaciones simbióticas con leguminosas, como bastante específicas: Alfalfa - *Rhizobium meliloti* y Trébol - *R. trifolii*.

En Andisoles de la Sabana de Bogotá, Barrera y Lozano (1991) caracterizaron la población nativa de *Rhizobium* y encontraron 8 razas de *R. leguminosarum* bv (bio-variedad) viciae infectivas en arveja var. guatecana.

Campos (1991), en ensayos de sobrevivencia en laboratorio, con 21 cepas de *Rhizobium* reportadas como tolerantes a acidez en Andisoles de la Sabana de Bogotá, encontró que a los 35 días de inoculación sólo 2 cepas seguían presentes en el suelo. Además, se presentó un efecto importante de la población microbial nativa sobre la supervivencia del *Rhizobium* que dificulta la implementación de prácticas biológicas de manejo de la fertilidad nitrogenada del suelo. Esta pérdida de inóculo también ha sido observada con frecuencia en Andisoles del oriente antioqueño (Herrón, 2001)¹.

Otras asociaciones simbióticas importantes son las que se establecen entre algunas plantas no leguminosas y bacterias del género *Frankia*; Paul y Clark (1989) reportan que esta bacteria es capaz de formar nódulos con 170 especies de plantas no leguminosas, pertenecientes a 8 familias.

También son importantes las asociaciones simbióticas de los **Líquenes** en las cuales cianobacterias de los géneros *Nostoc*, *Scytonema* y *Calothrix* principalmente, se asocian con hongos; además, hay otra simbiosis importante en los cultivos de arroz como la que se establece entre el helecho acuático *Azolla* y la cianobacteria *Anabaena* (Munévar, 1991; Burbano, 1989).

5.4. IMPORTANCIA DE LA FIJACIÓN BIOLÓGICA DE NITRÓGENO

Los fijadores no simbióticos son poco eficientes en la fijación, comparados con los simbióticos, tanto en cantidad de N₂ fijado, como en la velocidad con que lo hacen, según Burbano (1989); no obstante, estos aportes pueden llegar a ser importantes para el productor al representar algún ahorro en sus costos de fertilización, como lo muestran los valores de las Tablas 15.5 y 15.6.

TABLA 15.5. Cantidad de N fijado por algunos sistemas biológicos (Según Paul y Clark, 1989).

SISTEMA BIOLÓGICO	CANTIDAD FIJADA(kg N ha ⁻¹ año ⁻¹)
No leguminosas con <i>Frankia</i>	2 – 300
<i>Gunnera</i> sp. con <i>Nostoc</i>	10 – 72
Bacterias aeróbicas libres	Casi 0 – 20
Cianobacterias libres	30 – 70

TABLA 15.6. Cantidad de N fijado por algunos sistemas biológicos (Según Rodríguez et al, 1985).

SISTEMA BIOLÓGICO	CANTIDAD FIJADA(kg N ha ⁻¹ año ⁻¹)
Alfalfa – <i>Rhizobium meliloti</i>	200 – 250
Trébol rojo – <i>R. trifoli</i>	100 – 150
Lenteja – <i>R. leguminosarum</i>	100
Soya – <i>R. japonicum</i>	90 – 80
Garbanzo – <i>R. leguminosarum</i>	60 – 80
Fríjol – <i>R. phaseoli</i>	50
<i>Alnus</i> – <i>Frankia</i>	200 – 250
<i>Casuarina</i> – <i>Frankia</i>	60 – 230
<i>Myrica</i> – <i>Frankia</i>	30

¹ Herrón F. (2001). Exprofesor Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. Asesor particular en fertilidad de suelos. Comunicación personal.

Hongos – <i>Calothrix</i> o <i>Nostoc</i>	1 – 10
<i>Sphagnum</i> – <i>Nostoc</i>	1 – 10
<i>Azolla</i> – <i>Anabaena</i>	10 – 200

En relación con la importancia de la fijación de nitrógeno en sistemas de asociación, Orozco (1999) presenta una amplia revisión, de la cual se pueden extraer datos como:

- Cultivos de caña de azúcar con variedades altamente extractivas de nitrógeno, en Brasil, cuando presentan asociación con *Acetobacter* en la raíz y con *Herbaspirillum* en el tallo, obtienen entre 65 y 70% del N que requieren (entre 100 y 250 kg de N ha⁻¹ año⁻¹) del aire.
- La bacteria *Burkholderia brasiliense* ha permitido suplir hasta 30% de las necesidades de nitrógeno en cultivos de arroz.
- Las cantidades de nitrógeno fijado con este sistema, en el trópico, varían entre 10 y 45 kg ha⁻¹.
- En cultivos de arroz, con este sistema de fijación, se pueden obtener entre 30 y 140 kg de N ha⁻¹ año⁻¹. Con una variedad de arroz colombiana (Metica 1), ensayada en Brasil, la fijación alcanzó a suministrar entre 33 y 60 kg de N ha⁻¹ por cosecha, lo que representa entre 20 y 30% de los requerimientos del cultivo.

5.5. CONDICIONES QUE AFECTAN A LOS FIJADORES DE NITRÓGENO

Orozco (1999) discute en extenso los factores bióticos y abióticos que controlan las poblaciones de las bacterias fijadoras de nitrógeno, en los diferentes sistemas de fijación; de dicha discusión se extrae lo siguiente:

- La presencia de **oxígeno** es requerida en organismos aeróbicos pero es contraproducente en los anaeróbicos; sin embargo, el oxígeno tiene un efecto nocivo sobre la nitrogenasa que impediría la fijación si los organismos no hubieran desarrollado mecanismos para excluirlo de los sitios específicos donde ella se produce.
- Según varios autores, las condiciones de **acidez** o de **alcalinidad** son muy variables para los diferentes organismos. *Beijerinckia*, *Derxia*, *Acetobacter*, *Rhizobium tropici* y *Azomonas* se desarrollan mejor en suelos ácidos ($\text{pH} < 6$), mientras que bacterias como *Azotobacter* y *Azospirillum* prefieren suelos con $\text{pH} > 6$.
- Altas cantidades de **nitrógeno mineral** son limitantes para el desarrollo de las bacterias, para la formación de nódulos e inhiben el funcionamiento de la nitrogenasa.
- Los elementos **Ca**, **Mg**, **Fe**, **S**, **B**, **Co**, **Mo** y **V** son indispensables para la fijación de nitrógeno.
- Elementos como **Al** y **Mn** son nocivos para la fijación, sobretodo en leguminosas que dependen de ella, procedentes de zonas templadas; la bacteria *Rhizobium tropici*, que nodula con frijol y con leucaena, aislada en suelos ácidos de Antioquia (Colombia), presenta una alta tolerancia al Al.
- La **temperatura** óptima depende de cada bacteria y, en sistemas asociativos y simbióticos, parece que afecta más a la planta que al microorganismo; en términos generales, bacterias de ambientes tropicales presentan un rango óptimo de crecimiento y de fijación comprendido entre 32 y 40 °C.

- La **humedad** afecta los organismos debido a la relación que tiene con el suministro de oxígeno. Parece que en exceso puede ser limitante para los organismos fijadores. Para *Rhizobium* y *Bradyrhizobium* es nociva la alternancia de períodos de marcada sequía con inundación.
- **Factores de manejo** de suelos y de cultivos como la implantación de monocultivos, la aplicación incontrolada de fertilizantes y de otros agroquímicos, desbalancean las poblaciones de microorganismos y reducen la capacidad infectiva de los mismos (Rodríguez et al, 1985).
- **Factores bióticos** como la **especificidad**: que se encuentren la planta y el microorganismo adecuados para llevar a cabo la fijación; la **competitividad**: que las bacterias sean capaces de competir por sitio y alimento con los otros organismos del suelo y la **supervivencia**: que el organismo sea capaz de colonizar un ambiente y de permanecer en él el tiempo necesario, son factores que controlan los procesos de fijación de nitrógeno en el suelo.

5.6. INOCULACIÓN DE SEMILLAS CON FIJADORES DE NITRÓGENO

Independientemente de la bacteria que se utilice, Subba Rao (1992) describe dos procedimientos básicos para producir el inóculo: Cultivarla en un medio de agar o cultivarla en portadores como turba, carbón, lignito, compost, residuos de establos o suelo.

El inóculo de *Rhizobium* puede almacenarse hasta 3 ó 4 meses a 30°C y hasta 12 meses a temperatura de 4°C, aunque hay variaciones dependiendo del material portante; en todos los casos, Subba Rao (1992) obtuvo la mayor población, al mes de iniciado el almacenamiento.

Si el cultivo se hace en agar, se raspa la colonia con una aguja o bisturí y se hace una suspensión en agua; a esta suspensión se le puede añadir 10% de azúcar o 40% de goma arábica para aumentar la supervivencia del *Rhizobium* en la semilla; la suspensión, así preparada, se asperja sobre las semillas que se quieren inocular.

Cuando el cultivo se hace en portadores, éstos se mezclan con una mínima cantidad de agua de modo que se forme una “colada”, se adiciona azúcar o goma arábica y se echan las semillas en esa colada, revolviendo bien para lograr una impregnación homogénea; 150 g de inóculo de turba sirven para inocular la semilla para media hectárea, aproximadamente.

Es recomendable **peletizar** las semillas inoculadas, es decir, recubrirlas con alguna sustancia que las proteja de las condiciones ambientales externas; ésto se hace antes de que las semillas recién inoculadas se sequen; luego se extienden sobre papel y se dejan secar a temperatura ambiente.

Castro, citado por Castro y Munévar (1993), encontró, en suelos de El Espinal, Tolima (Colombia), que al peletizar semillas de sorgo con ZnSO₄, CaSO₄, azufre, cal dolomítica y carbonato de calcio, la producción se incrementó significativamente, mientras que cuando usó Borax o molibdato de amonio,

hubo una reducción en la producción ya que se presentó alto porcentaje de mortalidad de semillas debido a la acción deshidratante de las soluciones de estos compuestos sobre ellas.

Castro y Munévar (1993) obtuvieron diferencias significativas al 95% entre varios parámetros bióticos que evaluaron en un cultivo de soya, en suelos de Mariquita, Tolima, al comparar la siembra de soya inoculada con diferentes cepas de *Bradyrhizobium japonicum* y peletizada con cal dolomítica, contra la siembra de soya inoculada pero sin peletizar sino que, en lugar de la peletización, se agregaron al suelo 1.5 t de cal dolomítica ha⁻¹ (Ver la Tabla 15.7).

TABLA 15.7. Efecto de la peletización de semillas de soya sobre algunos parámetros bióticos* de un cultivo en Mariquita, Tolima. Resultados de Castro y Munévar (1993).

PARÁMETRO	SEMILLA PELETIZADA	SEMILLA SIN PELETIZAR
Producción de grano (kg ha ⁻¹)	2462	1973
Número de nódulos por planta a los 20 días de emergencia	1.5	0.5
Peso seco (g planta ⁻¹) a los 20 días después de emergencia	0.89	0.72

* Se presentaron diferencias significativas al 95% entre ellos.

Aparte de los resultados presentados en la Tabla 15.7, los autores también observaron que en plantas no inoculadas no se presentó formación de nódulos antes de 60 días después de la emergencia y que bajo cualquier sistema de siembra de los utilizados, con las mejores cepas se obtienen rendimientos similares a los que se obtienen con la aplicación de 150 kg N ha⁻¹, sin inoculantes.

Motta et al (1990) recomiendan peletizar las semillas con roca fosfórica, a razón de entre 100 y 400 g kg⁻¹ de semilla o con carbonato de calcio, aplicando alrededor de 500 g kg⁻¹ de semilla; las cantidades pueden variar dependiendo de las características de las semillas a inocular.

6. MICORRIZAS

Se llama **micorriza** a la unión íntima de la raíz de una planta con las hifas de determinados hongos; según Guerrero (1996), los hongos micorrizógenos son simbiontes obligados, pero no existe especificidad taxonómica estricta entre él y la planta hospedera, aunque puede asumirse, eso sí, que hay una especificidad ecológica entre el hongo y la comunidad vegetal como resultado de la co-evolución.

6.1. TIPOS DE MICORRIZAS

Según la relación que haya entre las hifas del hongo y la raíz de la planta, se reconocen tres grandes grupos de micorrizas: Ectomicorrizas, endomicorrizas y ectendomicorrizas.

6.1.1. Ectomicorrizas

En este tipo de micorrizas, las hifas del hongo forman un espeso manto sobre las raíces cortas y, además, penetran a los espacios intercelulares. Son las más importantes en árboles y son indispensables en plantaciones de *Pinus spp*, (Alvarado, 1988); Guerrero (1996) sostiene que también son

importantes en eucaliptos y en árboles tropicales de las familias Dipterocarpaceae y Cesalpinaeae. Según Sánchez (1999), hay poca diversidad de hospederos para este tipo de micorrizas y, además, ellas son poco frecuentes en condiciones tropicales.

Según Guerrero (1996), los principales hongos formadores de ectomicorizas son Basidiomicetos, que se agrupan en los géneros *Amanita*, *Boletus*, *Lactarius*, *Russula*, *Scleroderma* y *Agaricus*; Paul y Clark (1989) sostienen que estas micorrizas controlan infecciones radiculares en árboles y arbustos causadas por *Phytiun*, *Rhizoctonia* y *Phytophthora*. En la Tabla 15.8 se presentan los géneros de ectomicorizas que se han reportado y estudiado en Colombia.

6.1.2. Endomicorizas

Es el tipo de micorrizas más común, aun en el trópico; los hongos penetran los espacios inter e intracelulares de la raíz y no forman el manto hifal sobre ella. Según Sánchez (1999), a este grupo de micorrizas pertenecen las micorrizas arbusculares, las de las orquídeas y las de las ericáceas.

TABLA 15.8. Principales géneros de ectomicorizas encontrados en Colombia. (Tomados de Pardo, 1988 y de Alvarado, 1988).

GÉNERO	LOCALIDAD/HOSPEDERO (Género o Familia)
<i>Amanita</i>	Antioquia y Cundinamarca, 2400 a 3000 msnm./ <i>Pinus</i> , <i>Cupressus</i> , <i>Quercus</i> .
<i>Boletus</i>	Piso climático frío/ <i>Pinus</i> , <i>Quercus</i> , <i>Eucalyptus</i> .
<i>Lactarius</i>	Antioquia, 2100 msnm./ <i>Quercus</i> , <i>Cupressus</i> .
<i>Russula</i>	Antioquia, 2100 msnm./ <i>Quercus</i> , <i>Pinus</i> , <i>Vaccinum</i> , <i>Roupala</i> , algunas Ericaceae y Compositae.
<i>Laccaria</i>	Piso climático frío/ <i>Pinus</i> , <i>Quercus</i> , <i>Eucalyptus</i> .
<i>Cantharellus</i>	Piso climático frío/ <i>Quercus</i> .
<i>Scleroderma</i>	Piso climático frío/ <i>Pinus</i> , <i>Cupressus</i> .
<i>Inocybe</i>	Piso climático frío/ <i>Pinus</i> .
<i>Telephora</i>	Piso climático frío/ <i>Pinus</i> .

6.1.2.1. Endomicorizas arbusculares (MVA)

También se conocen como **micorrizas vesículo-arbusculares (MVA)** y, según Cochran et al (1994), se presentan en más del 85% de las plantas. En éstas, Toro y Sieverding (1988) apuntan que las hifas intracelulares forman estructuras especializadas de almacenamiento de lípidos (vesículas) o de intercambio de nutrientes y carbohidratos con la planta (arbúsculos). Los principales hongos de este tipo de micorrizas se agrupan en 6 géneros, dentro de la clase Zygomycetes, orden Glomales: *Glomus*, *Sclerocystis*, *Acaulospora*, *Entrophospora*, *Gigaspora* y *Scutellospora*.

Estrada y Sánchez (1994), en suelos de la zona cafetera del Valle del Cauca, inocularon plántulas de café, var. Colombia, con *Glomus manihot* y encontraron que el desarrollo radicular de la planta dependió obligatoriamente de la micorriza. En suelos de la parte plana del Valle del Cauca, Cenicaña (1996) encontró 10 especies de *Glomus* formando micorrizas con plantas de caña de azúcar.

6.1.2.2. Micorrizas de orquídeas

Llamadas también **micorrizas orquidoides**, son formadas por hongos del género *Rhizoctonia* con plantas de la familia Orchidaceae y son indispensables para la germinación de las semillas de estas plantas, aunque parece que la micorriza es opcional en plantas adultas. En este tipo de asociación hay una alta especificidad.

6.1.2.3. Micorrizas ericoides

Micorriza intracelular formada por Ascomycetes, principalmente de los géneros *Pezizella* y *Elaphomycetes*, según Sánchez (1999); se presenta con hifas septadas y con ensortijamientos o rizos; son relativamente frecuentes en algunos géneros de las familias Ericaceae, Empetraceae y Epacridaceae que crecen en suelos anegados, orgánicos y ácidos; también en éstas, como en las orquidoides, se presenta una alta especificidad.

6.1.3. Ectendomicorrizas

Según Sánchez (1999), son, básicamente, ectomicorrizas que llevan a cabo penetración intracelular, en las raíces de las plantas, por hifas septadas. Se encuentran asociadas a plantas coníferas y tienen una alta especificidad.

6.2. CONDICIONES QUE AFECTAN EL DESARROLLO DE LAS MICORRIZAS

Dado que los hongos micorrizógenos son aeróbicos, el exceso de humedad en el suelo dificulta su establecimiento en él. Otros factores ambientales como la temperatura, la luz o la aireación, los afectan, a través de el efecto que ellos tengan sobre las plantas hospederas, por ejemplo, disminuyendo su capacidad fotosintética y, por tanto, la disponibilidad de carbohidratos para los hongos (Sánchez, 1999).

Aunque las condiciones ambientales para el desarrollo de las micorrizas son bastante específicas, hay algunas situaciones que lo restringen como lo exponen Guerrero et al (1996):

- Realizar fumigaciones intensivas o quemas en el suelo.
- Dejar el suelo en barbecho o implantar en él monocultivos permanentemente.
- Invertir los horizontes del suelo o la presencia de erosión.
- Hacer aplicaciones intensas de fertilizantes fosfóricos al suelo.

6.3. IMPORTANCIA DE LAS MICORRIZAS

Según varios autores citados por Burbano (1989) y por Sánchez (1999), las micorrizas aumentan la absorción, por parte de la planta, de nutrientes poco móviles en el suelo, como P, Zn, S, Ca, Cu, Mo y B; le dan a la planta resistencia a condiciones desfavorables de suelo como: pH extremo, sequía,

salinidad, cambios grandes de temperatura y presencia de elementos tóxicos (Fe, Al, Mn); además, protegen la raíz del ataque de patógenos.

Como se mencionó anteriormente, para el establecimiento de ciertas especies vegetales se requiere la presencia de micorrizas, así como para la germinación de semillas de orquídeas; Guerrero et al (1996) indican que hay plantas con alta **micotrofia**, es decir, alta dependencia de las micorrizas para su desarrollo, como café, cítricos, yuca, zanahoria, chirimoya, cacao, aguacate y gran cantidad de pastos, en tanto que se presentan otras con media a baja micotrofia como caña de azúcar, maíz y sorgo.

Según Azcón y Barea (1996), la formación de micorrizas induce cambios nutricionales y fisiológicos en la planta que alteran los exudados radiculares y la composición microbiana de la rizosfera, creando diferentes interacciones entre los microorganismos de esta parte del suelo.

Asai, citado por Azcón y Barea (1996), estableció que la nodulación de las leguminosas por **Rhizobium** es bastante dependiente de una adecuada micorrización de la planta; parece haber un estímulo a la micorriza por parte de los polisacáridos extracelulares y del nitrógeno aportados por el **Rhizobium**, así como un estímulo al desarrollo de la bacteria por el suministro de fósforo que hace la micorriza a aquella.

Azcón y Barea (1996) reportan que entre **Frankia** y micorrizas también se presentan interacciones similares a las observadas con el **Rhizobium**, aunque son menos comprendidas; así mismo, se ha observado una interacción positiva entre MVA y bacterias de los géneros **Azotobacter** y **Azospirillum**, obteniéndose una mejor micorrización en presencia de las bacterias, aparentemente por efecto de las hormonas producidas por ellas.

Contrario a lo expuesto en párrafos anteriores, Layton et al (1999) no encontraron beneficio en inocular con **Glomus fasciculatum**, plántulas de acacia que ya tenían cepas de **Rhizobium**, en invernadero. Este procedimiento tuvo éxito en plántulas de retamo sólo con algunas cepas de **Rhizobium**, lo que muestra que hay alguna especificidad entre los organismos a asociar.

6.4. INOCULACIÓN CON MICORRIZAS

6.4.1. Endomicorrizas

Según Guerrero (1996) deben hacerse co-cultivos hongo-planta para multiplicar los **propágulos** (órganos o partes de ellos que se van a utilizar como fuente de inóculo) del hongo; según el tipo de propágulo, el inóculo pueden ser: esporas, raicillas infectadas o suelo micorrílico (suelo con esporas y raicillas infectadas).

Las esporas son el inóculo más puro, pero también es el más difícil de obtener; en las raíces el inóculo tiene poca supervivencia; por lo anterior, el suelo micorrílico es el inóculo más utilizado, aunque el riesgo de transmitir patógenos con él es alto. Con este sistema el inóculo puede durar viable hasta un año (Guerrero, 1996).

La adición del inóculo a la planta puede hacerse colocando la semilla en contacto con el suelo micorrílico antes de sembrarla, como se hace en el caso de la inoculación con bacterias; también colocando la raíz de aquella en contacto con dicho suelo al momento de hacer el trasplante o mezclando el suelo micorrílico con el suelo en el cual se va a efectuar la siembra.

6.4.2. Ectomicorras

La inoculación de especies forestales es una práctica silvicultural fundamental; existen varias maneras de obtener el inóculo de este tipo de micorras, según Guerrero (1996):

- Tomando suelo de plantaciones o de bosques en los cuales se haya observado la presencia del hongo.
- Recolectando carpóforos en el campo.
- Haciendo bancos de micorras en viveros.
- Producido inóculos puros de micelios o de esporas en el laboratorio.

Según Guerrero (1996), el último método planteado es el más confiable y eficiente ya que en los demás es difícil garantizar la calidad y disponibilidad del inóculo, así como la ausencia de trasmisión de patógenos; para la aplicación del inóculo pueden tenerse en cuenta las sugerencias hechas para inocular con bacterias o con MVA.

7. ALGUNOS EFECTOS DEL MANEJO DEL SUELO SOBRE SUS MICROORGANISMOS

Quizás lo que más afecta la población microbiana del suelo, tanto en su cantidad como en su actividad y en sus relaciones poblacionales es el cambio de la cobertura vegetal nativa por una cobertura de cultivos o de pastos. Esto puede tener relación con cambios en el microambiente edáfico provocados por las prácticas de manejo que deben implementarse para mantener aquellas actividades agropecuarias.

7.1. CAMBIO DE COBERTURA

Hay una gran cantidad de ejemplos que ilustran lo que sucede con las poblaciones de los microorganismos del suelo cuando se cambia la cobertura nativa por cultivos o por pastos.

Geraldes et al (1995) estudiaron el comportamiento del C y del N almacenados en la biomasa microbial de un Latossolo vermelho – amarelo distrófico muy arcilloso, después de varios años de haber cambiado la selva amazónica por potreros con pastos *Brachiaria* sp y/o *Panicum* sp y encontraron los resultados que se presentan en la Figura 15.5

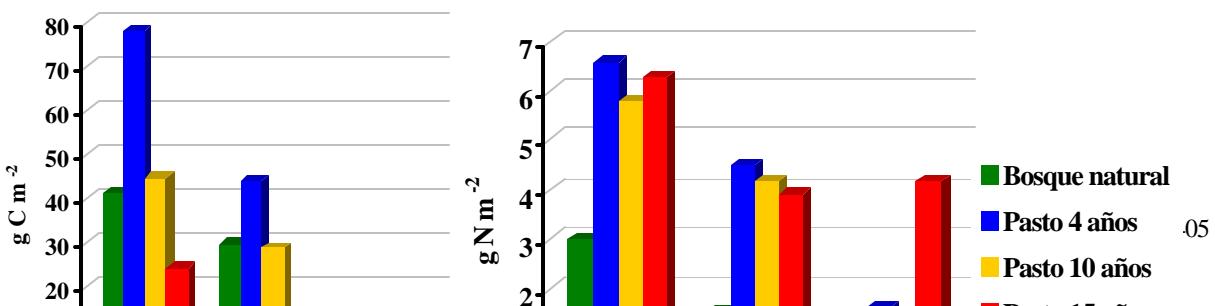


FIGURA 15.5. Cantidades de C y de N acumuladas en la biomasa microbial de un Latosol de la amazonia brasilera bajo diferentes coberturas vegetales y a distintas profundidades dentro del suelo. Con base en resultados de Geraldes et al (1995).

Se observa en la figura anterior que en los primeros años de establecido el potrero, tanto el C como el N se incrementan fuertemente con respecto a los contenidos de la selva nativa, en todas las profundidades. En la profundidad de 30 cm hay una tendencia del C a presentar los valores que tenía bajo la cobertura natural y esta tendencia es más marcada al aumentar el tiempo de uso en pastos, lo que puede estar mostrando que el efecto del cambio de cobertura no fue importante a esta profundidad. Con respecto al N, parece haber un efecto de acumulación de este nutriente, en profundidad, en los pastizales más viejos.

Salamanca et al (1998) obtuvieron diferencias significativas entre las poblaciones de bacterias rizosféricas en suelos de la altillanura colombiana, al comparar las poblaciones de la sabana nativa ($2.75 \log \text{ UFC g}^{-1}$ de suelo) contra el promedio de las poblaciones obtenidas bajo sistemas de cultivos en rotación y pastos mejorados ($4.29 \log \text{ UFC g}^{-1}$ de suelo). Entre las poblaciones de hongos y de actinomicetos las diferencias no fueron significativas: 3.08 y $3.17 \log \text{ UFC g}^{-1}$ de suelo para los hongos, en sabana nativa y cultivos, respectivamente y 4.23 y $4.71 \log \text{ UFC g}^{-1}$ de suelo para los actinomicetos, también en sabana nativa y en cultivos, respectivamente.

González et al (1999), en suelos de clima frío de Cundinamarca, encontraron diferencias altamente significativas entre las poblaciones de bacterias presentes en un bosque andino y las encontradas en pastizales aledaños ($p<0.0001$) y entre la producción de nitratos por parte de bacterias provenientes de suelos bajo dichas coberturas ($p<0.0003$). Las poblaciones fueron casi el doble bajo bosque y la producción de nitratos fue casi 6 veces más en las bacterias provenientes del bosque.

7.2. EL LABOREO DEL SUELO

Lee y Pankhurst (1992) estiman que cuando el suelo se somete a labranza convencional, los residuos vegetales son incorporados en él y quedan disponibles para la descomposición por parte de los organismos edáficos. Debido a la disturbación del suelo por este sistema de laboreo, las comunidades bióticas tienden a ser dominadas por microorganismos aeróbicos, principalmente bacterias, lo que lleva a un incremento de la población de bacteriófagos (protozoarios y nemátodos) en los suelos agrícolas,

generándose, de paso, una rápida descomposición de los residuos orgánicos y una intensa mineralización de nutrientes.

Al contrario de lo expuesto en el párrafo anterior, cuando se hace labranza mínima los residuos vegetales quedan en la superficie del suelo, lo que favorece la proliferación de hongos en los primeros milímetros del suelo y la inmovilización de nutrientes en los residuos: la comunidad biótica tiende a estar dominada por hongos y esto incrementa las poblaciones de fauna fungívora como nemátodos, collémbolos y lombrices (Lee y Pankhurst, 1992).

Efectos como los descritos anteriormente obtuvo Gómez (1997) en suelos arenosos de Pivijay cultivados con yuca, como puede verse en la figura 15.6. En este trabajo se tuvieron 2 sistemas de labranza: Convencional (C) y Labranza Cero (LC). Se comparó un nivel de fertilización (50 kg N ha^{-1} , $21.6 \text{ kg P ha}^{-1}$ y $41.3 \text{ kg K ha}^{-1}$) contra ausencia de fertilización y se comparó la aplicación de coberturas muertas al suelo contra la no aplicación de la misma, adicionando 12 t ha^{-1} de materia seca de *Panicum maximum* a los tratamientos correspondientes.

En la Figura 15.6 los tratamientos evaluados corresponden a:

- C: Labranza convencional, sin fertilización y sin cobertura muerta.
- CA: Labranza convencional, con fertilización y sin cobertura muerta.
- CC: Labranza convencional, sin fertilización y con cobertura muerta.
- CAC: Labranza convencional, con fertilización y con cobertura muerta.
- LC: Labranza cero, sin fertilización y sin cobertura muerta.
- LCA: Labranza cero, con fertilización y sin cobertura muerta.
- LCC: Labranza cero, sin fertilización y con cobertura muerta.
- LCAC: Labranza cero, con fertilización y con cobertura muerta.

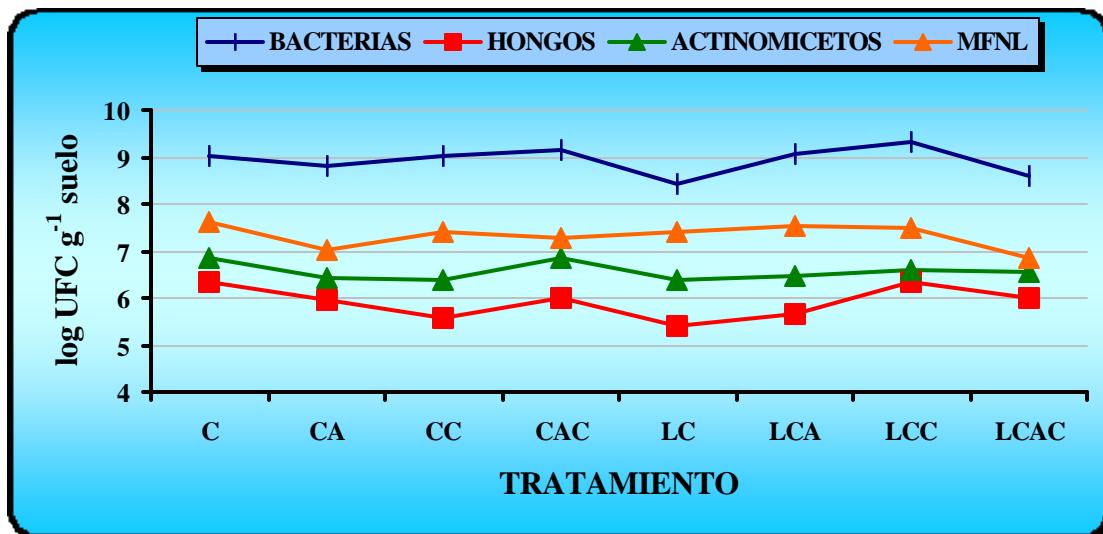


FIGURA 15.6. Poblaciones de microorganismos (Base logarítmica) en un suelo arenoso de Pivijay, Magdalena, bajo cultivo de yuca y con varios sistemas de manejo. Los resultados son promedios de dos muestreos

hechos en diferentes semestres (II-95 y I-96) hasta 15 cm de profundidad, con base en evaluaciones de Gómez (1997) (MFNL: microorganismos fijadores de N de vida libre).

En la figura anterior se aprecia que las poblaciones de bacterias fueron mayores que en los otros grupos, en todos los tratamientos y que el grupo de los hongos fue el de menor presencia; también resalta el hecho de que la adición de materia orgánica al suelo aumenta las poblaciones de microorganismos en él y que, en algunos casos, la adición de fertilizantes también hace lo mismo. Cabe aclarar que el autor de esta investigación obtuvo diferencias significativas al 95% entre los diferentes tratamientos analizados.

Gómez (1997) también evaluó el grado de infección de la Yuca con endomicorras y encontró que el mayor porcentaje de infección de raíces (88.8%) se presentó cuando el suelo estuvo sometido a labranza cero y no se le adicionó ni fertilizante ni mulch, es decir, cuando el suelo no fue sometido a ningún tipo de disturbación. Los tratamientos que siguieron en grado de infección también fueron los de labranza cero, con mulch y con fertilizante (85.1%) y con mulch pero sin fertilizante (82.5%). Entre los tratamientos de labranza cero no hubo diferencia significativa pero sí la hubo, al 95%, entre éstos y los tratamientos de labranza convencional. El tratamiento que menor porcentaje de infección presentó fue el de labranza convencional con fertilización y con mulch, es decir, el que generó el manejo más intensivo en el suelo.

7.3. EL USO DE AGROQUÍMICOS

Burbano (1989) hace una amplia discusión acerca del efecto que tiene el uso de agroquímicos y, especialmente de pesticidas, sobre la microbiota del suelo. De esta revisión pueden hacerse las siguientes generalizaciones:

- Las aplicaciones de herbicidas en dosis normales¹ no parecen tener efectos importantes en la respiración del suelo pero, en dosis altas, todos estos productos tienen algún efecto nocivo para los microorganismos del suelo.
- El tratamiento del suelo con fungicidas aumenta la concentración de amonio en el mismo, mientras que el uso de insecticidas influye poco sobre el proceso de la amonificación.
- Los fungicidas son, generalmente, inhibidores potentes de la nitrificación aunque, en dosis bajas este efecto no es considerable. Este efecto puede durar hasta varios meses, dependiendo de la dosis y del producto utilizados.
- Ni los herbicidas ni los insecticidas, en las dosis de uso normales, afectan considerablemente la nitrificación.
- La fijación biológica de N se afecta bastante por los fungicidas; este efecto se ha notado con *Azotobacter* y con *Rhizobium*. Para contrarrestarlo se han desarrollado algunas razas resistentes de *R. phaseoli* y de *R. meliloti*.
- Los insecticidas, en dosis altas, reducen las poblaciones de *Rhizobium* y el número de nódulos en las raíces de las plantas leguminosas. Generalmente con la aplicación de estos productos se reduce drásticamente la población de bacterias y se incrementan las de hongos y de actinomicetos, en los primeros días después de la fumigación.

¹ Corresponde a las dosis recomendadas comercialmente por los fabricantes. Dependen del producto, del cultivo, del suelo y de la región donde se va a aplicar el producto.

- Con la aplicación de fungicidas, los hongos y los actinomicetos son casi exterminados del suelo y las bacterias aumentan notablemente su población; esta situación puede durar varios meses, dependiendo del producto y de las dosis utilizadas.

Para ilustrar el efecto nocivo que algunos herbicidas tienen sobre la fijación de N, Burbano (1989) cita el trabajo de Eberbach y Douglas, quienes estudiaron el efecto de la aplicación de Glyphosato sobre el número de nódulos por planta, el peso de la raíz y la tasa de producción de C_2H_4 , en un suelo franco arenoso sembrado con trébol subterráneo inoculado con *Rhizobium trifoli*; después de 120 días de aplicado el herbicida se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 15.9.

TABLA 15.9. Efecto de la aplicación de Glyphosato sobre la nodulación y el peso de la raíz de trébol subterráneo inoculado con *Rhizobium trifoli* después de 120 días de aplicado el producto (Resultados de Eberbach y Douglas, citados por Burbano, 1989, del cual se toman).

DOSIS GLYPHOSATO (mg g^{-1} de suelo)	Nº NÓDULOS PLANTA $^{-1}$	PESO RAÍZ(mg)
0	93a*	310a*
2	27b	20b
5	27b	20b
10	24b	20b

* Diferente letra indica diferencia significativa entre dosis al 95%.

Los mismos investigadores citados en la tabla anterior evaluaron la fijación de N midiendo la producción de C_2H_4 hasta 19 semanas después de aplicado el herbicida y encontraron los resultados que se presentan en la Figura 15.7. Tanto en los resultados de la Tabla 15.9 como en los de la Figura 15.7 se aprecia el notable efecto nocivo que tiene la aplicación del herbicida sobre las variables estudiadas. En el caso de la fijación de N también se obtuvieron diferencias significativas al 95% entre la falta de aplicación del producto y la aplicación del mismo, aunque cuando se aplicó no hubo diferencias entre las dosis utilizadas.

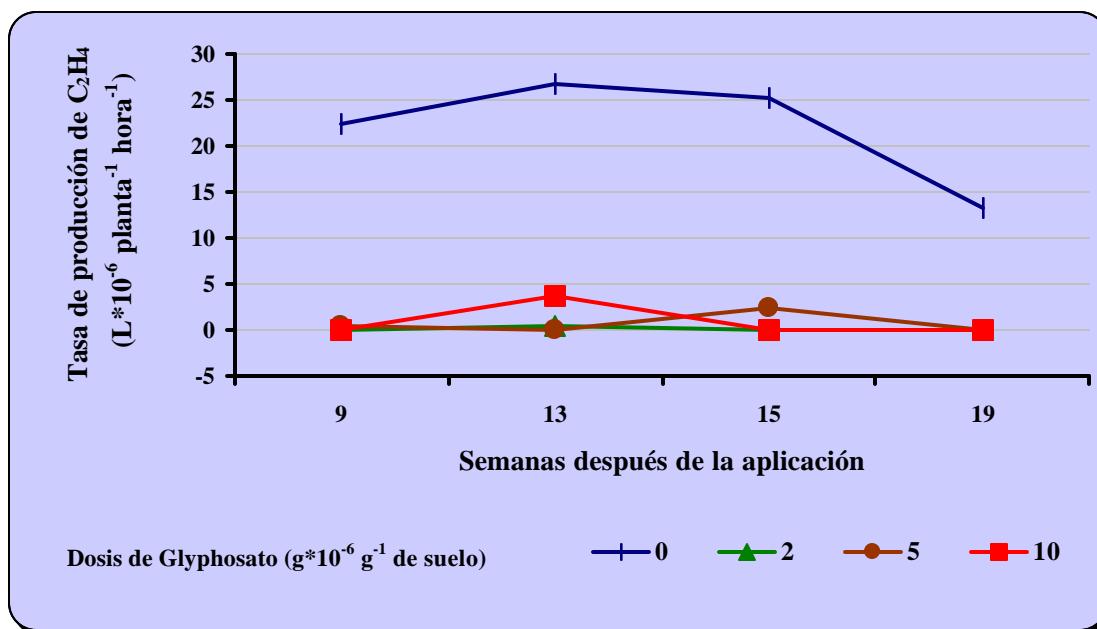


FIGURA 15.7. Efecto de la aplicación de Glyphosato sobre la tasa de producción de C₂H₄ por *Rhizobium trifoli* con trébol subterráneo después de 19 semanas de aplicado el producto (Resultados de Eberbach y Douglas, citados por Burbano, 1989, del cual se toman).

RECORDAR

- Los macro, meso y microorganismos del suelo pueden ser unos aliados importantes en los procesos de nutrición de las plantas.
 - La composición de la meso y macrofauna del suelo se altera notablemente cuando se cambian su uso y su manejo.
 - Organismos del orden Collémbola pueden ser indicadores de alteración importante en la parte superficial del suelo, por lo menos en clima frío.
 - Hay dos grupos de microorganismos que intervienen activamente en la nutrición y desarrollo vegetal: bacterias y hongos.
 - La mayor actividad de los microorganismos del suelo se produce en la rizosfera.
 - Una de las actividades más benéficas de las bacterias consiste en la fijación del nitrógeno atmosférico.
 - La manera más eficiente de fijación biológica del nitrógeno es la que se hace mediante la simbiosis entre bacterias del género *Rhizobium* y plantas leguminosas.
 - Los hongos forman asociaciones con las raíces de las plantas llamadas micorrizas.
 - Las micorrizas pueden ser ecto o endomicorrizas, dependiendo de que las estructuras del hongo se queden por fuera de las células radicales o no, respectivamente.
-
- Se pueden presentar asociaciones de plantas-bacterias-hongos, conformándose un sistema nutricional muy eficiente, en varios casos, pero parece que hay especificidad entre los organismos a asociar.
 - El uso intensivo del suelo disminuye la micorrización.

BIBLIOGRAFÍA

ALVARADO, B. 1988. Efecto de las Ectomicorrizas en el desarrollo del *Pinus patula*. En: Investigaciones sobre Micorrizas en Colombia N° 2. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS). Medellín. pp. 133-137.

AZCÓN, A., C. y J. M. BAREA. 1996. Interacciones de las micorrizas arbusculares con microorganismos de la rizosfera. En: Micorrizas: Recurso biológico del suelo. Guerrero, F. E. editor. Fondo FEN Colombia. Bogotá. pp. 47-68.

BARRERA, M. de R. y A. LOZANO de Y. 1991. Características de cepas nativas de *Rhizobium leguminosarum* bv. viceae, mediante diferentes técnicas. Suelos Ecuatoriales 21 (2): 137-142.

- BOWEN, G. 1993. The rhizosphere. Appendix B. In: Tropical soil Biology and Fertility: A handbook of methods. 2^a Ed. Anderson J. M. and J. S. I. Ingram editors. CAB International. U. K. 221 p.
- BROCK, T. D. and M. T. MADIGAN. 1991. Biology of microorganisms. 6^a. Ed. Prentice Hall International Inc . U.S.A. 874 p.
- BURBANO, H. 1989. El Suelo: Una visión sobre sus componentes biorgánicos. Universidad de Nariño. Pasto. 447 p.
- CABRERA, L. T. A. 2000. Aporte al conocimiento de la microbiota fúngica del suelo de la amazonia colombiana, con énfasis en tres grupos funcionales. Tesis (Biólogo). Pontificia Universidad Javeriana. Santafé de Bogotá. 353 p.
- CAMPOS, R. 1991. Sobrevivencia de *Rhizobium phaseoli* en condiciones de acidez. Suelos Ecuatoriales 21 (2): 131-135.
- CASTRO, H. y F. MUNÉVAR. 1993. Peletización de semillas de soya y su interacción con el uso de inoculantes y de nitrógeno. Suelos Ecuatoriales 23(1-2): 209-216.
- CENICAÑA. 1996. Informe anual 1994. Cenicaña. Cali. 78 p.
- CHAMORRO, C. 1990. Las lombrices de tierra (macrofauna) en correlación con las características químicas del páramo de Sumapaz. En: Biología de suelos. Investigaciones Subdirección Agrológico. Vol. 2 Nº. 1. IGAC - Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. pp. 21-45.
- CHAMORRO, C. 1989. Efecto del uso del suelo sobre la composición edafofaunística de los páramos que circundan la ciudad de Bogotá. Suelos Ecuatoriales 19(1): 48-62.
- COCHRAN, V. L.; S. D. SPARROW and E. B. SPARROW. 1994. Residue effects on soil micro and macroorganisms. In: Managing Agricultural Residues. Unger P. W. editor. Lewis Publishers. USA. pp: 163-184.
- CORAL, E. D. y C. R. BONILLA. 1998. Impacto de las prácticas agrícolas sobre la macrofauna del suelo en la cuenca del lago Guamues, Pasto, Colombia. Acta Agronómica 48(3-4): 55-61.
- CORTÉS, A.; C. CHAMORRO y A. VEGA. 1990. Cambios en el suelo por la implantación de praderas, coníferas y eucaliptos en un área aledaña al embalse del Neusa (Páramo de Guerrero). En: Biología del suelo. Investigaciones Subdirección Agrológico. Vol. 2 Nº. 1. IGAC - Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. pp: 101 – 114.
- DECAËNS, T.; J. JIMÉNEZ; J. SCHNEIDMADL y P. LAVELLÉ. 1998. La macrofauna del suelo en sistemas de producción agrícola: Respuestas a las perturbaciones y perspectivas de manejo. Un caso de estudio en los Llanos Orientales de Colombia. Suelos Ecuatoriales 28: 260-268.
- ESTRADA, G. y M. SÁNCHEZ. 1994. Dependencia del café *Coffea arabica* L. var. Colombia) por micorriza vesiculárbicular. Suelos Ecuatoriales 24: 95-98.
- GERALDES, A. P. A.; C. C. CERRI y B. J. FEIGL. 1995. Biomassa microbiana de solo sob pastagens na amazônia. R. bras. Ci. Solo Campinas 19: 55-60.
- GÓMEZ, E. D. 1997. Estimación de algunos indicadores biológicos del suelo asociados con el manejo del cultivo de la yuca *Manihot esculenta* Crantz, en la costa norte de Colombia. Tesis (Maestría en Ciencias Agrarias). Universidad Nacional de Colombia. Palmira. 98 p.
- GONZÁLEZ, X.; L. GONZÁLEZ; A. VARELA y J. A. AHUMADA. 1999. Incidencia de la cobertura vegetal sobre poblaciones de bacterias nitrificantes autótrofas en un fragmento de bosque andino. Suelos Ecuatoriales 29(1): 83-88.

- GUERRERO, F. E. 1996. Micorriza: Fundamentos biológicos y estado del arte. **En:** Micorrizas: Recurso biológico del suelo. Guerrero, F. E. editor. Fondo FEN Colombia. Bogotá. pp. 1-46.
- GUERRERO, F. E.; C. RIVILLAS y E. L. RIVERA. 1996. Perspectivas de manejo de la micorriza arbuscular en ecosistemas tropicales. **En:** Micorrizas: Recurso biológico del suelo. Guerrero, F. E. editor. Fondo FEN Colombia. Bogotá. pp. 181-208.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC). 1986. Acción pedobiológica de la mesofauna en algunos suelos de la Orinoquia. **En:** Diagnóstico geográfico nororiente del Vichada. Vol. 5.2: Suelos. IGAC. Bogotá. pp: 60-92.
- INFANTE, J. y C. CHAMORRO. 1990. Influencia del uso del suelo sobre la mesofauna edáfica en el Páramo de Chingaza (Cundinamarca, Colombia). **En:** Biología de suelos. Investigaciones Subdirección Agrológico. Vol. 2 Nº. 1. IGAC - Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. pp. 115-150.
- LAYTON, G.; A. LOZANO de Y. y H. CHAMORRO. 1999. Efecto de la aplicación de biofertilizantes en *Acacia decurrens* y *Teline monspessulana* en vivero. Suelos Ecuatoriales 29(2): 219-224.
- LEE, K. E. and C. E. PANKHURST. 1992. Soil organisms and sustainable productivity. Aust. J. Soil Res. 30: 855-892.
- MOTTA, B. et al. 1990. Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos. 5a. ed. IGAC. Bogotá. 502 p.
- MUNÉVAR, F. 1991. Conceptos sobre la materia orgánica y el nitrógeno del suelo, relacionados con la interpretación de análisis químicos. **En:** Fundamentos para la Interpretación de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas para riego. SCCS. Bogotá. pp. 227-244.
- OROZCO, F. H. 1999. Biología del nitrógeno. Conceptos básicos sobre sus transformaciones biológicas. Tomo I. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín. 231 p.
- OSORIO, N. W. 2000. Aislamiento y evaluación *in vitro* de microorganismos solubilizadores de P de suelos tropicales. **En:** Programa y resúmenes X Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. J. C. Pérez editor. Medellín. pp: 84.
- PARDO, V. M. 1988. Descripción de los géneros ectotróficos más importantes y su ecología. **En:** Investigaciones sobre Micorrizas en Colombia Nº 2. SCCS. Medellín. pp. 55-62.
- PAUL, E. A. y F. E. CLARK. 1989. Soil microbiology and biochemistry. Academic Press Inc. Londres. 275 p.
- PRITCHETT, W. L. 1991. Suelos forestales: Propiedades, conservación y mejoramiento. Editorial Limusa. México. 634 p.
- RODRÍGUEZ, B. C.; F. SEVILLANO y P. SUBRAMANIAN. 1985. La fijación de nitrógeno atmosférico: Una biotecnología en la producción agraria. Temas monográficos Nº 16. Centro de Edafología y Biología Aplicada. Salamanca. 71 p.
- SALAMANCA, C.; M. R. SILVA; G. E. NAVAS y R. VALENCIA. 1998. Dinámica poblacional de los microorganismos rizosféricos en diferentes sistemas de producción en la orinoquia colombiana. **En:** Memorias Encuentro Nacional de Labranza de Conservación. Romero G. et al editores. Villavicencio. pp: 421-443.
- SÁNCHEZ, M. de P. 1999. Endomicorrizas en agroecosistemas colombianos. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. 227 p.
- SOIL QUALITY INSTITUTE (SQI). 1999. Soil quality test kit guide. United States Department of Agriculture (USDA). Lincoln. 82 p.
- SUBBA RAO, N. S. 1992. Biofertilizers in agriculture. 2^a. Ed. A. A. Balkema. Rotterdam. 208 p.

TORO, S. y E. SIEVERDING. 1988. Fisiología de la micorriza vesículo – arbuscular. En: Investigaciones sobre Micorrizas en Colombia N° 2. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS). Medellín. pp. 63-97.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). 1998. Soil quality resource concerns: Soil Biodiversity. Soil quality information sheet. USDA. Lincoln. 2 p.

VALERO, N. O. 2000. Aislamiento y caracterización de fijadores biológicos de nitrógeno asociados a caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en algunos cultivos de Cundinamarca. Tesis (Biólogo). Universidad Nacional de Colombia. Santafé de Bogotá. 101 p

VITERI, S.; D. ZARTA y N. SALGADO. 2000. Algunos aspectos ecológicos de los hongos en los suelos de la finca Palma de Vino, La Dorada, Caldas, Colombia. Suelos Ecuatoriales 30(2): 197-203.

ZERDA, M. L. y C. CHAMORRO. 1990. Influencia del uso del suelo sobre la mesofauna edáfica en el Páramo de Chisacá, Cundinamarca, Colombia. En: Biología de suelos. Investigaciones Subdirección Agrológico. Vol. 2 N°. 1. IGAC - Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. pp. 47-60.

ZULUAGA, D. et al. 1995. Componente bioedáfico de los suelos del área de Caño Limón (Arauca - Colombia). Suelos Ecuatoriales 25: 109-111.

AUTOEVALUACIÓN

1. Enumerar 5 efectos que tengan los meso y macroorganismos en el suelo.
2. ¿Qué importancia pueden tener los individuos del orden Collémbola en el suelo?.
3. Enumerar 5 efectos que tengan los microorganismos en el suelo.
4. Enumerar 4 factores que dificulten la interpretación de la respiración del suelo.
5. ¿Qué es la rizosfera?. ¿Porqué es importante?.
6. ¿Qué se entiende por fijación biológica de nitrógeno?. ¿Cómo puede hacerse?.
7. Diga 2 géneros de bacterias fijadoras de nitrógeno libres y rizosféricas importantes en suelos ácidos.
8. ¿Cuál es el sistema de fijación biológica de nitrógeno más conocido?. Es también el más eficiente?. Diga un inconveniente que presente. Diga dos géneros de bacterias que lo representen.
9. ¿Qué es peletizar una semilla?. ¿Para qué se hace este proceso?. ¿Cuáles materiales se usan frecuentemente para hacerlo?.
10. ¿Qué es una micorriza?.
11. ¿Cuál es el grupo de micorrizas más frecuente?.
12. Diga 3 efectos de las micorrizas.
13. Se puede presentar asociación entre micorrizas y bacterias?. Comente.
14. ¿Cuáles prácticas afectan más la dinámica y la densidad de las poblaciones de microorganismos en el suelo?.

LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

CAPÍTULO 16

CONTENIDO

- ❖ Importancia de la materia orgánica en el suelo
- ❖ Contenido y distribución de la materia orgánica en el suelo
 - Distribución en el interior del suelo
 - Distribución espacial
 - Niveles críticos
- ❖ Evaluación de la materia orgánica del suelo
 - Análisis cuantitativos totales
 - Calcinación
 - Método de Walkley y Black
 - Oxidación con peróxido de hidrógeno
 - Fraccionamiento de la materia orgánica del suelo
 - Análisis de caracterización cualitativos

OBJETIVOS

- ❖ Comprender la importancia de la materia orgánica como componente activo del suelo
- ❖ Entender como se distribuye la materia orgánica del suelo y los factores que controlan esa distribución
- ❖ Conocer los métodos más utilizados para evaluar la materia orgánica que tiene el suelo

D

esde un punto de vista netamente práctico, pensando en la explotación sostenible del suelo, la materia orgánica puede considerarse como el principal componente sólido que posee este recurso natural, ya que de alguna manera se relaciona con casi todas las propiedades del mismo. Según el Soil Survey Laboratory (SSL, 1995, 1996), la materia orgánica del suelo, llamada también **humus**, se define como la fracción orgánica que posee el suelo, excluyendo los residuos vegetales y animales sin descomponer.

1. IMPORTANCIA DE LA MATERIA ORGÁNICA EN EL SUELO

La materia orgánica, en todas sus diferentes formas, tiene efectos marcados en casi todas las propiedades del suelo, como puede verse en el resumen que se presenta en la Tabla 16.1.

TABLA 16.1. Efecto general de la materia orgánica sobre algunas propiedades del suelo.

PROPIEDAD	EFFECTO AL AUMENTAR EL CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA
Estructura	Favorece su formación, aumenta el tamaño y estabilidad de los agregados.
Porosidad	Aumenta la cantidad de macroporos.
Aireación	Aumenta el volumen de aireación y mejora la circulación del aire.
Infiltración	Aumenta su velocidad.
Drenaje	Aumenta la velocidad de circulación del agua dentro del suelo.
Humedad	Aumenta la capacidad de retener agua, sobre todo a bajas tensiones y/o si el suelo es arenoso. En general, 1 g de carbono orgánico retiene 1.5 g de agua, a 15 bar y 3.5 g de agua, a 0.3 bar, aproximadamente, según el SSL (1995).
Consistencia	Aumenta la friabilidad, disminuye la pegajosidad, la plasticidad y el encostramiento superficial; con ésto se facilita el laboreo del suelo ya que éste le opone menor resistencia a los implementos y a las máquinas; también en este sentido tiene efectos económicos al requerirse menos potencia y menos gasto de combustible.
Erodibilidad	Disminuye la susceptibilidad del suelo a la erosión.
Color	Oscurece el suelo facilitando su calentamiento, con lo cual mejora la germinación de las semillas, el desarrollo radicular y, en general, la nutrición de la planta.
CIC	Incrementa su valor. En términos generales, 1 g de carbono orgánico aporta entre 3 y 4 meq a la CIC (SSL, 1995).
Capacidad buffer	Aumenta.
pH	Disminuye.
Nutrientes	Aporta algunos (N, P, S principalmente) durante el proceso de mineralización; puede ocasionar fijación de algunos elementos menores; la disponibilidad de algunos nutrientes se puede ver reducida debido a la formación de complejos estables en los cuales se ven involucrados, como es el caso de la formación de quelatos con Cu, Mn, Zn, Fe, entre otros, o a procesos de adsorción selectiva de algunos iones.
Contaminación	La materia orgánica almacena compuestos y/o elementos tóxicos como algunos ingredientes activos no degradables de agroquímicos o metales pesados (Pb, Ni, etc.), que llegan al suelo, dificultando su eliminación de este medio.
Hidrofobicidad	Los compuestos hidrofóbicos que se acumulan en el suelo son orgánicos; ellos alteran las propiedades hídricas del suelo que los posee.
Biota	La principal fuente de energía para los organismos que viven en el suelo es la materia orgánica del mismo; algunos productos de su alteración pueden ser tóxicos para algunos de ellos.

Otros beneficios notables de la materia orgánica son los que tienen que ver con su influencia en la nutrición vegetal. Está ampliamente demostrado que la aplicación de abonos orgánicos incrementa la producción de los cultivos, inclusive cuando son aplicados en suelos que presentan altos contenidos de materia orgánica nativa, como puede verse en los ejemplos que se muestran en las Tablas 16.2 y 16.3. Sin embargo, una discusión amplia sobre el tema escapa a las posibilidades de este texto aunque en el Capítulo 17 se presenta alguna información relacionada con él.

TABLA 16.2. Efecto de la aplicación de gallinaza sobre la producción de algunos cultivos en Antioquia. (Resultados seleccionados de Muñoz, 1994).

CULTIVO	SUELO	CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA (%)	MEJOR DOSIS DE GALLINAZA (kg ha ⁻¹)	PRODUCCIÓN (kg ha ⁻¹)		VARIACIÓN EN PRODUCCIÓN (kg ha ⁻¹)
				SIN GALLINAZA	CON MEJOR DOSIS	
Fríjol	Andisol	2.7	1000	1190	1592	402
Fríjol	Aluvial	1.5	1000	1358	1721	363
Papa	Andisol	20	5000	18200	26500	8300
Papa	Andisol	20	10000	17000	28500	11500
Papa	Andisol	-	3000	16200	20800	4600
Papa*	-	20	1000	22800	30500	7700
Maíz	Andisol	19	1000	4080	4820	740
Cebolla rama	Andisol	20.5	8000	29127	31111	2084

* Promedio de 5 sitios en el altiplano norte de Antioquia.

TABLA 16.3. Efecto de la aplicación de gallinaza en la producción de tomate en dos sitios de Colombia. (Tomados de Muñoz, 1995).

MUNICIPIO	DEPARTAMENTO	CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA (%)	MEJOR DOSIS DE GALLINAZA (kg ha ⁻¹)	PRODUCCIÓN (kg ha ⁻¹)		VARIACIÓN EN PRODUCCIÓN (kg ha ⁻¹)
				SIN GALLINAZA	CON MEJOR DOSIS	
Rionegro	Antioquia	19.2	10000	10900	30300	19400
Rionegro	Antioquia	17.5	10000	4000	25700	21700
Tulua	Valle del Cauca	2.7	1000	53740	64240	10500
Restrepo	Valle del Cauca	2.0	1000	40770	47770	7000

Los efectos expuestos en las tablas anteriores, así como de los analizados en el Capítulo 1, destacan la gran importancia que tiene la materia orgánica en el comportamiento del suelo, por lo que es tenida en cuenta, ampliamente, en su clasificación taxonómica, como se trata más adelante.

Por definición, el orden Histosol y el suborden Histel (Gelisol) agrupan todos aquellos suelos cuyo material parental está compuesto por sedimentos orgánicos. El sistema taxonómico americano (Soil Survey Staff, SSS, 1999, 1998) considera que un **material es orgánico** cuando tiene más de 20% de carbono orgánico, si no se satura con agua más de 30 días acumulativos al año o, cuando tiene un contenido de carbono orgánico menor a 18% y proporcional al contenido de arcilla, si se satura con agua por más de 30 días acumulativos al año. Debe tenerse presente que las diferenciaciones anteriores no son para suelos orgánicos.

Prácticamente, todos los epipedones tienen en su definición el contenido de materia orgánica, como uno de los requisitos que deben cumplir; así, por ejemplo, el epipedón melánico debe tener 6% o más de carbono orgánico en promedio; el mólico, el úmbrico y el antrópico deben tener más de 0.6% de carbono orgánico y el ócrico, entre otras características, no cumple con los contenidos de carbono orgánico establecidos para los demás epipedones.

Aparte de los materiales orgánicos, otros materiales también se definen, en parte, con base en su contenido de materia orgánica; tal es el caso de los **materiales ándicos** que deben tener menos de 25% de carbono orgánico y los **materiales espódicos** que deben tener 0.6% o más de carbono orgánico.

Los endopedones ágrico, sómbrico y espódico tienen como característica genética común el ser iluviales de humus. Otra buena cantidad de horizontes diagnósticos de suelos, aunque no se definen explícitamente por el contenido o la calidad de la materia que poseen, deben cumplir ciertos requerimientos que se relacionan directamente con ella, como es el color.

En varios órdenes, en las diferentes categorías, hay partículas que se utilizan para destacar la presencia de materia orgánica en cantidades altas para la respectiva clase de suelos que se clasifica; así por ejemplo se tienen:

- Hum y Umbr en subórdenes de Espodosoles e Inceptisoles, respectivamente.
- Fulv, Fulvi, Hum, Humi, Melan, Sombri y Umbr, al nivel de gran grupo.
- Anthropic, Cumulic, Histic, Humaqueptic, Humic, Mollic, Pachic, Plaggeptic, Sombric, Thaptic, Thapto-histic, Udollic, Umbreptic y Umbric, al nivel de subgrupo.

2. CONTENIDO Y DISTRIBUCIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA EN EL SUELO

Según Eswaran et al (1993) el carbono almacenado en los suelos en el mundo es casi tres veces el almacenado en la biomasa vegetal ubicada en la superficie terrestre y dos veces el que se encuentra en la atmósfera, como lo muestran los datos de la Tabla 16.4. De los 1576 Pg de carbono almacenados en los suelos, el 32% (\approx 506 Pg) están en los suelos de la zona tropical y de éste, el 40% se encuentra en suelos con cobertura forestal.

TABLA 16.4. Distribución general de las reservas de Carbono, según varios autores citados por Eswaran et al (1993).

RESERVORIO	CARBONO ALMACENADO (Pg)*
Biomasa vegetal terrestre	550
Suelos	1576
Atmósfera	750
Océanos	38000
Combustibles fósiles	4000
Total	44876

* Pg (Petagramos): 1 Pg es equivalente a 10^9 t.

La cantidad y el tipo de materia orgánica de un suelo, como se mencionó en el Capítulo 1, dependen del aporte de materiales orgánicos que se haga a dicho suelo, así como de la velocidad con la cual éstos se descompongan. En ese capítulo se trató lo relacionado con los aportes de materia orgánica que hace la vegetación al suelo.

La velocidad de descomposición es bastante variable pues depende de muchos factores, entre los que se encuentran:

- **Tipo de residuos vegetales aportados:** No todos los órganos vegetales que caen al suelo tienen la misma resistencia a los procesos de descomposición, como lo demuestran los resultados, reportados por Burbano (1989), para la vegetación arbórea en un bosque montano de Venezuela, ubicado entre 2000 y 2500 msnm, con temperatura promedio anual de 12.6 °C y precipitación media anual de 1500 mm, en donde las hojas tardaron en descomponerse totalmente 20 meses, en tanto que las ramas lo hicieron en 12.5 años.
- **Temperatura:** La tasa de descomposición se incrementa a medida que se aumenta la temperatura; Munévar (1991) sostiene que a temperaturas mayores a los 25 °C, en condiciones aeróbicas no hay acumulación importante de materia orgánica.
- **Humedad - aireación:** En condiciones anaeróbicas la descomposición es mucho más lenta que en condiciones aeróbicas.
- **pH:** La descomposición es más eficiente en condiciones cercanas a la neutralidad.
- **Relación C/N:** Este parámetro se relaciona linealmente con la mineralización de los materiales orgánicos, entendiendo por **mineralización** las transformaciones del nitrógeno orgánico, hasta que es liberado en la forma de NH₃, (Orozco, 1999). Hasta hace poco tiempo se aceptaba que esta relación controlaba la actividad de los microorganismos y la facilidad con que se puede descomponer la materia orgánica que se le aporte al suelo, teniendo como límites críticos los siguientes valores, tomados de Orozco (1984):

$$\text{C/N} \approx 10 \Rightarrow \text{Descomposición fácil.}$$

$$\text{C/N} > 30 \Rightarrow \text{Descomposición difícil.}$$

Hoy, como lo ilustra Orozco (1999), se está revaluando la relación anterior, con el argumento de que, tanto el N como el C, en el suelo o en un residuo orgánico, presentan diferentes posibilidades de acción en ellos, dependiendo de la fuente orgánica que los aporte; especial atención se está prestando a la posibilidad de cuantificar el **N de la biomasa**, así como el **C de polifenoles y de lignina**, en lugar de los totales, para estimar con mayor precisión las posibilidades de determinar la mineralización o la inmovilización del N de un determinado suelo o material orgánico.

- **Materiales inorgánicos del suelo:** La formación de complejos órgano-minerales protege la materia orgánica de la descomposición; este efecto es muy marcado en los Andisoles, debido a la presencia de materiales no cristalinos en la fracción arcilla, los cuales forman complejos sumamente estables con la materia orgánica, propiciando su acumulación al reducir drásticamente su mineralización.

Brady y Weil, citados por Cabrera (2000), agrupan los materiales orgánicos que se acumulan en el suelo, según el tipo de carbono que poseen, en:

- **Carbono activo:** Materia orgánica de alta calidad y fácilmente degradable. Está compuesta por la biomasa microbial, los metabolitos libres, por otras sustancias no húmicas y por los ácidos fulvicos lábiles. Representan entre 10 y 20% de la materia orgánica del suelo y tienen una tasa de recambio de 1.5 años aproximadamente.
- **Carbono lento:** Es una materia orgánica de menor calidad y de mayor dificultad para ser degradada. Está representado por tejidos vegetales finamente divididos, ricos en lignina. Tiene tasas de recambio de entre 15 y 100 años.
- **Carbono pasivo:** Compuesto principalmente por el humus formando complejos con las arcillas, por los ácidos húmicos y por las huminas. Tiene tasas de recambio de entre 500 y 5000 años y representa entre el 60 y el 90% de la materia orgánica total del suelo.

2.1. DISTRIBUCIÓN EN EL INTERIOR DEL SUELO

El contenido de materia orgánica en los suelos normalmente decrece en forma regular al aumentar la profundidad en el perfil; corrientemente, el contenido de materia orgánica es mayor en el horizonte A del suelo, con valores, algunas veces, muy superiores a los que presentan los otros horizontes (Figura 16.1a).

Con respecto a la distribución de la materia orgánica, expuesta en el párrafo anterior, se presentan algunas variaciones que la distorsionan, producidas por algunos procesos especiales en el suelo; por ejemplo, cuando se encuentran horizontes A de **suelos enterrados**, generalmente se presentan incrementos abruptos en el contenido de materia orgánica del suelo, a cierta profundidad dentro del perfil, donde se encuentran dichos horizontes enterrados. Esta distribución irregular del contenido de materia orgánica, a través del perfil, corresponde casi siempre a suelos que llevan la partícula **Fluv** en su nombre taxonómico, aunque, también, se presenta en subgrupos **Thaptic** (Figura 16.1b).

También se distorsiona el patrón de distribución normal de la materia orgánica cuando el suelo tiene un horizonte eluvial de materia orgánica, el cual tiene un contenido menor de aquella que el horizonte iluvial en el cual se está acumulando y que está subyaciendo al eluvial (Figura 16.1c).

En la Figura 16.1c, es evidente la pérdida de materia orgánica que se presenta en el segundo horizonte: un horizonte eluvial **álbico** en el cual, el contenido llega casi a cero a los 40 cm de profundidad; en cambio, en el tercer horizonte se está acumulando la materia orgánica perdida en el anterior, desarrollándose un horizonte iluvial **espódico**. El altísimo contenido de materia orgánica que presenta este suelo en el horizonte superficial, se debe a que ese horizonte está compuesto de materiales orgánicos (litter) que se han acumulado en la superficie del suelo.

Si se comparan las gráficas de las Figuras 16.1b y c, se observa que sus formas son muy similares; sin embargo, téngase en cuenta que reflejan procesos y condiciones muy diferentes de evolución de la materia orgánica de los suelos evaluados.

La Figura 16.1d presenta la distribución de la materia orgánica en un suelo con régimen de humedad ácuico, en el cual, en el segundo horizonte, se presenta un ligero incremento en el contenido de materia orgánica, debido a la acumulación de materiales provenientes del primer horizonte del suelo.

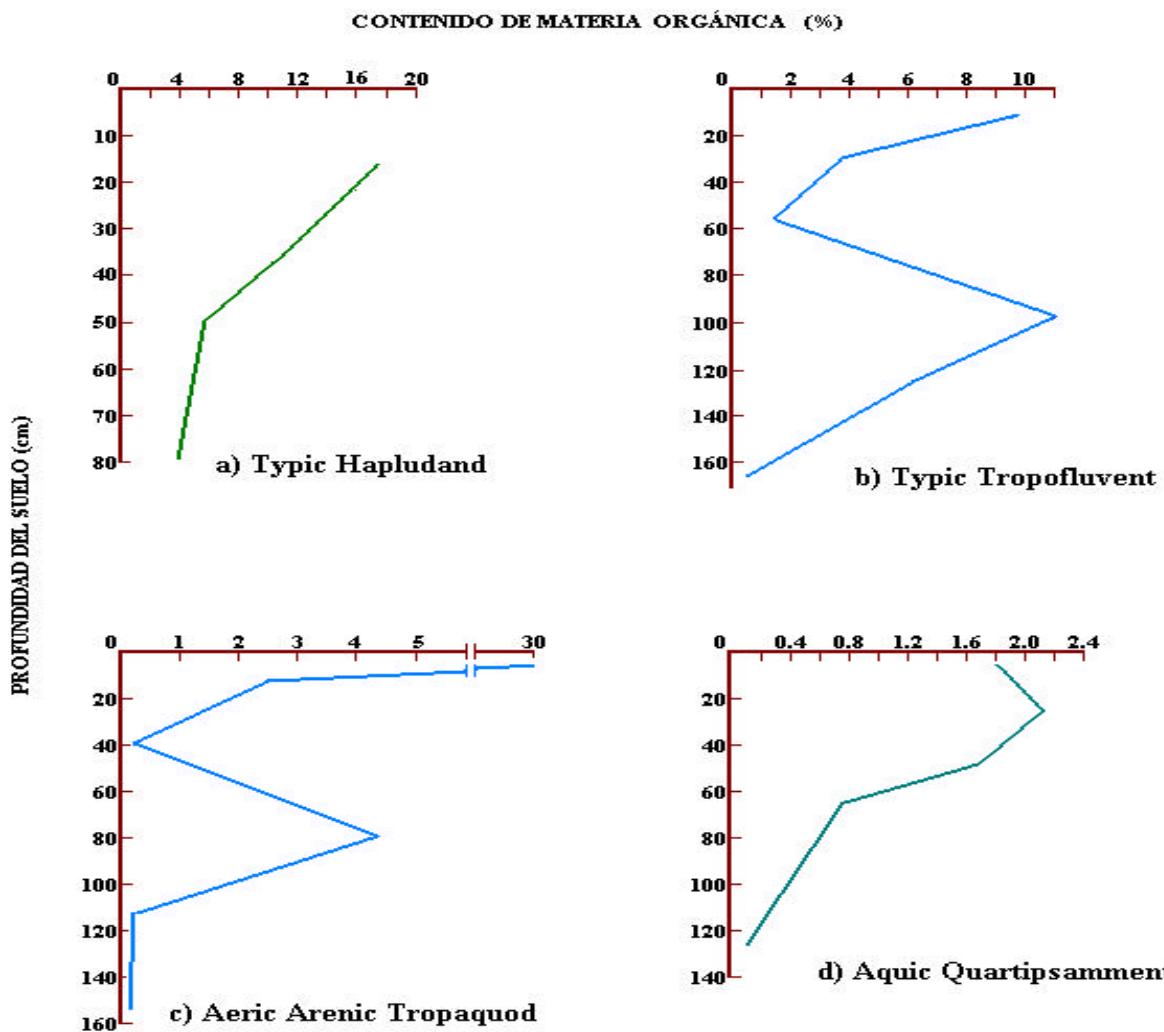


FIGURA 16.1. Algunos patrones de distribución de la materia orgánica en el interior del suelo: a y b. Oriente antioqueño (Jaramillo, sin publicar); c y d. Amazonia (Proradam, 1979). Los quiebres de dirección en las líneas marcan la profundidad en el centro del horizonte.

2.2. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL

Se acepta que hay una relación general directa entre el contenido de materia orgánica del suelo y la altitud: **a > altitud > acumulación de materia orgánica**. Este comportamiento está relacionado con el hecho de que al aumentar la altitud se reduce la temperatura, lo que ocasiona una disminución en la tasa de descomposición de aquella, produciéndose su acumulación.

El autor de este documento analizó la información presentada por el IGAC (1988) para 58 perfiles modales de suelos del departamento de Caldas, distribuidos en todos los pisos altitudinales en las dos vertientes de la cordillera central colombiana. Encontró una correlación altamente significativa estadísticamente ($> 95\%$) entre la altitud y el contenido de carbono orgánico del horizonte A del suelo, aunque con un coeficiente de correlación bajo ($r = 0.547$).

Debe tenerse en cuenta que estas relaciones altitud – contenido orgánico del suelo son generales y que no siempre se presentan, sobretodo cuando se trabaja con áreas pequeñas, como lo han demostrado varios trabajos citados por Burbano (1989), en los cuales no se cumplió la relación establecida anteriormente.

En condiciones naturales, hay un equilibrio entre la acumulación y la mineralización de la materia orgánica aportada al suelo, permaneciendo su contenido más o menos constante a través del tiempo, dentro de un rango específico de valores; el cambio de cobertura de bosque a cultivo o a pradera produce pérdida de materia orgánica en el suelo; esta pérdida es mayor en las zonas más cálidas.

En Colombia, los contenidos de materia orgánica más bajos se presentan en los suelos de la media y alta Guajira, en buena parte Ardisoles y los más altos se encuentran en los Andisoles de los pisos climáticos fríos (Jaramillo, Parra y González, 1994); este comportamiento se ilustra en la Tabla 16.5.

En la Tabla 16.5 se destaca la gran diferencia que se presenta entre los contenidos de materia orgánica de los Andisoles y el de los otros suelos, situación explicable, sólo en parte, por la gran diferencia climática que hay entre las zonas analizadas: los Andisoles se ubican en el piso frío, con temperatura promedio de 16°C , en tanto que las otras dos regiones corresponden al piso cálido y presentan temperaturas mayores a los 24°C .

TABLA 16.5. Contenido de materia orgánica (%) en el horizonte mineral superficial de suelos de algunas regiones de Colombia.

REGIÓN	n	MEDIA	MODA	DESV. EST.*	MÍNIMO	MÁXIMO	FUENTE
Guajira	77	1.16	0.34	0.98	0.12	4.55	IGAC, 1978.
Amazonia	53	3.83	4.53	2.43	0.69	11.94	PRORADAM, 1979.
Oriente							
Antioqueño**	40	21.89	30.30	9.50	7.90	44.70	Jaramillo, 1995.

* Desviación estándar.

** Solamente Andisoles.

Es sabido que en los Andisoles, la materia orgánica forma complejos muy estables con materiales inorgánicos no cristalinos que dificultan enormemente su degradación, favoreciendo que se acumule, lo que explica la mayor parte de las diferencias observadas entre los contenidos de materia orgánica de los Andisoles y los otros suelos que se encuentran a su alrededor, así como parte de las diferencias señaladas para la Tabla 16.5.

La diferencia que hay entre los suelos de la amazonia con los de la Guajira se explica por la diferencia que hay entre estas dos zonas con respecto a la precipitación que reciben, pues mientras que la

amazonia recibe más de 2500 mm de lluvia al año, la parte de la Guajira incluida en la tabla no llega a recibir los 300 mm de precipitación al año; las diferencias altitudinales entre ambas regiones no son importantes y no explican las diferencias observadas entre los contenidos de materia orgánica de los suelos de ambas.

2.3. NIVELES CRÍTICOS

Con el fin de realizar interpretaciones acerca del contenido de materia orgánica en el suelo, en relación con el aporte de N, principalmente, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 1992), ha propuesto los niveles críticos que se presentan en la Tabla 16.6. Cabe aclarar que estos criterios no son aplicables a suelos que presenten propiedades ándicas (ver Capítulo 20).

TABLA 16.6. Niveles críticos para el contenido de materia orgánica del suelo, en diferentes condiciones climáticas, para Colombia (Tomados de ICA, 1992).

CLIMA	CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA (%) PARA NIVEL		
	BAJO	MEDIO	ALTO
Cálido	<2	2 - 3	>3
Medio	<3	3 - 5	>5
Frío	<5	5 - 10	>10

De acuerdo con los niveles propuestos en la tabla anterior, al analizar la información que presenta el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 1988) sobre el contenido de materia orgánica de los suelos de Colombia, se observa que en el país sólo se tienen altos contenidos de ella en las zonas altas de las cordilleras, principalmente en aquellas que presentan climas fríos y suelos con propiedades ándicas. En la mayor parte del territorio colombiano los suelos tienen contenidos bajos de materia orgánica.

3. EVALUACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

La materia orgánica del suelo puede estudiarse evaluando su contenido o su composición. A su vez, el contenido puede establecerse en forma total, es decir, sin diferenciar ninguno de los componentes, o haciendo extracciones selectivas para fraccionarla en grupos de compuestos que luego son cuantificados.

Para fines prácticos, el estudio se centra en determinar la cantidad de materia orgánica total que presenta el suelo, sin establecer su composición; por esto, se pueden presentar problemas en la interpretación de los resultados de los análisis, así como en el manejo de los mismos, desde el punto de vista del manejo de la fertilidad del suelo. A continuación se exponen los principales análisis que se utilizan para hacer la cuantificación de la materia orgánica total que posee un suelo.

3.1. ANÁLISIS CUANTITATIVOS TOTALES

El contenido de materia orgánica total del suelo se puede determinar de varias maneras: por calcinación de la muestra, por oxidación de la muestra con dicromato de potasio y por oxidación de la muestra con peróxido de hidrógeno.

3.1.1. Calcinación

Este método determina el contenido total de materia orgánica que posee el suelo, completo o en alguna de sus fracciones. Debe tenerse presente que con este método se obtienen los valores más altos en el contenido de materia orgánica del suelo, ya que con él se volatilizan todas las formas de carbono orgánico presentes en la muestra. Lo anterior lo confirman los resultados encontrados por Jaramillo (1999), al someter Andisoles repelentes al agua a determinación del contenido de materia orgánica por calcinación (MOT) y por el método de Walkley y Black (MOW), presentados en la Tabla 16.7; se puede apreciar, en los resultados de esta tabla, que las diferencias entre los valores obtenidos pueden ser muy amplias y, además, que con el método de la calcinación se tiene la menor variabilidad en ellos.

TABLA 16.7. Contenido de materia orgánica en el horizonte A de Andisoles repelentes al agua, determinados por dos métodos diferentes. (Tomados de Jaramillo, 1999).

MÉTODO	CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA (%)			C.V. (%)*
	PROMEDIO	MÁXIMO	MÍNIMO	
MOT	46.45	86.48	25.45	21.14
MOW	35.08	63.90	11.67	29.68

* C.V.: Coeficiente de Variación.

La manera de hacer esta determinación de la materia orgánica del suelo consiste en:

- Se pesa una muestra de 6 ó 7 g de suelo seco al aire y tamizado a 2 mm (o en la fracción requerida) y se coloca en crisoles de porcelana.
- Se seca el conjunto (la muestra y el crisol) en horno a 105°C hasta peso constante (aproximadamente entre 24 y 48 horas), se retira del horno y se deja enfriar en desecador, luego se pesa.
- Se calcina la muestra en una mufla a 650 ó 700°C, durante 3 ó 4 horas.
- Se retira de la mufla el conjunto, se deja enfriar en desecador y se pesa nuevamente.
- Se calcula la diferencia de peso entre las medidas antes y después de calcinar; esta diferencia de peso equivale a la cantidad de materia orgánica que se perdió de la muestra por efecto de la calcinación.
- Se expresa la diferencia de peso en porcentaje, con respecto al peso inicial de la muestra (seca a 105°C) y ese es el porcentaje de materia orgánica que tenía aquella.

3.1.2. Método de Walkley y Black

Con este método se estima el contenido de carbono orgánico total de una muestra de suelo, completo o de alguna de sus fracciones. Es el método más utilizado en nuestro medio para evaluar la materia orgánica del suelo.

Según Kumada (1987) y el SSL (1995), este método actúa sobre las formas más activas del carbono orgánico que posee el suelo y no produce una oxidación completa de dichos compuestos, por lo que se deben hacer ajustes a los resultados obtenidos en el laboratorio, cuando se quieren expresar en términos de contenido de materia orgánica. El SSL (1996) recomienda utilizar un factor de corrección igual a **1.724**, asumiendo que la materia orgánica tiene 58% de carbono orgánico.

Motta et al (1990) exponen los procedimientos para llevar a cabo esta determinación como se presentan a continuación:

- Se pesan entre 0.2 y 2 g de suelo seco al aire y tamizado a 2 mm (o al tamaño de la fracción requerida), dependiendo del color del suelo: más oscuro menor cantidad y viceversa.
- Se coloca la muestra en un erlenmeyer de 250 mL y se le adicionan 5 mL de dicromato de potasio 1N y 10 mL de ácido sulfúrico concentrado, se agita y se deja enfriar; hay que tener precaución en este punto pues la reacción que se presenta es violenta.
- Cuando se enfriá el conjunto anterior, se diluye con 50 mL de agua destilada y se le agregan 5 mL de ácido fosfórico y 3 gotas de difenilamina o 5 gotas de ortofenantrolina.
- Se prepara un blanco, es decir, una mezcla de todos los reactivos mencionados pero sin suelo.
- Se titulan la mezcla inicial y el blanco con una solución de sulfato ferroso 1N; la titulación está completa cuando se obtiene un color verde.
- Se calcula el contenido de carbono orgánico con la ecuación [16.1].
- Se transforma el contenido de carbono orgánico a contenido de materia orgánica, en porcentaje (%MO), mediante la relación [16.2].

Las ecuaciones a utilizar en esta determinación son:

$$\boxed{\frac{V \left(1 - \frac{M}{B}\right) \times 0.003}{P_m}} \quad [16.1]$$

donde: %C = Contenido de carbono orgánico en %.

V = Volumen de dicromato de potasio empleado en la muestra y en el blanco (5 mL).

M = Volumen de sulfato ferroso gastado en la titulación de la muestra.

B = Volumen de sulfato ferroso gastado en la titulación del blanco.

Pm = Peso de la muestra.

$$\% MO = \% C \times 1.724$$

[16.2]

El SSL (1995) recomienda que cuando el contenido de carbono orgánico da valores mayores a 8%, no debe ser tenido en cuenta y que, el contenido de materia orgánica del suelo en cuestión debe ser evaluado por el método de calcinación a 400°C.

Con este método, como ya se dijo, puede quedar alguna parte del material orgánico del suelo sin oxidar, sobre todo en sus fracciones más frescas y más gruesas, por lo cual los valores de materia orgánica del suelo pueden quedar subestimados, aunque en una fracción orgánica poco o nada activa en él.

La reacción de oxidación que se produce en esta determinación es violenta y desprende gran cantidad de vapores, razón que obliga a hacerla bajo campana extractora y con la protección adecuada.

3.1.3. Oxidación con peróxido de hidrógeno

Aunque este procedimiento es recomendado para eliminar materia orgánica de muestras de suelos que están siendo sometidos a análisis textural y que presentan dificultades para dispersar debido a que tienen un alto contenido de ella, también es útil si se quiere cuantificar el contenido de materia orgánica en un suelo en que el contenido de ella sea bajo.

Con este método, el procedimiento a seguir es:

- Se toma una muestra de suelo tamizado a 2 mm (o a la fracción de tamaño deseado) y seco al horno.
- Se coloca la muestra en un erlenmeyer y se pesa.
- Se le adicionan porciones de solución de peróxido de hidrógeno (agua oxigenada) al 6% hasta que no haya efervescencia; el proceso puede acelerarse calentando en baño María a 60°C.
- Se seca la muestra en horno nuevamente y se vuelve a pesar cuando se enfrie; la diferencia de peso es el contenido de materia orgánica que tenía la muestra, el cual se expresa en porcentaje con respecto al peso inicial de ella.

En esta determinación debe tenerse mucha precaución al hacer las adiciones del peróxido de hidrógeno ya que la reacción puede ser muy violenta y puede causarle quemaduras al operario, así como pérdida de material de la muestra, invalidándose la determinación.

3.2. FRACCIONAMIENTO DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

Como ya se ha dicho, la materia orgánica del suelo es un continuum de materiales que van desde los residuos frescos de animales y vegetales que se adicionan al suelo, hasta una serie de polímeros que no se identifican químicamente en forma exacta.

Cuando se determina el contenido total de materia orgánica del suelo, todo ese continuum es evaluado dentro de un mismo conjunto edáfico, pero puede ser interesante conocer el contenido de los diferentes componentes incluidos en aquél. Para lograr ésto, se debe llevar a cabo un fraccionamiento de la materia orgánica del suelo y hacer los análisis de cuantificación en cada una de las fracciones separadas, expresando los contenidos como “**porcentaje de C de una determinada fracción, con respecto al contenido de C total del suelo**”.

Los contenidos de carbono en cada fracción que sea separada se determinan por el método de Walkley y Black. En la Figura 16.2 se presentan las fracciones en que más frecuentemente se divide la materia orgánica del suelo para su estudio.

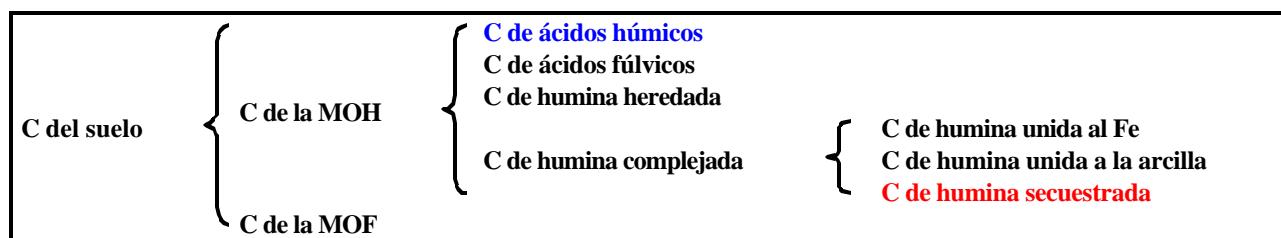


FIGURA 16.2. Fracciones generales de la materia orgánica del suelo, con base en discusiones de Motta et al (1990) y Malagón et al (1995) (MOH: materia orgánica humificada, MOF: materia orgánica fresca).

De acuerdo con Motta et al (1990), un primer fraccionamiento de la materia orgánica del suelo consiste en separar la fracción húmica (MOH = pesada) de la no húmica (MOF = liviana) (ver Capítulo 1, numeral 3.4.1). Esta separación puede hacerse por los métodos **densimétrico** o **granulométrico**.

Una vez separadas las fracciones húmica y no húmica, se procede a separar la húmica en sus componentes básicos: ácidos húmicos, ácidos fúlvinos y huminas. Esta separación se hace sometiendo la muestra a una extracción exhaustiva con soluciones alcalinas para extraer los ácidos húmicos y los fúlvinos; el residuo que queda sin solubilizarse en esta extracción compone las huminas.

Sometiendo el extracto alcalino a un proceso de acidificación intensa (con ácido sulfúrico hasta alcanzar un pH de 2) se separan los ácidos húmicos de los fúlvinos: la fracción que precipita en el medio acidificado corresponde a los ácidos húmicos y la que queda disuelta en él a los ácidos fúlvinos.

La extracción alcalina puede hacerse escalonadamente con diferentes soluciones, incrementando el pH, con lo cual se hace un fraccionamiento del carbono de los ácidos unido a diferentes compuestos en el suelo, formando los complejos órgano-minerales del mismo. Motta et al (1990) recomiendan utilizar la siguiente secuencia:

- Extracción con tetraborato de sodio 0.1 N a pH 9.7: Disuelve las sustancias órgano-minerales móviles; son los complejos que presentan los enlaces más débiles con la materia orgánica.

- Extracción con pirofosfato de sodio 0.1 N a pH entre 9.8 y 10: Disuelve la materia orgánica unida a las arcillas y a los sesquióxidos de Fe y Al, considerados complejos inmóviles.
- Extracción con hidróxido de sodio 0.1 N a pH entre 12 y 13: Disuelve prácticamente todos los complejos órgano-minerales, incluyendo los complejos con los enlaces más fuertes.

Como se aprecia en la Figura 16.2, la humina también se puede dividir en diferentes fracciones. Sometiendo el residuo no soluble en álcali a extracción con ditionito de sodio al 1% se obtiene la humina ligada al Fe. Luego, el residuo que queda se somete a extracción con una mezcla de HCl-HF 1 N para obtener la humina ligada a las arcillas y el residuo que permanece es la humina secuestrada o no extraíble (Motta et al, 1990).

La humina heredada es, según Malagón et al (1995), una humina muy cercana a la materia orgánica fresca, originada directamente a partir de la lignina con incremento de los grupos COOH. Según Motta et al (1990), este tipo de humina establece muy pocos complejos órgano-minerales y sus uniones son tan débiles que puede separarse aplicando ultrasonido a la fracción de materia orgánica húmica del suelo. En la Tabla 16.8 se presentan algunos resultados del fraccionamiento de la materia orgánica en el horizonte superficial de un Andisol de la Sabana de Bogotá, obtenidos por Piedrahita (1977) y en la Tabla 16.9 los resultados obtenidos por Piedrahita (1986) en horizontes A y B de Oxisoles de la orinoquia colombiana.

TABLA 16.8. Fracciones orgánicas* separadas en el horizonte superficial de un Andisol de la Sabana de Bogotá (Tomados de Piedrahita, 1977).

C TOTAL (%)	% DE C TOTAL						% DE HUMINA TOTAL	
	MOF	MOH	CT	CP	CH	HT	HFe	HAr
9.93	23.87	76.13	25.57	10.37	11.88	18.12	36.76	8.83

* C: Carbono. MOF: Materia orgánica fresca. MOH: Materia orgánica húmica. CT: Carbono extraído con tetraborato de sodio. CP: Carbono extraído con pirofosfato de sodio. CH: Carbono extraído con hidróxido de sodio. HT: Humina total. HFe: Humina ligada al Fe. HAr: Humina ligada a la arcilla.

TABLA 16.9. Fracciones orgánicas* separadas en varios horizontes de Oxisoles de la orinoquia colombiana (Tomados de Piedrahita, 1986).

SUELO**	HORI- ZONTE	C TOTAL (%)	% DE C TOTAL					
			MOF	MOH	CT	CP	CH	HT
1	Ap	1.15	20.43	79.57	14.78	5.12	5.76	53.91
	Bo	0.30	6.66	93.34	23.77	25.25	8.91	35.41
2	Ap	2.87	33.08	66.92	20.82	6.66	5.75	33.59
	Bo	0.40	3.89	96.11	38.08	10.08	12.69	34.46
3	Ap	0.71	1.76	98.24	18.05	5.74	6.20	64.60
	Bo	0.44	10.56	89.44	22.45	5.18	10.36	53.18

* Los símbolos igual que en la Tabla 16.8.

** 1: Quartzipsammentic Haplustox. 2: Typic Ochraquox. 3: Ultic Haplustox.

Al observar los resultados de las dos tablas anteriores se nota que la cantidad de humina total que se extrae en los Oxisoles es bastante mayor que en los Andisoles, lo que está mostrando el alto grado de

humificación que tiene la materia orgánica acumulada en los primeros suelos. Además, la cantidad de carbono extraído con tetracloruro de sodio es más alta que la que se extrae con pirofosfato y con hidróxido, lo que muestra que los complejos orgánicos que se están acumulando en los ácidos húmicos y fúlvicos de los suelos tienen poca estabilidad, ya que presentan uniones débiles entre los compuestos orgánicos y los inorgánicos que los acompañan.

3.3. ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN CUALITATIVOS

Para estudiar la composición de la materia orgánica del suelo, los métodos más utilizados son aquellos que establecen:

- La **composición química básica**: contenidos de C, N, H O y S, pH, acidez total, relación C/N, principalmente.
- El **contenido de ácidos húmicos y fúlvicos y de huminas**.
- El **contenido de grupos funcionales**: COOH, OH, C=O, O-CH₃, principalmente.
- Las **propiedades ópticas** de los compuestos orgánicos, tales como la espectroscopía infrarroja, la visible o la ultra-violeta y espectros de resonancia magnética nuclear de ¹³C.

Básicamente, el procedimiento para hacer estas evaluaciones consiste en someter una muestra de suelo a lavado con solventes específicos, dependiendo de la fracción que se quiera estudiar, recoger los extractos, purificarlos, separar sus componentes y hacer las determinaciones mencionadas. Esta parte de la caracterización de la materia orgánica del suelo escapa a los objetivos de este texto, razón por la cual no se amplía más su alcance.

RECORDAR

- **La materia orgánica del suelo tiene importantes efectos sobre sus propiedades físicas, químicas y biológicas.**
- **La materia orgánica es un parámetro muy importante en la clasificación taxonómica de los suelos.**
- **En la mayoría de los suelos, el contenido de materia orgánica decrece al ir aumentando la profundidad del mismo. Las distorsiones más importantes a este comportamiento las presentan suelos derivados de depósitos sedimentarios, suelos con horizontes A enterrados y suelos con horizontes iluviales de materia orgánica.**
- **Hay una relación general entre la altitud y el contenido de materia orgánica del suelo: a > altitud > contenido orgánico.**
- **Para fines prácticos, la materia orgánica del suelo se evalúa de manera cuantitativa.**
- **El método más utilizado para evaluar el contenido de materia orgánica del suelo es el de Walkley y Black.**

BIBLIOGRAFÍA

- BURBANO, H. 1989. El Suelo: Una visión sobre sus componentes biorgánicos. Universidad de Nariño. Pasto. 447 p.
- CABRERA, L. T. A. 2000. Aporte al conocimiento de la microbiota fúngica del suelo de la amazonia colombiana, con énfasis en tres grupos funcionales. Tesis (Biólogo). Pontificia Universidad Javeriana. Santafé de Bogotá. 353 p.
- ESWARAN, H.; E. VAN DER BERG and P. REICH. 1993. Organic carbon in soils of the world. Soil Sci. Soc. Am. J. 57: 192-194.
- INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO (ICA). 1992. Fertilización en diversos cultivos: Quinta aproximación. ICA. Tibaitatá. 64 p.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC). 1988. Suelos del departamento de Caldas. IGAC. Bogotá. 2º Tomo. 164 p.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC). 1978. Estudio general de suelos Alta y Media Guajira. IGAC. Bogotá. 577 p.
- JARAMILLO, D. F. 1999. Caracterización química de Andisoles repelentes al agua del oriente antioqueño. Rev. Fac. Nal. Agr. Med. 52 (2): 657-673.
- JARAMILLO, D. F. 1995. Andisoles del Oriente Antioqueño: Caracterización química y fertilidad. Ecográficas Ltda. Medellín. 35 p.
- JARAMILLO, D. F.; L. N. PARRA y L. H. GONZALEZ. 1994. El recurso suelo en Colombia: Distribución y Evaluación. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 88 p.
- KUMADA, K. 1987. Chemistry of soil organic matter. Japan Scientific Societies Press. Elsevier. Tokyo. 241 p.
- MALAGÓN, D.; C. PULIDO; R. LLINÁS y C. CHAMORRO. 1995. Suelos de Colombia: Origen, evolución, clasificación, distribución y uso. IGAC. Bogotá. 632 p.
- MOTTA, B. et al. 1990. Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos. 5ª Ed. IGAC. Bogotá. 502 p.
- MUNEVAR, F. 1991. Conceptos sobre la materia orgánica y el nitrógeno del suelo, relacionados con la interpretación de análisis químicos. En: Fundamentos para la Interpretación de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas para riego. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS). Bogotá. pp. 227-244.
- MUÑOZ, R. 1995. Fertilización del tomate (*Lycopersicum sculentum*) en Colombia. En: Memorias Seminario Fertilización de cultivos. Editores G. Vallejo y W. Osorio. SCCS. Medellín. pp 56-80.
- MUÑOZ, R. 1994. Los abonos orgánicos y su uso en la agricultura. En: Fertilidad de suelos: Diagnóstico y control. Editor F. Silva. SCCS. Santafé de Bogotá. pp 293-304.
- OROZCO, F. H. 1999. Biología del nitrógeno. Conceptos básicos sobre sus transformaciones biológicas. Tomo I. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín. 231 p.
- OROZCO, H. 1984. La materia orgánica de los suelos y su relación con los abonos orgánicos. En: Curso Fertilización Racional del Suelo. SCCS. Medellín. pp. 339-367.

PIEDRAHITA, S. de B. 1986. Comportamiento de la materia orgánica en suelos de la orinoquia. En: Diagnóstico geográfico nororiente del Vichada. Vol. 5.2: Suelos. IGAC. Bogotá. pp: 1-59.

PIEDRAHITA, S. de B. 1977. Fraccionamiento y caracterización del material húmico en dos Andosoles de la Sabana de Bogotá. IGAC. Bogotá. 37 p.

PRORADAM. 1979. La Amazonia colombiana y sus recursos. Proyecto Radargramétrico del Amazonas. Bogotá. 590 p.

SOIL SURVEY LABORATORY (SSL). 1996. Methods manual. Soil Survey Investigations Report Nº 42. Version 3.0. United States Department of Agriculture (USDA). Lincoln. 693 p.

SOIL SURVEY LABORATORY (SSL). 1995. Information manual. Soil Survey Investigations Report Nº 45. Version 1.0. USDA. Lincoln. 305 p.

SOIL SURVEY STAFF. (SSS) 1999. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2^a. Ed. Agriculture Handbook Nº 436. Soil Survey Staff. Washington D. C. 869 p.

SOIL SURVEY STAFF (SSS). 1998. Keys to Soil Taxonomy. 8^a. Ed. Soil Survey Staff. Washington. 326 p.

AUTOEVALUACIÓN

1. Describa el efecto que tiene la materia orgánica en 10 propiedades del suelo.
2. Enumere 6 horizontes diagnósticos que se definan con base en el contenido de materia orgánica en la taxonomía de suelos del USDA.
3. ¿De cuáles factores depende la velocidad de descomposición de la materia orgánica?.
4. En un suelo de clima cálido seco, ¿cómo es la tasa de descomposición de la materia orgánica?.
5. ¿Cómo es el patrón normal de distribución de la materia orgánica dentro del suelo?.
6. Diga dos situaciones en las que se distorsiona la distribución normal de la materia orgánica dentro del suelo.
7. Hay alguna relación entre el contenido de materia orgánica del suelo con el clima?. Explique.
8. ¿En cuál región de Colombia se presentan los suelos con los menores contenidos de materia orgánica?.
9. ¿A partir de qué valor se considera alto el contenido de materia orgánica en clima frío?.
10. ¿Cuál es el método estándar para evaluar el contenido de materia orgánica en el suelo?. ¿Qué estima realmente?.
11. ¿Qué es fraccionar la materia orgánica del suelo?.
12. ¿Cuáles son las fracciones en que se divide generalmente la materia orgánica humificada del suelo?.
13. Esboce el procedimiento que se utiliza para fraccionar la MOH del suelo.
14. Enumere 3 grupos de análisis que pueden hacerse para evaluar cualitativamente la materia orgánica del suelo.

EVALUACIÓN

1. Un epipedón melánico debe tener, entre otras cosas, un contenido de carbono orgánico igual o mayor a 4%. ¿Cuál es el valor mínimo en el contenido de materia orgánica que debe tener el epipedón para que sea melánico?. (R: 6.896%).

ENMIENDAS ORGÁNICAS

CAPÍTULO 17

CONTENIDO

- ❖ Caracterización
- ❖ Abonos orgánicos más utilizados
 - Estiércoles
 - Ventajas
 - Desventajas
 - Manejo
 - Residuos de cosecha
 - Ventajas
 - Desventajas
 - Manejo
 - Mulch vegetal
 - Efectos sobre el suelo
 - Inconvenientes
 - Compost
 - Formación de las pilas de compost
 - Beneficios del compostaje
 - Desventajas
 - Manejo
 - Lombricomposto
 - Abonos verdes
 - Características de las plantas a utilizar como abonos verdes
 - Ventajas
 - Desventajas
 - Manejo
 - Azolla
 - Residuos sólidos urbanos
 - Ventajas
 - Desventajas

- Manejo
- Lodos de aguas residuales urbanas
 - Ventajas
 - Desventajas
 - Manejo

OBJETIVOS

- ❖ Conocer los materiales orgánicos que se utilizan con mayor frecuencia en el manejo de los suelos
- ❖ Conocer los beneficios y desventajas de las enmiendas orgánicas
- ❖ Conocer las prácticas generales utilizadas para manejar las enmiendas orgánicas que se aplican al suelo
- ❖ Conocer las principales propiedades que se deben evaluar en las enmiendas orgánicas a utilizar en los suelos

E

l concepto de enmienda orgánica define todos aquellos materiales orgánicos que se aplican al suelo, con algunos propósitos específicos como suministrar nutrientes rápidamente disponibles para la planta y/o mejorar las condiciones físicas del suelo. Estos materiales se conocen comúnmente como **abonos**.

1. CARACTERIZACIÓN

Antes de aplicar un abono deben establecerse sus características, entre las cuales Orozco (1984) destaca:

- **Composición elemental:** La composición de los abonos es muy variable; para conocer su valor nutricional hay que realizar análisis de laboratorio con el fin de establecer los contenidos de elementos esenciales que posea, especialmente de N, P, K, Ca, Mg, y elementos menores (Fe, Zn, Mn, Cu, B); algunos abonos (porquinaza, gallinaza) pueden presentar niveles altos de Cu y Zn principalmente, que pueden llegar a ser fitotóxicos.
- **Humedad:** Para aplicar abonos sólidos, el contenido de humedad debe ser menor del 15 %, lo cual facilita y abarata su transporte y aplicación.
- **Contenido de ácidos Fúlvicos:** Está relacionado con la movilidad del abono en el suelo y con la facilidad que tenga éste de solubilizar metales tóxicos en aquél. En un abono adecuado, su contenido debe ser menor al 3%.
- **Relación C/N:** Con base en los contenidos de C y N totales; es una medida de la facilidad de mineralización del abono y se interpreta como se vio en el capítulo anterior.
- **pH:** Necesario para conocer el peligro de acidificación ó de alcalinización que pueda tener el abono en el suelo por su aplicación.
- **Conductividad eléctrica:** Frecuentemente es alta en los abonos; hay que tenerla en cuenta para evitar una posible salinización del suelo o problemas de toxicidad en las plantas debidos a la aplicación de altas cantidades de sales.
- **CIC:** Es deseable un abono con una CIC alta.

De los artículos de Abad (1998a, b) y de Cegarra (1998) se pueden adicionar, a la lista anterior, otras características que es deseable conocer en un material que va a ser utilizado como abono orgánico:

- Cantidad de materiales inertes.
- Tamaño de partículas que componen el material.
- Contenido de metabolitos potencialmente tóxicos.
- Contenido de patógenos, tanto de plantas como de animales.

2. ABONOS ORGÁNICOS MÁS UTILIZADOS

Los abonos orgánicos, que se adicionan al suelo, se diferencian fundamentalmente por 3 características:

- El contenido de nutrientes: Es bastante variable.
- Facilidad de descomposición: Depende básicamente de la relación C/N y también es muy variable.

- ☐ Estado de humedad en que se aplican: Normalmente se aplican con los siguientes rangos de humedad: Abono sólido: < 80% humedad.
Abono semilíquido: 80 - 90% humedad.
Abono líquido: > 90% humedad.

A continuación se exponen algunos aspectos generales relacionados con los abonos que más frecuentemente se aplican a los suelos.

2.1. ESTIÉRCOLES

Comprende las deyecciones de los animales; son de composición muy variable, como puede verse en la Tabla 17.1, así como también es variable su facilidad de descomposición, dependiendo del origen del estiércol, de su contenido de humedad y de los pretratamientos que se le hagan.

En general, son de baja relación C/N, lo que implica una alta mineralización y poca humificación, es decir, poco aporte de materia orgánica al suelo y suministro rápido de nutrientes al mismo.

TABLA 17.1. Composición de algunos estiércoles (Tomados de Burbano, 1989).

Origen	Humedad (%)	Contenido de nutrientes (lb t ⁻¹ de abono)					
		N	K	S	Ca	Mg	Fe
Ganado leche	79	11.2	10.0	1.0	5.6	2.2	0.08
Ganado carne	80	14.0	9.0	1.7	2.4	2.0	0.08
Cerdo	75	10.0	7.6	2.7	11.4	1.6	0.56
Caballo	60	13.8	12.0	1.4	15.7	2.8	0.27
Oveja	65	28.0	20.0	1.8	11.7	3.7	0.32
Codorniz*	-	-	46.4	-	8.2	0.4	0.03

*Resultados sin publicar de Jaramillo, D. F.

2.1.1. Ventajas

Burbano (1998) establece que las siguientes propiedades hacen ventajoso el uso de los estiércoles:

- ☐ La rápida mineralización, lo que se traduce en un aporte rápido de nutrientes.
- ☐ Los nutrientes que contiene son disponibles inmediatamente para la planta.
- ☐ Incrementan la actividad microbial en el suelo al ser aplicados (buena fuente de energía).
- ☐ Solubilizan algunos compuestos en el suelo que aportan nutrientes.
- ☐ La posibilidad de mezclarse con materiales resistentes a la descomposición, para aumentar su efecto en el tiempo.

2.1.2. Desventajas

Algunos riesgos que se presentan con la aplicación de estiércoles al suelo son, según Orozco (1983):

- ☐ Pueden inducir descomposición de la materia orgánica nativa del suelo.
- ☐ Pueden contener cantidades tóxicas de metales pesados.
- ☐ Pueden contener compuestos orgánicos fitotóxicos (ácidos grasos).

- Pueden provocar acumulaciones tóxicas de nitratos en plantas forrajeras, afectando la fisiología animal.
- Pueden transmitir enfermedades al hombre o a los animales.
- Pueden causar salinidad y/o acumulaciones altas de Na en el suelo. El autor de este texto encontró valores tan altos de conductividad eléctrica como 26.5 dS m⁻¹, en codornaza.
- Pueden crear desbalances nutricionales en el suelo.
- Casi no aportan humus al suelo.
- Se pueden presentar pérdidas altas de algunos de sus nutrientes, por lixiviación ó por volatilización.

2.1.3. Manejo

Para evitar la mayoría de los problemas citados en las desventajas, Orozco (1983) recomienda:

- Aplicar el abono en forma líquida, diluyendo así la concentración inicial de los nutrientes.
- Compostar, es decir, someter el estiércol a una oxidación previa a la aplicación para oxidar los ácidos orgánicos.
- Mezclar con residuos de difícil descomposición, para diluir y alargar en el tiempo el efecto del abono.

2.2. RESIDUOS DE COSECHA

Las partes vegetales de los cultivos que no tienen uso comercial, pueden incorporarse al suelo con el fin de aportarle materia orgánica humificable.

Una tonelada de rastrojo aporta, más o menos, 100 kg de humus estable al suelo; estos residuos tienen una relación C/N muy amplia, 60 – 80: 1, por lo cual su importancia, desde el punto de vista nutricional es mínima, excepto en lo referente al K en residuos de cultivos exigentes en este elemento como flores, café, banano, etc.; además, como en el caso de los estiércoles, su composición también es muy variable, como puede verse en la Tabla 17.2.

TABLA 17.2. Composición de algunos residuos vegetales (Según Correa et al, citados por Burbano, 1989).

PAJA DE	CONTENIDO (%) DE					
	Agua	M. O.	Cenizas	N	P	K
CEREALES	12 - 21	75 - 83	3 - 8	0.4 - 0.8	0.2 - 0.3	0.5 - 1.1
LEGUMINOSAS	12 - 22	76 - 83	3 - 9	1.2 - 2	0.3 - 0.4	0.6 - 1.8

En los resultados de la tabla anterior la diferencia más notable entre los dos materiales analizados se da en los contenidos de nitrógeno, lo cual está reflejando el efecto de la fijación biológica de este elemento por parte de la leguminosa. Shomberg et al (1994) presentan el valor nutricional que pueden tener los residuos vegetales de varias plantas de cultivo como puede verse en la Tabla 17.3.

Alfaro et al (1996), en suelos del valle alto del Magdalena (Espinil, Tolima), encontraron que los residuos dejados por una cosecha de arroz de 9 t y una de sorgo de 6 t, contenían las cantidades de nutrientes que se presentan en la Tabla 17.4.

TABLA 17.3. Contenido de algunos nutrientes en los residuos de cosecha de varias plantas de cultivo, según Shomberg et al (1994).

CULTIVO	CONTENIDO EN % DE			
	N	P	K	S
Alfalfa	2.09	0.18	1.78	0.25
Cebada	0.69	0.07	2.37	0.17
Maíz	0.95	0.10	1.45	0.17
Algodón	0.90	0.15	1.45	-
Avena	0.70	0.06	2.57	0.23
Maní	1.71	0.15	1.38	0.23
Arroz	0.69	0.08	0.57	0.09
Sorgo	0.83	0.13	1.20	-
Soya	0.83	0.47	0.93	0.30
Trigo	0.58	0.05	1.42	0.19

TABLA 17.4. Contenido de varios nutrientes en residuos de cosecha de arroz y sorgo, producidos en suelos de El Espinal (Tolima). (Resultados de Alfaro et al, 1996).

CULTIVO	CONTENIDO (kg) DE					
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S
ARROZ (9 t)	35	20	120	18	12	6
SORGO (6 t)	34	14	72	21	13	5

2.2.1. Ventajas

- Mejoran las propiedades físicas del suelo, al aportarle materia orgánica con una relación C/N amplia; a este respecto Kladivco (1994) reporta resultados donde se observa que los residuos de gramíneas son mejores como estabilizadores del suelo que los de leguminosas; encontró que los residuos de maíz demoran más tiempo en descomponerse y que producen más humus que los de soya. Además, el maíz produjo mayor cantidad de residuos que la soya.
- No requieren procesamiento para poder ser utilizados.
- Son materiales que siempre se producen en las explotaciones agrícolas.

2.2.2. Desventajas

- Aportan nutrientes en cantidades bajas a las plantas, en la mayoría de los cultivos.
- En las primeras etapas de su descomposición, los microorganismos deben utilizar el N del suelo o se debe aplicar este elemento en un fertilizante.
- Son de lenta descomposición.
- Algunas plantas, como por ejemplo el café, contienen alcaloides tóxicos para algunos microorganismos y ácidos grasos que inhiben de varios otros microorganismos; algunos cereales como trigo o centeno tienen benzoxazinonas que inhiben el desarrollo de algunas cianobacterias, hongos e insectos (Putnam, 1994). Este autor reporta varias plantas en las cuales se ha

detectado la presencia de sustancias tóxicas que afectan a otras plantas, como puede verse en la Tabla 17.5.

TABLA 17.5. Algunos residuos de plantas que se han reportado como fitotóxicos por varios autores. Información recopilada por Putnam (1994).

PLANTA CON RESIDUOS FITOTÓXICOS	PLANTAS AFECTADAS
Alfalfa	Alfalfa
Arroz	Arroz
Arveja	Varias
Avena	Varias
Café	Varias
Cebada	Varias
<i>Citrus</i> spp.	<i>Citrus</i> spp.
Durazno	Durazno
Espárrago	Varias
Festuca	Varias
Fríjol	Arveja, trigo
Girasol	Varias
Leucaena	Varias
Maíz	Varias
Manzana	Manzana
Pepino	Varias
Repollo	Espinaca
Ryegrass	Varias
Sorgo	Varias
Trigo	Varias

2.2.3. Manejo

Los residuos deben incorporarse al suelo con suficiente anticipación a la siembra de la próxima cosecha, para evitar deficiencias de nitrógeno en ella.

2.3. MULCH VEGETAL

Cuando no se quieren incorporar los residuos de las cosechas por alguna razón, otra manera de manejarlos consiste en dejarlos esparcidos sobre la superficie del suelo; esta cobertura se conoce como mulch vegetal para diferenciarla de otras que tienen el nombre genérico de **mulch**, pero que se componen de otros materiales diferentes a residuos vegetales como plásticos o piedras, entre otros (ver Figura 17.1).

2.3.1. Efectos sobre el suelo

Según Alberts y Howard (1994), la presencia de residuos de cosecha sobre el suelo aumenta la interceptación de lluvia, evitando el golpe de las gotas directamente sobre él; incrementa el tiempo requerido para que empiece a presentarse escorrentía, luego de un aguacero; al mismo tiempo, disminuye la rata de escorrentía, el sellamiento superficial, la cantidad de sedimentos y la erosión.

Horton et al (1994) observaron que los suelos con mulch se secan más lentamente que aquellos que no lo poseen, debido a que la evaporación se ve disminuida por la presencia de los residuos sobre la superficie; también los suelos cubiertos sufren cambios de temperatura más suaves que los suelos desnudos.



a. Mulch vegetal de caña de azúcar.



b. Mulch plástico en cultivo de fresas.

FIGURA 17.1. Diferentes tipos de mulch.

Kladivco (1994) estudió algunos efectos de la aplicación de paja de arroz a la superficie de Alfisoles en Nigeria, relacionados con algunas de sus propiedades físicas en los primeros 5 cm del suelo. Encontró los resultados que se presentan en la Tabla 17.6.

TABLA 17.6. Efecto del mulch de arroz sobre algunas propiedades físicas de los primeros 5 cm de Alfisoles de Nigeria. Resultados de Kladivco (1994).

CANTIDAD DE MULCH (Mg ha ⁻¹)	DENSIDAD APARENTE (Mg m ⁻³)	CONDUCTIVIDAD HIDRAÚLICA SATURADA (cm hora ⁻¹)	POROSIDAD TOTAL (%)	MACRO-POROS* (%)	MESOPOROS* (%)	MICROPOROS* (%)
6 Meses después del aclareo del suelo						
0	1.22	55	-	-	-	-
2	1.21	57	-	-	-	-
4	1.19	128	-	-	-	-
6	1.13	122	-	-	-	-
12	1.05	167	-	-	-	-
12 Meses después del aclareo del suelo						
0	1.32	54	54.5	26.0	7.0	21.5
2	1.20	72	54.5	28.0	6.0	20.5
4	1.17	96	55.5	27.5	8.5	19.5
6	1.09	130	56.5	29.5	8.0	19.0
12	1.04	182	60.0	39.5	8.0	12.5
18 Meses después del aclareo del suelo						
0	1.31	30	48.1	17.9	7.1	23.1
2	1.27	45	50.2	20.6	7.2	22.4
4	1.18	70	54.8	27.7	8.4	18.7

6	1.20	132	55.1	28.9	8.3	17.9
12	1.13	129	59.0	37.6	8.2	13.2

* Macro: Diámetro > 30 μm ; Meso: Diámetro entre 30 y 0.2 μm ; Micro: Diámetro < 0.2 μm .

Aparte de los resultados expuestos en la Tabla 17.6, Kladivco (1994) encontró que la adición de los residuos al suelo aumentó la infiltración y la retención de humedad en todas las tensiones y redujo la susceptibilidad a la compactación, así como el sellamiento y encostramiento superficiales.

2.3.2. Inconvenientes

Aparte de las desventajas señaladas para los residuos tratados en el numeral anterior, se presentan los siguientes inconvenientes con el manejo del mulch vegetal:

- Se pueden generar problemas de plagas y/o enfermedades en los cultivos, ya que los materiales de cobertura pueden seguir albergando a los agentes causales de ellas, dejándoles proseguir su ciclo biológico; éste es un problema crítico en el cultivo del algodón, por ejemplo.
- Se causan pérdidas altas de nutrientes al dejar el material expuesto directamente a las condiciones ambientales.
- Se retarda algún tiempo la incorporación del material orgánico al suelo con el consiguiente retardo en la formación del humus en éste.
- Se pueden dificultar algunas prácticas culturales debido a la acumulación de residuos gruesos sobre la superficie del suelo.

A pesar de los problemas anotados, Navas (1998) muestra que el uso de mulch proveniente de leguminosas, en suelos de los llanos orientales de Colombia, puede ser una práctica de manejo mejor que la incorporación de las plantas como abonos verdes, si se deja transcurrir algún tiempo después de la incorporación de los materiales, pues no hay diferencias significativas entre la mayoría de las variables evaluadas en aquellos suelos y si las hay entre los contenidos de Ca y de Mg, siendo mayores en el sistema de mulch (ver Figura 17.2). Aparte de lo anterior, con el mulch se evita el laboreo del suelo necesario para hacer la incorporación de los abonos verdes.

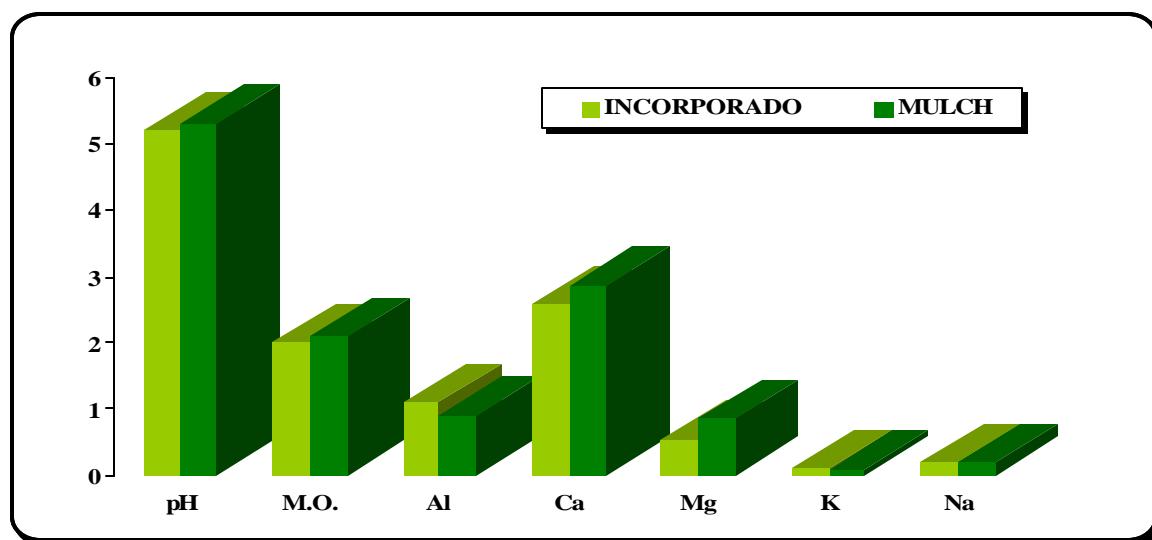


FIGURA 17.2. Efecto del manejo de Caupí: incorporado a los 45 días de edad y dejado como cobertura, sobre el comportamiento de algunas variables en un suelo del piedemonte llanero de Colombia, evaluadas a los 120 días después de la incorporación (MO: materia orgánica en %. Los otros elementos en meq/100 g de suelo). Con base en resultados de Navas (1998).

2.4. COMPOST

Según Cegarra (1994), el compost es el producto estabilizado e higienizado que se obtiene de la descomposición biológica oxidativa de materiales orgánicos frescos de desechos animales y vegetales.

Para obtener este producto, se mezclan materiales que pueden ser estiércoles, aserrín, restos de cosecha, basuras, etc. y se someten a un proceso de descomposición aeróbica, en la cual, la principal transformación la sufren los carbohidratos y las proteínas. El sistema más común para realizar las mezclas en nuestro medio y al nivel de finca, consiste en formar pilas de materiales, estratificándolos por composición, en fosas, como se describe a continuación.

2.4.1. Formación de las pilas de compost

- **Fosa:** Las fosas son huecos de no más de 90 cm de profundidad y con las dimensiones adecuadas para manejar la cantidad de residuos disponibles para compostar (Burbano, 1998). La fosa debe hacerse ligeramente inclinada, con el fondo apisonado y los taludes ligeramente inclinados; se divide en 3 porciones iguales, se apila material en 2 de ellas, dejando la tercera para volteo.
- **Colocación de residuos:** Burbano (1998) recomienda colocar capas alternas, de abajo hacia arriba, compuestas por una capa de 15 cm de residuos vegetales, seguida por otra de 5 cm de residuos animales y finalizando con una capa de 2 cm de espesor, de tierra; este arreglo se repite hasta llenar la fosa; después de acomodar cada paquete (22 cm), se debe humedecer el material, sin saturarlo.

Entre las capas de tierra y de desechos animales se puede colocar una capa fina de cal agrícola, roca fosfórica o cualquier otro material que mejore las cualidades del compost que se está produciendo. La parte superior del material acumulado se cubre con una capa de tierra de unos 5 cm de espesor y se protege con ramas u otro material, de la lluvia.

Es necesario dejar huecos para ventilación en la pila. Éstos se hacen colocando palos de unos 10 cm de diámetro, a lo largo de la fosa, espaciados aproximadamente un metro o metro y medio, sin apretarlos con el material que se va colocando pues, cuando se termina el llenado de la fosa, hay que retirarlos.

- **Volteo:** Los materiales acumulados deben ser invertidos dos veces durante la fase de descomposición aeróbica, haciendo el primer volteo a las 3 semanas de cargar la fosa y el segundo, 3 semanas después de primero; de aquí en adelante la descomposición es anaeróbica

y, por tanto, no requiere ventilación. La descomposición del material se puede acelerar si los volteos se hacen con mayor frecuencia: por ejemplo, semanalmente.

Después del segundo volteo, el material se deja en la fosa otras 6 semanas en descomposición, al cabo de las cuales el compost está formado y listo para aplicar.

2.4.2. Beneficios del compostaje

Según Burbano (1998), compostar los materiales orgánicos genera beneficios, como:

- El material producido por este método es económico.
- La producción se hace en la finca, con lo cual se ahorran costos de transporte.
- El material transformado adquiere una relación C/N tal, que es capaz de aportar buena cantidad de humus al suelo.
- El abono es balanceado desde el punto de vista nutricional.
- El sistema ofrece una buena alternativa para el manejo de desechos y basuras en la finca.

Cegarra (1998) adiciona otros beneficios como:

- El material producido es biológicamente estable.
- Se reducen las características fitotóxicas de los residuos utilizados.
- Se reduce notablemente el contenido de patógenos en los desechos tratados.
- Se reducen los malos olores si se hace correctamente.

2.4.3. Desventajas

- Se pierden nutrientes en la etapa inicial de oxidación.
- Se pueden presentar malos olores si no hay buena aireación, debido a la fermentación de los materiales en la pila.
- El manejo de los materiales en la pila, aunque no es difícil, sí implica más trabajo y cuidados que otros métodos para manejar los desechos de la finca.

2.4.4. Manejo

- Si se presenta fermentación (malos olores y presencia de moscas), se debe voltear inmediatamente la pila y se le deben mejorar las condiciones de aireación.
- A la fosa se le debe hacer drenaje, de manera que los líquidos producidos en la pila sean evacuados; éstos pueden ser recogidos en un foso adicional, en la parte baja de la fosa y externo a ella y pueden volver a ser adicionados a la pila.

2.5 LOMBRICOMPUESTO

Son los excrementos de la lombriz de tierra; estos materiales presentan una alta acumulación de casi todos los elementos nutricionales, con relación a los contenidos del suelo, por efecto de una aparente selección y concentración de ellos durante su paso a través del tracto digestivo de la lombriz; no aportan

buenas cantidades de humus, pero mejoran algunas condiciones físicas del suelo como su retención de humedad y su estabilidad estructural.

Cegarra (1998) recopila información acerca de algunos cambios que se producen sobre estiércoles de diferentes animales por efecto del lombricompostaje de los mismos, entre los cuales pueden destacarse los que se presentan en la Tabla 17.7; se observa en esta tabla que hay una reducción dramática en la relación C/N por efecto del lombricompostaje de los estiércoles, lo que reduce su calidad como material estabilizador del suelo, aunque, obviamente, la aumenta como fuente de nutrientes para la planta.

TABLA 17.7. Algunos cambios producidos sobre estiércoles por el lombricompostaje (Tomados de Cegarra, 1998).

ORIGEN DEL ESTIÉRCOL	VALOR EN EL ESTIÉRCOL		VALOR EN EL LOMBRICOMPUESTO	
	pH	C/N	pH	C/N
Bovino	9.38	22.10	7.45	9.70
Porcino	8.70	17.80	7.00	12.50
Avícola	6.20	30.70	7.00	14.00

Las propiedades del lombricomposto son muy variables, dependiendo del tipo de sustrato que se utilice para el desarrollo de la lombriz, como lo demuestran los resultados obtenidos por Menjivar y Gómez (1994), después de evaluar varios de ellos. En la Tabla 17.8 se presentan las propiedades de algunos de los lombricompostos obtenidos por los autores citados, acompañados de los resultados obtenidos por Jaramillo (sin publicar) para lombricompostos producidos en suelos aluviales de Medellín (Antioquia).

TABLA 17.8. Propiedades de algunos lombricompostos con diferentes sustratos.

PROPIEDAD	SUSTRATO		
	PULPA CAFÉ*	BOVINAZA*	SUELO**
Densidad aparente (g cm^{-3})	0.73	0.99	-
Densidad real (g cm^{-3})	1.64	2.11	-
Porosidad (%)	55.10	52.90	-
Materia orgánica (%)	42.00	65.30	5.33
PH	8.90	8.42	5.8
N (%)	3.07	1.82	-
P (%)	0.59	1.15	68.75
K (%)	3.49	3.59	0.58
Ca (%)	1.19	1.94	8.78
Mg (%)	0.34	1.41	3.8
Na (ppm)	795	1925	0.047
Cu (ppm)	53.50	64.00	11.8
Zn (ppm)	27.50	176	6.45
Fe (ppm)	1053	8982	890.6
Mn (ppm)	167	334	41.2

* Tomados de Menjivar y Gómez (1994).

** Resultados de Jaramillo. D. F., sin publicar, con el horizonte superficial de un suelo aluvial como sustrato; los contenidos de P y elementos menores, en ppm; las bases en meq/100 g de material.

Romero y Chamorro (1991) encontraron que las deyecciones de *Eisenia foetida*, provenientes de residuos de naranjo, banano, granadilla, papaya y café mezclados con suelo (Cryumbrepts) del páramo de Chisacá, presentaron mayores valores de CIC, pH, bases totales, carbono, Ca, Mg, K y N que el suelo original. En la mayoría de las dietas, los contenidos de Al y de P también fueron mayores en las deyecciones; en todos los casos la relación C/N estuvo alrededor de 10, efecto similar al reportado por Cegarra (1998).

Orozco et al (1998) estudiando la eficiencia de *Eisenia foetida* para transformar pulpa de café, encontraron que las deyecciones de la lombriz tenían mayores cantidades de P, Ca y Mg y menores de K, disponibles para la planta, que el material del sustrato original antes de ser consumido por la lombriz. Encontraron, además, un pobre balance entre las bases Ca : Mg : K.

2.6. ABONOS VERDES

Son plantas que se incorporan al suelo en estado verde, con el fin de aportarle algo de materia orgánica y aumentar el nitrógeno disponible en el suelo.

Subba Rao (1992) apunta que estos abonos son importantes sobre todo cuando las plantas utilizadas son leguminosas, por el aporte de nitrógeno que hacen al suelo, como puede verse en la Tabla 17.9.

TABLA 17.9. Cantidad de nitrógeno fijadas por algunas plantas leguminosas utilizadas como abonos verdes, según varios autores citados por Subba Rao (1992).

ESPECIE	kg N ₂ ha ⁻¹ cosecha ⁻¹
<i>Astragalus sinicus</i>	108 - 123
<i>Canavalia ensiformis</i>	98
<i>Cassia mimosoides</i>	97
<i>Crotalaria anagyroides</i>	98
<i>Crotalaria juncea</i>	105 - 129
<i>Dolichos biflorus</i>	89
<i>Sesbania aculeata</i>	96 - 122
<i>Sesbania sesban</i>	100 - 202
<i>Sesbania rostrata</i>	267

Subba Rao (1992) sostiene que entre más de 50 géneros de leguminosas estudiados como abono verde, hay 3 que nodulan en el tallo: *Aeschynomene*, con 150 a 250 especies, la mitad de ellas semiacuáticas; *Sesbania* con 170 especies aproximadamente, siendo la de mayor potencial de fijación de nitrógeno y *Neptunia*.

Destaca el autor, citado en el párrafo anterior, tres especies que se caracterizan por su producción de biomasa y por su capacidad para fijar nitrógeno:

- *Astragalus sinicus*, que produce entre 22.5 y 75 t de biomasa fresca ha⁻¹ y puede fijar hasta 270 kg N₂ ha⁻¹.
- *Sesbania rostrata*, que produce hasta 15 t ha⁻¹ de biomasa fresca en 8 semanas de crecimiento y fija más de 200 kg N₂ ha⁻¹ en 50 días de crecimiento.

- *Aeschynomene indica*, la cual en 1 mes de crecimiento produce alrededor de 15 t de biomasa fresca ha^{-1} .

Delgado y Alarcón (1997) encontraron en suelos de la altillanura colombiana que la incorporación de 3.1 t ha^{-1} de materia seca de caupí (*Vigna unguiculata* L.), producida como abono verde, le aportó al suelo 104, 72, 29, 6 y 6 kg ha^{-1} de N, K, Ca, Mg y P, respectivamente y, un cultivo de arroz, hecho después de la incorporación, mejoró la eficiencia de la utilización del fertilizante fosfórico aplicado. Navas (1998) encontró que las 3 leguminosas que utilizó como abono verde en suelos degradados de terraza alta en Villavicencio, Meta, aportaron las cantidades de biomasa (como materia seca) y de nutrientes que se exponen en la Tabla 17.10.

TABLA 17.10. Aporte de biomasa y de nutrientes a un suelo del piedemonte llanero de Colombia, por tres leguminosas utilizadas como abono verde, incorporadas a 50% de floración, en Villavicencio, Meta (Resultados de Navas, 1998).

PLANTA	BIOMASA (kg materia seca ha^{-1})	kg ha^{-1}				
		N	P	K	Ca	Mg
<i>Cannavalia ensiformis</i>	6143	150a*	13a	106a	36a	12b
Caupí calamary	3727	114b	12ab	69b	33ab	16a
Caupí llanura	3138	91b	10b	50b	25b	11b

* Valores en columnas con igual letra no presentan diferencia significativa al 95%.

El aporte de biomasa y de nutrientes que hacen los abonos verdes al ser incorporados al suelo es variable en el tiempo, como lo ilustran los resultados que se presentan en la Figura 17.3. Este comportamiento es específico para cada planta y para cada suelo y debe conocerse para hacer un aprovechamiento óptimo de los recursos ganados con este sistema de manejo de suelos.

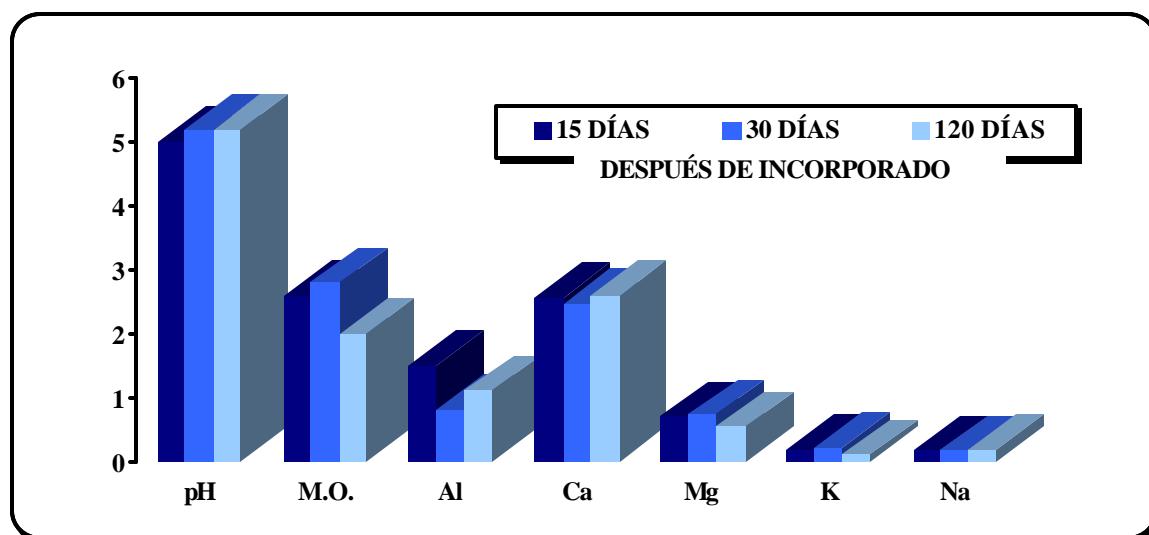


FIGURA 17.3. Variación en el tiempo de algunas propiedades de suelos del piedemonte llanero colombiano a los que se les incorporó caupí de 45 días de edad. Con base en resultados de Navas (1998). (Unidades como en la Figura 17.2).

2.6.1. Características de las plantas a utilizar como abonos verdes

Las plantas a ser utilizadas como abonos verdes, aparte de ser plantas suculentas, es decir, que tengan relaciones C/N estrechas y, por lo tanto, sean de fácil descomposición, deben cumplir unos requisitos mínimos que garanticen que los objetivos perseguidos con su aplicación, tienen buenas posibilidades de alcanzarse; éstos son, según Burbano (1998):

- Deben presentar un crecimiento rápido, ser precoces.
- Deben tener una alta producción de biomasa.
- Deben ser plantas resistentes a condiciones adversas.
- Deben ser de fácil manejo.

2.6.2. Ventajas

Burbano (1998), anota las siguientes:

- Aportan materia orgánica y nitrógeno al suelo, además de otros nutrientes.
- Si se usan leguminosas, puede elevarse aún más el contenido de nitrógeno debido a la fijación biológica del mismo.
- Solubilizan algunos nutrientes del suelo.
- Aumentan la actividad biológica en el suelo.
- Pueden concentrar nutrientes en el horizonte superficial del suelo.
- Pueden mejorar las propiedades físicas del suelo.

2.6.3. Desventajas

- No son recomendables para zonas secas, pues pueden consumir las reservas de agua que tenga almacenadas el suelo, generando déficit para el cultivo principal.
- Puede ser una práctica antieconómica, si se tiene en cuenta sólo el tiempo que va a estar improductivo (económicamente) el suelo (6 a 8 semanas, como mínimo) y que su manejo va a demandar algunos costos.
- Pueden convertirse en hospederos de plagas y enfermedades para el cultivo principal.
- Pueden convertirse en malezas, si su incorporación no se hace a tiempo.
- Requieren manejo como un cultivo, aunque poco intensivo.
- En suelos con baja fertilidad, pueden inducir extracción excesiva de nutrientes por parte del cultivo que se siembre después de incorporar el abono verde, como lo observaron Delgado y Alarcón (1997); ésto genera mayor demanda de nutrientes y un empobrecimiento más acelerado del suelo.
- Según Orozco (1999), en condiciones tropicales sufren una mineralización muy rápida, comportándose como un fertilizante mineral, con pérdidas de N y de C considerables.

2.6.4. Manejo

- Deben realizarse las prácticas culturales necesarias, dependiendo de las plantas que se estén utilizando como abono verde.
- No debe dejarse fructificar el cultivo para evitar producción de semillas y potenciales problemas de malezas posteriormente.
- Hay que incorporar el cultivo al suelo antes de la floración o iniciándose ésta para disminuir al máximo la lignificación de los residuos que se van a incorporar al mismo.
- Hay que esperar más o menos 3 semanas desde la incorporación, para establecer el próximo cultivo.
- Según Burbano (1998), sólo se justifica su uso en suelos muy pobres y haciendo que su establecimiento coincida con el período que hay entre la recolección de una cosecha y la siembra de la siguiente.

2.6.5. Azolla

Éste es un helecho flotante, de reproducción asexual, que puede formar simbiosis, en todo su ciclo biológico, con la cianobacteria *Anabaena azollae*, la cual fija nitrógeno atmosférico; este helecho crece bien en temperaturas entre 20 y 28°C y con pH entre 6 y 7. En suelos con pH < 4.6 no funciona (Subba Rao, 1992).

El *Azolla* es utilizado como abono verde en cultivos de arroz desde hace varios siglos, aprovechando que es un material de muy rápida descomposición (7 a 10 días) y que aporta entre 25 y 30 kg N₂ por cada 10 t de material fresco que se incorpora al suelo (Subba Rao, 1992).

Subba Rao (1992) reporta dos sistemas de manejo de este material para usarlo como abono verde en cultivos de arroz:

- En China, preparan el campo para el cultivo, lo inundan y aplican el *Azolla* a razón de 7.5 t ha⁻¹; después de 5 ó 10 días drenan el agua y el colchón de *Azolla* es incorporado al suelo con maquinaria; con esta práctica, incorporan 22.5 t ha⁻¹ de biomasa fresca y suplen el 50% del nitrógeno requerido por el cultivo.
- En la India se cultiva el *Azolla* en tanques de 50 ó 100 m² y de 5 a 10 cm de profundidad, los cuales se inoculan con 0.1 a 0.4 kg de *Azolla* m⁻²; a los 20 días de inoculación están cosechando el equivalente a 8 ó 10 t de biomasa fresca ha⁻¹, la cual incorporan al suelo mecánicamente.

En cultivos de arroz de inundación, el *Azolla* puede crecer con el cultivo y cuando presente buena cobertura es incorporado mecánicamente al suelo.

2.7. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Se refieren al conjunto de residuos sólidos de desecho producidos en las ciudades; presentan una fuerte variabilidad en su composición, dependiendo de su origen, como puede apreciarse en la Tabla 17.11. En la Tabla 17.12 se presenta el promedio de la composición de todas las basuras, de la ciudad de Medellín (Colombia), sin compostar y para el año de 1980, según estudio de la Gobernación de Antioquia, citado por Medina (1983).

En la Tabla 17.11 se observa que, excepto en el sector industrial, en los demás sectores se producen basuras con contenidos importantes de materia orgánica, lo que hace que estos residuos tengan un alto potencial para ser usados como enmiendas para los suelos sometidos a explotación agropecuaria.

TABLA 17.11. Composición general de las basuras de Medellín en 1980, según su origen (Tomada de Medina, 1983).

ORIGEN	%			
	Materia orgánica	Plástico	Papel y cartón	Otros*
Residencial	60-70	10-20	5-20	0-5
Industrial	10	20	40	30
Comercial	40	20	30	10
Hospitales	25	20	35	20

* Comprende leña, chatarra, vidrio y pedazos de tela.

TABLA 17.12. Composición promedia de las basuras de Medellín en 1980 y sin compostar. (Tomada de Medina, 1983).

pH	C/N	CE*	CONTENIDOS (%) DE					
			Agua	Ceniza	N	P	K	S
6.3	35	5	58	22	11	0.3	0.8	0.3

* Conductividad eléctrica en $\mu\text{mhos cm}^{-1}$.

2.7.1. Ventajas

- Es una alternativa para el manejo de basuras urbanas.
- Se presenta un aporte alto de materia orgánica al suelo.

2.7.2. Desventajas

Según Abad (1998a, b), los residuos sólidos urbanos presentan las siguientes desventajas:

- Exceso de nutrientes y sales que causan desbalances nutricionales para las plantas.
- La descomposición del material producido es muy lenta.
- Se puede presentar un alto contenido de materiales no biodegradables como plástico, vidrio, etc., tanto en el material original como en el compostado que dificultan su uso.
- Se pueden presentar contenidos altos de elementos y/o compuestos contaminantes y/o tóxicos.

- Inmadurez del compost.

Uno de los principales problemas de los residuos sólidos urbanos consiste en su **inmadurez**, lo cual, según Abad (1998b), limita sus posibilidades de uso, debido a que si se aplican frescos al suelo:

- Se presenta disminución en el contenido de oxígeno alrededor de la raíz, afectando la respiración de la planta.
- Hay una alta relación C/N con lo cual se produce inmovilización del N.
- Hay un aumento excesivo de la temperatura que puede causar quemazón y afectar el desarrollo de la planta.
- Hay presencia de altas cantidades de ácidos orgánicos de bajo peso molecular que pueden causar fitotoxicidad.
- Se presenta una alta cantidad de patógenos.

Para ilustrar los problemas inherentes a los residuos sólidos industriales se presenta la Tabla 17.13 que muestra la composición de este tipo de residuos en la ciudad de Medellín en el año 1979, según estudio de Codesarrollo, citado por Medina (1983).

TABLA 17.13. Composición de los desechos sólidos industriales frescos de Medellín en 1979. (Tomada de Medina, 1983).

COMPONENTE	CONTENIDO (%)
Vidrio	33.80
Residuos vegetales	21.80
Chatarra	11.45
Algodón y derivados	11.20
Minerales no metálicos	10.80
Papel y cartón	5.50
Plástico	2.60
Madera	1.0
Caucho	0.8
Cuero	0.5
Cabuya	0.3
Productos químicos y lubricantes	0.2
Seda	0.03

2.7.3. Manejo

Para suprir las desventajas anotadas anteriormente y los problemas de inmadurez, el material original requiere de procesamiento para ser utilizable, es decir, debe someterse a un proceso de compostaje, aunque ésto puede encarecer y limitar su utilización. El compost producido con las basuras urbanas tiene una calidad nutricional muy variable como lo muestran los resultados que obtuvo Cegarra (1998), los cuales se reproducen parcialmente en la Tabla 17.14. El compost producido con las basuras urbanas de Medellín tiene desventajas nutricionales frente al compost de la Tabla 17.14, como puede apreciarse en la Tabla 17.15.

Para mejorar la calidad del compost obtenido a partir de residuos sólidos urbanos, así como la de aquellos obtenidos a partir de otros materiales, pueden hacerse mezclas con otros materiales como estiércoles o lodos residuales, los cuales le aportan nutrientes y le estrechan su relación C/N.

Otro limitante importante que presentan los residuos sólidos urbanos para su uso es la presencia de materiales inertes (ver Tabla 17.15) que, aparte de no ser biodegradables y diluir el efecto fertilizante del residuo, pueden causar daños en máquinas y herramientas y heridas a operarios que los manipulen. Estos materiales inertes pueden ser eliminados en buena parte haciendo una selección de las basuras, ojalá desde la misma fuente primaria de ellas (las casas); una buena cantidad de aquellos elementos son susceptibles de ser reciclados en procesos industriales con lo cual se ayuda, de paso, a resolver problemas de contaminación ambiental.

TABLA 17.14. Promedio y rango de variación de algunas propiedades de compost producido con residuos sólidos urbanos en Valencia (España), con base en materia seca a partir de 111 muestras (Tomados de Cegarra, 1998).

PROPIEDAD	VALOR PROMEDIO	RANGO DE VARIACIÓN
PH	7.9	6.8 - 8.7
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	2186	1000 - 3240
Materia orgánica (%)	60	51 - 71
Relación C/N	14.3	7.1 - 19.9
Nitrógeno (%)	1.7	1.3 - 2.1
Fósforo (%)	0.2	0.05 - 0.4
Potasio (%)	0.7	0.2 - 1.6
Calcio (%)	6.7	4.4 - 9.5
Magnesio (%)	0.8	0.4 - 2
Hierro (%)	0.8	0.2 - 1.9
Sodio (%)	0.6	0.3 - 1.3
Cinc (ppm)	450	59 - 1578
Cobre (ppm)	261	81 - 624
Plomo (ppm)	387	57 - 813
Manganoso (ppm)	122	47 - 288
Níquel (ppm)	55	22 - 902
Cadmio (ppm)	2.7	1 - 15

TABLA 17.15. Composición de un compost producido a partir de basuras de la ciudad de Medellín en 1981 (Tomada de Medina, 1983).

COMPONENTE	CONTENIDO (%)
Humedad	39.52
Cenizas	33.82
Materiales inertes	32.66
Materia orgánica	26.9
Relación C/N	31
Plástico	0.86
N total	0.50
Fósforo	0.39

2.8. LODOS DE AGUAS RESIDUALES URBANAS

Son los subproductos sólidos o semilíquidos que quedan después de la depuración de las aguas residuales urbanas; su composición también es demasiado variable, dependiendo del origen que tengan los lodos.

En la Tabla 17.16 se presentan los resultados de la caracterización de los lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas, con los métodos utilizados en la caracterización de la fertilidad de suelos, de una zona urbana pequeña y con poca industrialización, ubicada en el oriente antioqueño (municipio de El Retiro), obtenidos por Gutiérrez et al (1998).

TABLA 17.16. Composición promedio de lodos residuales urbanos del municipio de El Retiro, oriente antioqueño. (Tomados de Gutiérrez et al, 1998).

PROPIEDAD	VALOR
Humedad	33 %
pH	7.3
Conductividad eléctrica	4.1 dS m ⁻¹
Materia orgánica	9.8 %
CIC	46 cmol (+) kg ⁻¹
Al intercambiable	0.2 cmol (+) kg ⁻¹
N	1.9 %
P	224 mg kg ⁻¹
S	343 mg kg ⁻¹
Ca	4 cmol (+) kg ⁻¹
Mg	4 cmol (+) kg ⁻¹
K	3 cmol (+) kg ⁻¹
Na	1.2 cmol (+) kg ⁻¹
Cu	0.7 mg kg ⁻¹
Mn	268 mg kg ⁻¹
Fe	49 mg kg ⁻¹
Zn	266 mg kg ⁻¹
Ni	Trazas mg kg ⁻¹
Cd	No se detectó
Cr	Trazas mg kg ⁻¹
Pb	No se detectó

2.8.1. Ventajas

- Pueden aportar alta cantidad de humus al suelo.
- Son una alternativa para el manejo y disposición de desechos urbanos.
- Pueden reducir el pH en suelos alcalinos o aumentarlo en suelos ácidos (ver Figura 17.3).

2.8.2. Desventajas

- Requieren procesamiento antes de ser aplicados.
- Tiene cantidades importantes de compuestos y elementos tóxicos y/o contaminantes, como compuestos industriales resistentes a la degradación o metales pesados como Zn, Cu, Pb, Ni y Cr, entre los más abundantes (Cegarra, 1983).
- Pueden transmitir enfermedades, al albergar patógenos.
- Pueden causar malos olores si no se estabilizan bien antes de aplicarlos.
- Si se aplican en estado líquido, pueden reducir la infiltración del suelo, pudiéndose producir pérdidas importantes de N y P.
- Hay pérdidas altas de nutrientes en su procesamiento.
- Pueden llegar a tener un costo alto, dependiendo del tratamiento que deba hacérseles.

Los lodos caracterizados en la Tabla 17.16 fueron utilizados para observar el efecto que ellos tenían sobre la producción de materia seca y la acumulación de algunos elementos químicos en plantas de tomate y de maíz cuando ellas crecían durante 30 días, en un sustrato compuesto de mezclas de diferentes cantidades de lodo con un suelo muy ácido y de muy baja fertilidad (Ultisol). El ensayo se llevó a cabo bajo condiciones de invernadero y los principales efectos producidos por los lodos sobre el suelo utilizado se presentan en la Figura 17.4.

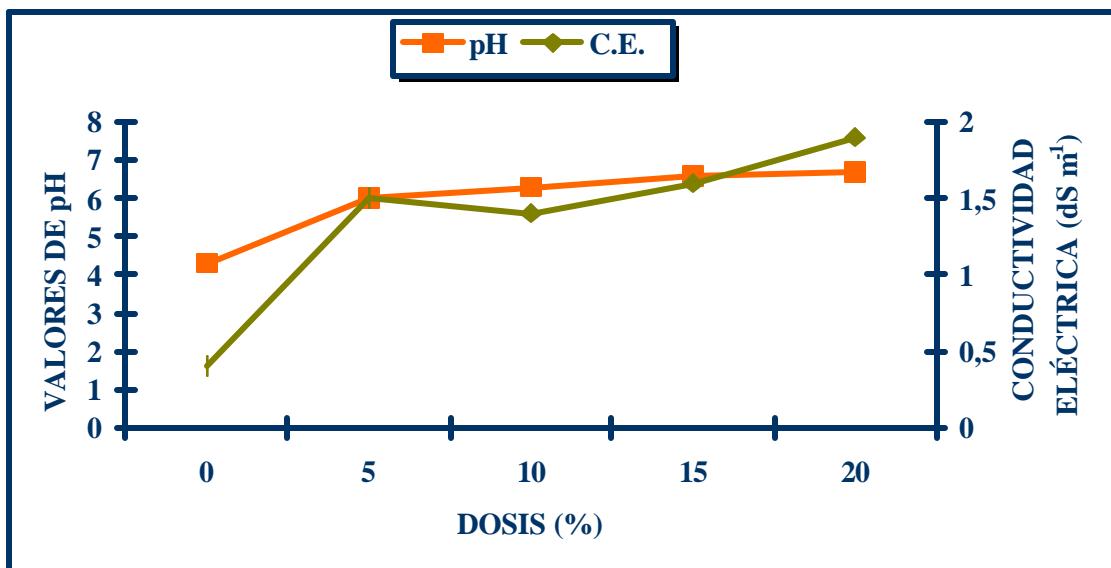


FIGURA 17 4. Efecto de la adición de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas del municipio de El Retiro, oriente antioqueño, sobre el pH y la salinidad de un Ultisol muy ácido y muy pobre del valle de Aburrá (Antioquia). (Con base en resultados de Gutiérrez et al, 1998).

En los resultados expuestos en la Figura 17.3, es notable el efecto que tiene la adición de los lodos a los suelos utilizados. Los resultados más sobresalientes obtenidos con las plantas, en el estudio referenciado en la Figura 17.3, fueron:

- Con mezclas donde se colocó más de 25% (peso/peso) de lodo, no hubo crecimiento de ninguna planta.

- La mayor producción de materia seca, en tomate, se obtuvo con la mezcla que tenía 10% de lodo y, en maíz, con la que tenía 5% de lodo.
- En los rangos de 5% y 10% se encuentra la mayor cantidad de valores máximos de elementos acumulados en las hojas de las plantas utilizadas.
- Con dosis mayores a 10% de lodo se reduce la acumulación de Ca, Mg, Mn y Zn en los tejidos foliares de las plantas.
- Los contenidos foliares de Ni, Cd, Cr y Pb fueron menores a 1 mg kg^{-1} , lo que indica que los lodos utilizados no aportan cantidades tóxicas de dichos elementos y, por lo tanto pueden ser aprovechados como bioabonos.

2.8.3. Manejo

- Deben ser sometidos a procesos de maduración antes de aplicarlos para evitar malos olores y pérdidas grandes de sus compuestos solubles.
- Deben analizarse periódicamente para determinar su uso más adecuado (enmienda física o fertilizante) y para evitar contaminaciones en el suelo, el cultivo o los animales.
- Pueden someterse a compostaje para equilibrar sus nutrientes, mezclándolos con otros desechos orgánicos, cuando la relación C/N del lodo es baja.

A parte de los materiales que se han tratado en este documento, los cuales son los más comúnmente utilizados en el manejo de la materia orgánica del suelo, hay otra gran variedad de materiales susceptibles de ser utilizados con este fin. Éstos no se incluyen en este documento porque son relativamente poco conocidos, como los subproductos industriales o los extractos húmicos que están actualmente en experimentación.

A manera de compendio, se presentan en la Tabla 17.17 algunas de las características más sobresalientes de los materiales orgánicos discutidos en los apartes anteriores.

TABLA 17.17. Características relevantes de algunos materiales orgánicos importantes en el manejo de suelos.

Tipo de Abono	Relación C/N	Aporte de nutrientes	Aporte de humus	Velocidad de descomposición
Estiércoles	Media - Baja	Medio - Alto	Bajo	Media - Rápida
Residuos de cosecha	Alta	Bajo	Alto	Lenta
Mulch vegetal	Alta	Bajo	Alto	Lenta
Compost	Media - Alta	Bajo - Medio	Alto	Lenta
Lombricomposto	Baja - Media	Alto	Bajo	Media - Rápida
Abonos verdes	Baja - Media	Alto	Bajo	Rápida
Residuos sólidos urbanos	Alta - Media	Bajo	Alto	Lento
Lodos residuales urbanos	Alta	Bajo	Alto	Media

RECORDAR

- Al suelo se le pueden adicionar materiales orgánicos de muy variadas propiedades, con dos propósitos fundamentales: nutrición vegetal o mejoramiento de sus condiciones físicas.
- Cualquier material orgánico que vaya a ser incorporado al suelo debe ser evaluado previamente, para conocer su calidad y los posibles riesgos que se corren con su aplicación.
- En nuestro medio, los materiales que con mayor frecuencia se utilizan como enmiendas orgánicas son los estiércoles, los residuos de cosecha y el compost.
- Los estiércoles se utilizan como fuentes de nutrientes, en tanto que los otros dos materiales son mejores como aportantes de humus al suelo.

BIBLIOGRAFÍA

- ABAD, M. 1998a. Aprovechamiento del compost de residuos sólidos urbanos en agricultura. **En:** Residuos orgánicos: Aprovechamiento agrícola como abono y sustrato. 2^a Ed. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS) - Universidad Nacional de Colombia. Medellín. pp. 53-66.
- ABAD, M. 1998b. Limitaciones y riesgos del uso agrícola de los residuos orgánicos. **En:** Residuos orgánicos: Aprovechamiento agrícola como abono y sustrato. 2^a Ed. SCCS - Universidad Nacional de Colombia. Medellín. pp. 9-19.
- ALBERTS, E. E. y W. HOWARD. 1994. Influence of crop residues on water erosion. **In:** Managing Agricultural Residues. Lewis Publishers. USA. pp: 19-39.
- ALFARO, R.; A. M. CAICEDO; E. AMÉZQUITA y H. CASTRO. 1996. La rotación de cultivos en el valle cálido del alto Magdalena: Un enfoque conservacionista de alto rendimiento. *Suelos Ecuatoriales* 26 (1): 76-85.
- BURBANO, H. 1998. Las enmiendas orgánicas. **En:** Fertilización de cultivos en clima frío. Monómeros Colombo Venezolanos S. A. pp: 363-403.
- BURBANO, H. 1989. El Suelo: Una visión sobre sus componentes biorgánicos. Universidad de Nariño. Pasto. 447 p.
- CEGARRA, J. 1998. Compostaje y lombricompostaje: Características de los compost. **En:** Residuos orgánicos: Aprovechamiento agrícola como abono y sustrato. 2^a Ed. SCCS - Universidad Nacional de Colombia. Medellín. pp. 39-52.
- CEGARRA, J. 1994. Compostaje de desechos orgánicos y criterios de calidad del compost. **En:** Memorias 7 Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. SCCS. Bucaramanga. pp. 22-30.
- CEGARRA, J. 1983. Utilización y manejo de lodos de aguas residuales urbanas con fines agrícolas. *Suelos Ecuatoriales* 13 (1): 151-173.
- DELGADO, H. y H. ALARCÓN. 1997. Efecto de la incorporación de caupí (*Vigna unguiculata* L.) como abono verde sobre la eficiencia del arroz en el uso del fósforo en un Oxisol de la altillanura plana colombiana. *Suelos Ecuatoriales* 27: 86-90.
- GUTIÉRREZ, F. L.; D. ROJAS; M. JIMÉNEZ; L. A. SERNA y R. ZAPATA. 1998. Evaluación de la eficiencia agronómica de un lodo residual usado como bioabono en un Ultisol. **En:** Residuos orgánicos: Aprovechamiento agrícola como abono y sustrato. 2^a Ed. SCCS - Universidad Nacional de Colombia. Medellín. pp. 105-116.

HORTON, R.; G. J. KLUITENBERG y K. L. BRISTOW. 1994. Surface crop residue effects on the soil surface energy balance. In: Managing Agricultural Residues. Lewis Publishers. USA. pp: 143-162.

KLADIVCO, E. J. 1994. Residue effects on soil physical properties. In: Managing Agricultural Residues. Lewis Publishers. USA. pp: 123-141.

MEDINA, H. 1983. Las basuras del área urbana del Valle de Aburrá como fuentes de materia orgánica. Suelos Ecuatoriales 13 (1): 191-202.

MENJIVAR, J. C. y J. GÓMEZ. 1994. Evaluación de la calidad de cuatro lombricompostos. En: Memorias 7 Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. SCCS. Bucaramanga. pp. 181-183.

NAVAS, G. 1998. Avances sobre algunas alternativas de manejo de suelos agrícolas degradados en el piedemonte llanero. En: Memorias Encuentro Nacional de Labranza de Conservación. Romero G. et al editores. Villavicencio. pp: 407-420.

OROZCO, H.; J. CEGARRA; L. M. TRUJILLO y A. ROIG. 1998. Vermicompostaje de pulpa de café usando la lombriz de tierra *Eisenia foetida*. Efectos en los contenidos de C y N y la disponibilidad de nutrientes. En: Residuos orgánicos: Aprovechamiento agrícola como abono y sustrato. 2^a Ed. SCCS - Universidad Nacional de Colombia. Medellín. pp. 117-128.

OROZCO, H. 1984. La materia orgánica de los suelos y su relación con los abonos orgánicos. En: Curso Fertilización Racional del Suelo. SCCS. Medellín. pp. 339-367.

OROZCO, H. 1983. Uso de la “porquinaza” como materia orgánica para los suelos: Bondades y riesgos. En: II Curso Internacional de Porcicultura. COLVEZA. Medellín. pp. 1-34.

PUTNAM, A. R. 1994. Phytotoxicity of plant residues. In: Managing Agricultural Residues. Lewis Publishers. USA. pp: 285-314.

ROMERO, M. y C. CHAMORRO. 1991. Utilización de *Eisenia foetida* en labores agriculturales. Suelos Ecuatoriales 21 (2): 155-163.

SHOMBERG, H. H.; P. B. FORD y W. L. HARGROVE. 1994. Influence of crop residues on nutrient cycling and soil chemical properties. In: Managing Agricultural Residues. Lewis Publishers. USA. pp: 99-121.

SUBBA RAO, N. S. 1992. Biofertilizers in agriculture. 2^a. Ed. A. A. Balkema. Rotterdam. 208 p.

AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Qué es una enmienda orgánica?.
2. Enumere 10 características que se deban evaluar en una enmienda orgánica, antes de aplicarla al suelo.
3. Analice la importancia de la relación C/N de una enmienda orgánica.
4. ¿Por qué los estiércoles frescos no se consideran buena fuente de materia orgánica para el suelo?.
5. Los residuos de cosecha son adecuados para esperar de ellos una alta mineralización y suministro de nutrientes a la planta?. Explique.
6. ¿Qué es mulch vegetal?. ¿Para qué es más útil en el suelo?.
7. Enumere 5 beneficios que puedan obtenerse con el compostaje de materiales orgánicos.
8. Enumere 4 características deseables en aquellas plantas que se utilicen como abonos verdes.
9. Enumere 4 factores que puedan limitar el uso agrícola de compost hecho con residuos urbanos sólidos.
10. Enumere 4 efectos nocivos que puedan ocurrir por el uso de enmiendas orgánicas.

EVALUACIÓN

1. Si en una finca se dispone de porquinaza y de pulpa de café descompuesta y hay un lote arenoso, cuál de esos materiales se debe utilizar preferencialmente para tratar de ir mejorando la estructura de dicho suelo?
2. En un suelo con alto contenido de materia orgánica, por ejemplo 20%, puede mejorarse la nutrición de la planta por adición de materia orgánica fresca?. Explique.
3. Consultar qué son los siguientes materiales, cuáles son sus propiedades más importantes y en qué regiones de Colombia se utilizan con mayor frecuencia:
 - a. Cachaza
 - b. Cenichaza.
 - c. Champiñonaza.
4. ¿Cuántos kg ha⁻¹ de fósforo y de potasio se adicionarán a un suelo si se le aplican 5 t ha⁻¹ de un compost como el de la Tabla 17.15?. (R: 19.5 kg P ha⁻¹, 5 kg K ha⁻¹).

SUELOS ORGÁNICOS

CAPÍTULO 18

CONTENIDO

- ❖ Origen de los suelos orgánicos
 - Las turbas
 - Propiedades
 - Tipos
 - Pedogénesis
- ❖ Propiedades de los suelos orgánicos
- ❖ Uso y Manejo de los suelos orgánicos
- ❖ Clasificación taxonómica de los suelos orgánicos
- ❖ Distribución de los suelos orgánicos en Colombia

OBJETIVOS

- ❖ Conocer el origen y las propiedades más importantes de los suelos orgánicos
- ❖ Informarse acerca de las prácticas de manejo generales que se llevan a cabo en estos suelos, cuando son sometidos a actividades agropecuarias
- ❖ Informarse sobre la clasificación taxonómica de los suelos derivados de materiales orgánicos
- ❖ Conocer donde están ubicados los suelos orgánicos de Colombia

E

n algunos documentos como en el sistema de clasificación taxonómica de suelos de FAO/UNESCO (Porta et al, 1994), los suelos orgánicos se denominan **turberas** o **turbas**.

1. ORIGEN DE LOS SUELOS ORGÁNICOS

Los suelos orgánicos se forman independientemente del clima y la litología, siempre que se den las condiciones topográficas que favorezcan la acumulación de materiales orgánicos en **condiciones hidromórficas**, es decir, saturados con agua deficiente en oxígeno casi permanentemente.

El material parental de estos suelos está constituido por restos de musgos y de otras plantas superiores que se han depositado en ambientes escasos en oxígeno, con exceso de agua, a través de períodos importantes de tiempo. Los depósitos formados por estos materiales los definen varios autores, citados por Clymo (1983) y por Abad y Noguera (1998), como **turberas** y, a los materiales en sí, como **turbas**.

1.1. LAS TURBAS

Como ya se dijo, son residuos vegetales disgregados, incompletamente descompuestos.

1.1.1. Propiedades

Aunque son muy variables y dependen fuertemente del grado de humificación que presenten, Abad y Noguera (1998) resaltan las siguientes:

- La densidad aparente puede llegar máximo hasta 0.6 Mg m^{-3} .
- La porosidad total puede llegar a ser mayor al 95%.
- El pH puede variar entre 3.5 y 8.5.
- Presentan alta CIC: mayor a $100 \text{ cmol (+)} (\text{kg de suelo})^{-1}$.
- Tienen un bajo nivel de fertilidad.

Clymo (1983) reporta, para varias propiedades de las turbas, valores de diversos autores, de los cuales pueden extraerse:

- Si están poco descompostas, tienen alta conductividad hidráulica: 0.1 a 0.001 cm s^{-1} .
- La gran mayoría de las veces sólo tienen, como máximo, 20% de sustancias húmicas.
- La mayor parte de la carga es variable.

1.1.2. Tipos

Clymo (1983), plantea la necesidad de diferenciar el sistema donde se forma la turba (turbera), de la sustancia turba, cuando se quiere establecer una clasificación. Se ha reconocido la importancia que tiene el origen del agua que satura las turberas, ya que define, en buena medida, la calidad nutricional que va a

tener la turba desarrollada en ellas; teniendo en cuenta lo anterior, propone una clasificación ecológica amplia de las turberas, como se muestra en la Tabla 18.1.

TABLA 18.1. Clasificación ecológica general de las turberas, según Clymo (1983).

FUENTE DEL AGUA	CONDICIÓN NUTRICIONAL*	
	EUTRÓFICA	OLIGOTRÓFICA
Freática o superficial	Fen	Bog o Fen
Precipitación (lluvia)	-	Bog

* Eutrófica: con alto contenido de elementos nutricionales. Oligotrófica: con contenido bajo de elementos nutritivos.

En las clases propuestas por Clymo (1983), el mismo autor indica que, en los sistemas **bog**, el principal componente vegetal que se encuentra es el musgo *Sphagnum*, acompañado por un escaso número de especies de plantas vasculares, principalmente del género *Eriophorum*; en cambio, en los sistemas **fen**, con aguas enriquecidas en solutos (eutróficas), se presenta una mayor variedad de especies de plantas vasculares que dominan la composición vegetal del sistema.

Para la clasificación de las turbas, Clymo (1983) presenta algunos sistemas que se utilizan para hacerlo, de los cuales se expone uno general en la Tabla 18.2.

TABLA 18.2. Bosquejo del sistema de clasificación de turbas, propuesto por Kivinen (1977), tomado de Clymo (1983).

CRITERIO DE CLASIFICACIÓN	TIPO DE TURBA
Composición botánica	Turba de musgos (> 75% de musgo y < 10% de madera)
	Turba herbácea (> 75% de plantas herbáceas y < 10% de madera)
	Turba de madera (> 35% de madera)
	Turbas mixtas o mezcladas: cualquier otro tipo de composición
Grado de descomposición	Turba poco descompuesta
	Turba moderadamente descompuesta
	Turba altamente descompuesta
Estado nutricional	Oligotrófica (Bajo contenido de nutrientes)
	Mesotrófica (Contenido medio de nutrientes)
	Eutrófica (Alto contenido de nutrientes)

El Soil Survey Division Staff (SSDS, 1993), reúne, con un sentido meramente descriptivo y práctico, los diferentes tipos de turbas en cuatro grupos:

- **Turba sedimentaria:** Depósito orgánico compuesto principalmente por restos de plantas acuáticas flotantes y de residuos de material fecal de animales acuáticos.
- **Turba de musgo:** Compuesta por residuos de musgos, incluyendo *Sphagnum*.
- **Turba herbácea:** Compuesta por residuos de plantas herbáceas como juncos.
- **Turba de madera:** Formada por residuos de plantas leñosas como árboles y rastrojos.

Además, el SSDS (1993) restringe el uso del término **turba (peat)** para aquellos materiales que están lo suficientemente frescos como para poder identificar las plantas de origen. Cuando el material ya ha sufrido un grado de descomposición que sólo permite la diferenciación de algunas partes vegetales en él, entonces se denomina **muck** y, si ha habido una descomposición tan intensa que buena en parte del material no se puede reconocer, entonces se llama **turba mucky**.

1.2 PEDOGÉNESIS

Según Buol et al (1997), la acumulación de materiales orgánicos puede ser el estado final de colmatación de lagos y de otras depresiones. Este proceso de acumulación es llamado **paludización**.

En la formación y crecimiento de dichos depósitos orgánicos es indispensable que se presenten condiciones en las que la velocidad de descomposición de la materia orgánica sea menor que la velocidad con que ella es aportada al depósito. Estas condiciones las ofrecen las áreas permanentemente húmedas y **anóxicas** al impedir, casi por completo, la mineralización de la materia orgánica. Dicho desbalance aporte - mineralización de la materia orgánica garantiza que el depósito orgánico aumente su espesor, creciendo de abajo hacia arriba mediante los aportes superficiales, de modo que se tenga el material parental que dará origen a los suelos orgánicos.

La formación de los suelos orgánicos empieza cuando entra aire al depósito orgánico y éste comienza a oxidarse, produciéndose una serie de cambios físicos, químicos y biológicos. Varios autores, citados por Buol et al (1997), han agrupado a este conjunto de transformaciones en un proceso que han llamado **maduración (ripening)**.

La magnitud y el tipo de los cambios que se pueden producir por la maduración de los sedimentos orgánicos dependen de la composición de los residuos, del contenido de materiales inorgánicos presentes en el depósito y de la calidad de las aguas que alimentan el sitio, así como de la altura del nivel freático y/o de la condición de drenaje que presente el mismo.

Uno de los cambios físicos más notable es la disminución de volumen en el material aireado, es decir, la presencia de un proceso de **adensamiento**. Químicamente, se presenta la **mineralización** de una parte muy pequeña de la materia orgánica y el resto es sometido a un proceso de **humificación**. Los principales procesos biológicos que se presentan involucran la reducción en el tamaño de las partículas orgánicas, la mezcla de materiales orgánicos y la formación de agregados y de otros rasgos pedológicos: **bioturbación** (Buol et al, 1997).

2. PROPIEDADES DE LOS SUELOS ORGÁNICOS

Las propiedades de estos suelos dependen fundamentalmente del grado de descomposición que presente la materia orgánica del mismo, así como de la cantidad de materiales minerales que se encuentre en él.

El Soil Survey Staff (SSS, 1999), desde un punto de vista práctico, diferencia tres grupos de materiales orgánicos que pueden estar presentes en los suelos orgánicos: **Fíbrico**, **Hémico** y **Sáprico**. Estos grupos se definen con base en el grado de descomposición que presentan los materiales orgánicos, el cual, a su vez, se manifiesta en el contenido de fibras que él posee.

Las **fibras** se definen, según el SSS (1999), como aquellas partes de los tejidos vegetales (excluyendo raíces vivas) que:

- Son lo suficientemente grandes para que sean retenidas en un tamiz de 100 mallas, cuando son cernidas; y
- Tienen evidencias de estructuras celulares de las plantas de las cuales se han derivado; y
- Tienen 2 cm o menos en su dimensión más pequeña o tienen una descomposición suficiente como para que sean aplastadas y desmenuzadas con los dedos.

Las principales propiedades de los anteriores grupos de materiales orgánicos se presentan en la Tabla 18.3.

TABLA 18.3. Principales propiedades de los diferentes grupos de materiales orgánicos, según el SSS (1999).

MATERIAL	Da (Mg m ⁻³)	CONTENIDO DE FIBRAS (VOLUMÉTRICO)	CONTENIDO GRAVIMÉTRICO DE AGUA A SATURACIÓN (%)	COLOR* (VALUE/CHROMA)
Fibríco	≤ 0.1	> 2/3	850 – >3000	7/1, 7/2, 8/1, 8/2, 8/3
Hémico	0.07 – 0.18	1/3 – 2/3	450 – 850	No definido
Sáprico	≥ 0.2	< 1/3	< 450	5/1, 6/2, 7/3

* Color producido en una tira de papel cromatográfico o de filtro, blancos, insertado en una pasta hecha de los materiales del suelo en una solución saturada de pirofosfato de sodio.

Aparte de las propiedades que le pueden imprimir al suelo los tipos de materiales orgánicos definidos anteriormente, los suelos orgánicos también poseen otras propiedades importantes como:

- Tienen una alta CIC, comúnmente mayor de 100 cmol (+) kg⁻¹ de suelo, medida a pH 7.
- Presentan un alto contenido de carbono orgánico.
- Son muy variables propiedades como el pH, el contenido de bases, la acidez intercambiable y el contenido de nutrientes.
- Tienen muy baja o ninguna plasticidad y pegajosidad.

Para ilustrar lo relacionado con las propiedades de estos suelos, en la Tabla 18.4 se presentan los valores de algunas de ellas en el horizonte superficial de dos Histosoles colombianos (Tropohemists), uno de clima cálido y otro de clima frío. En éstos es notoria la diferencia entre la saturación de bases que poseen (coincidencialmente también de magnesio), debida probablemente a diferencias en las aguas que inundaron los respectivos depósitos orgánicos que les dieron origen.

TABLA 18.4. Algunas propiedades del horizonte superficial de dos Histosoles de Colombia, uno de clima frío (López y Cortés, 1978) y otro de clima cálido (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, 1980).

CLIMA	CARBONO ORGÁNICO (%)	pH agua 1:1	CIC [cmol (+) kg ⁻¹ suelo]	SATURACIONES (%) CON BASES				P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)
				Ca	Mg	K		
FRÍO	29.1	5.2	91.5	20.2	18.5	1.2	0.3	49
CÁLIDO	44.9	4.7	96.2	62.2	18.2	31.8	0.9	7

En la Tabla 18.4, el suelo de clima cálido está ubicado en una zona de marisma del municipio de Turbo (Antioquia) (IGAC, 1980), en tanto que el de clima frío, proviene de una planicie palustre del municipio de San Miguel de Sema, en el altiplano cundiboyacense (López y Cortés, 1978). La diferencia en el contenido de fósforo puede estar muy influenciada por el uso pecuario del suelo de clima frío.

Como norma general, en los suelos orgánicos, al aumentar el grado de descomposición del material orgánico, se incrementan la densidad aparente, la CIC variable, el contenido de carbono orgánico y la microporosidad, mientras que se disminuye la permeabilidad y se desmejora la condición de drenaje.

3. USO Y MANEJO DE LOS SUELOS ORGÁNICOS

Según Buol et al (1997), los suelos orgánicos tienen posibilidades de ser utilizados en actividades agrícolas, principalmente hortícolas, en explotaciones ganaderas de leche, con pastos mejorados o nativos, en plantaciones forestales comerciales o de protección, siempre que se hagan las adecuaciones de manejo necesarias para llevarlas a cabo; también son importantes, ecológicamente, como santuarios para la protección de vida silvestre o como áreas aptas para la recreación.

Los materiales orgánicos de estos suelos se han utilizado como acondicionadores físicos para los suelos minerales, como combustible, como material para limpiar aguas residuales, como fuente de productos químicos para algunas industrias (ceras, grasas, resinas y otros compuestos) y como relleno en los fertilizantes químicos (Buol et al, 1997), como sustrato para cultivos bajo invernadero (Abad y Noguera, 1998) y como soporte para inoculantes microbiológicos (Orozco, 1999).

En estos suelos no se recomienda hacer construcciones debido a que la capacidad portante de ellos es muy baja y, al secarse dichos suelos se puede presentar una fuerte subsidencia que afecta esas construcciones. Además, las aguas de estos suelos son altamente corrosivas para el concreto y para los metales (Buol et al, 1997).

Cuando se van a establecer usos agropecuarios en estos suelos, las prácticas de manejo que se deben implementar, generalmente, son: **drenaje, fertilización y riego**.

Debido a que el ambiente normal de formación de estos suelos es hidromórfico, la primera práctica que se debe hacer para poderlos utilizar en la producción agropecuaria es el drenaje, el cual debe manejarse teniendo la precaución de **no secar completamente** el suelo, así como de **no bajar demasiado el nivel freático** para que no se interrumpa la **capilaridad** y el suelo pueda seguirse humedeciendo.

Según Buol et al (1997), el drenaje aumenta la susceptibilidad de estos suelos a los incendios y el drenaje excesivo produce pérdida directa del suelo por volatilización de agua y de CO₂. El exceso de drenaje se manifiesta, normalmente, en un incremento en la **subsidencia** (asentamiento del suelo), la cual está relacionada, directamente, con la profundidad a la cual se encuentre el nivel freático. Este asentamiento de los suelos puede llegar a tener magnitudes muy importantes: los autores citados al comienzo de este párrafo reportan valores de subsidencia de 1.8 m, obtenidos en 50 años de drenaje de suelos orgánicos en La Florida.

La subsidencia puede aumentar la microporosidad y la densidad aparente del suelo, dificultándose así el movimiento de agua y su avenamiento con el trascurso del tiempo. Además de producir subsidencia y de aumentar la susceptibilidad a los incendios, si estos suelos se secan, se tornan muy susceptibles a la **erosión**, a la **compactación** y a la **hidrofobicidad**.

Las condiciones de baja fertilidad de estos suelos que se manifiestan en el bajo contenido de bases y de nutrientes para las plantas, hacen que, normalmente, se tengan que **fertilizar** con macro y microelementos. Además, las condiciones de alta acidez requieren de **encalamiento**. Eventualmente, dependiendo de la composición química de los suelos, se puede requerir la aplicación de enmiendas para contrarrestar la presencia de **sulfatos**.

La mecanización en estos suelos puede hacerse en forma relativamente fácil ya que, por lo general, están en superficies planas y son muy poco pegajosos; éstas condiciones implican que se debe usar **maquinaria liviana** para no compactarlos. Debe recordarse, sin embargo, que a medida que avanza la maduración en estos suelos, se va incrementando su densidad, por lo que puede ser necesario el uso de maquinaria o de implementos un poco más pesados en aquellos suelos cuyos materiales orgánicos están más descompuestos.

López y Cortés (1978) llaman la atención acerca de que el cultivo en estos suelos tiende a destruir fácilmente su estructura, convirtiéndolo en un material suelto y polvoriento. Esta condición de degradación hace aconsejable el uso de equipos para compactar, con el fin de reducir las pérdidas de suelo por erosión.

La aplicación de riego puede ser requerida en estos suelos durante algunas épocas secas del año para suministrar agua a las plantas. También puede tenerse la práctica del riego como una estrategia para mantener el nivel freático a una profundidad adecuada, así como para controlar incendios.

4. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA DE LOS SUELOS ORGÁNICOS

Como se verá más adelante, en el Capítulo 20, en Colombia se utiliza el sistema USDA para llevar a cabo la clasificación taxonómica de los suelos. Este sistema hace una diferenciación práctica entre lo que son materiales orgánicos y materiales minerales (inorgánicos) de los suelos, así como entre los suelos que se derivan de cada uno de ellos.

Los **materiales orgánicos** son aquellos materiales que cumplen uno de los dos requisitos siguientes:

- “1. Están saturados con agua menos de 30 días acumulativos al año, la mayoría de los años normales* y contienen más de 20%, por peso, de carbono orgánico, o

* Año normal es el que presenta más o menos una desviación estandar del promedio anual de precipitación de 30 años o más.

2. Están saturados con agua 30 días o más, acumulativos, al año, la mayoría de los años normales, o están drenados artificialmente y, excluyendo las raíces vivas, tienen un contenido de carbono orgánico, por peso, de:
 - a. Más de 18%, si la fracción mineral contiene 60% o más de arcilla, o
 - b. Más de 12%, si la fracción mineral no tiene arcilla, o
 - c. Más de [12 + (porcentaje de arcilla multiplicado por 0.1)]%, si la fracción mineral tiene menos de 60% de arcilla.”

El SSS (1999) define, además, los **suelos orgánicos** como:

“Los suelos orgánicos son suelos que tienen materiales orgánicos que:

1. No tienen propiedades ándicas en 60% o más del espesor comprendido entre la superficie del suelo y alguna de las siguientes profundidades (la que sea más superficial): hasta 60 cm o hasta un contacto denso, lítico o paralítico o hasta un duripán, y
2. Cumple uno o más de los siguientes requisitos:
 - a. Está sobre materiales cenicientos, fragmentales o pumíceos y/o llenando sus intersticios y directamente por debajo de esos materiales hay un contacto denso, lítico o paralítico, o
 - b. Cuando se mezclan con los materiales cenicientos, fragmentales o pumíceos subyacentes, tienen un espesor total de 40 cm o más entre la superficie del suelo y una profundidad de 50 cm, o
 - c. Constituye dos tercios o más del espesor total del suelo hasta un contacto denso, lítico o paralítico y no tiene horizontes minerales o tiene horizontes minerales con un espesor total de 10 cm o menos, o
 - d. Están saturados con agua por 30 días o más durante el año, en la mayoría de los años normales, o están drenados artificialmente, tienen su límite superior dentro de los 40 cm superficiales del suelo y tienen alguno de los siguientes espesores:
 - i. 60 cm o más, si tres cuartas partes o más de su volumen consta de fibras de musgo o si su densidad aparente, en húmedo, es menor de 0.1 g cm⁻³, o
 - ii. 40 cm o más, si consta de materiales sápicos o hémicos, o de materiales fíbricos con menos de tres cuartas partes (por volumen) de fibras de musgo y una densidad aparente, en húmedo; de 0.1 g cm⁻³ o más, o
 - e. Ocupan 80% o más del volumen del suelo, desde la superficie hasta una profundidad de 50 cm, o hasta unas capa glácica o hasta un contacto denso, lítico o paralítico, lo que sea más superficial.”

En términos generales, un suelo se clasifica como orgánico cuando más de la mitad de sus primeros 80 cm son orgánicos o cuando el material orgánico, de cualquier espesor, descansa sobre la roca o sobre material fragmental cuyos intersticios están llenos con material orgánico (SSS, 1999). Muchos Andisoles, debido a la gran acumulación de materia orgánica que pueden exhibir, originada en la formación de complejos estables Al – humus, pueden cumplir los requerimientos de contenido orgánico como para que sean clasificados como suelos orgánicos; sin embargo, según el SSS (1999), debido a la importancia que tiene la fracción inorgánica en las propiedades de estos suelos, ellos se deben clasificar como suelos minerales.

El SSS (1999) establece que un suelo mineral no debe tener cantidades mayores de materiales orgánicos que las establecidas para los **epipedones hísticos**, los cuales se definen como:

“Una capa (uno o más horizontes) que está saturada con agua 30 días o más, acumulativos, y que presenta reducción durante algún tiempo en años normales (si no está drenada artificialmente) y que:

1. *Consta de materiales orgánicos que:*
 - a. *Tienen 20 a 60 cm de espesor y que o contienen 75% o más, en volumen, de fibras de **Sphagnum** o tienen una densidad aparente, en húmedo, menor a 0.1 g cm^{-3} , o*
 - b. *Tienen 20 a 40 cm de espesor, o*
2. *Es un horizonte Ap que, cuando se mezcla hasta una profundidad de 25 cm, tiene un contenido de carbono orgánico, por peso, como sigue:*
 - a. *16% o más, si la fracción mineral contiene 60% o más de arcilla, o*
 - b. *8% o más, si la fracción mineral no tiene arcilla, o*
 - c. *[8 + (porcentaje de arcilla dividido por 7.5)% o más, si la fracción mineral contiene menos de 60% de arcilla.”*

En la taxonomía de suelos del USDA (SSS, 1999, 1998; ver Capítulo 20), los suelos orgánicos se clasifican en el orden **Histosol** y en el suborden **Histel** del orden **Gelisol**. Para establecer las categorías de suborden, gran grupo y subgrupo se utilizan los siguientes criterios diferenciales:

- Suborden:** Tiempo de saturación con agua.
Tipos de materiales orgánicos presentes.
- Gran grupo:** Tiempo de saturación con agua.
Grado de descomposición de los materiales orgánicos.
Régimen de humedad.
Origen de las fibras.
Presencia de sulfuros y de sulfatos.
Presencia de humus iluvial.
Presencia de materiales gélidos (con crioturbación).
- Subgrupo:** Presencia de capas de agua dentro del perfil del suelo.

Presencia de contactos líticos.
 Presencia de capas de materiales minerales.
 Presencia de fibras de *Sphagnum*.
 Presencia de materiales límnicos, fíbricos, hémicos o sápicos.
 Presencia de sales.
 Presencia de materiales gélidos (con crioturbación).

Con los criterios expuestos en el párrafo anterior se definieron las clases de suelos que se presentan, en el orden Histosol (terminación ist en la columna de suborden) y en el suborden Histel, en la Tabla 18.5.

TABLA 18.5. Clases de suelos orgánicos al nivel de suborden, gran grupo y subgrupo en el sistema taxonómico del USDA. En gran grupo y subgrupo se presentan sólo los elementos formativos (Tomadas de SSS, 1998).

SUBORDEN	GRAN GRUPO	SUBGRUPO
Folist	Cryo	Lithic, Typic
	Torri	Lithic, Typic
	Usti	Lithic, Typic
	Udi	Lithic, Typic
Fibrist	Cryo	Hydric, Lithic, Terric, Fluvaquentic, Sphagnic, Typic
	Sphagno	Hydric, Lithic, Limnic, Terric, Fluvaquentic, Hemic, Typic
	Haplo	Hydric, Lithic, Limnic, Terric, Fluvaquentic, Hemic, Typic
Saprist	Sulfo	Typic
	Sulfi	Terric, Typic
	Cryo	Lithic, Terric, Fluvaquentic, Typic
	Haplo	Lithic, Limnic, Halic Terric, Halic, Terric, Fluvaquentic, Hemic, Typic
Hemist	Sulfo	Typic
	Sulfi	Terric, Typic
	Luvi	Typic
	Cryo	Hydric, Lithic, Terric, Fluvaquentic, Typic
	Haplo	Hydric, Lithic, Limnic, Terric, Fluvaquentic, Fibric, Sapric, Typic
Histel	Folist	Lithic, Glacic, Typic
	Glacist	Hemic, Sapric, Typic
	Fibrist	Lithic, Terric, Fluvaquentic, Sphagnic, Typic
	Hemist	Lithic, Terric, Fluvaquentic, Typic
	Saprist	Lithic, Terric, Fluvaquentic, Typic

Al nivel de familia, en los Histosoles y en los Histels se definen las clases mediante los siguientes criterios:

- Tamaño de partículas.
- Mineralogía, incluyendo la naturaleza de los depósitos límnicos.
- Reacción.
- Régimen de temperatura.
- Espesor.

5. DISTRIBUCIÓN DE LOS SUELOS ORGÁNICOS EN COLOMBIA

En Colombia los suelos orgánicos se presentan en todos los pisos climáticos, siendo abundantes en planicies lacustres de páramos y altiplanos fríos y templados, así como en basines de clima cálido en el bajo Magdalena (Jaramillo et al, 1994).

Según estudios del IGAC, reportados por López y Cortés (1978) y por Malagón et al (1995), las áreas más extensas con este tipo de suelos se presentan en el valle del río Atrato, en planicies costeras y mal drenadas de los litorales caribe y pacífico, en los páramos altos, en el altiplano cundiboyacense y en el valle del Sibundoy, en el Putumayo. Según Mejía, citado por Malagón et al (1995), los suelos orgánicos, en Colombia, ocupan un área de 230 000 ha.

En el país se han publicado muy pocos estudios relacionados con estos suelos, siendo los más completos los que se realizaron en los valles de Sibundoy (Putumayo) y de San Miguel de Sema (Boyacá), por López y Cortés (1978).

RECORDAR

- Los suelos orgánicos se forman a partir de depósitos de materiales orgánicos que se han acumulado en ambientes saturados con agua.
- Los procesos pedogenéticos más importantes en el desarrollo de los suelos orgánicos son Maduración, Humificación y Bioturbación.
- Los suelos orgánicos tienen alto contenido de carbono orgánico, alta CIC, alta capacidad de retención de humedad, baja densidad aparente, alta acidez y baja fertilidad.
- Los suelos orgánicos pueden utilizarse en explotaciones agropecuarias y forestales y son importantes sitios de conservación de vida silvestre; no son aptos para la construcción de obras civiles sobre ellos.
- Los materiales orgánicos que componen estos suelos se utilizan como combustible, sustrato para invernaderos, soporte para inoculantes microbiológicos, como fuente de productos químicos para algunas industrias y como material para limpiar aguas residuales.
- Para someter los suelos orgánicos a uso agropecuario hay que hacer drenaje, fertilizar y aplicar riego.
- Si el drenaje es excesivo hay pérdida de suelo, subsidencia, alta susceptibilidad a la erosión y a los incendios, compactación e hidrofobicidad.
- Los suelos orgánicos se agrupan, taxonómicamente, en el orden Histosol y en el suborden Histel del orden Gelisol.
- El grado de descomposición de los materiales es un criterio muy importante de clasificación de los suelos orgánicos.
- En Colombia, las áreas que presentan mayor cantidad de suelos orgánicos son el andén pacífico, la costa caribe, la planicie del río Atrato, los páramos y algunos altiplanos cordilleranos.

BIBLIOGRAFÍA

- ABAD, M. y N. NOGUERA. 1998. Inventario de materiales orgánicos para cultivos sin suelo. Características más importantes. Sus ventajas e inconvenientes. **In:** Residuos orgánicos: Aprovechamiento agrícola como abono y sustrato. 2^a Ed. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS) - Universidad Nacional de Colombia. Medellín. pp. 92-104.
- BUOL, S. W.; F. D. HOLE; R. J. McCRAKEN. and R. J. SOUTHARD. 1997. Soil Genesis and Classification. 4^a. Ed. Iowa State University Press. Iowa U. S. A. 527 p.
- CLYMO, R. S. 1983. Peat. Chapter 4. **In:** Mires: Swamp, Bog, Fen and Moor. A general studies. Gore A. J. P. editor. Elsevier Scientific Publishing Company. Ámsterdam. pp. 159-224.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC). 1980. Estudio general de suelos de la región del Darién. IGAC. Bogotá. 654 p.
- JARAMILLO, D. F.; L. N. PARRA y L. H. GONZÁLEZ. 1994. El recurso suelo en Colombia: Distribución y evaluación. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 88 p.
- LÓPEZ, A. y A. CORTÉS. 1978. Los suelos orgánicos de Colombia: Su origen, constitución y clasificación. IGAC. Bogotá. 190 p.
- MALAGÓN, D.; C. PULIDO; R. LLINÁS y C. CHAMORRO. 1995. Suelos de Colombia: Origen, evolución, clasificación, distribución y uso. IGAC. Bogotá. 632 p.
- OROZCO, F. H. 1999. Biología del nitrógeno. Conceptos básicos sobre sus transformaciones biológicas. Tomo I. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín. 231 p.
- PORTA, J.; M. LÓPEZ – ACEVEDO y C. ROQUERO. 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi Prensa. Madrid. 807 p.
- SOIL SURVEY DIVISION STAFF (SSDS). 1993. Soil survey manual. Handbook No. 18. United States Department of Agriculture (USDA). Washington D. C. 437 p.
- SOIL SURVEY STAFF. (SSS) 1999. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2^a. Ed. Agriculture Handbook Nº 436. Soil Survey Staff. Washington D. C. 869 p.
- SOIL SURVEY STAFF. (SSS). 1998. Keys to Soil Taxonomy. 8^a. Ed. Soil Survey Staff. Washington D. C. 326 p.

AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Cómo se definen turbera, turba y suelo orgánico?.
2. ¿Cuál es la condición indispensable para que se acumulen los materiales orgánicos que dan origen a los Histosoles?.
3. Diga 4 procesos pedogenéticos fundamentales en el desarrollo de los suelos orgánicos.
4. Los suelos orgánicos sólo pueden formarse en climas fríos húmedos?. Explique.
5. Enumere y califique 5 propiedades de los suelos orgánicos.
6. ¿Cómo afecta el grado de descomposición del material el drenaje de los suelos orgánicos?. Sustente brevemente su respuesta.
7. ¿Para qué tipo de explotaciones se utilizan con mayor frecuencia los suelos orgánicos y para cuál tipo de uso tienen restricciones severas?.

8. Enumere 3 prácticas de manejo casi indispensables en todos los suelos orgánicos, cuando se quieren someter a uso agropecuario.
9. ¿Cómo puede afectar el drenaje excesivo a los suelos orgánicos?.
10. ¿Cuál es el principal criterio diferencial para clasificar los suelos orgánicos al nivel de suborden?.
11. ¿En qué regiones de Colombia son abundantes los suelos orgánicos?.

EVALUACIÓN

Consultar cómo se clasifican taxonómicamente los suelos orgánicos en el sistema FAO/UNESCO.

SUELOS ORGÁNICOS	457
CAPÍTULO 18	457
1. ORIGEN DE LOS SUELOS ORGÁNICOS.....	459
1.1. LAS TURBAS.....	459
1.1.1. Propiedades	459
1.1.2. Tipos	459
1.2 PEDOGÉNESIS	461
2. PROPIEDADES DE LOS SUELOS ORGÁNICOS.....	461
3. USO Y MANEJO DE LOS SUELOS ORGÁNICOS.....	463
4. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA DE LOS SUELOS ORGÁNICOS.....	464
5. DISTRIBUCIÓN DE LOS SUELOS ORGÁNICOS EN COLOMBIA	467
BIBLIOGRAFÍA	469
AUTOEVALUACIÓN	469
EVALUACIÓN.....	470

EL ESTUDIO ESPACIAL DE LOS SUELOS

PARTE 6

EL ESTUDIO ESPACIAL DE LOS SUELOS

TIPOS DE LEVANTAMIENTOS DE SUELOS

- ❖ Tipos de levantamientos de suelos
- ❖ Metodología para hacer los levantamientos de suelos

LA CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

- ❖ Objetivos de un sistema de clasificación
- ❖ El sistema USDA de clasificación de suelos
- ❖ El sistema FAO/UNESCO de clasificación de suelos
- ❖ El sistema Brasílico de clasificación de suelos

CARTOGRAFÍA DE SUELOS

- ❖ Delimitación
- ❖ El mapa de suelos

EL INFORME DEL LEVANTAMIENTO DE SUELOS

- ❖ La memoria técnica
- ❖ El uso de los informes de levantamientos de suelos

VARIABILIDAD DE LAS PROPIEDADES DE LOS SUELOS

- ❖ Variabilidad de las propiedades del suelo
- ❖ Variabilidad espacial de suelos

SUELOS DE COLOMBIA

- ❖ Regiones naturales de Colombia
- ❖ Aptitud de uso agropecuario de los suelos colombianos
- ❖ Limitantes para el uso agropecuario de los suelos colombianos

L

os levantamientos o estudios de reconocimiento de suelos son estudios que tratan de:

- Establecer la distribución de los suelos de una zona.
- Explicar por qué están ahí.
- Representar su distribución en un mapa.
- Dar pautas para su uso eficiente y racional.

De esta manera, el usuario de este recurso tiene la información necesaria para planificar sus actividades en él.

En los capítulos siguientes se pretende dar una información básica acerca de lo que son los levantamientos de suelos, sus características, su ejecución y su utilización como documento que suministra una valiosa ayuda en la planificación del uso racional de este recurso.

TIPOS DE LEVANTAMIENTOS DE SUELOS

CAPÍTULO 19

CONTENIDO

- ❖ Tipos de levantamientos de suelos
 - Levantamientos exploratorios
 - Levantamientos generales
 - Levantamientos semidetallados
 - Levantamientos detallados

- ❖ Metodología para hacer los levantamientos de suelos
 - Etapa preliminar de oficina
 - Revisión de literatura
 - Fotointerpretación preliminar
 - Programación del trabajo de campo
 - Etapa de campo
 - Etapa final de oficina

OBJETIVOS

- ❖ Conocer las características y aplicaciones de los diferentes tipos de levantamientos de suelos que se hacen con mayor frecuencia en Colombia

- ❖ Conocer los métodos que se emplean para llevar a cabo los levantamientos de suelos

S

e entiende por **levantamiento de suelos** el conjunto de investigaciones necesarias para **caracterizar, clasificar, delimitar y representar**, en un mapa, los diferentes suelos de una región, para luego **interpretar** la aptitud que tienen para un uso determinado y **predecir** su comportamiento y productividad bajo diferentes sistemas de manejo (Forero, 1984). El concepto levantamiento de suelos puede considerarse sinónimo de “mapeo de suelos”.

El proceso de caracterizar un suelo consiste en describir y cuantificar, hasta donde sea posible, sus **características** (rasgos que pueden medirse o estimarse), de modo que se puedan establecer sus **propiedades** (rasgos derivados de la interacción de características) y deducir sus **cualidades** (comportamientos definidos por la interacción de características y propiedades); estos elementos pueden ser evaluados en el campo, mediante el estudio del perfil del suelo o en el laboratorio, mediante análisis más detallados.

En los capítulos anteriores, se ha presentado la información requerida para llevar a cabo el proceso de caracterización del suelo y, por esta razón, no se tratarán aquí. Los otros aspectos que tienen que ver con el levantamiento de suelos serán tema de los próximos capítulos.

No siempre se requiere conocer el suelo con el mismo grado de detalle, razón por la cual se han diseñado diferentes tipos de levantamientos de manera que puedan realizarse los estudios con la intensidad que se ajuste a las necesidades y objetivos de ellos; lo anterior implica que hay notorias diferencias entre la información suministrada por los diferentes tipos de estudios de suelos, así como en sus aplicaciones.

1. TIPOS DE LEVANTAMIENTOS DE SUELOS

En Colombia, el Centro Interamericano de Fotointerpretación (CIAF) propuso siete niveles de Levantamientos de Suelos, diferenciados entre sí por los objetivos que perseguía cada uno, lo cual genera diferencias en los métodos de trabajo; especificaciones completas de ellos se pueden encontrar en Botero et al (1977), Forero (1984) y Cortés y Malagón (1984); posteriormente, se eliminó el levantamiento de séptimo orden, quedando actualmente definidos 6 niveles (Malagón, 1986; Elbersen et al, 1986).

Los órdenes de levantamientos, que se utilizan actualmente, se denominan con la siguiente nomenclatura: Primer Orden o **Muy Detallado**, Segundo Orden o **Detallado**, Tercer Orden o **Semidetallado**, Cuarto Orden o **General**, Quinto Orden o **Exploratorio** y Sexto Orden o **Esquemático**.

Según Malagón (1985, 1986), los levantamientos más importantes en el país, por el área que cubren, son:

- Exploratorio, que cobija la Amazonia y el Choco.
- General, que abarca casi toda la zona andina, los Llanos Orientales, la Costa Atlántica y aproximadamente una tercera parte de la Costa Pacífica.

- Semidetallado, que cubre gran parte de la Costa Atlántica, la parte plana del Valle del Cauca, parte del Magdalena Medio, el altiplano Cundinamarqués y otras zonas pequeñas en varias regiones del país.
- Detallado, que comprende varias zonas de gran desarrollo agropecuario ubicadas en la parte plana del Valle del Cauca y de la Sabana de Bogotá, así como aquellos sitios donde se han establecido distritos de riegos y drenajes y granjas experimentales.

Las características más importantes de los levantamientos, mencionados en el párrafo anterior, se exponen a continuación, seleccionadas de Elbersen et al (1986). Para hacer las descripciones es necesario utilizar algunos términos específicos, los cuales serán aclarados en numerales posteriores.

1.1. LEVANTAMIENTOS EXPLORATORIOS

Este tipo de levantamiento se hace en zonas extensas y/o poco accesibles, con cualquier tipo de relieve, con muy baja intensidad de trabajo de campo, con potencial desconocido y bajo o nulo desarrollo. El objetivo primordial es identificar áreas con diferentes potenciales de uso y definir, en consecuencia, aquellas áreas que ameritan estudios más detallados.

La información que suministra este tipo de levantamiento es demasiado general y la **escala** a la cual se publican sus mapas (ver numeral 2.1, Capítulo 21) no permite una ubicación correcta de pequeñas áreas; las **unidades de mapeo** (ver numeral 2.2, Capítulo 21) que utilizan presentan gran variabilidad en los suelos que representan, por lo cual se comprende fácilmente la imposibilidad de usar estos estudios para fines diferentes a los regionales muy amplios; no se va a encontrar en ellos solución a problemas específicos de localidad pequeña o de vereda y, mucho menos, de finca o de parcela.

1.2. LEVANTAMIENTOS GENERALES

Este tipo de levantamiento se realiza en amplias zonas, desde planas a onduladas de bajo desarrollo o áreas montañosas con alto a medio desarrollo, con accesibilidad limitada y moderado potencial agropecuario; la intensidad de trabajo de campo es baja y se hacen fundamentalmente en zonas que actualmente no requieren estudios con más detalle.

La información que suministran estos estudios permite formular recomendaciones generales de manejo para las explotaciones que se encuentran en la zona, así como para el diagnóstico y planeación general de cuencas hidrográficas; además, es el nivel de máxima generalización que debe recomendarse, dentro de los estudios básicos biofísicos necesarios para establecer los planes de ordenamiento territorial departamentales, en lo que respecta a suelos. Siguen presentando limitaciones para ser usados en áreas pequeñas pues la unidad cartográfica que más utiliza es la asociación y la escala de publicación de sus mapas es de 1:100000.

1.3. LEVANTAMIENTOS SEMIDETALLADOS

Los levantamientos correspondientes a este nivel se llevan a cabo en aquellas zonas que van desde planas a onduladas que presentan un alto potencial agropecuario, alto a medio desarrollo, con buena a moderada accesibilidad y con una intensidad media de trabajo de campo.

El fin primordial de éstos estudios es realizar la planeación técnica del uso y manejo del suelo con explotaciones semi-intensivas. Son la base para establecer las especificaciones de anteproyectos y por ello deben ser precursores de los estudios detallados. Además, pueden ser utilizados, junto con los detallados, como los documentos básicos de suelos para definir los planes de ordenamiento territorial municipales (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, 1997).

El uso de la información que suministran también se ve algo restringido en áreas pequeñas, ya que la escala a la cual se publican es generalmente de 1:50000; en áreas de extensión apropiada, el limitante de la escala puede subsanarse, en parte, ya que las unidades de mapeo utilizadas preferentemente son las consociaciones, con lo cual se purifica bastante la información pedológica suministrada.

No obstante, aunque el detalle y la precisión de este levantamiento son considerablemente mayores que en los anteriores, todavía no son suficientes para resolver problemas prediales muy específicos.

1.4. LEVANTAMIENTOS DETALLADOS

Se desarrollan estos levantamientos con una intensidad alta de trabajo de campo en aquellas áreas de alto potencial agropecuario, con avanzado desarrollo, planas o casi planas y prácticamente sin limitaciones de acceso; tiene unos objetivos muy específicos como:

- Planear el uso intensivo de la tierra.
- Efectuar avalúos catastrales.
- Evaluar el potencial de producción de una zona para implementar proyectos de riego y drenajes o para establecer granjas experimentales.
- Reconocer áreas afectadas por problemas especiales de suelos como salinidad, etc.

Con los levantamientos detallados se obtiene un amplio conocimiento del suelo, tanto de sus cualidades como de su extensión y ubicación, ya que exigen un intenso trabajo de campo. Dependiendo de los objetivos específicos propuestos para el estudio, éste puede suministrar información para resolver problemas prediales; su principal limitante para ser usado radica en el elevado costo que tiene su realización.

Aparte de las diferencias que se han expuesto, en los párrafos anteriores, entre los tipos de levantamientos que se han analizado, debe tenerse claro, como lo expresan Elbersen et al (1986), que “*en los levantamientos detallados el edafólogo trata de separar todo aquello que pueda separarse, en tanto que en los demás, el objetivo es unir todos aquellos suelos que puedan juntarse, obviamente, dentro de ciertos límites*”.

Cualitativamente, pueden establecerse algunas características de los levantamientos mencionados anteriormente, como se muestra en la Tabla 19.1; de esta información se pueden deducir algunas de las limitaciones que presentan los levantamientos mencionados, tanto desde el punto de vista de su ejecución como del de su utilización.

TABLA 19.1. Algunas cualidades de diferentes tipos de levantamientos de suelos.

Tipo de levantamiento	Intensidad del trabajo de campo	Conocimiento del suelo	Accesibilidad	Homogeneidad de unidades cartográficas	Aplicabilidad
Detallado	Muy alta	Muy alto	Alta	Muy alta	Local a casi puntual
Semidetallado	Alta	Alto	Media a alta	Alta	Local a regional
General	Baja	Medio a Bajo	Baja	Baja	Regional
Exploratorio	Muy baja	Bajo a muy bajo	Baja a muy baja	Muy baja	Regional muy amplia

En la actualidad, en las zonas de mayor desarrollo agropecuario y socioeconómico y con miras a implementar sistemas de manejo más eficientes: menores costos de producción, excelente calidad de los productos, competitividad en los mercados internacionales y conservación de un ambiente sano, es recomendable llevar a cabo estudios **ultradetallados** de suelos, con apoyo de la **geoestadística**, que permitan conocer mejor el suelo y su variabilidad espacial, de modo que se pueda optar por tener una **agricultura de precisión** o un manejo de suelos por **sitio específico** (ver Capítulo 23).

2. METODOLOGÍA PARA HACER LOS LEVANTAMIENTOS DE SUELOS

Un levantamiento de suelos se lleva a cabo en varias etapas, como se describe a continuación.

2.1. ETAPA PRELIMINAR DE OFICINA

Se desarrolla en tres fases fundamentales: Revisión de literatura, fotointerpretación preliminar y programación del trabajo de campo.

2.1.1. Revisión de literatura

Se debe conocer el medio físico de la zona de estudio; por lo tanto, se debe conseguir información acerca de todos los factores que pueden intervenir en el desarrollo de los suelos y en el uso de la tierra, tales como geología, geomorfología, climatología, hidrología, etc.; de este modo se tiene una visión amplia del ambiente en el cual se han desarrollado los suelos que se van a estudiar.

2.1.2. Fotointerpretación preliminar

La **fotointerpretación**, es decir, el análisis de imágenes de sensores remotos (fotografías aéreas, imágenes de radar o de satélite, principalmente) para deducir el significado que tienen los elementos representados en ellas y tratar de relacionarlos con la distribución de los suelos. Ésta es una herramienta indispensable cuando se trata de hacer levantamientos modernos.

La utilización de esta técnica reduce los costos del estudio ya que reduce, en buena medida, el tiempo de trabajo, aparte de que mejora la calidad del estudio. La fotointerpretación permite establecer relaciones espaciales en áreas grandes que en el terreno pueden pasar desapercibidas, por lo cual, la mayoría de las veces, los límites de suelos establecidos con ayuda de la fotointerpretación son más precisos que aquellos trazados directamente en el campo.

La base para hacer esta fotointerpretación preliminar es la **Fisiografía**, la cual definen Botero et al (1996) y Botero et al (1997), desde el punto de vista edafológico, como “el estudio, caracterización y categorización de los paisajes terrestres, especialmente, aunque también se han incluido los acuáticos”; según el mismo autor, se preocupa la fisiografía por analizar los factores de formación del paisaje, que son los mismos que los del suelo, y de los procesos que los afectan.

Esta fotointerpretación preliminar se lleva a cabo mediante el **análisis fisiográfico**, el cual es un método moderno de interpretar imágenes de la superficie del terreno para establecer la relación paisaje (fisiográfico) – suelo (Villota, 1997). Este análisis, según Botero (1978, 1997), relaciona la fisiografía con el patrón de distribución de los suelos y de la cobertura vegetal natural de un área.

Mediante el análisis fisiográfico se lleva a cabo una zonificación del terreno que, según Botero et al (1997), puede ser aplicada a aquellos estudios que involucran el medio natural. El análisis fisiográfico es jerárquico, por lo que la zonificación del terreno puede hacerse en diferentes niveles de abstracción, lo que permite utilizarlo en diferentes tipos de estudios.

En la última propuesta de análisis fisiográfico, realizada por Villota (1997), se definen 5 niveles de clasificación de las unidades fisiográficas: Provincia fisiográfica, unidad climática, gran paisaje, paisaje y subpaisaje; en el Capítulo 21 se analiza con mayor detalle.

Un análisis más detallado del análisis fisiográfico está por fuera de los objetivos de este texto; sin embargo, vale la pena puntualizar que, desde el punto de vista de la cartografía de suelos, la unidad fisiográfica fundamental es el **Paisaje**, ya que él está definido como una porción tridimensional del terreno en la cual todos los factores de formación de los suelos están actuando de una manera similar y, por lo tanto, se espera que en él se presente una alta similitud entre los suelos que lo componen.

2.1.3. Programación del trabajo de campo

Los aspectos más importantes de esta fase son:

- Definir las áreas que se van a trabajar con mayor intensidad en el campo.
- Puntualizar las dudas que se deban resolver en el sitio.
- Confirmar que los materiales y equipos necesarios están completos y funcionando correctamente.

2.2. ETAPA DE CAMPO

Ningún estudio de suelos puede desarrollarse únicamente con trabajo de oficina, puesto que la caracterización exige la observación y el análisis de los perfiles del suelo; aparte de caracterizar el suelo, el trabajo de campo permite desarrollar otras actividades como:

- Confrontar y actualizar la información recolectada en la revisión bibliográfica.
- Actualizar las imágenes, si son viejas, adicionándoles detalles que no aparezcan en ellas y que sean importantes como sitios de referencia y ubicación, por ejemplo, carreteras, caminos, puentes, construcciones, etc.; además, en este caso, se pueden establecer los cambios que ha sufrido la zona a través del tiempo.
- Apreciar las condiciones socioeconómicas de la zona.
- Observar el uso y manejo que se está haciendo de los suelos.
- Verificar los límites trazados en la fotointerpretación preliminar.
- Establecer la relación paisaje - suelo - imagen, necesaria para poder hacer la extrapolación de información a las zonas estudiadas con menor detalle en el campo.
- Definir el patrón de distribución de los suelos.
- Establecer los limitantes de uso que presentan los suelos.
- Clasificar taxonómicamente los suelos.
- Establecer límites de suelos que no se definieron en la fotointerpretación preliminar.
- Establecer los rangos de características de las clases de suelos definidas.
- Definir algunas unidades de mapeo.
- Describir los **perfiles modales** (ver numeral 1.7, Capítulo 22) de cada clase de suelos.
- Colectar las muestras de suelos necesarias para análisis de laboratorio.
- Resolver dudas traídas de la oficina.

Las actividades más importantes del trabajo de campo son, sin duda, la caracterización y clasificación de los suelos, la revisión y establecimiento de los límites definitivos de las unidades de suelos que se van encontrando (fotointerpretación ajustada) y el establecimiento de las relaciones paisaje – suelo – imagen – uso de la tierra.

2.3. ETAPA FINAL DE OFICINA

Concluido el trabajo de campo, se hace necesario dar los toques finales al estudio; para ello se realizan cuatro actividades fundamentales:

- Ajuste final de la fotointerpretación.
- Interpretación del levantamiento.
- Compilación del informe.
- Elaboración de los mapas correspondientes.

El ajuste final de la fotointerpretación consiste en definir los límites finales de los suelos, mediante la extrapolación de la información obtenida en las áreas que se estudiaron con más detalle en el campo

(áreas de muestreo) a las áreas que se trabajaron con menor énfasis; los otros tópicos serán tema de próximos capítulos.

RECORDAR

- En un levantamiento de suelos se pretende caracterizar, clasificar, delimitar y representar en mapas la distribución de los suelos de una zona e interpretar sus posibilidades de uso.
- El suelo se puede estudiar con diferentes grados de detalle lo que define diferentes tipos de levantamientos de suelos.
- Los levantamientos más comunes en el país son el general y el semidetallado; el detallado sólo en pequeñas áreas y para fines muy específicos y especiales.
- La realización de un levantamiento de suelos se hace en tres etapas.
- La delimitación de las unidades de suelos se hace por fotointerpretación y utilizando el análisis fisiográfico como herramienta fundamental.
- La principal unidad fisiográfica es el Paisaje porque en ella todos los factores de formación de suelos actúan en forma similar.

BIBLIOGRAFÍA

BOTERO, P. J. 1978. Interpretación de imágenes para estudios de suelos: Notas de clase. Centro Interamericano de Fotointerpretación (CIAF). Bogotá. 292 p.

BOTERO, P. J.; B. JIMÉNEZ; N. RODRÍGUEZ; J. M. HERRERA; J. V. RODRÍGUEZ; Y. MENDOZA y A. PINILLA. 1997. Estudio fisiográfico de la Orinoquia - Amazonia colombiana. Revista CIAF 15(1): 7-62.

BOTERO, P. J.; B. JIMÉNEZ; J. M. HERRERA; L. A. CASTILLO; N. RODRÍGUEZ; A. DUQUE y Y. MENDOZA. 1996. Inestabilidad de los paisajes en Orinoquia-Amazonia ORAM. Séptimo Congreso Colombiano de Geología. Santafé de Bogotá. 13 p.

BOTERO, P. J.; S. T. BENAVIDES y G. W. ELBERSEN. 1977. Una metodología para levantamientos edafológicos. Suelos Ecuatoriales 8(1):432-441.

CORTÉS, A. y D. MALAGÓN. 1984. Los levantamientos agrológicos y sus aplicaciones múltiples. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá. 360 p.

ELBERSEN, G. W.; S. T. BENAVIDES y P. J. BOTERO. 1986. Metodología para levantamientos edafológicos. Segunda parte: Especificaciones y manual de procedimientos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá. 82 p.

FORERO, M.C. 1984. Métodos de levantamientos de suelos (primera parte). CIAF. Bogotá. 83 p.

INSTITUTO GEOGRÁFICO “AGUSTÍN CODAZZI”. (IGAC). 1997. Guía metodológica para la formulación del plan de ordenamiento territorial municipal. IGAC. Santafé de Bogotá. 186 p.

MALAGÓN, D. 1986. Levantamientos de suelos en Colombia: Importancia, realizaciones y proyectos. Suelos Ecuatoriales 16(1): 41-51.

MALAGÓN, D. 1985. Aplicación de la taxonomía de suelos del USDA en la correlación y cartografía de los suelos de Colombia. Metas futuras. Suelos Ecuatoriales 15(1): 36-48.

VILLOTA, H. 1997. Una nueva aproximación a la clasificación fisiográfica del terreno 1977. Revista CIAF 15(1): 83-115.

AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Qué es hacer un levantamiento de suelos?.
2. ¿Cuáles son los 4 tipos de levantamientos de suelos más comunes en Colombia?. ¿Cuáles son sus principales aplicaciones?.
3. ¿Cuál es la diferencia fundamental entre el levantamiento detallado de suelos y los demás?.
4. ¿Cuáles son las etapas que se siguen para hacer un levantamiento de suelos y cuáles son las actividades específicas principales que se llevan a cabo en cada una de ellas?.
5. ¿Qué es fisiografía?. ¿Análisis fisiográfico?.
6. Para los levantamientos de suelos ¿cuál es la unidad fisiográfica fundamental?. ¿Por qué?.

LA CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

CAPÍTULO 20

CONTENIDO

- ❖ Objetivos de un sistema de clasificación
- ❖ El sistema USDA de clasificación de suelos
 - Atributos
 - Principios básicos
 - El suelo que se clasifica
 - Suelo mineral y suelo orgánico
 - Características diagnósticas
 - Epipedones
 - Endopedones
 - El clima edáfico
 - Otras características diagnósticas
 - Categorías
 - Las clases
 - Nomenclatura
 - Procedimiento para clasificar un suelo con el sistema USDA
 - Algunos problemas en la clasificación de suelos con el sistema USDA
- ❖ El sistema FAO/UNESCO de clasificación de suelos
- ❖ El sistema Brasilero de clasificación de suelos

OBJETIVOS

- ❖ Conocer el sistema de clasificación de suelos del USDA: Entender su nomenclatura y conocer y aprender a manejar las claves utilizadas para clasificar los suelos en él
- ❖ Conocer el diseño y la nomenclatura de las categorías altas del sistema FAO/UNESCO de clasificación de suelos
- ❖ Conocer el diseño y la nomenclatura de las categorías altas del sistema Brasilero de clasificación de suelos

B

uol et al (1983) y Buol et al (1997) hacen una amplia exploración acerca de lo que ha sido la evolución de la clasificación de los suelos de la cual se retoma alguna información importante desde el punto de vista histórico.

En la última mitad del siglo XIX se hicieron los primeros intentos de clasificación de suelos en Europa y en Norteamérica; estas propuestas tuvieron una fuerte influencia geológica en la definición de las características que se utilizaron para diferenciar las clases de suelos estudiados.

Hacia finales del siglo XIX, Dokuchaev estudió los suelos de Rusia bajo una óptica genética que involucró los factores de formación del suelo y que desembocó en una propuesta de clasificación natural de suelos en 1886.

A comienzos del siglo XX, Sibirtsev y Glinka, discípulos de Dokuchaev, introdujeron en occidente los conceptos rusos sobre suelos y su clasificación, mediante la traducción al inglés de sus trabajos. En 1935, Marbut publicó en Estados Unidos de Norteamérica su propuesta de clasificación de suelos en un Atlas de los suelos de ese país. En los años siguientes se hicieron varias revisiones al sistema de Marbut hasta que en 1951 se decidió desarrollar un nuevo sistema de clasificación para los suelos de los Estados Unidos de Norteamérica. Para esta época, también se estaban diseñando nuevos sistemas de clasificación en varios países del mundo, incluyendo a Colombia con la propuesta elaborada por el Dr. Manuel del Llano, publicada en 1956 (Llano, 1956).

El desarrollo del nuevo sistema de clasificación se inició en el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), bajo la dirección del Dr. G. Smith y en 1960 se dio a conocer al público la primera versión completa del sistema, conocida como la 7^a aproximación: “**Soil classification: a comprehensive system-7th approximation**”.

La década de los 60's fue especialmente prolífica en sistemas de clasificación de suelos en el mundo:

- Se revisan los sistemas de clasificación rusos y se establece una nueva sistemática en 1968.
- En Bélgica, en Francia y en Canadá se proponen sendos sistemas de clasificación en 1962, 1964 y 1968, respectivamente.
- En Australia se presentan dos alternativas diferentes de sistemas: una natural en 1960 por Northcote y otra morfogenética en 1962, por Stephens.
- En Brasil se propone un sistema en 1964.
- En 1961 se inicia la elaboración del mapa de suelos del mundo por la FAO y la UNESCO que llevó a proponer un nuevo sistema de clasificación en 1968.

A medida que se fueron desarrollando trabajos donde se aplicaban los sistemas de clasificación propuestos inicialmente, se fueron haciendo ajustes a los mismos que los actualizaron o que produjeron nuevas propuestas:

- En el Reino Unido se presentó la última revisión en 1973, en Canadá en 1978 y en Brasil en 1987.
- En Sudáfrica se generó un nuevo sistema en 1991 y en China en 1994.

- En 1988 se revisó la leyenda del mapa de suelos de la FAO/UNESCO y se planteó una nueva que se ha convertido en un nuevo sistema de clasificación.

En este capítulo se presenta una síntesis de las principales características del sistema de clasificación de suelos que se utiliza en Colombia, es decir, del **Sistema Taxonómico Norteamericano o del USDA** (Soil Survey Staff, SSS, 1999, 1998). Se presenta lo que corresponde a la clasificación de los suelos minerales, ya que en el Capítulo 18 se trató lo relacionado con la clasificación de los suelos orgánicos. Al final se hará un breve resumen del sistema utilizado en el mapa de suelos del mundo por la FAO/UNESCO, puesto que es muy utilizado en estudios de suelos de Europa, así como del sistema brasileño por la gran aplicación y adaptación que tiene a los suelos tropicales.

1. OBJETIVOS DE UN SISTEMA DE CLASIFICACIÓN

La etapa de la clasificación de los suelos, dentro de un levantamiento de suelos, consiste en ubicarlos dentro de un sistema taxonómico de clasificación que permita agrupar aquellos cuyas características y propiedades estén variando dentro de un rango de valores permisible para ese grupo, separándolos de aquellos que están en otros grupos.

Buol et al (1983) puntualizan que el hombre ha sentido la necesidad de clasificar los fenómenos naturales con los objetivos básicos de:

- Organizar el conocimiento.
- Entender las relaciones entre los individuos y los grupos de la población que analiza.
- Recordar propiedades de los objetos que estudia.
- Aprender nuevos principios y relaciones acerca de la población que estudia.
- Establecer clases con los objetos estudiados que le permitan:
 - Predecir su comportamiento.
 - Identificar su mejor uso.
 - Estimar su productividad.
 - Investigar los individuos y extrapolar el conocimiento que adquiere acerca de ellos.

Otro objetivo fundamental que debe cumplir cualquier sistema de clasificación es proporcionar una base lingüística que permita llevar a cabo una integración de conocimientos entre personas que por su origen, costumbres, idioma, etc., no tienen en común sino el objeto de su trabajo.

Los objetivos expuestos son aplicables a cualquier sistema de clasificación: **Científico** (natural) o **Técnico** (práctico). El sistema de clasificación de suelos del USDA, como apuntan Buol et al (1997), trata de acercarse a un sistema de clasificación natural, aunque tiene una fuerte tendencia a conceder importancia a propiedades relacionadas con el uso y manejo de aquellos.

La tendencia que destacan Buol et al (1997) en el párrafo anterior no debe sorprender pues, si se mira con atención el nombre que se le ha dado al documento en el cual se consigna el sistema de clasificación, se ve que esa es una de sus propiedades intrínsecas: “[Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys](#)” que en español se

traduce como “[Taxonomía de Suelos: Un Sistema Básico de Clasificación de Suelos para Hacer e Interpretar Levantamientos de Suelos](#)”.

2. EL SISTEMA USDA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS

El sistema cumple con los objetivos planteados en el numeral anterior y, aparte de que también sirve a los propósitos específicos de los levantamientos de suelos, tiene otras características, que se describen a continuación.

2.1. ATRIBUTOS

Según el SSS (1975, 1999), los levantamientos de suelos requieren un sistema de clasificación que permita relacionar los cuerpos naturales y los reales de suelos y que facilite el establecimiento de similitudes y diferencias entre ellos, para una gran variedad de propósitos. Con esta premisa se estableció el sistema de clasificación de suelos con los siguientes atributos:

- La definición de cada taxón tiene el mismo significado para todos los usuarios; ésto implica cambiar las definiciones subjetivas por mediciones o por valores concretos.
- El sistema es multicategórico, de modo que se puede adaptar a diferentes tipos de levantamientos, de acuerdo con las necesidades de detalle que éstos requieren.
- El taxón representa un cuerpo real de suelo que ocupa un área geográfica, lo que facilita el mapeo de los suelos.
- Las propiedades a utilizar para diferenciar suelos son mensurables, preferiblemente en el campo, o son deducibles de otras que sí lo sean.
- El sistema permite ser modificado para acomodarlo al nuevo conocimiento, con un mínimo de disturbación por esto.
- Los suelos sin disturbar y después de haber sido alterados por el hombre deben quedar clasificados en el mismo taxón, en lo posible.
- La taxonomía es capaz de proveer taxa para todos los suelos de un paisaje. Los suelos forman un continuum.
- La taxonomía provee taxa para todos los suelos conocidos.

2.2. PRINCIPIOS BÁSICOS

Según Buol et al (1983) y otros autores, citados por Mejía (1985), el sistema de clasificación de suelos del USDA cumple con los siguientes principios:

- **Base genética:** el conocimiento de la génesis de los suelos proporciona el marco de referencia para definir los criterios diferenciales.
- **Acumulación de diferencias:** las características diferenciales deben acumularse al ir pasando a categorías más bajas del sistema.
- **Inclusión total:** Todos los suelos deben tener la posibilidad de ser clasificados en cada categoría, según los criterios diferenciales definidos para ellas por el sistema.
- **Techo de separación intercategórica:** Una característica diferencial que se haya utilizado en una determinada categoría con un suelo, no puede volverse a utilizar como tal en categorías más bajas del sistema, con el mismo suelo.

Se ha mencionado, en párrafos anteriores, el concepto de **característica diferencial** o **diagnóstica**, el cual definen Elbersen et al (1986) como unas propiedades que solas o en

combinación con otras son exclusivas de un taxón; en términos prácticos puede decirse que son aquellas propiedades que se utilizan para definir los taxa del sistema de clasificación, las cuales, a su vez, agrupan suelos semejantes y separan estos grupos de otros diferentes.

2.3. EL SUELO QUE SE CLASIFICA

El sistema de clasificación de suelos del USDA (SSS, 1999) define su objeto de clasificación como “*un cuerpo natural, compuesto de sólidos (materiales minerales y orgánicos), líquidos y gases que ocurren en la superficie de la tierra, ocupan espacio y se caracterizan por tener horizontes y/o capas diferenciables del material inicial como resultado de las adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia o por la habilidad para soportar plantas enraizadas en un ambiente natural*”.

El límite superior del suelo está definido por el límite entre el suelo y el aire, las láminas delgadas de agua, las plantas vivas o los materiales vegetales que no se han descompuesto. Los límites laterales u horizontales del suelo son las áreas donde el suelo está gradando hacia aguas profundas, hacia áreas estériles, rocas o hielo (SSS, 1999).

El límite inferior que separa el suelo del no – suelo es más difícil de establecer. Para fines de clasificación, y si no se presentan antes contactos paralíticos u horizontes cementados gruesos que impidan el crecimiento de las raíces, el límite inferior del suelo se coloca a una profundidad arbitraria de 200 cm. Cuando se presentan los impedimentos mencionados, la profundidad del suelo va hasta el límite inferior del impedimento, pero sin ir más allá de los 200 cm (SSS, 1999).

El sistema de clasificación (SSS, 1999) también considera otra situación que puede presentarse comúnmente en ciertos paisajes, debido a su dinámica geomorfológica: los **suelos enterrados**. Un suelo se considera enterrado cuando está cubierto por un manto superficial de nuevos materiales que tienen o un espesor de 50 cm o más, o un espesor entre 30 y 50 cm que representa al menos la mitad del espesor total de los horizontes diagnósticos que se han preservado en el suelo enterrado. Además, todos los horizontes o capas que se encuentren por debajo de un epipedón plágico, se consideran enterrados.

2.4. SUELO MINERAL Y SUELO ORGÁNICO

El USDA (SSS, 1999) define un **suelo mineral** de la siguiente manera:

“*Los suelos minerales son suelos que*

1. *Tienen materiales minerales de suelo que cumplen uno o más de los siguientes requisitos:*
 - a. *Están sobre materiales cenicientos, fragmentales o pumíceos (eyectos volcánicos) y/o tienen huecos de modo que menos del 10% están llenos con materiales orgánicos y directamente por debajo de esos materiales hay un contacto denso, lítico o paralítico, o*

- b. Cuando se mezclan con los materiales cenicientos, fragmentales o pumíceos subyacentes, tienen un espesor total de más de 10 cm entre la superficie del suelo y una profundidad de 50 cm, o
 - c. Constituyen más de un tercio del espesor total del suelo hasta un contacto denso*, lítico* o paralítico* o tienen un espesor total de más de 10 cm, o
 - d. Si están saturados con agua por 30 días o más durante el año, en la mayoría de los años normales, o están drenados artificialmente y tienen materiales orgánicos con su límite superior dentro de los 40 cm superficiales del suelo, tienen alguno de los siguientes espesores:
 - i. Menos de 60 cm, si tres cuartas partes o más de su volumen consta de fibras de musgo o si su densidad aparente, en húmedo, es menor de 0.1 g cm^{-3} , o
 - ii. Menos de 40 cm, si consta de materiales sápicos o hémicos, o de materiales fibricos con menos de tres cuartas partes (por volumen) de fibras de musgo y una densidad aparente, en húmedo; de 0.1 g cm^{-3} o más, o
2. Más de 20%, en volumen, de materiales minerales de suelo desde la superficie de éste hasta una profundidad de 50 cm o hasta una capa glácica* o un contacto denso, lítico o paralítico, lo que esté más superficial, y
- a. Permafrost* dentro de los 100 cm superficiales del suelo, o
 - b. Materiales gélicos* dentro de los primeros 100 cm del suelo y permafrost dentro de los 200 cm superficiales del mismo”.

Nota: En la definición anterior, los términos que aparecen con asterisco se definen más adelante.

La definición de suelo mineral está elaborada con base en el contenido de materiales minerales que contenga el suelo. El USDA define estos **materiales minerales del suelo** como:

“Materiales que tienen menos de 2 mm de diámetro que cumplen alguno de los siguientes requisitos:

- 1. Están saturados con agua menos de 30 días acumulativos al año, en años normales y contiene menos de 20%, por peso, de carbono orgánico; o
- 2. Están saturados con agua por 30 días o más, acumulativos, en los años normales o están drenados artificialmente y, excluyendo las raíces vivas, tiene alguno de los siguientes contenidos de carbono orgánico, con base en peso:
 - a. Menos de 18% si la fracción mineral tiene 60% o más de arcilla; o
 - b. Menos de 12% si la fracción mineral no tiene arcilla; o
 - c. Menos de $[12 + (\% \text{ de arcilla multiplicado por } 0.1)] \%$, si la fracción mineral contiene menos de 60% de arcilla.”

La definición correspondiente, tanto al suelo orgánico como a los materiales orgánicos del suelo, se presentó en el numeral 4 del Capítulo 18.

2.5. CARACTERÍSTICAS DIAGNÓSTICAS

Las características diagnósticas, definidas anteriormente, fueron agrupadas en: horizontes diagnósticos (epipedones y endopedones), régimen de humedad del suelo, régimen de temperatura del suelo y otras. A continuación se hace una síntesis del contenido que, acerca de este tópico, presenta el SSS (1999, 1998), para los suelos minerales.

2.5.1. Epipedones

Son aquellos horizontes diagnósticos que se desarrollan en la superficie del suelo; se definen, de manera abreviada, los siguientes:

2.5.1.1. Mólico

Es un epipedón que presenta **todas** las propiedades siguientes:

- Cuando están secos no tienen unidades estructurales de más de 30 cm de diámetro o tienen una clase de resistencia a la ruptura moderadamente dura o más suave.
- Tienen estructuras de roca en menos de la mitad de su volumen.
- Color oscuro: value y chroma menor o igual a 3 en húmedo.
- Saturación de bases mayor o igual a 50%, por el método del AcONH₄ 1N y neutro.
- Contenido de carbono orgánico 0.6 %.
- Espesor de 10, 18, 25 o más centímetros, según la textura y/o la presencia de otros horizontes diagnósticos.
- Contenido de P₂O₅ soluble en ácido cítrico al 1% < 1500 ppm.
- Húmedo 3 meses o más al año.
- Valor n < 0.7. Este valor se calcula con la siguiente relación:

$$n = \frac{A - 0.2R}{L + 3H} \quad [20.1]$$

Donde: A: Porcentaje de humedad del suelo (gravimétrico) en condiciones de campo.

R: Porcentaje de limo mas arena.

L: Porcentaje de arcilla.

H: Porcentaje de materia orgánica.

2.5.1.2. Melánico

Es un epipedón cuyo límite superior debe estar en los primeros 30 cm del suelo y dicho límite es o la superficie del suelo mineral o el límite superior de una capa orgánica que tiene propiedades ándicas, lo que esté más superficial. Además, tiene, en capas con un espesor acumulativo de 30 cm o más, dentro de los primeros 40 cm del suelo, los tres requisitos siguientes:

- Propiedades ándicas; y
- Value y chroma en húmedo de 2 o menos y un índice melánico de 1.7 o menor, en todo el espesor; y

- 6% o más de carbono orgánico como promedio ponderado y 4% o más de carbono orgánico en todas las capas acumuladas.

El **Índice Melánico** (IM) es una medida del grado de humificación que ha sufrido la materia orgánica del suelo: cuando este índice es menor a 1.65, hay una alta acumulación de ácidos húmicos tipo A, muy evolucionados, que le imprimen al suelo colores negros muy intensos (Shoji, 1988). Para determinar el índice melánico (según propuesta de Honna et al, citados por Shoji, 1988), se hace una extracción en una muestra de suelo con NaOH al 0.1% y al extracto se le mide la absorbancia a 450 nm (A_{450}) y a 520 nm (A_{520}); el índice se calcula con la relación:

$$IM = \frac{A_{450}}{A_{520}} \quad [20.2]$$

2.5.1.3. Plágeno

Es un epipedón hecho por el hombre mediante la adición continua de abonos y desechos de sus actividades. Tiene un espesor de 50 cm o más y en él se encuentran comúnmente artefactos antrópicos. Generalmente, su contenido de carbono orgánico varía entre 1.5 y 4% y los colores están entre pardo y negro, según el origen de materia orgánica que se haya acumulado en él. Además, el value varía entre 1 y 4 y el chroma es de 2 o menos, en húmedo.

2.5.1.4. Epipedones variantes del mólico

Son dos epipedones que cumplen la mayoría de los requerimientos exigidos para el epipedón mólico pero que presentan algunas propiedades que los separan de aquel. Ellos son:

- **Antrópico:** cumple todos los requerimientos del mólico, con o sin la saturación de bases, excepto el contenido de P_2O_5 , el cual es mayor a 1500 ppm.
- **Úmbriko:** cumple todos los requerimientos del mólico, excepto la saturación de bases, la cual es menor de 50%.

2.5.1.5. Epipedones orgánicos

Para suelos orgánicos se han definido dos epipedones: el **hístico** y el **folístico**. En el Capítulo 18 se ha presentado la definición del epipedón hístico. El folístico está definido esencialmente con los mismos parámetros que el hístico, diferenciándose de éste en los espesores del primer requerimiento (20 ó 15 cm, para las situaciones a y b, respectivamente, para el folístico) y en la duración del período de saturación con agua: el folístico está saturado menos de 30 días acumulativos al año, en los años normales.

2.5.1.6. Ócrico

Es un epipedón que se asigna a aquellos horizontes que no cumplen con la definición de ninguno de los epipedones anteriores; de todas formas, no debe tener estructura de roca, ni incluir sedimentos frescos finamente estratificados.

2.5.2. Endopedones

Son horizontes diagnósticos que se han formado en el interior del suelo. En forma general, aunque no necesariamente, coinciden con el horizonte B de éste. Para las definiciones que se dan a continuación, de manera resumida, los endopedones se han agrupado teniendo en cuenta el proceso pedogenético que ha dominado en su desarrollo, aclarando que no es el único que ha actuado en el suelo que posee determinado endopedón (ver Capítulo 2):

2.5.2.1. Endopedones iluviales

Se definen los siguientes endopedones:

- **Ágrico:** Es un horizonte que se forma por efecto del cultivo continuado durante largo tiempo; presenta altas cantidades de limo, arcilla y humus, pH cercano a la neutralidad y son comunes los pedotúbulos.
- **Argílico:** Es un horizonte iluvial de arcillas silicatadas.
- **Cálcico:** Es un horizonte de acumulación de carbonatos de calcio y de otros carbonatos secundarios; tiene 15 cm o más de espesor y no está cementado.
- **Espódico:** Es un horizonte iluvial de 2.5 cm o más de espesor, con 85% o más de materiales espódicos (materiales amorfos activos iluviales compuestos de materia orgánica y Al, con o sin Fe).
- **Gypsico (Yesífero):** Es un horizonte de acumulación de yeso secundario de 15 cm o más de espesor, no cementado ni endurecido.
- **Nátrico:** Es un horizonte argílico que tiene, además de las características de este horizonte, un PSI 15% en los primeros 40 cm del horizonte y estructura columnar o prismática dominante.
- **Sómbrico:** Es un horizonte iluvial de humus que no está complejado con Al, ni dispersado; tiene saturación de bases menor de 50% (AcONH_4); tiene mayor contenido de materia orgánica que el horizonte suprayacente y menor value y/o chroma que él.

2.5.2.2. Endopedones de transformación

Los endopedones de transformación son horizontes que se han formado debido a la alteración, intensa o no, de sus materiales originales y en los cuales, los productos de esa alteración se han acumulado causando enriquecimiento residual de ellos en el horizonte. Se presentan frecuentemente los siguientes endopedones en este grupo:

- **Cámbico:** Es un horizonte de alteración de 15 cm o más de espesor, que presenta cambios de color, textura y/o estructura, pero que no cumple los requerimientos ni de los epipedones definidos anteriormente, ni de los endopedones argílico, cálcico, gypsico, nátrico, óxico, espódico, plácico, petrocálcico, petrogypsico, duripán o fragipán.
- **Óxico:** Es un horizonte con textura franco arenosa o más fina, con una CIC $7 < 16 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$ de arcilla y CICE $< 12 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$ de arcilla, de 30 cm o más de espesor y menos de 10% de minerales meteorizables en la fracción de 0.2 a 0.05 mm de diámetro.
- **Sulfúrico:** Es un horizonte de 15 cm o más de espesor, compuesto de materiales orgánicos o minerales de suelo, que presenta un pH en agua (1:1) 3.5 y que tiene evidencias de que el bajo pH es causado por ácido sulfúrico. Se forma como consecuencia del drenaje y oxidación de materiales de suelo orgánicos ricos en sulfuros.

2.5.2.3. Endopedones mixtos

Se incluyen en esta categoría aquellos endopedones que deben su formación a varios procesos pedogenéticos dominantes y que pueden o no expresar las evidencias de la acción de dichos procesos en un mismo horizonte genético del suelo. Los principales endopedones de este grupo son:

- **Fragipán:** Es un endopedón que puede formarse por alteración y/o por iluviaión de arcilla. Es un horizonte de 15 cm o más de espesor, duro a muy duro en seco, estructura poliédrica muy gruesa y casi sin raíces; generalmente es un limitante para el paso de agua y de raíces.
- **Duripán:** Es un endopedón que se forma por la translocación de sílice soluble y la posterior cementación del material del suelo por ella.
- **Glósico:** Es un horizonte mezclado de 5 cm o más de espesor. En él se diferencia una parte eluvial de materiales álbicos y otra iluvial de remanentes de horizontes argílico, kándico o nátrico.
- **Kándico:** Es un endopedón de 15 cm o más de espesor, con textura arenoso franca muy fina o más fina, con $CIC\ 7 < 16\ cmol\ (+)\ kg^{-1}$ de arcilla y $CICE < 12\ cmol\ (+)\ kg^{-1}$ de arcilla en 50% o más del espesor. Este horizonte se puede generar por iluviaión de arcilla; por destrucción de la arcilla o por erosión selectiva de las partículas más finas en el epipedón o por sedimentación de materiales gruesos en la superficie del suelo.
- **Orstein:** Es un horizonte espódico, con espesor de 25 mm o más, que tiene más del 50% de su volumen cementado.
- **Petrocálcico:** Este endopedón se forma mediante la acumulación iluvial de carbonatos de calcio secundarios y la posterior cementación del horizonte por dichos carbonatos. En general, es un horizonte cementado por carbonato de calcio, principalmente, que presenta reacción positiva al HCl y que tiene un espesor de 10 cm o más, si no está directamente sobre la roca, si lo está, debe tener un espesor de 1 cm o más.
- **Petrogypsico:** Es un horizonte similar al petrocálcico, del cual se diferencia porque el cementante principal, en el petrogypsico, está compuesto por yeso.
- **Plácico:** Es un horizonte que se presenta cementado por hierro (con o sin manganeso) y materia orgánica. Tiene colores de rojo oscuro hasta negro; su espesor es de 1 mm o más, sin límite máximo, si no está asociado a materiales espódicos, caso en el cual, el espesor máximo es de 25 mm

2.5.2.4. Otros endopedones

- **Álbico:** Es un horizonte eluvial de 1 o más centímetros de espesor que contiene 85% o más (por volumen) de materiales álbicos (claros).
- **Sálico:** Horizonte de acumulación, generalmente residual, de sales más solubles que el yeso. Tiene 15 cm o más de espesor y una conductividad eléctrica de $30\ dS\ m^{-1}$ o más.

Debe tenerse en cuenta que ni los epipedones ni los endopedones tienen que coincidir, en su espesor, con alguno de los horizontes genéticos del suelo (ver Capítulo 5). Ellos pueden ser iguales o puede ser que el horizonte diagnóstico sea parte de uno o de varios horizontes genéticos.

2.5.3. El clima edáfico

Cuando se hace referencia al clima, como factor de formación del suelo, se está hablando del clima ambiental y en este sentido fue tratado en el Capítulo 1. Sin embargo, las condiciones de humedad y de temperatura que hay en el suelo son diferentes a las atmosféricas y no tienen el mismo significado en los dos medios, aunque el clima del suelo está relacionado directamente con el ambiental.

La temperatura que se presenta en el suelo es mayor a la temperatura ambiental, como lo han confirmado Flórez (s.f.) y García (s.f.) en las cordilleras colombianas. Además, las condiciones de humedad edáficas se relacionan con la disponibilidad de agua que hay para que la planta pueda llevar a cabo sus funciones y no con la cantidad total de agua que haya en el suelo.

En el suelo, el clima se define con dos conceptos fundamentales que son: **Régimen de Temperatura** y **Régimen de Humedad**; estos parámetros son de gran importancia porque establecen las condiciones climáticas en la zona de desarrollo radicular de la planta y, por tanto, las condiciones para que haya un buen funcionamiento de la raíz, una nutrición adecuada de la planta y una buena actividad biológica.

2.5.3.1. *El régimen de temperatura del suelo*

El régimen de temperatura del suelo se refiere a la temperatura estabilizada del mismo, es decir, establece el valor de la temperatura que se mantiene relativamente constante todo el tiempo y la profundidad a la cual se presenta dicha temperatura.

El SSS (1999) tiene como profundidad de referencia general, para definir este régimen, 50 cm o a la que se encuentre un contacto denso, lítico o paralítico, si están antes de los 50 cm. Sin embargo, Flórez (s.f.) encontró en los suelos de un transecto en la cordillera occidental, entre 550 y 3820 msnm, que no siempre la temperatura se estabiliza a esta profundidad, como puede verse en los resultados de la Tabla 20.1, en la cual se observa que en muchos sitios, independientemente de la vertiente que se seleccione, la temperatura del suelo se estabiliza en un rango de profundidad que queda por fuera de los 50 cm.

TABLA 20.1. Temperatura estabilizada de varios suelos en las vertientes de la cordillera occidental colombiana, sector centro - norte. (Seleccionados de Flórez, s.f.)

VERTIENTE	ALTITUD (msnm)	TEMPERATURA (°C)	PROFUNDIDAD (cm)
OCCIDENTAL	3700	7.5	31 a 36
	2800	11.5	45 a 60
	1900	16.9	18 a 28
	1650	18.7	13 a 63
	550	24.0	34 a 51
ORIENTAL	3700	7.5	22 a 32
	3100	11.2	55 a 90
	2740	13.3	25 a 35
	1950	18.9	25 a 35
	1275	22.2	15 a 55

Flórez (s.f.) encontró un comportamiento muy similar entre las temperaturas del aire y del suelo, en su variación con la altitud, en la cordillera occidental; en esta cordillera la temperatura estabilizada del suelo fue mayor a la temperatura promedio anual del aire, con diferencias importantes entre las vertientes: en la vertiente oriental, la diferencia de temperatura entre el suelo y el aire fue menor a 1.4 °C. En cambio, en la occidental fue ligeramente mayor a 2 °C, después de los 2700 msnm y menor a 2 °C en altitudes menores a 2700 msnm.

García (s.f.) presenta resultados de Flórez que muestran un comportamiento irregular de las temperaturas del aire y del suelo en la cordillera central. Aquí, la temperatura del aire es mayor que la del suelo hasta los 2200 msnm por el flanco occidental y hasta los 1100 msnm por el oriental; en las altitudes mayores, la temperatura del suelo es mayor que la del aire; además, la diferencia de temperatura entre los dos sistemas se hace mayor al irse incrementando la altitud.

Con respecto a los gradientes térmicos, también se presenta disimetría entre las cordilleras y entre las vertientes de la misma cordillera como puede verse en los resultados que se exponen en la Tabla 20.2.

TABLA 20.2. Incremento de la temperatura estabilizada del suelo (°C por cada 100 m de altitud) en la parte media de las cordilleras occidental y central de Colombia. (Resultados de Flórez, s.f. y de Flórez, citado por García, s.f.)

	CORDILLERA OCCIDENTAL		CORDILLERA CENTRAL	
	VERTIENTE	VERTIENTE	OCCIDENTAL	ORIENTAL
°C por cada 100 m de altitud	0.54	0.62	0.53	0.52

Tanto las variaciones en los valores de la temperatura, como en sus gradientes en las diferentes localidades, ubicadas en posiciones comparables, obedecen a cambios en las variables climáticas ambientales, así como a cambios en la cobertura vegetal, en el tipo de horizontes presentes en el suelo, sobre todo si son orgánicos y, en especial dependen del contenido de humedad del suelo.

El SSS (1999) establece 4 regímenes de temperatura en el suelo, para la región tropical (diferencia entre las temperaturas de las épocas secas y lluviosas - máximas y mínimas - promedias anuales menor a 6 °C), llamados **iso-regímenes**, con base en la temperatura estabilizada a 50 cm de profundidad y los define de la siguiente manera:

- **Isofrígio**: Temperatura media anual menor a 8 °C.
- **Isomésico**: Temperatura media anual entre 8 y 15 °C.
- **Isotérmico**: Temperatura media anual entre 15 y 22 °C.
- **Isohipertérmico**: Temperatura media anual mayor a 22 °C.

A los regímenes definidos anteriormente hay que adicionar el régimen **crílico**, el cual se utiliza como criterio diferencial en algunas categorías del sistema y se caracteriza por presentar temperatura media anual menor a 8°C y por ser más frío, en verano, que los suelos del régimen isoerígio.

Los anteriores regímenes de temperatura, vigentes desde que se publicó la primera edición de la taxonomía (SSS, 1975), han sido revisados para las condiciones de la agricultura colombiana por Castellanos y Callejas (1988), quienes encontraron algunos desfases entre la temperatura óptima

de producción de los principales cultivos por regiones y la temperatura definida por el régimen térmico correspondiente a dicha región; las anteriores observaciones llevaron a los autores mencionados a proponer algunos ajustes a los regímenes de temperatura definidos por el USDA, definiéndolos como se presenta en la Tabla 20.3.

TABLA 20.3. Regímenes de temperatura propuestos para Colombia y su cobertura (Tomados de Castellanos y Callejas , 1988).

RÉGIMEN	TEMPERATURA DEL SUELO (°C)	ALTITUD (msnm)	ÁREA EN COLOMBIA	
			ha	%
Isofríido	< 10	> 3800	217750	0.19
Isomésico	10 a 14	3100 a 3800	2488750	2.58
Isotérmico	14 a 22	1800 a 3100	6320375	5.54
Isohipertérmico	22 a 27	1000 a 1800	10515250	9.21
Isomegatérmico	> 27	< 1000	94632675	82.88

En la tabla anterior se puede apreciar que más del 90% del territorio colombiano presenta suelos con temperaturas promedias mayores de 22 °C, lo cual implica que, si se tiene un suministro adecuado de agua, los procesos de alteración y de evolución de los suelos serán rápidos y eficientes y explica, en algo, la abundancia de suelos altamente evolucionados que se presentan en aquellas zonas de régimen isomegatérmico, húmedas como la Orinoquia y la Amazonía.

2.5.3.2. *El régimen de humedad del suelo*

Con respecto a la humedad, el SSS (1999) considera el **régimen de humedad del suelo** como la presencia o ausencia de agua disponible o aprovechable para la planta en el suelo o en alguno de sus horizontes, durante períodos específicos del año; para este efecto, se considera que el suelo está seco cuando el agua está retenida con una tensión mayor a 1500 kPa y se considera que tiene agua disponible para la planta, cuando la humedad edáfica se encuentra retenida a menos de 1500 kPa, pero por encima de cero kPa de tensión.

Con base en las consideraciones anteriores, el SSS (1999) define los siguientes regímenes de humedad para los suelos, teniendo en cuenta sus condiciones de humedad dominantes en años normales (ver pie de página, numeral 4 del Capítulo 18):

2.5.3.2.1. Arídico y Tórrico (o Tórrido)

El suelo está seco más de la mitad del tiempo acumulativo del año en el cual la temperatura, hasta 50 cm de profundidad, es mayor a 5 °C y está húmedo, todo o una parte, menos de 90 días consecutivos, cuando la temperatura del suelo, a 50 cm de profundidad, es mayor a 8 °C. Estas condiciones de humedad se presentan fundamentalmente en climas áridos y semiáridos. El término **Tórrico** se reserva para suelos secos en clima cálido.

2.5.3.2.2. Ústico

En condiciones tropicales, el suelo está seco, todo o alguna parte, 90 días o más acumulativos al año y húmedo durante 90 días o más consecutivos o 180 días o más acumulativos al año. Esta condición de humedad implica que el suelo presenta condiciones adecuadas para el crecimiento

vegetal, sólo durante un semestre al año, debiéndose tener riego para poderlo cultivar permanentemente.

2.5.3.2.3. Údico

El suelo no está seco más de 90 días acumulativos al año. En este régimen se presentan los suelos de los climas húmedos, con la precipitación bien distribuida y, también, aquellos de climas donde las precipitaciones se concentran en varios meses pero que son suficientes para recargar el suelo y para dejar una cantidad de agua, almacenada en él, suficiente para satisfacer los requerimientos de las plantas, durante los meses secos.

El SSS (1999) considera el clima como **perhúmedo** cuando la evapotranspiración es menor que la precipitación durante todos los meses del año y en algunas categorías del sistema de clasificación lo resalta llamando su régimen de humedad **perídico**.

2.5.3.2.4. Ácuico

En esta condición de humedad, el suelo se presenta saturado con agua y sin oxígeno durante un tiempo suficientemente largo (no conocido aun), como para presentar evidencias de condiciones de reducción. En algunos casos el suelo presenta un **nivel freático** (superficie de la lámina de agua libre del suelo) en o cerca a la superficie, permanentemente (basines, ciénagas, pantanos u otras depresiones cerradas); esta situación la define el SSS (1999) como régimen de humedad **perácuico**.

2.5.3.2.5. Xérico

Este es un régimen establecido específicamente para las condiciones climáticas mediterráneas, donde el invierno es húmedo y frío y el verano es cálido y seco; este régimen no se aplica en las condiciones tropicales.

En Colombia, según información presentada por Malagón et al (1995), el régimen de humedad que más cobertura presenta es el údico, incluyendo en él pequeñas zonas con régimen perídico; el régimen ústico coincide ampliamente con la zona de vida bs-T y con las áreas secas de los altiplanos de las cordilleras.

El régimen arídico ocupa la alta y media Guajira y algunas áreas del valle del Magdalena y el régimen ácuico es dominante en las llanuras de inundación actuales de los ríos y en las áreas bajas costeras del litoral Pacífico.

2.5.4. Otras características diagnósticas

Aparte de las características definidas anteriormente, que son las más utilizadas por el sistema en la definición de sus taxa superiores, hay otras que también se tienen en cuenta. Entre las más frecuentes están:

- Los cambios texturales abruptos.
- La presencia de propiedades ándicas o frágiles (fragipán, quebradizo).

- La presencia de materiales álbicos (muy claros, blancos), espódicos (materia orgánica y Al iluviales, con o sin Fe), densos (duros), gélidos (crioturbados), paralíticos (roca poco meteorizada y débilmente consolidada o depósitos sedimentarios gruesos) o sulfídicos.
- La presencia de condiciones ácuicas o anhídricas.
- El COLE y la extensibilidad lineal.
- La presencia de carbonatos secundarios.
- La presencia de nódulos.
- La presencia de contactos (límites) denso (con material duro), lítico (con roca dura), paralítico (con roca fragmentada) o petroférreo (con una capa cementada por Fe).
- La presencia de permafrost (congelamiento) o de crioturbación.
- La presencia de capas gélidas (de hielo).
- La presencia de discontinuidades litológicas o de lamelas.
- La presencia de plintita.
- La presencia de propiedades vérticas (debidas a la presencia de minerales expansivos: Grietas, slickensides, superficies de presión, estructuras cuneiformes, microrrelieve gilgai).
- El contenido de minerales meteorizables o de minerales resistentes a la meteorización.

La mayor parte de las características enumeradas anteriormente se han mencionado en algunos numerales de capítulos anteriores. Sin embargo, las propiedades ándicas no se han tratado y los materiales que las posean deben cumplir con lo siguiente:

- Tener menos de 25% (gravimétrico) de carbono orgánico y uno o ambos grupos de los siguientes requerimientos:
 - Densidad aparente a 33 kPa menor o igual a 0.9 Mg m⁻³, y
 - 85% o más de capacidad de fijación de fosfatos, y
 - 2% o más de (Al + ½ Fe) extraído con oxalato ácido de amonio, o
 - Unos contenidos de (Al + ½ Fe) entre 0.4 y 2%, proporcionales a contenidos de vidrio volcánico entre 5 y 30% en la fracción arena del suelo, que se establecen según una gráfica.

2.6. CATEGORÍAS

2.6.1. Las clases

Como se mencionó en párrafos anteriores, el sistema de clasificación de suelos debía ser un sistema multicategórico, que permitiera clasificar un suelo con diferentes niveles de detalle, de modo que hubiera una correspondencia entre la escala de los levantamientos de suelos y la generalización taxonómica que se utilizara en ellos.

Con este criterio, el sistema fue diseñado con 6 categorías:

- Orden
- Suborden
- Gran grupo
- Subgrupo
- Familia
- Serie

El sentido descendente de las categorías exige un conocimiento más detallado del suelo para poderlo clasificar. Es decir, en ese sentido aumenta el trabajo de campo, aumenta la cantidad de análisis de laboratorio y aumenta la cantidad de características y propiedades que hay que evaluar en el suelo; todo lo anterior, permite obtener un mejor conocimiento del suelo que se está clasificando, pero también incrementa el esfuerzo, el tiempo y el costo para hacerlo.

Malagón (1985) y Elbersen et al (1986) definen la relación que se presenta entre el nivel de los levantamientos de suelos y las unidades (categorías) taxonómicas a utilizar en ellos como se muestra en la Figura 20.1, adaptada parcialmente de ambos autores.

En la representación hecha en la Figura 20.1 se quiere destacar que a medida que se desciende en la clasificación (que se aumenta el detalle), se incrementa el tamaño de la categoría utilizada; ésto implica que al avanzar en el sistema, cada que se cambie de una categoría a otra de mayor detalle, se incrementa el número de clases de suelos que resultan.

En efecto, la última versión del sistema de clasificación (SSS, 1999) define en sus claves 12 clases, al nivel de orden, 64 al nivel de suborden, más de 300 clases en el gran grupo y más de 2400 en el subgrupo; además, aunque no están definidas en las claves, sólo en los Estados Unidos de Norteamérica, se habían reconocido, hasta el año 1999, más de 19000 series de suelos.



FIGURA 20.1. Relación entre el nivel del levantamiento de suelos y las categorías del sistema de clasificación de suelos del USDA.

2.6.2. Nomenclatura

Todas las reglas y normas para la formación y uso de los nombres que identifican cada taxón en el sistema, se encuentran descritas detalladamente en el SSS (1999), documento del cual se resume este aparte.

2.6.2.1. Características

Los nombres que se diseñaron para identificar los diferentes taxa definidos en el sistema tienen algunas propiedades especiales:

- Son nombres cortos.
- Son nombres de fácil pronunciación.
- Están derivados de raíces latinas y griegas, en su gran mayoría.
- Con el nombre del taxón se puede establecer el nivel categórico en el cual está clasificado el suelo.
- En los niveles por encima de la serie, el nombre acumula los elementos formativos de todos los taxa de las categorías que están por encima de aquella en la cual se encuentra está clasificado, por lo cual se identifican varias de las características diagnósticas que tiene dicho suelo.

2.6.2.2. Conformación de los nombres

Para la configuración de los nombres de los taxa en las diferentes categorías del sistema se desarrollaron los procedimientos que se especifican a continuación, para cada categoría.

2.6.2.2.1. Orden

En la última edición que se ha hecho del sistema (SSS, 1999), se definen 12 órdenes cuyos nombres se componen de los siguientes elementos:

- Una **terminación SOL**, la cual implica que se trata de un sistema de clasificación de suelos (**SOL** de **SOLUM** = SUELO).
- La terminación está unida al resto del nombre mediante una **vocal de enlace**, la cual es una **o**, si la raíz utilizada en el nombre es griega o una **i**, si las raíces son de otro origen.
- Un **elemento formativo del orden**, compuesto por todas las letras que se encuentren entre la vocal de enlace y la próxima primera vocal que se encuentre antes de ella; este elemento formativo se conserva en los nombres de todos los taxa, hasta la categoría de familia, por lo cual, en cualquier categoría en que se clasifique el suelo hasta ésta, es posible saber a qué orden pertenece.

En la Tabla 20.4 se presentan los nombres de los órdenes definidos en el sistema, sus elementos formativos correspondientes y la característica principal que el nombre implica del suelo que identifica; a continuación se presentan dos ejemplos que ilustran cómo se establece el nombre de un orden de suelos:



TABLA 20.4. Nombre, elemento formativo y connotación de las clases de suelos al nivel de orden en el sistema USDA. (Con base en SSS, 1999).

NOMBRE	ELEMENTO FORMATIVO	CONNOTACIÓN
Alfisoles	ALF	-
Andisoles	AND	Oscuro, propiedades ándicas
Aridisoles	ID	Clima árido
Entisoles	ENT	Reciente
Espodosoles	OD	-
Gelisoles	EL	G elido, congelado
Histosoles	IST	Tejido
Inceptisoles	EPT	I niciante
Mollisoles	OLL	Mullido, blando
Oxisoles	OX	O xidado
Ultisoles	ULT	U ltimo
Vertisoles	ERT	V ertido

2.6.2.2.2. Suborden

Para establecer el nombre del suborden, se toma el elemento formativo del orden y se le antepone el prefijo connotativo de la característica diagnóstica principal utilizada para definir el taxón; el nombre así formado queda compuesto por dos sílabas, como en los siguientes ejemplos:

UDANDS, SALIDS, BORALFS, HUMODS

Obsérvese en los ejemplos anteriores que la parte resaltada con rojo corresponde a los elementos formativos del orden. En ellos están representados los órdenes Andisoles, Aridisoles, Alfisoles y Espodosoles, respectivamente con el orden en que se presentan los subórdenes. En la Tabla 20.5 se presentan los elementos formativos que utiliza el sistema de clasificación (SSS, 1999) para definir los subórdenes, así como la connotación correspondiente de cada uno de ellos.

Según los elementos formativos expuestos en la tabla 20.5, se deduce en los ejemplos presentados que el taxón Udands define Andisoles que se encuentran en un régimen de humedad údico; que el Salids corresponde a Aridisoles que presentan un horizonte sálico, etc.

2.6.2.2.3. Gran grupo

El nombre del gran grupo se establece anteponiendo al nombre completo del suborden un prefijo compuesto por uno o dos elementos formativos, que implican la o las principales características diagnósticas que identifican el taxón correspondiente:

Melanudands: la parte coloreada es el nombre del suborden (Udands); el elemento formativo del gran grupo es **Melan** e implica que el suelo tiene un horizonte melánico; se trata, entonces, de Andisoles que están en un régimen údico y que poseen un horizonte melánico.

Debido a que en este nivel el número de taxa definidos en el sistema se incrementa bastante, como ilustración se presentan, en la Tabla 20.6, sólo los elementos formativos utilizados en esta categoría, en el orden Andisol, así como su correspondiente connotación.

TABLA 20.5. Elementos formativos del suborden y su connotación en el sistema de clasificación del USDA (Tomados de SSS, 1999).

ELEMENTO FORMATIVO	CONNOTACIÓN
Alb	Horizontes álbicos
Anthr	Antrópico
Aqu	Condiciones ácuicas
Ar	Arado, mezclado
Arg	Horizonte argílico
Calc	Horizonte cárlico
Camb	Horizonte cámbico
Cry	Régimen de temperatura crílico, frío
Dur	Duripán
Fibr	Material fibroso
Fluv	Fluvial
Fol	Foliar, hoja
Gyps	Horizonte gypsico (yesífero)
Hem	Material orgánico semidescompuesto
Hist	Hístico, materiales orgánicos
Hum	Húmico, humus
Orth	Común
Per	Régimen de humedad perúdico
Psamm	Arenoso
Rend	Rendzina, calcáreo
Sal	Sales, horizonte sálico
Sapr	Material orgánico descompuesto
Torr	Régimen de humedad tórrico
Turb	Turbación, disturbio
Ud	Régimen de humedad údico
Ust	Régimen de humedad ústico
Vitr	Material vítreo
Xer	Régimen de humedad xérico

TABLA 20.6. Elementos formativos de los grandes grupos de los Andisoles y su connotación. (Tomados de SSS, 1999).

ELEMENTO FORMATIVO	CONNOTACIÓN
Cry	Régimen de temperatura crílico, frío
Dur, Duri	Duripán
Endo	Adentro, saturación interna con agua
Epi	Sobre, encima, saturación exterior con agua
Fulv, Fulvi	Fúlvico, materia orgánica
Hapl, Haplo	Simple, sencillo
Hydr, Hydro	Hídrico, mucha agua
Melan, Melano	Horizonte melánico
Plac	Horizonte plácico
Udi	Régimen de humedad údico
Usti	Régimen de humedad ústico
Vitr, Vitri	Material vítreo

2.6.2.2.4. Subgrupo

El nombre de esta categoría se conforma anteponiendo al nombre completo del gran grupo uno o más adjetivos que indican si el suelo clasificado corresponde al concepto central que define el gran grupo o si se aparta de él; en este último caso, indican el concepto central hacia el cual está cambiando. Si el suelo cumple todos los requerimientos que definen el concepto central del gran grupo, al subgrupo se le coloca el adjetivo **Typic**. Las variaciones que se presentan en el concepto central pueden mostrar que el suelo está virando hacia otro taxón: **Intergrado**, o hacia una condición aberrante: **Extragrado**. Con el siguiente ejemplo se ilustra lo dicho anteriormente:

Supóngase un suelo que al nivel de gran grupo (SSS, 1999, 1998) fue clasificado como Sombriustox (Oxisoles en régimen ústico y con un horizonte sómbrico); para aumentar el detalle de su clasificación a subgrupo, se tiene la siguiente definición del concepto central del gran grupo:

- 1- No tiene un contacto petroférico en los primeros 125 cm de suelo mineral.
- 2- No tiene un contacto lítico en los primeros 125 cm de suelo mineral.
- 3- No tiene un contenido de C orgánico de 16 kg m^{-2} o más dentro de los primeros 100 cm de suelo mineral.

De acuerdo con lo expuesto antes, si el suelo en cuestión cumple estrictamente con los tres requisitos que definen el concepto central de los Sombriustox, se clasifica como **Typic Sombriustox**, al nivel de subgrupo.

Los dos primeros requisitos configuran una situación anómala para el suelo que los cumpla, con respecto al suelo típico, es decir, en este caso serían extragrados del concepto central; si el suelo no cumple el requisito 1, su nombre será **Petroferric Sombriustox** y si el que no cumple es el 2, su nombre será **Lithic Sombriustox**.

El tercer requisito, si no lo cumple el suelo, tipifica una condición anormal de acumulación de materia orgánica en él, pero no anómala, pues el horizonte sómbrico es de acumulación de este material. En este caso, el suelo es un intergrado hacia otro suelo más orgánico y toma el nombre **Humic Sombriustox** al nivel de subgrupo; en resumen, se tienen estas posibilidades:

Gran grupo	Subgrupos posibles	
Sombriustox	Typic Sombriustox	
	Petroferric Sombriustox	Extragrados
	Lithic Sombriustox	
	Humic Sombriustox	Intergrado

Se observa, en el ejemplo anterior, que los intergrados están manifestando que el suelo posee algunas características diferentes a las que definen el gran grupo, que lo hacen transicional a otros suelos de órdenes, subórdenes o grandes grupos diferentes a aquel gran grupo en el cual está clasificado. El suelo del subgrupo **Typic** tiene claramente expresadas las características diagnósticas del orden, suborden y gran grupo en que está clasificado.

2.6.2.2.5. Familia

El nombre de la familia lo compone un polinomio, en el cual está el nombre completo del subgrupo, seguido por unos adjetivos (en idioma español), generalmente tres, que indican las características diagnósticas utilizadas para definir el taxón.

Hasta esta categoría, el nombre del taxón es acumulativo porque toma parte o todo el nombre de los taxa definidos en las categorías superiores; además, en esta categoría se empiezan a utilizar criterios relacionados netamente con el uso y manejo del suelo, como características diagnósticas principales del taxón.

Para definir los adjetivos que identifican cada taxón, en esta categoría, el sistema establece clases en las diferentes características diagnósticas así:

- **Por tamaño de partículas:** Estima la composición granulométrica del suelo completo, razón por la cual el concepto es más amplio que la textura. Para suelos minerales con granulometría homogénea, que no tengan propiedades ándicas ni cantidades importantes de materiales volcánicos, se definen 2 clases generalizadas (sólo para suelos superficiales y para subgrupos Lithic, Arenic y Grossarenic) y 12 clases básicas más amplias, las cuales pueden variar en algunos órdenes de suelo. Si la granulometría es contrastante en el interior del suelo, el sistema define 59 clases. Para los subgrupos Terric de los suelos orgánicos se definen 6 clases (SSS, 1999).

Todas las clases por tamaño de partículas se definen de acuerdo con la proporción en que se encuentren la **tierra fina** (TF: Partículas con diámetro menor a 2 mm) y los fragmentos de roca (FR: Partículas con diámetro mayor a 2 mm), así como en la textura presente en la TF.

Las dos clases generalizadas se denominan **franca** y **arcillosa**; la primera presenta una textura arenosa muy fina o más fina y tiene menos de 35%, por peso, de arcilla en la tierra fina; la arcillosa tiene más de 35%, por peso, de arcilla.

- **Por mineralogía:** Se definen teniendo en cuenta los minerales dominantes en una determinada fracción por tamaño de partículas, el material parental del suelo o la presencia de horizontes kándicos y de Oxisoles.

Para los Oxisoles y suelos con horizonte kándico, se definen 8 clases; para suelos con propiedades ándicas, 4 clases; para los otros suelos minerales y para los subgrupos Terric de suelos orgánicos, 19 clases y para los suelos orgánicos, 4 clases (SSS, 1999).

- **Por actividad de intercambio catiónico:** Se definen 4 clases que se aplican sólo a suelos minerales, excepto a Oxisoles y a grandes grupos o subgrupos kándicos de Alfisoles y Ultisoles, que pertenecen a clases mezclada o silícea de mineralogía y que no pertenecen a clases fragmental, arenosa, arenosa esquelética ni a clases sustitutas, por tamaño de partícula. Las clases por actividad se definen teniendo en cuenta los valores de la relación [CIC pH 7.0 en AcONH₄ 1N / % gravimétrico de arcilla] así:
 - **Superactiva:** ≥ 0.6 .

- **Activa:** Entre 0.4 y 0.6.
 - **Semiacactiva:** Entre 0.24 y 0.4.
 - **Subactiva:** < 0.24.
- **Por presencia de carbonatos y reacción:** Para suelos minerales se definen las siguientes clases:
- **Álica (Álica?):** Se presenta un horizonte de 30 cm o más de espesor, que tiene 2 o más cmol (+) kg⁻¹ de suelo de Al extractable en KCl en la tierra fina. Sólo se usa en Oxisoles.
 - **Calcárea:** Si la tierra fina presenta efervescencia con HCl diluido.
 - **Ácida:** El pH del suelo es < 5 en CaCl₂ 0.01M (2:1) o < 5.5 en agua (1:1).
 - **No ácida:** El pH del suelo es > 5 en CaCl₂ 0.01M (2:1). En este caso, el nombre no se coloca en el nombre de la familia.

Para los suelos orgánicos se definen 2 clases por reacción:

- **Euic:** El pH de alguna parte del suelo > 4.5 en CaCl₂ 0.01M, medido en muestras sin secar.
- **Dysic:** El pH del suelo < 4.5 en CaCl₂ 0.01M, medido en muestras sin secar.

Las clases por carbonatos y reacción sólo se usan en algunas pocas clases de suelos de los órdenes Entisoles, Andisoles, Mollisoles e Inceptisoles.

- **Por régimen de temperatura:** Se han definido 3 clases para los Gelisoles y 4 clases para el resto de los suelos, minerales u orgánicos, bajo condiciones tropicales, exceptuando los Histels, que corresponden a los Gelisoles.

Las clases definidas para los Gelisoles son:

- **Hipergélico:** Temperatura media anual ≤ – 10 °C.
- **Pergélico:** Temperatura media anual entre – 4 °C y – 10 °C.
- **Subgélico:** Temperatura media anual entre + 1 °C y – 4 °C.

Las clases que se utilizan para los demás suelos, en condiciones tropicales se identifican con el nombre de los regímenes de temperatura, definidos en el numeral 2.5.3.1 de este capítulo, que le corresponda al suelo que se estudia.

- **Por profundidad del suelo:** Para los suelos minerales, se define la clase **Superficial (Shallow)**, la cual se usa:
- En todos los órdenes de suelos, excepto Oxisoles, cuando hay una capa limitante para la penetración de la raíz, a menos de 50 cm de profundidad, desde la superficie del suelo y éste no está en el subgrupo Lithic.
 - En Oxisoles cuando hay una capa limitante para la penetración de la raíz, a menos de 100 cm de profundidad, desde la superficie del suelo y éste no está en el subgrupo Lithic.

En Histosoles, excepto en el suborden Folists, se establece la clase **superficial (shallow)** cuando hay una capa que limitante para la penetración de la raíz o cuando tienen una clase

por tamaño de partículas fragmental o ceniciente o pumítica entre 18 y 50 cm de profundidad, desde la superficie del suelo. Cuando los impedimentos o características descritos antes están a menos de 18 cm de profundidad la familia se define como **Micro**.

- **Por resistencia a la ruptura:** Se usa este criterio para definir familia en los Espodosoles, cuando tienen el horizonte espódico parcialmente cementado (orstein). En este caso el nombre de la familia lleva el modificador **Orstein**.
- **Por recubrimientos en arenas:** Se usa en los Quartzipsamments para definir si las partículas de arena están o no recubiertas con otras partículas más finas. Cuando la suma del [peso promedio ponderado del contenido de limo + 2*peso ponderado del contenido de arcilla] > 5, la familia se llamará **Recubierta**.
- **Por grietas:** Se usa este criterio para definir una sola clase, únicamente en los Fluvaquents y en los Humaquepts; la familia se llamará **Agrietada**, si el suelo presenta grietas permanentes y continuas lateral y verticalmente de 2 mm o más de ancho, espaciadas a intervalos menores de 50 cm y en todo el espesor de una capa de 50 cm o más de gruesa.

A continuación se presentan algunos ejemplos de la nomenclatura utilizada en los nombres de familias de suelos:

- Typic Paleaquults arcilloso, mezclado, isohipertérmico.
- Typic Quartzipsamments isomésico, recubierto.
- Typic Torriorthents franco esquelético, mezclado, calcáreo, isohipertérmico.
- Alic Hapludands medial sobre arcilloso, mezclado, isomésico.

2.6.2.2.6. Serie

Debido a la gran cantidad de características que se han acumulado para definir el suelo hasta este nivel categórico, se presentó la necesidad de romper con el sistema de nomenclatura que se traía hasta el nivel de familia.

Para identificar la serie se utilizan nombres, generalmente geográficos, relacionados con el sitio donde fue descrita la serie por primera vez o con alguna región en la cual ella es particularmente importante, etc.

Nótese que con este cambio estructural en la nomenclatura, hay una pérdida importante de información con respecto a las propiedades del suelo. El nombre que se le da a la serie no tiene ninguna connotación pedológica; para subsanar en parte esta falla, puede especificarse el nombre de la familia a la cual pertenece la serie en cuestión, aunque esto, obviamente, no informa acerca de las principales características diagnósticas utilizadas para definir la serie.

Según el SSS (1999), para definir una serie se puede utilizar cualquier diferencia que se encuentre al nivel de familia, que afecte el uso del suelo: La presencia, espesor, profundidad y expresión de los horizontes y propiedades diagnósticos de los taxa superiores y diferencias en textura, mineralogía, humedad del suelo, temperatura del suelo y contenido de materia orgánica, que no hayan sido reconocidas como criterios diferenciales al nivel de familia, se utilizan

frecuentemente para diferenciar series, obviamente, utilizando rangos de variación más estrechos para definir dichas diferencias.

Ejemplos de nombres de series definidas en Colombia (IGAC, 1977) son las Series Techo, Tibaitatá y Río Bogotá, en la Sabana de Bogotá, pertenecientes a las siguientes familias:

- **Techo**: Typic Durustalfs fino, mezclado, isomésico.
- **Tibaitatá**: Andic Eutropepts medial sobre franco, mezclado, isomésico.
- **Río Bogotá**: Tropic Fluvaquents muy fino, mezclado, ácido, isomésico.

2.6.2.3. Reglas para el uso de la nomenclatura

El USDA (SSS, 1999) recomienda tener en cuenta las siguientes reglas cuando se va a utilizar el sistema de clasificación de suelos; es importante observar estas recomendaciones para evitar inducir confusiones o malas interpretaciones de la información que se quiere presentar de los suelos, cuando éstos están clasificados taxonómicamente:

- No adjetivar los nombres de los órdenes de suelos.
- El primer elemento formativo del suborden o del gran grupo puede ser adjetivado. Ejemplo: puede decirse “los suelos ácuicos de los Andisoles” para referirse a los Aquands.
- Los nombres de los diferentes taxa se expresan en género masculino.
- El plural de los nombres originales en inglés se forma agregando una ese “s” al final del nombre; si los nombres se van a traducir a otro idioma, el plural se forma siguiendo las reglas gramaticales que se tienen para el efecto en ese idioma.
- Los adjetivos en inglés se forman agregando el sufijo ‘IC’; en español se agrega el sufijo ‘ICO’; si se va a pluralizar, el sufijo es ‘ICOS’.
- Los nombres de los órdenes, subórdenes y grandes grupos se tratan como nombres propios, es decir, su primera letra va en mayúscula; cuando los nombres son adjetivados en español, pueden o no presentar su primera letra en mayúscula.
- Cuando al nivel de subgrupo se presentan varios modificadores del nombre, estos se organizan en orden alfabético; ejemplo: Calcic Udic Ustochrepts; Lithic Ruptic-Alfic Eutrochrepts; Aquic Lithic Eutrudox.
- Los nombres de los taxa hasta subgrupo se usan en plural.
- El nombre de las “clases por presencia de carbonatos y reacción”, cuando se definen, se coloca a continuación del nombre de las clases por mineralogía.

2.7. PROCEDIMIENTO PARA CLASIFICAR UN SUELO CON EL SISTEMA USDA

Antes de clasificar un suelo, es necesario realizar un trabajo previo de selección del sitio, descripción y muestreo del mismo, en un perfil representativo, para adquirir la información solicitada por el sistema de clasificación y poder llevar a cabo esta labor; de la realización de estas actividades depende la calidad y representatividad de la clasificación que se haga.

En la descripción de los perfiles de suelos se deben establecer, en el sitio de descripción, clara y precisamente tanto los horizontes diagnósticos, como los regímenes de humedad y temperatura y el mayor número posible de características diagnósticas. También, se debe definir, en lo posible, la clasificación taxonómica del suelo en el nivel categórico necesario.

Debe tenerse presente que los horizontes diagnósticos no necesariamente coinciden con horizontes genéticos del suelo, aunque, en la mayoría de los casos, puede haber correspondencia entre ambos grupos de horizontes; cuando esto último sucede, los horizontes diagnósticos pueden estar definidos por los símbolos de los horizontes genéticos del suelo, como se presentan en la Tabla 20.7 (ver Capítulo 5).

TABLA 20.7. Nomenclatura frecuente (SSS, 1999) de los horizontes diagnósticos del suelo, con fines de clasificación.

HORIZONTE o CAPA	SÍMBOLOS
Mólico, Úmbrico, Antrópico, Plágeno, Ócrico, Melánico.	Ap, A, A1
Hístico, Folístico	Oa, Oe, Oi, Ap, A, A1
Ágrico	A, A1, Bh, Bth, Bhs
Álbico	E
Argílico	Bt
Cálcico	Bk
Cámbico	Bw, Bg, Bh, AB, EB, BA, BC, CB
Duripán	Bqm
Espódico	Bs, Bh, Bhs
Fragipán	Bx, Btm
Glásica	Cf
Glósico	E/B
Gypsico	By
Kándico	Bs, Bt, Bw, Bo
Lamela	Bw, Bh, Bt, Bs, Bk, Bth, Bhs, EB, CB, C
Nátrico	Btn
Orstein	Bsm, Bhsm
Óxico	Bo
Plácico	Bsm, Bhsm
Sálico	Bz, Bzm
Sómbrico	Bh, Bth
Petrocálcico	Bkm
Petrogypsico	Bym

Cuando ya se han definido las características diagnósticas, se procede a ubicarlas dentro de los taxa definidas por el sistema; esta ubicación se realiza en la secuencia en que se encuentran jerarquizadas las categorías, empezando en el Orden y descendiendo hasta la categoría necesaria.

El procedimiento para realizar la clasificación consiste en ir comprobando, en el estricto orden en que se encuentran descritos, cada uno de los taxa, hasta encontrar aquel en el cual el suelo encaja completamente, es decir, en el cual el suelo cumple todos los requisitos establecidos. La búsqueda ordenada es indispensable ya que la taxonomía se encuentra diseñada en forma de **clave** en las categorías Orden, Suborden, Gran Grupo y Subgrupo y, al nivel de familia, la definición de las clases también tiene este mismo diseño.

De acuerdo con lo anterior, para establecer el orden al cual pertenece un determinado suelo, se deben empezar a comprobar los requerimientos que definen cada taxón en el orden en que se encuentran expuestos en la clave, es decir, se debe comprobar: Primero, si el suelo se congela en forma permanente o temporal o si no se congela nunca; segundo, si el suelo es o no orgánico; luego, si pertenece o no a los Espodosoles; luego a los Andisoles y así sucesivamente, hasta encontrar aquel taxón en el cual el suelo cumple todos los requisitos que lo definen; cuando se

llega a este punto, el nombre de ese taxón es el que se asigna al suelo y se suspende la búsqueda en los taxa posteriores, pues el primero que se acomoda es el que se selecciona. Para ilustrar el diseño mencionado, en la Tabla 20.8 se presenta la clave para los órdenes, con las definiciones de ellos simplificadas.

La selección del nombre del orden del suelo se debe hacer respetando estrictamente la distribución que presentan en la clave, entre otras cosas, porque como se ve en ella, varios órdenes de suelos pueden presentar los mismos horizontes diagnósticos. Por ésto hay que comprobar otras características para diferenciarlos. Los horizontes diagnósticos posibles en cada uno de los órdenes se muestran en la Figura 20.2, la cual corrobora lo que se ha dicho.

ORDEN HORIZONTE	ALF	AND	EL	ENT	EPT	ERT	ID	IST	OD	OLL	OX	ULT
Mólico				*								
Úmbrico												
Antrópico												
Hístico												
Folístico												
Melánico												
Plágeno												
Ócrico												
Álbico												
Argílico				*								
Cálcico												
Cámbico												
Duripán				*								
Espódico												
Fragipán												
Capa glácica												
Glósico												
Gypsico												
Kándico												
Lamelas												
Nátrico				*								
Óxico												
Petrocálcico				*								
Petrogypsico												
Plácico												
Sálico												
Sómbrico												
Sulfúrico												

* : Fragmentos solamente, no continuos.

FIGURA 20.2. Horizontes diagnósticos considerados explícitamente por el sistema de clasificación del USDA en los diferentes órdenes de suelos, (SSS, 1999, 1998).

TABLA 20.8. Clave simplificada de los órdenes de suelos del sistema de clasificación del USDA (SSS, 1999, 1998).

A. Suelos que tienen permafrost o materiales gélidos.

GELISOLES

B. Suelos que no tienen propiedades ándicas en más del 60% de los primeros 60 cm del suelo y están formados por materiales orgánicos.

HISTOSOLES

C. Otros suelos que tienen Ap con 85% o más de materiales espódicos, o un horizonte espódico y no tienen propiedades ándicas en 60% o más de los primeros 60 cm de suelo mineral.

ESPODOSOLES

D. Otros suelos con propiedades ándicas en 60% o más de los primeros 60 cm de suelo mineral.

ANDISOLES

E. Otros suelos que tienen horizonte óxico en los 150 cm superiores del suelo mineral o 40% o más de arcilla en la tierra fina en los primeros 18 cm de suelo mineral y un horizonte kándico en los primeros 100 cm de suelo mineral.

OXISOLES

F. Otros suelos que tienen un horizonte de 25 cm o más de espesor que tiene slickensides y que tienen 30% o más de arcilla hasta 50 cm de profundidad o más y grietas que se abren y cierran periódicamente.

VERTISOLES

G. Otros suelos que tienen régimen de humedad arídico y epipedón ócrico o antrópico y alguno de los siguientes horizontes en los primeros 100 cm del suelo: argílico, cálcico, cámrico, gypsico, nátrico, petrocálcico, petrogypsico o sálico, o tienen un horizonte sálico y saturación con agua en alguna capa en los primeros 100 cm del suelo durante un mes o más al año y no tienen horizonte sulfúrico.

ARIDISOLES

H. Otros suelos que tienen un argílico o un kándico con saturación de bases menor de 35% en los primeros 200 cm de suelo o un fragipán.

ULTISOLES

I. Otros suelos que tienen un epipedón mólico o un horizonte superficial que cumple los requerimientos del mólico, excepto el espesor.

MOLLISOLES

J. Otros suelos que tienen argílico, kándico o nátrico o tiene un fragipán con películas de arcilla.

ALFISOLES

K. Otros suelos que tienen un cámrico, o condiciones ácuicas en los primeros 50 cm de suelo, o tienen cálcico, petrocálcico, gypsico, petrogypsico, plágico o duripán en los primeros 100 cm de suelo mineral, o tienen fragipán u óxico en los primeros 200 cm de suelo mineral, o tienen un horizonte sulfúrico en los primeros 150 cm de suelo mineral, o tienen epipedones mólico, plágico o úmbrico.

INCEPTISOLES

L. Otros suelos.

ENTISOLES

Una vez que se ha definido el orden correspondiente, se pasa a la clave de los subórdenes y se determina el que identifica el suelo tratado, siguiendo el mismo procedimiento que para establecer el orden; así mismo se definen el gran grupo y el subgrupo.

Al nivel de familia se determinan el tamaño de partículas, la mineralogía y el régimen de temperatura del suelo, que son criterios que se utilizan en la definición de todos los taxa, a este nivel. Luego, se determinan los otros posibles modificadores que le correspondan al suelo específico que se clasifica. Hasta este nivel todos los taxa se encuentran definidos en el sistema de clasificación que se está analizando, es decir, hasta el nivel de familia la clasificación del suelo se hace por comparación de un conjunto de propiedades que tiene éste, con un grupo de propiedades que definen los diferentes taxa descritos en el sistema.

Las características diagnósticas que pueden definir la serie, así como el nombre de ésta, no están definidas en el sistema. Generalmente, la definición, la caracterización y la identificación de las series de suelos se realiza con la colaboración de oficinas de correlación de suelos, en las cuales se lleva el control de los levantamientos de suelos que se hacen en un país o en una región; para ampliar la información acerca de este tema pueden consultarse Malagón (1985), Elbersen et al (1986) y SSDS (1993).

2.8. ALGUNOS PROBLEMAS EN LA CLASIFICACIÓN DE SUELOS CON EL SISTEMA USDA

Para la aplicación de la clasificación de suelos del USDA, se han identificado algunos problemas entre los que sobresalen:

- Poca y deficiente información climática que no permite establecer los regímenes de humedad y temperatura, en forma confiable (Guerrero, 1985).
- Regímenes de humedad y temperatura definidos con rangos muy amplios; además, poca coincidencia de estas definiciones con las condiciones de uso de la tierra en el país y con el manejo de cultivos (Malagón, 1985; Callejas y Castellanos, 1991).
- Desconocimiento del sistema de clasificación de suelos del USDA, según Guerrero (1985); esta condición, así como las causas que la generan expuestas por el autor citado, siguen teniendo validez hoy.
- En algunos órdenes de suelos, particularmente en los Andisoles, muchos taxa están definidos con bastantes determinaciones de laboratorio, las cuales dificultan y encarecen la clasificación de estos suelos; además, muchas de las determinaciones exigidas por el sistema no se tienen a disposición de los usuarios en la mayoría de los laboratorios de suelos del país.
- En algunos taxa, ciertos métodos de laboratorio no son adecuados para caracterizar sus suelos. Éste es el caso, por ejemplo, de la extracción del Al con KCl, utilizada para caracterizar subgrupos Acraquoxic, Alic, Acrudoxic y Dystric de los Andisoles (Jaramillo, 1995) o la extracción de Al y de Fe con oxalato ácido (Jaramillo 2000a, b).

3. EL SISTEMA FAO/UNESCO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Este sistema es muy similar en su concepción y en su nomenclatura al sistema USDA; no utiliza como características diagnósticas los regímenes de humedad y de temperatura. El sistema clasifica los suelos en tres posibles categorías:

- **Grupo principal de suelo:** La categoría más general; equivale, en términos generales, al orden o al suborden del sistema USDA; hay 28 clases definidas.

- **Unidad de suelo:** Es el segundo nivel de clasificación y, en términos generales puede corresponder, en la mayoría de los casos, a los subgrupos del sistema USDA. En el sistema se encuentran definidas 152 clases de suelos correspondientes a esta categoría.
- **Subunidades de suelos:** Son divisiones dentro de las clases anteriores incluidas en el sistema en la revisión que se le hizo en 1988. Aún no se han definido clases en esta categoría.

En la Tabla 20.9 se presentan los nombres de los grupos principales de suelos definidos en el sistema en la revisión que se le hizo en 1988, tomados de Porta et al (1994); se muestra, además, la equivalencia que más probablemente le corresponde en las categorías de orden o suborden del sistema USDA.

TABLA 20.9. Grupos principales de suelos del sistema de clasificación de suelos FAO/UNESCO, versión de 1988 y los órdenes o subórdenes del sistema USDA que con mayor probabilidad les corresponden.

GRUPO PRINCIPAL DE SUELO (TOMADO DE PORTA et al, 1994)	ORDEN O SUBORDEN DEL SISTEMA USDA EQUIVALENTE
Fluvisol	Fluvent, Entisol, Inceptisol, Mollisol
Gleysol	Entisol, Inceptisol, Mollisol en régimen ácuico
Regosol	Entisol
Leptosol	Mollisol, Inceptisol, Entisol líticos
Arenosol	Psamment, Entisol, Gelisol
Andosol	Andisol
Vertisol	Vertisol
Cambisol	Inceptisol, Mollisol
Calcisol	Mollisol, Aridisol, Inceptisol, Alfisol
Gypsisol	Mollisol, Aridisol, Inceptisol, Alfisol
Solonetz	Alfisol, Aridisol
Solonchak	Aridisol, Inceptisol, Mollisol, Entisol
Kastanozem	Mollisol
Chernozem	Mollisol
Phaeozem	Mollisol
Greyzem	Mollisol
Luvisol	Alfisol en clima mediterráneo húmedo
Planosol	Ultisol, Alfisol
Podzoluvisol	Ultisol, Alfisol
Podzol	Espodosol
Lixisol	Alfisol
Acrisol	Ultisol
Alisol	Ultisol en clima mediterráneo húmedo
Nitisol	Ultisol, Alfisol
Ferralsol	Oxisol
Plinthosol	Ultisol, Oxisol, Inceptisol, Alfisol
Histosol	Histosol, Histel
Anthrosol	Anthrept, Inceptisol, Aridisol, Entisol

Los grupos principales de suelos se pueden agrupar, a su vez, por los siguientes criterios, según Porta et al (1994):

- Suelos orgánicos: Histosoles
- Suelos minerales condicionados por influencia antrópica: Anthrosoles
- Suelos minerales condicionados por el material parental: Andosoles, Arenosoles, Vertisoles

- Suelos minerales condicionados por la topografía: Fluvisoles, Gleysoles, Leptosoles, Regosoles
- Suelos minerales condicionados por su edad (léase evolución) limitada: Cambisoles
- Suelos minerales condicionados por un clima húmedo tropical o subtropical: Plinthosoles, Ferralsoles, Nitisoles, Acrisoles, Alisoles, Lixisoles
- Suelos minerales condicionados por un clima árido o semiárido: Solonchaks, Solonetzs, Gypsisoles, Calcisoles
- Suelos minerales condicionados por un clima estepario: Kastanozem, Chernozems, Phaeozems, Greyzems
- Suelos minerales condicionados por un clima templado húmedo o subhúmedo: Luvisoles, Podzoluvisoles, Planosoles, Podsoles

4. EL SISTEMA BRASILERO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Similar a los sistemas USDA y FAO/UNESCO en su concepción y en las propiedades diagnósticas que utiliza. Según Camargo et al (1987), a pesar de que es un sistema que se está trabajando desde 1950, hasta ese año no se tenía una versión suficientemente desarrollada; en 1992 aun se utilizaba la versión de 1987, según Buol et al (1997). Aparte de utilizar muchas de las propiedades diagnósticas de los otros sistemas, hace énfasis en aquellas propiedades que más se relacionan co los suelos de condiciones ambientales tropicales, específicamente en aquellas que tienen que ver con las arcillas de baja actividad y con los sesquióxidos de Fe y de Al.

Camargo et al (1987) hicieron una síntesis del sistema en la que muestran los dos niveles de clasificación utilizados en esa época. En este sistema los suelos se agrupan, en un primer nivel; en 16 clases, las cuales, a su vez, son subdivididas en 38 clases en el segundo nivel categórico. De este trabajo se extrae la información que se presenta en la Tabla 20.10.

TABLA 20.10. Clases de suelos del nivel más alto de clasificación en el sistema brasileño y órdenes del sistema USDA que pueden ser más probablemente equivalentes.

CLASES ALTAS DEL SISTEMA BRASILEÑO (TOMADAS DE CAMARGO et al , 1987)	ÓRDENES DEL SISTEMA USDA EQUIVALENTES
Latossolos	Oxisol, Inceptisol
Terras Roxas y Terras Brunas	Alfisol, Ultisol, Mollisol
Solos Podzólicos	Alfisol, Ultisol, Mollisol
Podzols	Espodosol, Entisol
Brunizéms	Mollisol
Rubrozéms	Ultisol
Solos Brunos não-Cálcicos	Alfisol, Aridisol
Planossolos	Alfisol, Ultisol, Mollisol, Aridisol
Solonetz Solodizados	Alfisol, Aridisol
Solos Salinos	Alfisol, Entisol
Cambissolos	Inceptisol
Plintossolos	Ultisol, Oxisol, Inceptisol, Entisol
Gleissolos	Inceptisol, Ultisol
Vertissolos	Vertisol
Otros suelos poco evolucionados en general*	Entisol, Inceptisol, Mollisol, Aridisol, Gelisol
Solos orgánicos	Histosol

* Rendzinias, Solos Litólicos, Regossolo, Areias Quartzosas, Solos Aluviales

Como se mencionó anteriormente, este sistema hace un gran énfasis en el comportamiento y contenido de los óxidos de hierro y de las arcillas de baja actividad en el suelo, como criterios diferenciales; es así como, de las 38 clases de suelos definidas en el segundo nivel de la clasificación, 14 clases se definen con esos criterios. Esta característica del sistema brasileño lo hace muy promisorio para la clasificación de suelos en condiciones de climas tropicales. Nótese que en la Tabla 20.10 no aparece equivalencia entre ninguna clase del sistema brasileño con el orden Andisol del sistema USDA.

RECORDAR

- La taxonomía de suelos del USDA, aunque no es un sistema natural de clasificación, por lo menos en las categorías altas (orden, suborden, gran grupo y subgrupo) tiene un apoyo fundamental en la Génesis del suelo.
- El sistema USDA es multicategórico: clasifica los suelos en 6 niveles, lo que permite adecuar el sistema de clasificación a diferentes tipos de estudios. Las categorías inferiores (familia y serie) hacen énfasis en características relacionadas con el uso y el manejo de los suelos.
- Las características diagnósticas más utilizadas en el sistema son: Horizontes diagnósticos (endopedones y epipedones) y clima edáfico (regímenes de temperatura y de humedad del suelo).
- La nomenclatura del sistema USDA está basada en partículas, provenientes de raíces latinas y griegas, que se seleccionan de acuerdo con las características que presente el suelo y que se van uniendo para formar los nombres de éste en las diferentes categorías. Así, en el nombre del suelo quedan acumuladas sus principales propiedades.
- Los 12 órdenes de suelos definidos en el sistema, en el ordenamiento que presentan en la clave correspondiente, son: Gelisol, Histsol, Espodosol, Andisol, Oxisol, Vertisol, Aridisol, Ultisol, Mollisol, Alfisol, Inceptisol y Entisol.
- El sistema está diseñado, en su mayor parte, en forma de claves lo que implica que para establecer el taxón que le corresponde al suelo en una categoría hay que evaluar cada uno de ellos en estricto orden de colocación en la clave, desde el primero que aparezca.
- Aparte del sistema USDA, el sistema FAO/UNESCO también tiene amplia difusión y utilización en Europa.
- El sistema brasileño es un sistema que puede ser muy útil para la clasificación de suelos en condiciones de ambientes tropicales.

BIBLIOGRAFÍA

BUOL, S. W.; F. D. HOLE; R. J. McCRAKEN. and R. J. SOUTHARD. 1997. Soil Genesis and Classification. 4^a. Ed. Iowa State University Press. Iowa U. S. A. 527 p.

BUOL, S. W.; F. D. HOLE y R. J. McCRAKEN. 1983. Génesis y clasificación de suelos. 1^a. edición en español. Editorial Trillas. México. 417 p.

- CALLEJAS, S. H. y C. J. CASTELLANOS. 1991. Regímenes de temperatura del suelo (actuales y propuestos). *Suelos Ecuatoriales* 21 (1): 39 – 50.
- CAMARGO, M. N.; E. KLAMT y J. H. KAUFFMAN. 1987. Classificação de solos usada em levantamentos pedológicos no Brasil. Sociedade Brasileira de Ciencias do Solo. Campinas (SP). 24 p.
- CASTELLANOS, C. J. y S. H. CALLEJAS. 1988. Régimen de temperatura de los suelos (actuales y propuestos). En: *Suelos y bosques de Colombia*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá. pp: 27 – 35.
- ELBERSEN, G. W.; S. T. BENAVIDES y P. J BOTERO. 1986. Metodología para levantamientos edafológicos. Segunda parte: Especificaciones y manual de procedimientos. IGAC. Bogotá. 82 p.
- FLÓREZ, A. s.f. Transecto Tatamá, Cordillera occidental: Aspectos climatológicos y geomorfológicos. Análisis Geográficos Nº 3. IGAC. Bogotá. 86 p.
- GARCÍA, R. s.f. Características pluviotérmicas y sus variaciones por la altitud: Un aporte para el análisis de los pisos bioclimáticos en Colombia. En: Fundamentos para la definición de pisos bioclimáticos. Análisis Geográficos Nº 11. IGAC. Bogotá. pp: 15 – 52.
- GUERRERO, M. R. 1985. La utilización del Soil Taxonomy del USDA en América Tropical y en otros países tropicales. *Suelos Ecuatoriales* 15 (1): 7 – 12.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC). 1977. Estudio general y detallado de suelos de los municipios de Cota, Funza, Mosquera y parte de Madrid (departamento de Cundinamarca). IGAC. Bogotá. 513 p.
- JARAMILLO, D. F. 2000a. Clasificación taxonómica de los suelos del altiplano de San Félix, departamento de Caldas. *Rev. Fac. Nal. Agr. Med.* 53(2): 1059-1076.
- JARAMILLO, D. F. 2000b. Efecto del secado de las muestras sobre la extracción selectiva de Fe y Al activos en Andisoles del norte de la cordillera central colombiana. *Rev. Fac. Nal. Agr. Med.* 53(2): 1077-1090.
- JARAMILLO, D. F. 1995. Andisoles del oriente antioqueño: Caracterización química y fertilidad. Medellín. 35 p.
- LLANO, M. del. 1956. Clasificación filogenética y ecológica de los suelos del mundo. *Suelos Ecuatoriales* 1(1): 4 – 12.
- MALAGÓN, D.; C. PULIDO; R. LLINÁS y C. CHAMORRO. 1995. *Suelos de Colombia: Origen, evolución, clasificación, distribución y uso*. IGAC. Bogotá. 632 p.
- MALAGÓN, D. 1985. Aplicación de la taxonomía del USDA en la correlación y cartografía de los suelos de Colombia: Metas futuras. *Suelos Ecuatoriales* 15 (1): 36 – 48.
- MEJÍA, L. 1985. Generalidades sobre la estructura, principios básicos, criterios de clasificación y nomenclatura de la taxonomía de suelos del USDA. *Suelos Ecuatoriales* 15 (1): 49 – 84.
- PORTE, J.; M. LÓPEZ – ACEVEDO y C. ROQUERO. 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi Prensa. Madrid. 807 p.
- SHOJI, S. 1988. Proposal on the separation of melanic and fulvic Andisols. Appendix 6. In: ICOMAND Circular letter Nº 10. pp. 69-80.
- SOIL SURVEY DIVISION STAFF (SSDS). 1993. Soil survey manual. Handbook No. 18. United States Department of Agriculture (USDA). Washington D. C. 437 p.

SOIL SURVEY STAFF. (SSS) 1999. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2^a. Ed. Agriculture Handbook Nº 436. Soil Survey Staff. Washington D. C. 869 p.

SOIL SURVEY STAFF. (SSS). 1998. Keys to Soil Taxonomy. 8^a. Ed. Soil Survey Staff. Washington D. C. 326 p.

SOIL SURVEY STAFF. (SSS) 1975. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. Agriculture Handbook Nº 436. USDA. Washington D. C. 754 p.

AUTOEVALUACIÓN

1. Diga 4 objetivos de una clasificación.
2. Enumere 6 atributos que presente el sistema de clasificación de suelos del USDA.
3. ¿Cómo se define el suelo desde la perspectiva de la clasificación de suelos?.
4. ¿Qué es una característica diagnóstica?. ¿Cuáles son las 4 de mayor uso?.
5. ¿Qué es un epipedón?. ¿Un endopedón?.
6. ¿Cuál es la diferencia entre un epipedón mólico y uno úmbrico?.
7. Enumere 5 endopedones iluviales.
8. ¿Qué es régimen de humedad?. ¿De temperatura?. ¿Cómo se caracteriza cada uno de ellos?.
9. ¿Cuántas categorías posee el sistema de clasificación de suelos del USDA?. Enumérelas en orden descendente de generalización.
10. ¿Cómo se relacionan las categorías taxonómicas con el nivel del levantamiento de suelos?.
11. ¿Qué se entiende por elemento formativo del orden?. Exponga los elementos formativos de los 12 órdenes de suelos definidos en la taxonomía.
12. Diga la característica fundamental que identifica cada uno de los órdenes definidos en la taxonomía.
13. ¿Un mismo horizonte diagnóstico puede presentarse en varios órdenes?. Coloque ejemplos para ilustrar su respuesta.
14. ¿Cuál es la diferencia fundamental entre un Alfisol y un Ultisol?.
15. ¿El horizonte argílico es exclusivo de los Alfisoles y Ultisoles?. Comente la respuesta.
16. ¿Qué quiere decir que la taxonomía de suelos del USDA está organizada en forma de clave?. ¿Qué implica ese diseño para clasificar un suelo?.

EVALUACIÓN

1. Podrá clasificarse como orgánico el material del horizonte A de un suelo que tiene 10% de arcilla y 8% de carbono orgánico, considerando las definiciones que da el SSS (1999) para materiales orgánicos e inorgánicos del suelo?. (R: No, debe tener más de 13% de carbono orgánico para ser considerado como material orgánico, con el contenido de arcilla que presenta).
2. Se encontraron los siguientes nombres de suelos:
 - a. Uderts.
 - b. Fluvaquentic Cryofibrists.
 - c. Durustalfs.
 - d. Lithic Psammaquents silíceo isomésico.
 - e. Melanudands.

Para cada uno de los suelos anteriores resuelva:

- i. Orden al cual pertenece.
- ii. Categoría en la cual está clasificado.
- iii. Diga 2 propiedades diagnósticas que puedan deducirse del nombre.

3. Para los perfiles de los suelos expuestos en el numeral 11 de la autoevaluación del Capítulo 5, proponga dos posibles órdenes taxonómicos para clasificarlos, sustentando la propuesta.

CARTOGRAFÍA DE SUELOS

CAPÍTULO 21

CONTENIDO

- ❖ Delimitación
 - Tipos de observaciones de suelos
 - Calicatas
 - Detalladas
 - De comprobación
 - Mapeo de suelos
 - Mapeo en red
 - Mapeo en transectos
 - Mapeo libre
 - Áreas de muestreo o Áreas piloto
- ❖ El mapa de suelos
 - La escala del mapa de suelos
 - Las unidades cartográficas
 - Consociación
 - Asociación
 - Complejo
 - Disociación
 - Inasociación
 - Las unidades taxonómicas
 - Taxadjunto
 - Variante
 - Conjunto
 - Fase
 - Áreas misceláneas
 - El contenido del mapa de suelos
 - La leyenda
 - Información complementaria

OBJETIVOS

- ❖ Conocer el procedimiento utilizado para hacer mapas de suelos
- ❖ Conocer las propiedades de los mapas de suelos
- ❖ Conocer las diferencias fundamentales que hay entre la cartografía de los diferentes tipos de levantamientos de suelos

C

uando se han caracterizado y clasificado los suelos de una región, se hace necesario establecer su distribución y representarla en mapas; ésto permite conocer la **ubicación** de los diferentes suelos en el terreno, el **área** que ellos ocupan y los suelos con los cuales tienen alguna **relación espacial**.

1. DELIMITACIÓN

En esta fase del levantamiento se establecen los límites de los **cuerpos de suelos** que se van encontrando, mediante el ajuste de la fotointerpretación preliminar que se tiene y con el conocimiento de la relación **paisaje -suelo** que se va adquiriendo a medida que avanza el trabajo de campo.

Como se mencionó en el Capítulo 19, para la delimitación de los cuerpos de suelos se utiliza el análisis fisiográfico, el cual permite separar áreas en las cuales los factores de formación: clima, relieve, material parental, organismos y edad, han ejercido un control similar en la evolución de los paisajes terrestres y de los suelos que los componen.

Aquellas unidades fisiográficas en las cuales los factores de formación han actuado en forma similar se conocen como **Paisajes Fisiográficos** y son las unidades fisiográficas básicas para el análisis fisiográfico y para la cartografía de los suelos (Botero, 1996, 1977; Villota, 1997, 1991).

En la delimitación de las clases de suelos, es fundamental establecer la relación **Fisiografía-Suelos** que hay en la zona de estudio, ya que este conocimiento se convierte en el modelo predictivo que permite saber qué suelos se van a presentar en una determinada parte del terreno; cuando este patrón de distribución de los suelos se ha definido, la labor de delimitar se facilita enormemente.

El análisis fisiográfico, al igual que la clasificación taxonómica de los suelos, también es jerárquico y multicategórico, razón por la cual puede hacerse en diferentes niveles de clasificación, con base en procesos geológicos, geomorfológicos, pedológicos y de uso.

En el Centro Interamericano de Fotointerpretación (CIAF), a comienzos de la década de los 70, se empezó a configurar el análisis fisiográfico como una técnica para llevar a cabo la cartografía de los suelos (Elbersen et al, 1974; Botero, 1977; Botero et al, 1977). Esta metodología ha continuado su evolución (Elbersen et al, 1986) y hoy se tiene una propuesta depurada y probada con muchos trabajos de levantamiento de suelos. Esta última propuesta de análisis fisiográfico ha sido presentada por Villota (1997) y establece las siguientes unidades fisiográficas: Provincia Fisiográfica, Unidad Climática, Gran Paisaje, Paisaje y Subpaisaje, las cuales se definen como sigue:

- **Provincia fisiográfica:** Es la unidad mayor y puede coincidir con regiones naturales. Es un área que se ha formado por procesos geológicos globales, como orogénesis por ejemplo, que le da alguna homogeneidad general en el relieve; Villota (1997) ha reconocido 15 provincias fisiográficas para Colombia, entre las cuales se tienen, como ejemplo, la cordillera central, la Amazonia, la costa caribe o la depresión del río Magdalena.

- **Unidad climática:** Es la subdivisión de la provincia fisiográfica en unidades que presentan condiciones de temperatura promedio y de disponibilidad de agua lo suficientemente homogéneas como para ejercer un control específico en la pedogénesis, en la distribución de la vegetación natural y en el uso de la tierra. La discusión que se hizo en el Capítulo 1, numeral 1.2, acerca de la clasificación del clima, presenta algunos de los métodos que se utilizan con más frecuencia para definir esta unidad fisiográfica.
- **Gran paisaje:** Es una unidad que tiene homogeneidad genética en el relieve. Villota (1997) describe 21 de estas unidades, aunque reconoce que pueden ser muchas más. Ejemplos de grandes paisajes establecidos por el autor citado antes son: Relieve montañoso estructural - erosional, relieve colinado disolucional, superficie de aplanamiento, planicie lacustre, piedemonte diluvial o valle aluvial.
- **Paisaje:** Es la unidad en la cual se presentan características climáticas, morfológicas, litológicas y de edad muy similares. Ejemplos de paisajes fisiográficos importantes en áreas de agricultura intensiva los constituyen las terrazas aluviales de diferentes edades (niveles), los abanicos aluviales, también de edades diferentes y las llanuras de inundación de los ríos.
- **Subpaisaje:** Es una unidad definida con base en modificadores actuales del paisaje, que afectan el uso y el manejo de los suelos. Para identificarlos se utilizan, generalmente, criterios morfométricos. Los atributos que con mayor frecuencia se tienen en cuenta para definir los subpaisajes son:
 - La forma y/o el grado de las vertientes.
 - El tipo y el grado de erosión.
 - El tipo, intensidad y densidad de los movimientos en masa.
 - La condición de drenaje.

Para ilustrar un poco la manera en que se hace el análisis fisiográfico, a continuación, en la Figura 21.1 se presenta lo que podría ser una leyenda fisiográfica en un valle aluvial.

PROVINCIA FISIOGRÁFICA	UNIDAD CLIMÁTICA	GRAN PAISAJE	PAISAJE	SUBPAISAJE
Depresión Cauca - Patía	Piso cálido subhúmedo	Valle aluvial del río Cauca entre Buga y Andalucía	Terraza alta Terraza baja Llanura actual de inundación	Parte plana Talud Parte plana Talud Dique Basín Meandros abandonados Complejos de orillares Cubetas de decantación

FIGURA 21.1. Leyenda fisiográfica para una llanura aluvial de un río meándrico (hipotética).

Obsérvese en la leyenda anterior que al nivel de paisaje se separan las dos terrazas como unidades diferentes. Esto se debe a que la diferencia de posición que tienen en el terreno (diferencia de altura entre ellas) es criterio cronológico: la más alta es más vieja que la más baja. La diferencia de edad entre ellas es criterio suficiente para tratarlas, en principio, como paisajes diferentes.

La jerarquización fisiográfica que se ha presentado anteriormente permite adaptar el nivel del análisis a los diferentes niveles de levantamientos de suelos, como lo muestra la Tabla 21.1.

TABLA 21.1. Relación entre las unidades fisiográficas y el tipo de levantamiento (Adaptada de Elbersen et al, 1986).

TIPO DE LEVANTAMIENTO	UNIDAD FISIOGRÁFICA
Detallado y Semidetallado	Subpaisaje y/u otras posibles subdivisiones de él, no definidas en el sistema, con criterios eminentemente prácticos.
General	Paisaje y/o Subpaisaje.
Exploratorio	Gran Paisaje y/o Paisaje.

Se indicó al comienzo de este aparte que la delimitación se hace inicialmente por fotointerpretación. Obviamente, el resultado de este trabajo tiene que ser confirmado mediante actividades de campo que permitan observar el suelo, de modo que éste pueda ser conocido, descrito, muestreado y clasificado y que, además, se puedan establecer las relaciones entre las unidades fisiográficas definidas, así como con la imagen que se está utilizando en el estudio.

1.1. TIPOS DE OBSERVACIONES DE SUELOS

Para establecer las propiedades y características de los suelos, que van a permitir agruparlos o separarlos entre sí, ellos deben ser observados en sus condiciones naturales; hay varias clases de observaciones que pueden hacerse, dependiendo del grado de detalle con el cual se quiera conocer el suelo.

1.1.1. Calicatas

Son las observaciones más detalladas; se llevan a cabo en huecos (calicatas) de aproximadamente 1.5×1.5 m y entre 1.5 y 2 m de profundidad en los cuales se encuentra expuesto el perfil completo del suelo; su finalidad primordial es describir completa y detalladamente el perfil representativo de un cuerpo suelo y muestrearlo para establecer todas sus propiedades y características **modales** (más frecuentes).

1.1.2. Detalladas

Son observaciones que se hacen en cortes previamente existentes o en **minicalicatas** (huecos de 0.4 ó 0.5×0.4 ó 0.5 m y con profundidad que permita observar directamente todo el **solum**) hechas para el efecto; estas observaciones son las más frecuentes en las etapas iniciales del levantamiento y son las que permiten ir estableciendo las características y propiedades de los suelos, así como sus rangos de variación correspondientes.

1.1.3. De comprobación

Son las más comunes cuando ya se tiene definida la relación Fisiografía-Suelo y se utilizan para comprobar esta relación en áreas que han tenido baja intensidad de observaciones; generalmente, se realizan con barreno.

El tipo y número de observaciones a realizar depende del tipo de levantamiento que se está realizando, como puede apreciarse en la Tabla 21.2.

TABLA 21.2. Tipo y densidad de observaciones que se requieren en diferentes niveles de levantamientos de suelos, según Elbersen et al (1986) y Malagón (1986).

Tipo de levantamiento	Cantidad media de observaciones por km ²		Calicatas por cada suelo diferente*
	Detalladas	De comprobación	
Detallado	20	80	2
Semidetallado	4	9	1
General	0.45	0.4	1
Exploratorio	0.25	0.125	1

* Se adicionan otras de acuerdo con el área que presente el suelo.

1.2. MAPEO DE SUELOS

Según Forero (1984) es el procedimiento que se sigue en campo y oficina para detectar y mostrar el patrón de distribución de los suelos de la zona que se estudia; en esta fase, se define el sistema mediante el cual se van a ubicar las observaciones de suelos requeridas, lo cual depende del tipo de levantamiento, de lo complejo que se espere que sea el patrón de distribución de los suelos y de la accesibilidad de la zona.

1.2.1. Mapeo en red

En este sistema de trabajo, las observaciones de suelos se ubican siguiendo una malla de puntos en la cual la intersección de líneas determina el sitio de ubicación de la observación; según Forero (1984) y Cortés y Malagón (1984), este sistema tiene la ventaja de que permite evaluar estadísticamente la composición taxonómica de las unidades cartográficas.

Este sistema de mapeo es aplicable sólo en pequeñas áreas y puede ser el más indicado para hacer estudios en zonas donde no hay buen contraste fisiográfico que facilite la delimitación de los suelos, en estudios donde se deba tener una alta densidad de observaciones o cuando se trabaja con suelos que presentan problemas especiales como salinidad, alcalinidad, hidrofobicidad, etcétera.

1.2.2. Mapeo en transectos

En este sistema, las observaciones de suelos se ubican sobre una línea imaginaria cuya dirección se establece perpendicularmente a la dirección en la cual se presente la mayor variación fisiográfica o edafológica, según se conozca o no el patrón de distribución de los suelos.

Según Forero (1984), los transectos se usan principalmente en estudios generales o menos detallados con el fin de comprobar límites de fotointerpretación preliminar o para confirmar resultados de extrapolaciones hechas a partir del estudio en áreas piloto.

1.2.3. Mapeo libre

Con este tipo de mapeo, las observaciones de suelos se ubican atendiendo a la relación fisiografía-suelo, según el criterio del reconocedor de suelos; aquí no se sigue un esquema definido para ubicar los chequeos de suelos que se hagan; su utilización exige que se conozca el patrón de distribución de los suelos y que el edafólogo tenga experiencia.

1.3. ÁREAS DE MUESTREO O ÁREAS PILOTO

Son áreas que representan un porcentaje del área total bajo estudio. En ellas se realiza un trabajo intenso de campo para establecer el patrón de distribución de los suelos; una vez conocido este patrón, en el resto del área se lleva a cabo una extrapolación de esa información para terminar la labor de delimitación de los suelos.

Este sistema de mapeo puede utilizarse en cualesquiera de los levantamientos y, dentro de las áreas piloto puede implementarse cualesquiera de los métodos de mapeo descritos anteriormente; cuando se utiliza este sistema, es cuando mayor aplicación tiene el mapeo libre al utilizarlo en el proceso de extrapolación.

Sin importar cual sistema de mapeo se utilice, si los puntos de observación son georreferenciados en un sistema de coordenadas (verdaderas o arbitrarias), los resultados de la caracterización y clasificación de los suelos encontrados pueden ser sometidos a análisis de **variabilidad espacial** y de interpolación. Se pueden producir mapas de **isolíneas** de varias propiedades del suelo, siguiendo los métodos descritos por Jaramillo (1997), como se verá en el próximo capítulo de este texto.

2. EL MAPA DE SUELOS

El mapa de suelos es un mapa temático que representa la distribución espacial de los suelos de una determinada región. Es uno de los medios más efectivos para comunicar los resultados de un levantamiento de suelos. En la elaboración del mapa de un levantamiento de suelos hay 3 aspectos fundamentales a considerar: La escala, las unidades cartográficas y la presentación del contenido.

2.1. LA ESCALA DEL MAPA DE SUELOS

La escala de un mapa informa acerca de las veces que se han tenido que reducir las dimensiones de los objetos reales para poderlos representar en él. De acuerdo con lo anterior, ella define el tamaño mínimo que deben tener los objetos que quieren representarse en el mapa; en el caso de los levantamientos de suelos, el tamaño mínimo que debe tener un cuerpo suelo para que pueda ser representado en aquel.

Según lo expuesto, también está controlando, en cierta medida, el tamaño del área que puede estudiarse con un determinado nivel de detalle; entre más detallado sea el estudio requerido, se pueden separar más cuerpos suelo, pero con menor área, lo que implica que se debe utilizar una escala mayor para poderlos representar y que el área total a estudiar con alto grado de detalle debe ser pequeña.

Así mismo, la escala a la cual se va a publicar el mapa del levantamiento define el tipo de imagen que se va a utilizar para la fotointerpretación, puesto que la transferencia de información entre documentos tiene limitaciones cartográficas y fotogramétricas debidas a la diferencia de escala. Cabe aclarar que el mapa de suelos se realiza sobre un mapa, generalmente topográfico, elaborado previamente, llamado **mapa base** y éste es el que le da la precisión cartográfica final al mapa de suelos; las relaciones establecidas anteriormente se resumen en la Tabla 21.3.

TABLA 21.3. Relación entre el tipo de levantamiento de suelos con la escala del mapa, la imagen y el área mínima de mapeo en campo (Adaptada de Elbersen et al, 1986).

TIPO DE LEVANTAMIENTO	ESCALA DEL MAPA*	TIPO DE IMAGEN	ÁREA MÍNIMA DE MAPEO EN CAMPO (ha)**
Detallado	1:10000 a 1:25000	Fotografías aéreas	0.25 ó 1.56
Semidetallado	1:25000 a 1:50000	Fotografías aéreas	1.56 ó 6.25
General	1:50000 a 1:100000	Fotografías aéreas, Imágenes Spot	6.25 ó 25
Exploratorio	1:100000 a 1:250000	Imágenes de satélite y de radar	25 ó 156

* En color los valores más utilizados en Colombia.

** Para los valores de escala de la segunda columna.

Para ilustrar las diferencias entre los mapas de estudios de diferente escala, con respecto a la precisión, al detalle de las delineaciones hechas en ellos y al tipo de información que presentan, en la Figura 21.2 se presentan fragmentos de mapas de la misma zona, uno de un estudio general y el otro de uno detallado, con sus correspondientes leyendas.

El valor de la escala se puede representar en forma numérica, como una proporción, o en forma gráfica; esta última forma de representación es más práctica ya que al reducir o ampliar el mapa, la escala también lo hace en igual medida, conservándose su validez; las siguientes son formas de presentación de la escala:



La escala es adimensional y significa, en los ejemplos anteriores, que una parte (cualquier unidad como cm, mm, etc.) medida en el mapa equivale a 10000 de esas mismas partes medidas en el terreno, es decir, que por ejemplo 1 cm medido en el mapa representa una distancia de 10000 cm ó 100 m en el terreno.

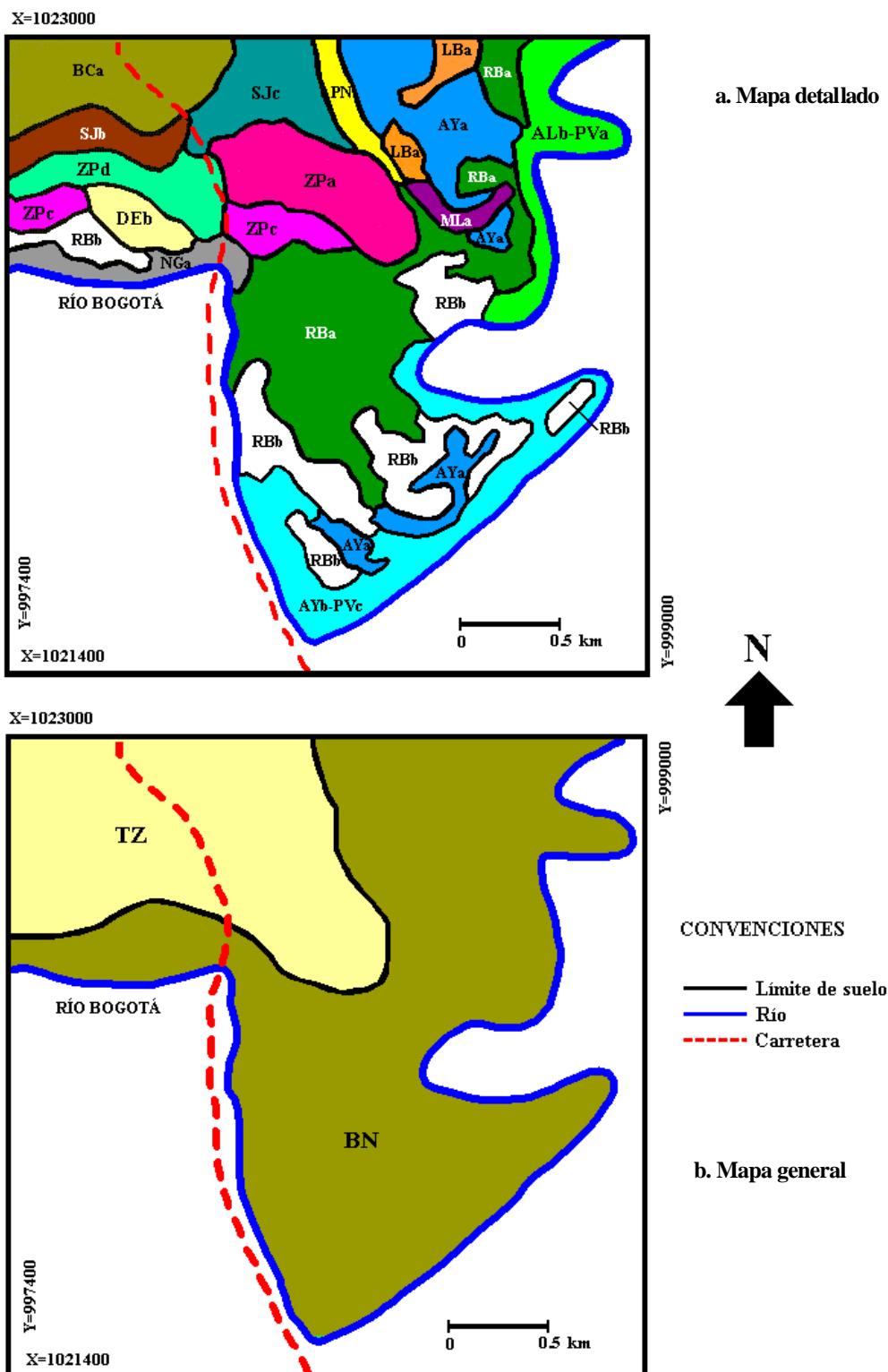


FIGURA 21.2. Fragmentos de mapas de estudios de suelos, con diferente detalle, de un sector de la Sabana de Bogotá. a. De un estudio detallado (Tomado de IGAC, 1977). b. De un estudio general (Tomado de Carrera et al, 1968).

a. Leyenda del estudio detallado.

UNIDADES FISIOGRÁFICAS	UNIDADES TAXONÓMICAS		SÍMBOLO
	FAMILIA	SERIE	
Planicie aluvial del río Bogotá	Tropic Fluvaquents franco fino, mezclado, ácido, isomésico	Arrayán arcilloso, plano	AYa
	Tropic Fluvaquents fino, mezclado, ácido, isomésico	La Balsa arcilloso, plano, muy pobemente drenado, superficial	LBa
	Tropic Fluvaquents muy fino, mezclado, ácido, isomésico	Río Bogotá arcilloso, plano, pobemente drenado, moderadamente profundo	RBa
		Río Bogotá arcilloso, plano, ondulado, muy pobemente drenado, superficial	RBb
	Thapto Histic Tropic Fluvaquents fino, mezclado, ácido, isomésico	Media Luna arcilloso, plano-cóncavo, muy pobemente drenado, superficial	MLa
	Typic Tropaquepts muy fino, mezclado, ácido, isomésico	Nogales franco arcilloso, plano, pobemente drenado	NGa
	Tropic Fluvaquents y Tropic Psammaquents muy fino, mezclado, ácido y cuarcítico, isomésicos	Complejo* Arrayán-Puente Vargas franco arcillosos, planos	(AYb-PVc)
	Tropic Fluvaquents y Tropic Psammaquents franco grueso, mezclado, ácido y cuarcítico, isomésicos	Complejo* Alameda franco arcillo arenoso y Puente Vargas franco arenoso, planos	(ALb-PVa)
Misceláneo pantanoso			PN
Talud ligeramente plano a inclinado de terraza baja lacustre	Andic Aquic Humitropepts medial sobre arcilloso, caolinítico, isomésico	Zipaquirá franco, ligeramente plano	ZPa
		Zipaquirá franco, ligeramente inclinado	ZPc
		Zipaquirá franco, inclinado	ZPd
	Typic Tropaquepts muy fino, caolinítico, ácido, inclinado, isomésico	Delicias franco, ligeramente plano a ligeramente inclinado	DEb
Terraza baja lacustre	Andic Aquic Humitropepts medial isomésico	San Jacinto franco, ligeramente plano	SJb
		San Jacinto franco arcillo limoso, ligeramente plano a ligeramente inclinado	SJc
	Typic Dystrandepts medial, isomésico	Bacatá franco, plano	BCa

* Unidad cartográfica (ver numeral 2.2.3. en este capítulo); en todos los demás casos se trata de consociaciones (ver numeral 2.2.1. de este capítulo).

b. Leyenda del estudio general.

UNIDADES FISIOGRÁFICAS	ASOCIACIONES*	UNIDADES TAXONÓMICAS ¹		SÍMBOLO
		CONJUNTOS	SUBGRUPOS	
Vegas	Río Bogotá-Nemocón	Río Bogotá	Aeric Tropaquepts	BN
		Nemocón	Tropic Fluvaquents	
Planicies y abanicos	Tibaitatá-Zipaquirá-Corzo	Tibaitatá	Andic Eutropepts	TZ
		Zipaquirá	Humitropepts	
		Corzo	Typic Eutrandepts	

* Unidad cartográfica (ver numeral 2.2.2. de este capítulo).

¹ Para Conjunto, ver numeral 2.3.3. de este capítulo. Los subgrupos tomados de Mejía (1987).

FIGURA 21.2. Continuación. Leyendas de los mapas de la página anterior. a. Del estudio detallado. b. Del estudio general. En ambos casos modificadas sólo en su presentación con respecto a los originales.

En la Figura 21.2 es evidente que la cantidad de información cartográfica, fisiográfica y pedológica que suministra el estudio detallado es bastante mayor que la proporcionada por el estudio general, lo que permite, además, hacer mejores interpretaciones y recomendaciones en el primer estudio mencionado.

2.2. LAS UNIDADES CARTOGRÁFICAS O DE MAPEO

Según el Soil Management Support Services (SMSS, 1985), el mapa de suelos presenta un conjunto de áreas completamente delimitadas por líneas, cada una de las cuales se llama **delineación de suelos**; todas las delineaciones de suelos que se encuentran identificadas con un mismo símbolo en el mapa conforman una **unidad cartográfica**.

Todas las unidades cartográficas tienen un símbolo y un nombre y se encuentran definidas por una o varias **unidades taxonómicas** (taxón de cualquier categoría del sistema taxonómico de clasificación de suelos) y/o por **áreas misceláneas** (zonas sin suelos).

Dependiendo de que en una unidad cartográfica predominen una o varias unidades taxonómicas, se tienen unidades **monotáxicas** o **polítáxicas**, respectivamente; la utilización de unidades polítáxicas en los levantamientos de suelos se justifica por varias razones como:

- Los objetivos del levantamiento no requieren de la precisión que dan las unidades monotáxicas.
- El patrón de distribución de los suelos es muy intrincado y no se logró dilucidar durante el levantamiento.
- El área del levantamiento no fue lo suficientemente grande como para establecer el patrón de distribución de los suelos.
- Las áreas que ocupa cada suelo no son cartografiadas independientemente, por problemas de escala.
- Las diferencias entre los suelos encontrados no son suficientes como para afectar el uso y manejo de ellos y su representación en una sola unidad simplifica el trabajo del levantamiento.

No obstante las justificaciones anteriores, cuando los objetivos del levantamiento exigen la presentación de unidades cartográficas monotáxicas y éstas pueden separarse con las actividades normales del levantamiento, ellas deben ser establecidas. Los aspectos meramente económicos no deben determinar el uso de las unidades polítáxicas.

Las unidades cartográficas que se utilizan actualmente para los levantamientos de suelos son: Consociación, Asociación, Complejo, Grupo no diferenciado o Disociación y Grupo no asociado o Inasociación; León (1980), Forero (1984), SMSS (1985) y Soil Survey Division Staff (SSDS, 1993) discuten ampliamente las unidades de mapeo mencionadas y de ellos se extrae el resumen que se presenta a continuación.

2.2.1. Consociación

Es la unidad en la cual domina una clase de suelo que representa más del 50% de los suelos encontrados en ella. Además, del resto de taxa solo puede haber un 25%, como máximo, de suelos disímiles (diferentes) al que caracteriza la unidad.

2.2.2. Asociación

Son unidades que contienen dos o más suelos disímiles dominantes que se presentan relacionados geográficamente. Cada uno de los componentes principales de la unidad se puede representar por separado a escala 1:24000.

2.2.3. Complejo

Es la unidad que presenta dos o más suelos dominantes y disímiles, asociados geográficamente, pero que no pueden separarse en estudios a escala de 1:24000 debido a lo intrincado de su patrón de distribución.

2.2.4. Disociación

Es la unidad que presenta dos o más suelos dominantes, que no están asociados geográficamente, pero que se incluyen juntos debido a que presentan un comportamiento similar frente al uso y manejo que pueda dárseles.

2.2.5. Inasociación

Es la unidad que presenta dos o más suelos dominantes que no están asociados geográficamente y que presentan comportamientos diferentes frente al uso y manejo. Generalmente, es una unidad transitoria que con un estudio más detallado de los suelos puede pasar a formar asociaciones, disociaciones o complejos, principalmente; su uso es común en áreas grandes con levantamientos generales o exploratorios donde es difícil establecer el patrón de distribución de los suelos.

Puede deducirse de lo anterior que la **consociación** es la unidad fundamental en los levantamientos más detallados, ya que en ellos hay un mayor y mejor conocimiento del suelo y unos objetivos más específicos que cumplir; es la única unidad monotáxica en los levantamientos de suelos.

El uso de las diferentes unidades cartográficas está condicionado por el nivel de detalle del levantamiento, como lo muestran las recomendaciones del SMSS (1985) que se presentan en la Tabla 21.4. Las relaciones establecidas en esta tabla evidencian que hay una mayor pureza en el contenido

pedológico de las unidades cartográficas a medida que se va incrementando el detalle del estudio; ésto se debe a la realización de un trabajo de campo más intenso para la obtención de un mayor detalle, que lleva a tener un mejor conocimiento del suelo y de su distribución, así como a reducir los rangos de variación de sus características.

TABLA 21.4. Relación entre las unidades cartográficas y el tipo de levantamiento de suelos, según el SMSS (1985).

TIPO DE LEVANTAMIENTO	UNIDADES CARTOGRÁFICAS*
Detallado	Consociación, complejo , disociación, inasociación.
Semidetallado	Asociación, complejo , consociación, disociación.
General	Asociación , complejo, consociación, disociación.
Exploratorio	Asociación , consociación, disociación.

* Resaltadas en color las unidades que mejor se ajustan a cada tipo de levantamiento.

2.3. LAS UNIDADES TAXONÓMICAS

Se ha mencionado que las unidades cartográficas son definidas con unidades taxonómicas, las cuales son, en sentido estricto, cualquier categoría del sistema taxonómico de clasificación de suelos en la que se clasifiquen los suelos en un levantamiento. Es decir, las unidades taxonómicas son orden, suborden, gran grupo, subgrupo, familia y serie, cuando los suelos se están clasificando según el sistema taxonómico norteamericano; en el Capítulo 20 se informa, con relativa amplitud, acerca de estas unidades taxonómicas básicas.

Aparte de las unidades básicas se han diseñado otras llamadas **unidades taxonómicas funcionales**, las cuales, según León (1980), se han establecido para ayudar a la cartografía de suelos. El SMSS (1985) y el SSDS (1993) consideran dos unidades taxonómicas funcionales: Taxadjunto y Variante; a éstas se añade el Conjunto, definido en el CIAF (Colombia) (León, 1980; Cortés y Malagón, 1984; Elbersen et al, 1986). También pueden considerarse dentro de este grupo de unidades, por la forma en que se utilizan, la **Fase** y las **Áreas misceláneas**.

2.3.1. Taxadjunto

Según León (1980), es una clase de suelo que difiere de una Serie de suelos ya definida, en forma **no significativa**, en alguna o algunas **pocas** características, por lo cual no se considera como una nueva Serie, sino como un **taxa adjunto** (taxadjunto) de la Serie a la cual se parece.

2.3.2. Variante

Son clases de suelos cuyas características y propiedades difieren de las de la Serie más parecida en forma tan **amplia** que podría crearse una nueva Serie, pero la **extensión** de aquella nueva clase es menor a 800 ha y, por lo tanto, se considera una variante de la Serie de suelos ya establecida que más se le parezca. Debe tenerse en cuenta que ni la variante ni el taxadjunto generan nuevas unidades cartográficas (SMSS, 1985; SSDS, 1993).

2.3.3. Conjunto

Es una unidad que resulta de subdividir una clase taxonómica superior a familia, según su ocurrencia en diferentes **paisajes fisiográficos** (Elbersen et al, 1986); por lo anterior, León (1980) establece que el conjunto puede concebirse como una **Fase Fisiográfica** de una unidad taxonómica.

2.3.4. Fase

Es una subdivisión que se hace en cualquier categoría taxonómica con base en cambios que se presenten en atributos del suelo importantes para su uso y manejo como pendiente, erosión, textura superficial, pedregosidad, salinidad, etcétera; puede utilizarse en cualquier tipo de levantamiento.

Se está considerando la fase de suelo como una unidad taxonómica funcional, en este texto, debido a que: primero, se aplica a categorías de unidades taxonómicas básicas y, segundo, porque se utiliza para identificar unidades cartográficas.

2.3.5. Áreas misceláneas

Son áreas donde prácticamente no hay suelo y, por lo tanto, presentan severas restricciones para el uso agropecuario. La mayoría de las veces requieren de fuertes prácticas de recuperación para que puedan ser utilizadas. Los misceláneos más frecuentes son: urbano, de afloramiento rocoso, pantanoso, de escombros, de tierras malas (bad land), de playas, de canteras, de depósitos aluviales de cauce, de dunas. En el nombre de estas áreas siempre se coloca la palabra misceláneo, al principio; por ejemplo: Misceláneo Urbano, Misceláneo de Dunas, etc. Esta nomenclatura también se utiliza para definir componentes de las unidades cartográficas, por lo que se consideran, en este texto, unidades taxonómicas funcionales. Las áreas misceláneas se definen en cualquier tipo de levantamiento.

Como ya se mencionó e ilustró en el Capítulo 20, también el tipo de unidades taxonómicas a utilizar depende del tipo de levantamiento que se está realizando. Sin embargo, con el fin de incluir las unidades taxonómicas funcionales, en la Tabla 21.5 se expone la relación existente entre esos dos aspectos.

TABLA 21.5. Relación entre el tipo de levantamiento de suelos y las unidades taxonómicas, con base en SSDS (1993), Elbersen et al (1986), SMSS (1985) y León (1980).

TIPO DE LEVANTAMIENTO	UNIDADES TAXONÓMICAS
Detallado	Serie, taxadjunto, variante, familia, fases y misceláneos.
Semidetallado	Familia, conjuntos de subgrupos por paisaje, fases y misceláneos.
General	Conjuntos de subgrupos por paisaje, fases y misceláneos.
Exploratorio	Conjuntos de grandes grupos o de subórdenes por paisaje, fases y misceláneos.

2.4. EL CONTENIDO DEL MAPA DE SUELOS

Aparte de las delineaciones de suelos, otras partes esenciales del mapa son la leyenda y la información complementaria.

2.4.1. La Leyenda

Un mapa, por ser una representación de la distribución de algún fenómeno, tiene que estar acompañado, necesariamente, de algo que explique lo que se está representando en él; ese algo es la leyenda, sin la cual el mapa pierde toda utilidad. La leyenda es, en la práctica, un resumen de los resultados obtenidos en el levantamiento; ella describe el contenido de las diferentes unidades cartográficas y su entorno; en lo posible, debe presentar la mayor cantidad de información relacionada con la interpretación del estudio; una leyenda de un mapa de suelos, en cualquier nivel de detalle, debe contener información acerca de los tópicos que se plantean en el siguiente modelo de encabezamiento:

UNIDADES FISIOGRÁFI- CAS	UNIDADES TAXONÓMICAS			UNIDADES CARTOGRÁFICAS		USO ACTUA- L	LIMITANTES DE USO	USO POTEN- CIAL
	CONJUNT O	TAXÓN	%	TIPO Y NOMBRE	SÍMBOLO			

Es obvio que el grado de detalle con el cual se haga la parte descriptiva de cada uno de los aspectos propuestos en el encabezamiento anterior va a depender del tipo de levantamiento que se esté haciendo.

2.4.2. Información complementaria

Es aquella otra información que se presenta en el mapa que no está relacionada con los suelos, ni con su entorno; consta de:

- Título del mapa (especifica el tipo de levantamiento).
- Croquis de ubicación de la zona de estudio.
- Cuadro explicativo de las convenciones topográficas, incluyendo la dirección del norte.
- Escala a la cual fue elaborado.
- Cartografía utilizada como base para elaborar el mapa.
- Autor (es).
- Entidad que lo elaboró y/o que lo recibió.

RECORDAR

- La delimitación de unidades de suelos tiene como base metodológica el análisis fisiográfico.
- La unidad fisiográfica básica es el Paisaje.
- El tipo de unidad fisiográfica, de unidad cartográfica y de unidad taxonómica que se utilicen depende del tipo de levantamiento que se esté haciendo.
- El sistema de mapeo libre es el más eficiente en los levantamientos de suelos.
- La escala del mapa de suelos, el tipo de imagen a utilizar para el levantamiento y el área mínima de mapeo en campo también dependen del tipo de levantamiento.
- La unidad cartográfica más pura que se presenta es la consociación.

- Las unidades cartográficas políticas son: asociación, complejo, disociación e inasociación.
- Las unidades taxonómicas funcionales son: taxadjunto, variante, conjunto, fase y área miscelánea.
- El taxadjunto y la variante sólo se usan en estudios detallados, donde la unidad taxonómica básica que se utiliza es la serie.
- El mapa sin leyenda no dice nada.

- La leyenda es un resumen de los resultados del levantamiento y debe suministrar tanta información, acerca de la interpretación del levantamiento, como sea posible.

BIBLIOGRAFÍA

- BOTERO, P. J. 1996. Aproximación conceptual a la zonificación ambiental: El caso Apaporis -Tabatinga. Primer Simposio Nacional de Ecología del Paisaje. Santafé de Bogotá. 10 p.
- BOTERO, P. J. 1977 Guías para el análisis fisiográfico. Centro Interamericano de Fotointerpretación (CIAF). Bogotá. 87 p.
- BOTERO, P. J.; S. T. BENAVIDES y G. W. ELBERSEN. 1977 Una metodología para levantamientos edafológicos. Suelos Ecuatoriales 8 (1): 432-441.
- CARRERA, E.; J. PICHOTT y E. B. ALEXANDER. 1968. Estudio general de clasificación de los suelos de la cuenca alta del río Bogotá para fines agrícolas. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá. 200 p.
- CORTÉS, A. y D. MALAGÓN. 1984. Los levantamientos agrológicos y sus aplicaciones múltiples. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá. 360 p.
- ELBERSEN, G. W.; S. T. BENAVIDES y P. J BOTERO. 1986. Metodología para levantamientos edafológicos. Segunda parte: Especificaciones y manual de procedimientos. (IGAC). Bogotá. 82 p.
- ELBERSEN, G. W.; S. T. BENAVIDES y P. J BOTERO. 1974. Metodología para levantamientos edafológicos. Especificaciones y manual de procedimientos. CIAF. Bogotá. 134 p.
- FORERO, M. C. 1984. Métodos de levantamientos de suelos (primera parte). CIAF. Bogotá. 83 p.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC). 1977. Estudio general y detallado de suelos de los municipios de Cota, Funza, Mosquera y parte de Madrid (departamento de Cundinamarca). IGAC. Bogotá. 513 p.
- JARAMILLO, D. F. 1997. Variabilidad espacial de suelos. En: Diagnóstico químico de la fertilidad del suelo. Editor W. Osorio. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo – Universidad Nacional de Colombia – Universidad de Antioquia. Medellín. pp 167-187.
- LEÓN, J. C. 1980. Unidades taxonómicas y unidades de mapeo en levantamientos edafológicos. CIAF. Bogotá. 152 p.
- MALAGÓN, D. 1986. Levantamientos de suelos en Colombia: Importancia, realizaciones y proyectos. Suelos Ecuatoriales 16(1): 41-51.

MEJÍA, L. 1987. Características y taxonomía de algunos suelos modales del altiplano Cundi-boyacense. *Suelos Ecuatoriales* 17(2): 317-331.

SOIL MANAGEMENT SUPPORT SERVICES (SMSS). 1985. Criterios para el uso de la taxonomía de suelos en la denominación de unidades cartográficas. Monografía técnica SMSS No. 15. Editores A. van Wambeke y T. R. Forbes. Universidad de Cornell. 67 p.

SOIL SURVEY DIVISION STAFF (SSDS). 1993. Soil survey manual. Handbook No. 18. United States Department of Agriculture (USDA). Washington D. C. 437 p.

VILLOTA, H. 1997. Una nueva aproximación a la clasificación fisiográfica del terreno 1977. *Revista CIAF* 15(1): 83-115.

VILLOTA, H. 1991. Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de las tierras. IGAC. Santafé de Bogotá. 211 p.

AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Qué es delimitar un suelo?
2. ¿Qué es paisaje fisiográfico y porqué es importante en los levantamientos de suelos?.
3. Enumere, conservando la jerarquía, las unidades fisiográficas que se utilizan en levantamientos de suelos.
4. ¿Cuáles tipos de observaciones de suelos se hacen durante un levantamiento de suelos?. ¿Con cuál de ellas se deben establecer la descripción y las propiedades del perfil modal de un suelo?.
5. Enumere tres sistemas de mapeo utilizados en levantamientos de suelos. ¿Cuál es el más eficiente de ellos?.
6. ¿Qué es un mapa de suelos?.
7. ¿Qué es la escala de un mapa y cuáles son las escalas más comunes en los mapas de suelos de diferentes tipos de levantamientos?.
8. ¿Qué es unidad cartográfica de suelos?. ¿Qué es una delimitación en un mapa de suelos?.
9. Diga tres razones que justifiquen el uso de unidades cartográficas polítáxicas en levantamientos de suelos.
10. ¿Cuáles son y en qué se diferencian las unidades cartográficas polítáxicas?.
11. ¿Cuál unidad cartográfica exigiría usted para un estudio de suelos con fines de drenajes?. Explique.
12. ¿Se puede presentar una consociación de misceláneo rocoso?. Comente su respuesta.
13. ¿Cuáles son las unidades taxonómicas funcionales?.
14. ¿Qué es una fase de suelo?.
15. ¿En qué tipo de levantamiento se utilizan el taxadjunto y la variante?. ¿Por qué?.
16. Aparte de las delineaciones, ¿qué otra información es indispensable en un mapa de suelos?.
17. Enumere los items que debería tener la leyenda de un mapa de suelos.

EVALUACIÓN

1. Elaborar una leyenda fisiográfica completa para una llanura aluvial de piedemonte ubicada en el valle del Magdalena, entre Ibagué y Mariquita.
2. Consultar en la literatura 2 métodos que se utilicen para determinar la escala desconocida de un mapa.
3. ¿A cuántos km corresponde una distancia de 4.5 cm, medidos en un mapa de escala 1:25000?. ¿Y a cuántas ha un área de 12.5 cm², medidos en el mismo mapa?. (R: 1.125 km; 78.125 ha).
4. Consultar el método del planímetro para calcular áreas en mapas.

EL INFORME DEL LEVANTAMIENTO DE SUELOS

CAPÍTULO 22

CONTENIDO

- ❖ La memoria técnica
 - Introducción
 - Ubicación y descripción de la zona
 - Descripción de las unidades cartográficas
 - Interpretación del levantamiento
 - Metodología
 - Génesis y clasificación de los suelos
 - Descripción de los perfiles modales
- ❖ El uso de los informes de levantamientos de suelos
 - Tipos de usuarios
 - De bajos conocimientos en suelos
 - De conocimientos moderados en suelos
 - Personas especializadas en suelos
 - La extracción de la información

OBJETIVOS

- ❖ Conocer los temas que se incluyen en el informe de un levantamiento de suelos hecho con fines agropecuarios
- ❖ Aprender a extraer información de los informes de levantamientos de suelos

L

os informes de los levantamientos de suelos son valiosos documentos. Muchas veces no son utilizados debido al desconocimiento que tiene el usuario potencial de sus características y de la información que puede obtener de ellos.

Todo trabajo de reconocimiento de suelos debe presentar como informe dos documentos esenciales: los **mapas** y la **memoria técnica** o texto escrito y explicativo del levantamiento. En el capítulo anterior se trató lo relacionado con los mapas por lo cual, en éste, se tratará lo que tiene que ver con el documento escrito.

1. LA MEMORIA TÉCNICA

Este documento presenta en forma descriptiva la información correspondiente a la zona estudiada y esencialmente consta de los mismos capítulos en todos los levantamientos de suelos, sin importar su tipo; la variación fundamental, debida al tipo de levantamiento, radica en el detalle con que la información es presentada.

Los capítulos fundamentales de esta memoria son los siguientes:

- Introducción.
- Ubicación y descripción de la zona.
- Descripción general de las unidades de mapeo y sus correspondientes suelos.
- Interpretación del levantamiento.
- Bibliografía.

Como complemento de la información anterior, a manera de anexos, se presentan los siguientes tópicos:

- Metodología.
- Génesis y clasificación de los suelos.
- Descripción de los perfiles modales.

1.1. INTRODUCCIÓN

En esta parte se establecen claramente los objetivos que persigue el levantamiento, su importancia y justificación; también puede incluirse un aparte en el cual se den instrucciones para diferentes tipos de usuarios sobre el manejo del informe y de los mapas.

1.2. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA ZONA

Deben fijarse exactamente los límites de la zona que se estudió para facilitar la ubicación de los usuarios en el estudio y para que ellos sepan, a ciencia cierta, si la zona que les interesa conocer formó parte o no del trabajo.

En lo que corresponde a la descripción del medio físico, se hace un resumen de la bibliografía consultada para proporcionar la información básica acerca de las condiciones ambientales bajo las cuales se han desarrollado los suelos; deben incluirse aspectos relacionados con el clima, la geología, la geomorfología, la hidrología y aspectos socioeconómicos como el uso actual y la tenencia de la tierra, el nivel educativo de los habitantes y su ocupación principal, etc.

1.3. DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES CARTOGRÁFICAS

En la descripción de la unidad de mapeo, se incluye la información concerniente a su ubicación, extensión, relación con otras unidades vecinas, suelo o suelos dominantes, con un resumen de sus principales características y el rango de variación que ellas pueden presentar. A manera de ilustración, se trascrcribe a continuación la descripción de una unidad cartográfica, extractada de un levantamiento semidetallado de suelos realizado por Jaramillo et al (1979):

“*Consociación Vegas A124 (320,4 ha).*

Está ubicada en el cuerpo de los abanicos subrecientes de la cordillera central; presenta relieve ondulado, con pendientes menores de 2%; sus límites con los paisajes recientes son bien definidos, mientras que con las otras unidades subrecientes, sus límites son difusos; está compuesta por los conjuntos Vegas (Vertic Haplustolls) que representa el 90% de los suelos encontrados y como inclusión se encuentra el conjunto Potosí (Typic Haplustolls), con una frecuencia de 10% de las observaciones y el cual se ubica en las partes convexas.

Los suelos del conjunto Vegas (Vertic Haplustolls) se caracterizan por tener un horizonte superficial de aproximadamente 30 cm de espesor, colores oscuros, textura franco arcillo limosa a franco arcillosa, bien estructurado, pH neutro; poseen horizontes B de 30 cm, de color oscuro, textura franco arcillo limosa a franco arcillosa, buena estructura, pH ligeramente alcalino; un horizonte C de color amarillo grisáceo oscuro, textura franco arcillo limosa, gravilla muy meteorizada y pH alcalino. Es un suelo de buena aptitud agrícola cuya única limitante ligera es la textura pesada en el horizonte superficial. El rango de características del conjunto Vegas (Vertic Haplustolls) se presenta en la Tabla 22.1.

TABLA 22.1. Rango de características de los suelos del conjunto Vegas (tomado de Jaramillo et al, 1979).

Horizontes	Espesor (cm)	Color	Textura	Estructura	pH
Ap	15-40	Negro a negro pardusco	FArL a FAr	Bloques subangulares medios, débiles a moderados.	7.0 a 7.5
B21	16-45	Negro a negro pardusco	FAr a FArL	Bloques subangulares medios, moderados.	7.0 a 7.5
B22	20-35	Negro pardusco a amarillo naranja opaco	FAr a FArL	Bloques subangulares medios, moderados.	7.0 a 7.5
		Amarillo claro a	FArL a FA		

<i>C</i>	<i>negro pardusco</i>	<i>fina</i>	<i>Laminar fina débil.</i>	<i>7.0 a 8.0</i>
----------	-----------------------	-------------	----------------------------	------------------

*Para los suelos del Conjunto Potosí (*Typic Haplustolls*) es válida la descripción del conjunto anterior, haciendo la salvedad de que éste presenta texturas más livianas en el horizonte superficial, lo que hace que sea, desde el punto de vista agrícola, un excelente suelo. El rango de características del conjunto Potosí se presenta en la descripción de la consociación Potosí”.*

1.4. INTERPRETACIÓN DEL LEVANTAMIENTO

Interpretar un levantamiento de suelos consiste en hacer un análisis de las unidades cartográficas obtenidas en él, basado en las características y propiedades de los suelos que las componen, con el objetivo de establecer las bondades y las limitaciones que presentan para un determinado uso y recomendar, en consecuencia, su mejor manejo.

La clase de interpretación que se hace depende de los objetivos específicos del levantamiento y el detalle con que se den las recomendaciones, del tipo de estudio que se haya hecho. Así, por ejemplo, en un estudio general, una recomendación acorde con su detalle podría ser que determinada unidad se utilice en agricultura, en ganadería, en silvicultura o como zona de reserva ecológica. En el caso de un estudio semidetallado podría decirse que una determinada unidad cartográfica puede utilizarse en tal o cual cultivo con unas determinadas prácticas generales de manejo, como por ejemplo, con riego. Al nivel de estudio detallado, podrían especificarse aquellas prácticas de manejo que requiere un determinado cultivo, como tipo de riego, mecanización, algunas pautas de fertilización, etc.; el estudio específico para algún tipo de uso de tierra permite recomendar el manejo que debe hacerse del suelo para someterlo a ese uso específico.

Además, si el estudio se hace para resolver algún problema especial de suelos, por ejemplo, riego, drenaje, salinidad, obviamente la interpretación y recomendaciones serán mucho más detalladas y tratarán de establecer las soluciones prácticas del problema.

En los estudios realizados en Colombia, la interpretación más común que se realiza consiste en establecer el uso potencial de cada uno de los suelos encontrados para luego agrupar aquellos que tienen posibilidades de uso similares en unidades de tierra y definir en ellas el uso más recomendable. Para establecer ese uso, el método más utilizado es el **Sistema de Clasificación de la Capacidad de Uso de la Tierra**, también conocido como el Sistema de las Ocho Clases Agrológicas o Sistema USDA de Clasificación de Tierras (Mosquera, 1986).

El sistema de clasificación de la capacidad de uso de la tierra establece 3 niveles de clasificación, de menor a mayor detalle, así: Clase, Subclase y Unidad de capacidad o grupo de manejo; los más utilizados en la interpretación de los levantamientos de suelos son los 2 primeros niveles.

Según recopilación hecha por Mosquera (1986), por Cortés y Malagón (1984) y por el Centro Interamericano de Fotointerpretación (CIAF, 1977), los suelos se pueden agrupar, según su capacidad

de uso, en 8 clases, con base en la severidad de las limitaciones de uso que presenten y en la intensidad de manejo que deba hacerse para protegerlos: al aumentar el número de la clase, aumenta la intensidad de las limitaciones que tienen los suelos y la cantidad e intensidad de prácticas de manejo que deben establecerse en ese suelo para conservar su productividad.

Las clases I a IV pueden ser aradas y cultivadas sin mayores riesgos y constituyen las tierras aptas para agricultura intensiva; las clases V a VIII presentan limitaciones altas para la implantación y manejo de cultivos, conformando tierras con mejor aptitud de uso para pastos, bosques o vida silvestre.

Las subclases son subdivisiones de las clases en las cuales se especifican el o los factores limitantes para el uso de la clase. Los factores limitantes y los símbolos con los cuales se identifican son: Peligro o susceptibilidad a erosión (**e**), exceso de humedad (**h**), limitaciones de suelo en la zona radicular (**s**) y limitaciones por clima (**c**); si hay varios factores limitantes, se especifican en el orden en el cual se expusieron: Por ejemplo: IIIhs.

En la Tabla 22.2 se presenta el área que ocupan en Colombia las diferentes clases de capacidad de uso de la tierra, de acuerdo con datos de Malagón (1986). Obsérvese que el 81.2% del área del país se ubica en las clases VI, VII y VIII, con severas restricciones para su uso agropecuario.

TABLA 22.2. Cobertura de las clases por capacidad de uso de la tierra en Colombia (tomada de Malagón, 1986).

CLASE	%	CLASE	%
I	0.15	V	7.50
II	0.85	VI	25.10
III	4.70	VII	45.60
IV	5.60	VIII	10.50

En la actualidad, se recomienda que la información recolectada en los levantamientos de suelos sea interpretada para diferentes usos y/o aplicaciones, de modo que se obtenga una mayor cobertura y eficiencia de los estudios. El Soil Survey Division Staff (SSDS, 1993) y Cortés y Malagón (1984) dan pautas para hacer interpretaciones de levantamientos de suelos para aplicaciones en obras civiles, recreación, manejo ambiental, impuestos, entre otras, aparte, obviamente, de las tradicionales interpretaciones para establecer el uso potencial agropecuario.

1.5. METODOLOGÍA

Debe especificarse el método de trabajo seguido en el levantamiento de una forma breve pero clara; además, es importante clarificar cuáles métodos de laboratorio se han utilizado en los análisis con el fin de facilitar la interpretación de sus resultados.

1.6. GÉNESIS Y CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

En este capítulo, se hace una discusión amplia del efecto que han tenido los factores y procesos pedogenéticos en el desarrollo de los suelos y las propiedades y características que han dejado en el mismo.

Esta parte es fundamental para establecer la evolución del suelo, su razón de estar en un determinado paisaje, la explicación de su comportamiento y gran parte del manejo que en él deba hacerse; además, utilizando estos criterios y evidencias genéticas se pueden clasificar los suelos dentro del sistema taxonómico utilizado en Colombia.

1.7. DESCRIPCIÓN DE LOS PERFILES MODALES

Se entiende por **perfil modal**, según Botero et al (1977) aquel “*perfil que tiene características comunes con la mayoría de los perfiles examinados en la zona y que representa la unidad taxonómica de la que hace parte*”.

En esta parte, se hace una descripción del perfil que cumple con la definición de modal, enunciando los resultados de su observación en el campo; como ejemplo, se presenta a continuación la descripción de un perfil modal tomada de Jaramillo (1989):

“*Unidad cartográfica: Complejo La Gómez – Minería (V).*

Unidad Taxonómica: Conjunto La Gómez: Aquic Udipsamments.

Describió: Daniel F. Jaramillo J.

Fecha: Marzo 29 de 1988.

Localización: Municipio de Amalfi (Antioquia), margen izquierda de la quebrada La Gómez, 150 m antes de su desembocadura en el río Riachón.

Altitud: 1520 msnm.

Posición fisiográfica: Vega alta de la quebrada La Gómez.

Topografía: Plana con pendiente menor de 3% y recta.

Material parental: Aluvión grueso.

Uso actual: Ganadería extensiva.

Régimen de humedad del suelo: Ácuico.

Régimen de temperatura del suelo: Isotérmico.

Profundidad efectiva: Superficial.

Limitante de profundidad: Nivel freático fluctuante alto.

Drenaje natural: Pobremente drenado.

Inundaciones: Frecuentes, breves.

Evidencias de erosión: Severa degradación de la unidad por antigua minería de oro de aluvión.

Epipedón: Ócrico.

Horizontes subsuperficiales: No hay.

Descripción del perfil:

- Ap 0 - 12 cm; color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2); franco arenoso; con estructura masiva que parte a bloques subangulares finos, débiles; friable, no plástico, no pegajoso; abundantes poros gruesos, continuos, redondeados; poca actividad biológica; abundantes raíces gruesas y medianas; pH 5.0; límite claro, plano.*
- C1 12 - 37 cm; color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2); franco arenoso con 20% de gravilla fina, angulosa, cuarcítica; estructura masiva; firme, no plástico, no pegajoso; abundantes poros gruesos, continuos, redondeados; pocas raíces finas; pH 5.0; límite abrupto, plano.*
- C2 37 - 78 cm; capa de arena fina, gris (10YR5/1), suelta, con pH de 5.0; límite abrupto plano.*
- C3 78 - 110 cm; capa de arena gruesa, parda (10YR5/3), suelta, con pH de 5.0; límite abrupto plano.*
- C4 110 - + cm; capa de arena gruesa, pardo amarillenta (10YR5/4), suelta, con pH de 5.0".*

Después de la descripción del perfil se presentan los resultados de los análisis de laboratorio que se hayan efectuado para el suelo representado por ese perfil.

2. EL USO DE LOS INFORMES DE LEVANTAMIENTOS DE SUELOS

Para extraer información de una manera eficaz de un estudio de suelos, el usuario debe consultarlo de una manera ordenada para evitar confusiones y/o malas interpretaciones que lo lleven a cometer errores, a veces graves, en el manejo de sus suelos.

De la discusión hecha en los capítulos anteriores, se observa que el informe (la memoria técnica) de estos estudios tiene dos partes muy diferentes que, por los temas que tratan y la manera de tratarlos, pueden ser utilizadas por personas con diferentes niveles de conocimiento en suelos. Ésto define, entonces, que los informes tienen diferentes tipos de usuarios, dependiendo de la información que pueda interesarle a cada uno.

2.1. TIPOS DE USUARIOS

Se pueden definir tres grupos generales de usuarios de los informes de levantamientos de suelos, según la preparación que tengan con respecto al tema.

2.1.1. De bajos conocimientos en suelos

En este grupo pueden incluirse usuarios muy diferentes: Tecnólogos, Administradores de explotaciones del sector agropecuario y algunos Planificadores. Se supone que estas personas tienen pocos o ningún conocimiento de suelos y, por tanto, a ellos va dirigida la primera parte del informe.

A este grupo de usuarios generalmente la información que más les interesa es la que le proporciona el mapa, ya que les da una información global y al mismo tiempo relacionada espacialmente, muy útil para propósitos de ordenamiento. Debe tenerse en cuenta entonces este usuario potencial cuando se está confeccionando el mapa y su leyenda, para hacerlos de manera que sean asequibles a ellos.

2.1.2. Con conocimiento moderado en suelos

En este grupo pueden incluirse los profesionales del sector agropecuario que por su formación han recibido instrucción en el área de suelos, pero de todos modos restringida en muchos temas que tienen que ver con los levantamientos.

Estos usuarios utilizarán tanto la primera parte del informe como algunos de los anexos, especialmente aquellos relacionados con descripción de perfiles y análisis de laboratorio. Es conveniente anotar que este grupo de usuarios es muy importante desde el punto de vista del control de la calidad de los levantamientos, pues son las personas que están en el campo y que conocen los suelos de su región, por lo cual pueden analizar críticamente los resultados que se les presentan en los informes.

2.1.3. Personas especializadas en suelos

En este grupo de usuarios están aquellos profesionales que tienen conocimientos especializados en suelos. Son los usuarios más importantes de los anexos del informe, ya que buscarán, en estos estudios, información más científica para resolver problemas más específicos, por ejemplo de investigación. A pesar de las diferencias anotadas; las recomendaciones que se dan a continuación para acceder a la información son válidas para los tres grupos de usuarios.

2.2. EXTRACCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Si la información que se necesita de un estudio de suelos se busca ordenadamente, no será difícil encontrarla y evitará, como ya se dijo, malas interpretaciones. Antes de efectuar cualquier consulta, el usuario debe cerciorarse de que el tipo de levantamiento que va a utilizar ofrece el detalle que requiere para sus necesidades específicas.

El usuario debe consultar, antes que nada, el índice del estudio para comprobar si el informe que posee proporciona instrucciones sobre el modo de utilizarlo; en este caso, deberá leerlas cuidadosamente y seguir las fielmente; en caso de no contar con este recurso, puede proceder de la siguiente forma:

- Ubicar el área de interés en el mapa y definir la unidad cartográfica que le corresponde.
- Establecer el símbolo que identifica la unidad cartográfica que tiene el área de interés.
- Buscar, con el símbolo, el nombre y la composición de la unidad cartográfica en la leyenda y con esta información ir al índice y ubicar la página en la cual está descrita dicha unidad.
- Establecer, en la descripción de la unidad cartográfica, los suelos que la componen.
- Cerciorarse, una vez conocida la clase de suelo que se va a encontrar en el área de interés, de que ella está en el terreno, haciendo una observación rápida del suelo en el campo y comparándola con la descripción que le da la unidad cartográfica del mismo.
- Buscar, con la identificación positiva del suelo en el terreno, la unidad taxonómica que le corresponde, la descripción del perfil modal y sus análisis respectivos; además, en la descripción de la unidad cartográfica se dan los limitantes de uso más importantes que presenta el suelo.

- Buscar, con la información básica obtenida, la parte interpretativa del levantamiento para consultar las recomendaciones de uso y manejo que se hayan dado; debe advertirse que la implementación de dichas recomendaciones debe hacerse bajo la supervisión directa de un profesional dedicado a las actividades específicas que se recomiendan, en caso de que el usuario no esté capacitado para desarrollarlas.

RECORDAR

- **El informe de un levantamiento de suelos está compuesto por dos documentos básicos: el mapa de suelos y la memoria técnica.**
- **La memoria técnica consta de dos partes: una información básica o cuerpo central del informe que suministra información acerca de las características biofísicas de la zona, describe las unidades cartográficas y los suelos y suministra la interpretación del estudio; la otra, de anexos, informa sobre la metodología seguida para hacer el estudio, sobre la génesis y la clasificación de los suelos y describe los perfiles modales de los suelos encontrados.**
- **En Colombia se ha utilizado ampliamente el Sistema de Clasificación de Tierras por Capacidad de Uso para interpretar los levantamientos de suelos. Más del 80% del territorio colombiano se clasifica en las clases VI, VII y VIII de ese sistema, lo que muestra las graves limitaciones que tiene este país para el uso agropecuario del recurso suelo.**
- **Los informes de los levantamientos de suelos tienen diferentes tipos de usuarios.**
- **De los informes de los levantamientos de suelos se puede extraer valiosa información pero, rara vez, suficiente para resolver problemas puntuales y específicos acerca del manejo de los suelos.**

BIBLIOGRAFÍA

- BOTERO, P. J.; S. T. BENAVIDES y G. W. ELBERSEN. 1977. Una metodología para levantamientos edafológicos. *Suelos Ecuatoriales* 8 (1): 432-441.
- CENTRO INTERAMERICANO DE FOTOINTERPRETACIÓN (CIAF). 1977. Clasificación de tierras para uso agropecuario y forestal. CIAF. Bogotá. 154 p.
- CORTÉS, A. y D. MALAGÓN. 1984. Los levantamientos agrológicos y sus aplicaciones múltiples. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá. 360 p.
- JARAMILLO. D.F. 1989. Estudio general de suelos, erosión y uso potencial agropecuario del área de influencia del proyecto hidroeléctrico Riachón, Amalfi, Antioquia. Empresas Públicas de Medellín. Medellín. 65 p.
- JARAMILLO. D. ; E. FERNÁNDEZ y C. LOMBARDO. 1979. Levantamiento semidetallado de suelos de la zona plana del Valle del Cauca entre Buga - Sonso. CIAF. Bogotá. 109 p.
- MALAGÓN, D. 1986. Levantamientos de suelos en Colombia: Importancia, realizaciones y proyectos. *Suelos Ecuatoriales* 16(1): 41-51.
- MOSQUERA, L. 1986. Clasificación de las tierras por su capacidad de uso. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá. 37 p.
- SOIL SURVEY DIVISION STAFF (SSDS). 1993. Soil survey manual. Handbook No. 18. United States Department of Agriculture (USDA). Washington D. C. 437 p.

AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Cuáles son los documentos básicos del informe de un levantamiento de suelos?.
2. ¿Cuáles son los capítulos fundamentales de la memoria técnica de un levantamiento de suelos?.
3. ¿Cuál es el sistema general de interpretación de levantamientos de suelos que se usa en Colombia?.
¿Cuáles son los criterios que utiliza para definir el segundo nivel de clasificación?.
4. ¿Cuál es la clase de capacidad de uso de la tierra más extensa en el país y qué implica esto desde el punto de vista del uso agropecuario de los suelos en él?.
5. ¿Qué es el perfil modal de un suelo?.
6. ¿El informe de un levantamiento de suelos puede ser consultado por cualquier persona?. Comente.
7. Enumerar los pasos a seguir para extraer información acerca de los suelos de una finca, utilizando el informe de un levantamiento de suelos de la región en la que ella está ubicada.

EVALUACIÓN

Haga el ejercicio propuesto en el numeral 2.2 de este capítulo para obtener información acerca de los suelos de una determinada región.

VARIABILIDAD DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO

CAPÍTULO 23

CONTENIDO

- ❖ Variabilidad de las propiedades del suelo
 - Componentes de la variabilidad
 - Evaluación de la variabilidad
 - Variabilidad aleatoria
 - Variabilidad sistemática
- ❖ Variabilidad espacial de suelos
 - Generalidades
 - Evaluación
 - Diseños anidados
 - Análisis de semivariografía
 - Aplicaciones
 - Producción de mapas de isolíneas
 - Muestreo de suelos
 - Selección del tamaño y de la ubicación de unidades experimentales
 - Interpretación de resultados de investigación
 - Ayuda en el manejo de los suelos

OBJETIVOS

- ❖ Conocer la magnitud de la variabilidad que tienen las propiedades del suelo
- ❖ Conocer los componentes de la variabilidad de las propiedades del suelo
- ❖ Conocer los métodos que se usan más frecuentemente para evaluar variabilidad
- ❖ Conocer los métodos que se usan para evaluar la variabilidad espacial de las propiedades de los suelos

U

na característica dominante de los suelos es su heterogeneidad, aún en pequeñas áreas que podrían considerarse como homogéneas. Esta heterogeneidad induce una variabilidad en las propiedades del suelo que puede llegar a ser de considerable magnitud, la cual puede afectar grandemente las generalizaciones y predicciones que se hagan con ellas.

El problema planteado se ha tratado de obviar, en la práctica, incrementando el número de muestras utilizadas para establecer los valores promedios que caractericen aquellas propiedades y, en la investigación edafológica, recurriendo a los diseños experimentales y a las replicaciones de los tratamientos, acciones que algunas veces no resuelven satisfactoriamente el problema de la desuniformidad del suelo.

1. VARIABILIDAD DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO

La variabilidad de las propiedades del suelo es una condición inherente al mismo debido a que en su formación intervienen varios procesos diferentes, controlados, a su vez, por los factores de formación; éstas interacciones pueden ser muy variadas dando como consecuencia una alta cantidad de suelos posibles.

La variabilidad depende de la propiedad que se analice, siendo más variables las propiedades químicas que las físicas. Además, hay menor variabilidad en las propiedades del suelo, en su condición natural, que cuando es sometido a uso. Aquellas propiedades que más se afectan por el manejo del suelo serán las que presenten la mayor variabilidad (Ovalles, 1992).

1.1. COMPONENTES DE LA VARIABILIDAD

Upchurch y Edmonds (1992) sostienen que la variabilidad presenta dos componentes fundamentales: uno **Aleatorio** y el otro **Sistemático**, teniendo en cuenta la fuente de error que produce la variación.

Los mismos autores definen la **variabilidad sistemática** como aquella que puede ser atribuida a causas conocidas, entendibles y predecibles. Wilding y Drees, citados por Trangmar et al (1985), consideran que esta variabilidad está representada por los cambios que presentan las propiedades del suelo que pueden ser entendidos y explicados en términos de sus factores y procesos de formación, a la escala de observación usada.

Cuando la variabilidad no puede relacionarse con causas conocidas, Upchurch y Edmonds (1992) la definen como **variabilidad aleatoria** o debida al **azar** y estiman que en los suelos, en general, la variabilidad sistemática es mayor que la variabilidad aleatoria, aunque reconocen que la relación entre los dos tipos de variabilidad puede tener una alta dependencia de la escala de trabajo.

Burrough (1993) considera que cuando la acción de un factor de formación domina el desarrollo del suelo por largos períodos de tiempo, se puede llegar a reducir la variabilidad en él; con esta anotación

puede concluirse que los suelos más evolucionados presentan menor variabilidad que aquellos que lo son menos.

1.2. EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD

Teniendo en cuenta la división planteada anteriormente, hay diferentes métodos para evaluar los distintos componentes de la variabilidad.

1.2.1. Variabilidad aleatoria

Este componente de la variabilidad es el que ha sido objeto de trabajo de la estadística clásica.

Según Uphuruch y Edmonds (1992), cuando el grupo de datos cumple los supuestos de **normalidad, aleatoriedad e independencia** de las observaciones, la variabilidad de ellos puede ser estudiada con estimadores paramétricos como la amplitud del rango de valores, la varianza, la desviación estándar y/o el coeficiente de variación.

De los anteriores estimadores, Gómez (1989) afirma que la amplitud del rango es el menos utilizado, debido a que es muy susceptible al efecto de los valores extremos. Además, de los restantes, el coeficiente de variación es el que permite hacer comparaciones de variabilidad entre grupos de datos o de experimentos, ya que cuantifica la magnitud del error en ellos.

Los estimadores citados se pueden calcular con las siguientes relaciones:

$$\boxed{Rango = \max(x) - \min(x)} \quad [23.1]$$

Donde $\max(x)$ y $\min(x)$ representan los valores mayor y menor, respectivamente, que toma la variable x que se está estudiando.

$$\boxed{S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad [23.2]$$

Donde: S^2 : Varianza

x_i : Valores de la variable.

\bar{x} : Valor promedio de la variable.

n: Número de datos.

$$\boxed{S = \sqrt{S^2}} \quad [23.3]$$

Donde S es la desviación estándar y S^2 la varianza.

$$CV = \frac{S}{\bar{x}} \times 100 \quad [23.4]$$

Donde: CV: Coeficiente de variación.

S: Desviación estándar.

\bar{x} : Promedio general del grupo de datos.

La interpretación del coeficiente de variación es difícil y debe estar basada en un amplio conocimiento de los factores involucrados en el experimento, así como respaldada por una amplia cantidad de investigación. Como referencia para interpretar los coeficientes de variación en algunas propiedades del suelo, en la Tabla 23.1 se presentan los rangos de valores que con frecuencia se encuentran para los coeficientes de variación, recopilados por Vauclin (s.f.). Obsérvese la gran amplitud que tiene el coeficiente de variación en la mayoría de las propiedades del suelo.

TABLA 23.1. Valores comunes del coeficiente de variación (CV) para algunas propiedades del suelo, tomados de Vauclin (s.f.).

PROPIEDAD	RANGO DE VARIACIÓN DEL CV (%)
Densidad aparente	Desde 60 hasta > 400
Contenido de elementos y de compuestos químicos	Desde 25 hasta 400
Conductividad eléctrica	Desde 25 hasta ≈ 250
Contenido de materia orgánica	Desde 25 hasta 100
Textura	Desde 5 hasta 50
pH	Desde casi 0 hasta 25

También, con respecto a los valores que puede tomar el coeficiente de variación en algunas propiedades físicas del suelo, Jury et al (1991) presentan rangos de variación de este parámetro con valores menores a 50%, para la porosidad, la densidad aparente, el porcentaje de arena o de arcilla y los contenidos de agua a 0.1 y 15 bares; hasta del 100% para la velocidad de infiltración del agua y hasta de 320% para la conductividad hidráulica saturada.

En la Tabla 23.2 se presentan los valores de algunas medidas de la variabilidad de unas cuantas propiedades de Andisoles del oriente antioqueño, obtenidas por Jaramillo (1995). En esta tabla se aprecia el gran efecto que tienen los valores extremos sobre la amplitud del rango. Además, aunque los valores de los coeficientes de variación parecen altos, se ubican más hacia la parte baja de los rangos que para este parámetro se presentaron en la Tabla 23.1. Se conserva también, en esta Tabla 23.2, la tendencia a que sean los contenidos de elementos químicos, las variables que presenten los mayores valores en los coeficientes de variación.

Como en las tablas mencionadas anteriormente, se pueden conseguir gran cantidad de datos para ilustrar la variabilidad de las propiedades del suelo. Con el fin de mostrar un último ejemplo sobre el tema, se presenta, en la Tabla 23.3, otro conjunto de datos que muestran dicha variabilidad en los

Inceptisoles (Aquepts y Tropepts) descritos como perfiles modales en un estudio detallado de suelos de una parte de la zona plana de la Sabana de Bogotá (IGAC, 1977).

TABLA 23.2. Algunas medidas de la variabilidad* de propiedades de Andisoles del oriente antioqueño (Tomadas de Jaramillo, 1995).

PROPIEDAD**	n	PROMEDIO	max (x)	min (x)	RANGO	S	S ²	CV (%)
MO	40	21.9	44.7	7.9	36.8	9.5	90.25	43.4
Al	39	1.0	6.1	0	6.1	1.57	2.47	81.8
Ca	40	1.2	7.7	0.2	7.5	1.7	2.89	142.6
Mg	40	0.43	1.2	0.09	1.11	0.31	0.096	72.5
K	40	0.23	0.72	0.04	0.68	0.18	0.032	77.4
P	40	3.23	30.27	0	30.27	5.42	29.38	168.0
BT	40	2.1	9.1	0.48	8.62	1.9	3.61	91.0
SAIE	39	48.6	85	0	85	23.8	566.44	49.0

* n: Número de muestras; max (x): Valor máximo; min (x): Valor mínimo; S: Desviación estándar; S²: Varianza; CV: Coeficiente de variación.

** MO, BT: Contenidos de materia orgánica y de bases totales en %, respectivamente; Al, Ca, Mg, K: Contenidos de aluminio, calcio, magnesio y potasio en cmol (+) kg⁻¹ suelo, respectivamente; P: contenido de fósforo disponible en ppm; SAIE: saturación con aluminio en %, con base en la CICE.

TABLA 23.3. Algunas medidas de la variabilidad* de propiedades de Inceptisoles de la parte plana de la Sabana de Bogotá (Calculados por el autor con base en información de IGAC, 1977).

PROPIEDAD**	n	PROMEDIO	max (x)	min (x)	RANGO	S	S ²	CV (%)
Ar (%)	22	28.18	44.7	7.9	36.8	9.5	90.25	43.4
Da (Mg m ⁻³)	17	1.18	6.1	0	6.1	1.57	2.47	81.8
CC (%)	17	38.51	1.2	0.09	1.11	0.31	0.096	72.5
CICE	22	14.00	0.72	0.04	0.68	0.18	0.032	77.4

* Las abreviaturas del encabezado con el mismo significado que en la Tabla 23.2.

** Ar: Contenido de arcilla. Da: Densidad aparente. CC: Capacidad de campo. CICE: CIC efectiva, en cmol (+) kg⁻¹ suelo.

1.2.2. Variabilidad sistemática

Este tipo de variabilidad se reconoce porque los valores de las propiedades cambian de acuerdo con la ubicación que presenta la muestra analizada, bien sea en el espacio (variabilidad espacial) o en el tiempo (variabilidad temporal).

La variabilidad temporal es un factor importante en procesos nutricionales relacionados con las poblaciones de microorganismos del suelo y/o con condiciones ambientales (Stark, 1994).

Cahn et al (1994) encontraron una variabilidad temporal de rango corto (días) en el comportamiento del N-NO₃ en Mollisoles cultivados con maíz y soya en Estados Unidos, lo cual hace muy importante la época de muestreo para evaluar esta propiedad.

El tipo principal de variabilidad sistemática, en los suelos, lo constituye la variabilidad espacial, la cual se caracteriza porque las propiedades que la presentan adquieren valores diferentes dependiendo de la ubicación y/o del espaciamiento entre las muestras utilizadas para caracterizarlas.

2. VARIABILIDAD ESPACIAL DE SUELOS

Con el desarrollo de la teoría de las variables regionalizadas y su incorporación a los estudios de suelos, se han adquirido herramientas estadísticas que ayudan a evaluar buena parte de dicha variabilidad, mejorando así los resultados que se obtienen en la investigación hecha en suelos.

A continuación se presentan las herramientas estadísticas que ayudan a conocer la variabilidad espacial del suelo y algunas de las principales aplicaciones que tiene este conocimiento en la investigación edafológica.

2.1. GENERALIDADES

Cuando el valor que toma una variable en un sitio depende de la distancia y/o la dirección a la cual se ubica de otro sitio vecino, se tiene una variable con **dependencia espacial**. Si una variable presenta dependencia espacial, durante el muestreo se puede violar el principio de la independencia entre las muestras y los procedimientos de la estadística paramétrica clásica no son adecuados para su estudio.

Journel y Huijbregts (1978) llaman a estas variables que presentan dependencia espacial “**variables regionalizadas**”. Estas variables regionalizadas son una función que describe un fenómeno natural geográficamente distribuido y tienen, según Vieira et al (1983) algún grado de **autocorrelación**. Para el estudio de este tipo de variables se tiene un grupo de herramientas estadísticas conocido con el nombre genérico de “Geoestadística” o “Estadística Espacial”.

2.2. EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL EN SUELOS

Las técnicas más utilizadas para llevar a cabo esta actividad las constituyen el **diseño anidado** y el **análisis de semivariografía**. A continuación se detallan sus principales características y aplicaciones de estas técnicas, así como las metodologías empleadas para realizarlas.

2.2.1. Diseños anidados

Este método provee una buena aproximación para conocer la distancia entre muestras que más variabilidad induce en el valor de las variables que se analizan.

Burrough (1993) anota que el análisis anidado de varianza permite estimar cómo varía la varianza acumulada con el espaciamiento entre muestras, lo cual puede dar una estimación cercana a la óptima, acerca de la distancia de muestreo necesaria para evaluar una variable regionalizada.

Este método de estudio es muy recomendable para establecer las distancias de muestreo adecuadas para obtener el semivariograma que caracteriza la variabilidad estructural que tienen las variables a analizar. Además, con este sistema se puede tener una economía importante en los costos que implica el conocimiento de la variabilidad espacial de aquellas variables.

Oliver y Webster (1986) y Ovalles (1992) han encontrado que el número mínimo de niveles de jerarquización (distancias de muestreo en este caso particular) debe ser de 4, de manera que haya persistencia en los variogramas que se obtengan.

La metodología a seguir para este análisis consiste en:

- Se definen las diferentes distancias a evaluar (**Niveles**).
- Se hace el muestreo cuidadosamente de manera que no se confundan los códigos de ubicación de las muestras.
- Se debe tener mucho cuidado en la elaboración de la base de datos, de modo que los pares de muestras ubicadas a las menores distancias entre sí queden ubicadas en forma contigua.
- Se hace un análisis de varianza anidado para tener el porcentaje de varianza que aporta cada nivel a la varianza total.
- Se elabora una gráfica (**variograma**) de porcentaje de varianza acumulada vs distancia, para observar el comportamiento de la varianza en todas las distancias y definir cual de éstas es la que mejor resuelve la variabilidad espacial de la propiedad analizada.

A continuación se ilustra la metodología con un ejemplo. Castillo y Gómez (1995) y Abril y Ortiz (1996) utilizaron un diseño anidado para establecer la distancia de muestreo óptima para estudiar la variabilidad espacial de un conjunto de variables físico-químicas de Andisoles repelentes y no repelentes al agua del oriente antioqueño.

Para tal efecto se utilizó una parcela de $(100 \times 40) \text{ m}^2$. Esta parcela se dividió en una cuadrícula de $(20 \times 20) \text{ m}^2$, correspondiendo la distancia de 20 m al nivel 1 del diseño anidado. A continuación, se seleccionaron al azar 7 unidades del nivel 1, las cuales se subdividieron, cada una, en otras 4 de $(10 \times 10) \text{ m}^2$, configurándose así la distancia de 10 m como el nivel 2; en cada unidad de primer nivel se seleccionaron al azar 2 unidades del nivel 2.

En cada unidad del nivel 2 seleccionada se ubicó un eje de 5 m, cuya dirección se asignó al azar y en cada extremo de este eje se construyó otro de 2 m de longitud, cuya dirección también se seleccionó al azar; en cada uno de los extremos del eje de 2 m se tomaron las muestras para los análisis de laboratorio correspondiente.

Quedaron definidas entonces las condiciones del diseño anidado así:

- Nivel 1: 20 m y 7 repeticiones
- Nivel 2: 10 m y 2 repeticiones

- Nivel 3: 5 m y 2 repeticiones
- Nivel 4: 2 m y 2 repeticiones
- Número de muestras: $7 \times 2 \times 2 \times 2 = 56$

Mediante el análisis de varianza anidado se obtuvieron los porcentajes de varianza aportados por cada nivel (distancia) a la varianza total. En la Tabla 23.4 se presentan los resultados obtenidos para algunas de las variables analizadas por Castillo y Gómez (1995).

TABLA 23.4. Análisis de varianza anidado para algunas propiedades seleccionadas de Andisoles repelentes al agua del oriente antioqueño (Datos tomados de Castillo y Gómez, 1995).

PROPIEDAD	VARIANZA APORTADA POR NIVEL (%)			
	4	3	2	1
pH	35.91	0.48	63.61	0
CICE	65.72	0	6.12	28.16
Contenido de P (P)	76.57	13.64	0	9.78
Contenido de K (K)	87.31	0	7.2	5.49
Capacidad de Campo (CC)	5.11	89.19	5.7	0
Espesor de la capa de acículas (ECA)	99.94	0	0.06	0

Calculando la varianza acumulada para cada nivel y graficando este valor contra la distancia, se obtienen los variogramas que se presentan en la Figura 23.1.

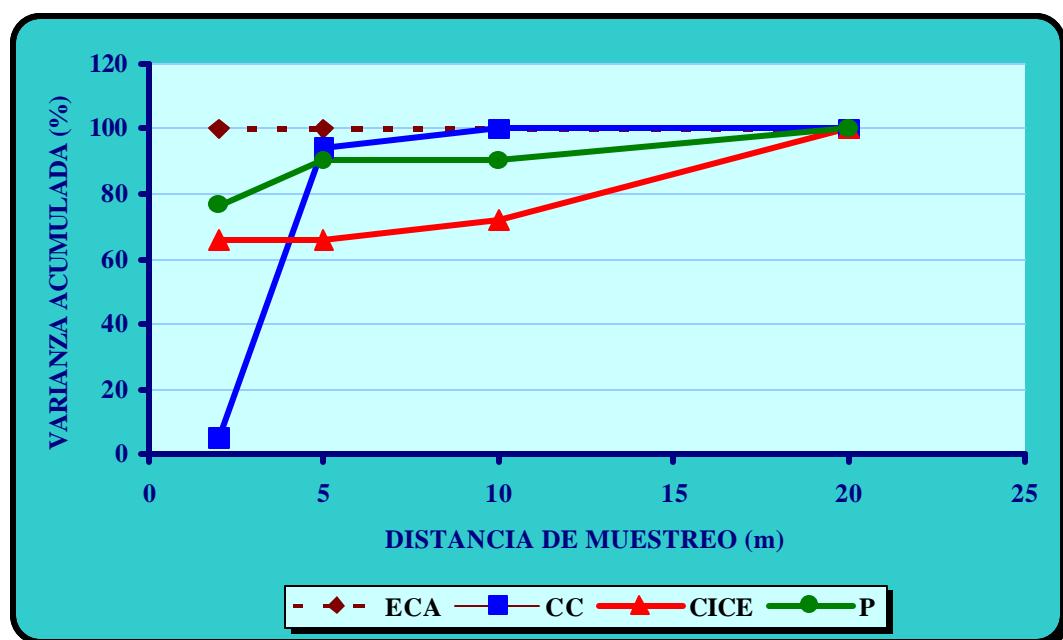


FIGURA 23.1. Variogramas de algunas propiedades seleccionadas de Andisoles repelentes al agua del oriente antioqueño (con base en datos de Castillo y Gómez, 1995).

Los variogramas expuestos en la Figura 23.1 presentan diferentes formas y características que reflejan el grado de dependencia espacial que tienen las variables analizadas. En general, todas las variables, exceptuando la capacidad de campo, acumularon un alto porcentaje de varianza en los primeros 2 m de distancia de muestreo, lo que indica que son variables con una alta variabilidad de rango corto.

El pH, la capacidad de campo y el espesor de la capa de acículas son las únicas variables que resuelven su variabilidad completamente dentro del rango máximo de espaciamiento entre muestras (20 m); la CICE y los contenidos de K y de P no alcanzan a estabilizar su varianza antes de esta distancia lo que implica que su variabilidad espacial está controlada por procesos que actúan en distancias mayores a las utilizadas.

El contenido de P y la capacidad de campo acumulan la máxima cantidad de varianza entre 2 y 5 m, por lo cual el espaciamiento entre muestras para determinar estas propiedades, en los suelos estudiados, no debe ser mayor de 5 m; para el pH este espaciamiento es de 10 m puesto que a esta distancia se presenta la máxima acumulación de varianza en él. El espesor de la capa de acículas prácticamente acumula toda su varianza a los 2 m, siendo la variable con mayor exigencia en el muestreo para ser evaluada.

Otros ejemplos de la aplicación del diseño anidado a los estudios de variabilidad espacial de suelos pueden obtenerse en Ovalles (1991, 1992), Ovalles et al (1989), Ovalles y Rey (1994) y Ovalles y Nuñez (1994).

Oliver y Webster (1986) hacen una amplia discusión acerca de este tipo de análisis y proponen alternativas de diseños anidados desbalanceados para reducir el número de muestras y por tanto los costos de los estudios.

2.2.2. Análisis de semivariografía

Este análisis es el objetivo fundamental de la geoestadística. Como en el análisis anterior, se requiere un muestreo hecho a distancias controladas para establecer la variabilidad espacial de las propiedades del suelo.

La distancia de muestreo más adecuada para este análisis puede establecerse mediante un diseño anidado como el que se expuso en el numeral anterior, en una parte del área experimental, cubriendo, posteriormente, con otro muestreo el resto del área que no fue incluida en el anidado.

El producto fundamental de este análisis es el **semivariograma**, el cual es una gráfica que representa los valores de **semivarianza** que adquiere la variable en relación con el espaciamiento entre muestras. El semivariograma es un variograma aproximado y algunos autores no hacen ninguna diferenciación entre los dos términos.

La semivarianza se estima mediante la siguiente relación:

$$\mathbf{g}(h) = \frac{1}{2n} \sum \left[Z(x) - Z(x+h) \right]^2 \quad [23.5]$$

Donde: $\gamma(h)$: Semivarianza.

n: Número de pares de observaciones comparadas en cada distancia.

Z(x): Valor de la variable en el sitio x.

Z(x + h): Valor de la variable en un sitio ubicado a una distancia h del sitio x.

(x) y (h) son vectores, es decir, interesa su dirección, además de su magnitud.

Para el análisis de semivarianza, el grupo de datos debe tener una **distribución normal** y **estacionaridad**, es decir, que para todas las distancias la varianza de las diferencias de valores en las dos posiciones definidas sea finita e independiente de la posición (Trangmar et al, 1985).

Algunos autores como Yost et al (1982 a, b) y Burrough (1993) han encontrado que la no estacionaridad en los datos no afecta apreciablemente el análisis de semivarianza. Robertson y Gross (1994) también reconocen lo anterior y adicionan que la semivarianza es más sensible a las **distribuciones asimétricas** de los datos y a las **tendencias** que a la no estacionaridad.

El procedimiento básico para llevar a cabo el análisis de semivarianza es el siguiente:

- Se definen las distancias de muestreo.
- Se hace el muestreo cuidadosamente para no confundir muestras.
- La ubicación de cada muestra debe ser referenciada mediante coordenadas (x, y) o (x, y, z), verdaderas o artificiales.
- Se debe tener sumo cuidado en la elaboración de la base de datos.
- Cuando ya se tiene la base de datos completa se debe hacer un **análisis exploratorio** de los mismos con el fin de:
 - Comprobar la distribución normal o, por lo menos, que no hay asimetría.
 - Detectar valores anómalos o extremos.
 - Comprobar que no hay tendencias.
- Se obtiene el semivariograma y se analizan sus características.

En el análisis exploratorio de datos se deben corregir las anomalías que se encuentren, antes de obtener el semivariograma; si los datos no se distribuyen en forma normal o presentan asimetría, hacer transformaciones para simetrizar su distribución; si se detectan tendencias, eliminarlas; Rey (1994), Utset et al (1989) y Hamlett et al (1986) proponen y desarrollan algunos métodos para hacer el análisis exploratorio de los datos y para llevar a cabo las correcciones necesarias.

Cuando se tiene la distribución de puntos en el semivariograma, esta distribución se ajusta a un modelo teórico. Burrough (1992) reúne los semivariogramas ajustados en dos grandes grupos:

- **Transicionales:** Aquellos en los cuales la semivarianza aumenta al ir aumentando el espaciamiento entre muestras, hasta un cierto valor de distancia, a partir de la cual la semivarianza se estabiliza.
- **No transicionales:** Aquellos en los cuales la semivarianza crece monótonamente al ir aumentando la distancia de muestreo, sin estabilizar su valor dentro de la mayor distancia de espaciamiento entre muestras analizadas.

En los semivariogramas transicionales (ver Figura 23.2), la distancia a la cual se estabiliza la semivarianza, llamada **rango (a)**, define la distancia hasta la cual hay dependencia espacial en las muestras: Muestras tomadas a una distancia mayor que el rango son independientes. En los semivariogramas no transicionales no puede definirse un rango ya que éste, si existe, está por fuera de la máxima longitud del área muestreada.

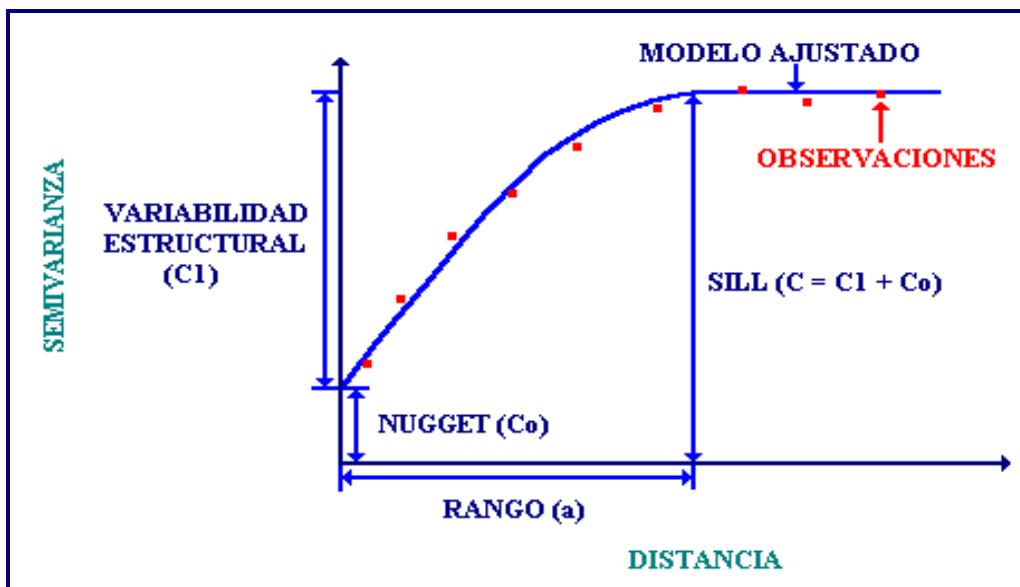


FIGURA 23.2. Ejemplo hipotético de un semivariograma con sus componentes.

El **sill** (C) es el valor de la semivarianza al cual el modelo se estabiliza; está compuesto por la suma de la **semivarianza estructural** (C_1) y la semivarianza aleatoria o **nugget** (C_0); adquiere un valor muy cercano al valor de la varianza total de la variable, cuando se cumple la estacionariedad en los datos.

El nugget puede expresarse como porcentaje de la semivarianza total (del sill), con lo cual se tiene una idea de la importancia que tiene la variabilidad aleatoria en la variabilidad de la propiedad analizada. Cambardella et al (1994) establecieron 3 categorías para agrupar la importancia de la variabilidad espacial de las variables, de acuerdo con el porcentaje que representa el nugget en el sill, así:

- Fuerte dependencia espacial: nugget < 25%.
- Moderada dependencia espacial: nugget entre 25 y 75%.
- Débil dependencia espacial: nugget > 75%.

Los modelos teóricos de semivariogramas que más frecuentemente se usan en suelos son: lineal con sill, esférico, exponencial y gausiano, en los transicionales y el lineal en los no transicionales (ver Figura 23.3). Las expresiones matemáticas que definen estos modelos pueden verse en Vieira et al (1983), Warrick et al (1986) y más ampliamente tratadas en Journel y Huijbregts (1978).

Obsérvese en la Figura 23.3 que cuando no hay dependencia espacial en la variable analizada, el modelo lineal (nugget puro) que se ajusta mejor a los datos es paralelo al eje de distancia, por lo cual no acumula semivarianza al aumentar el espaciamiento entre muestras.

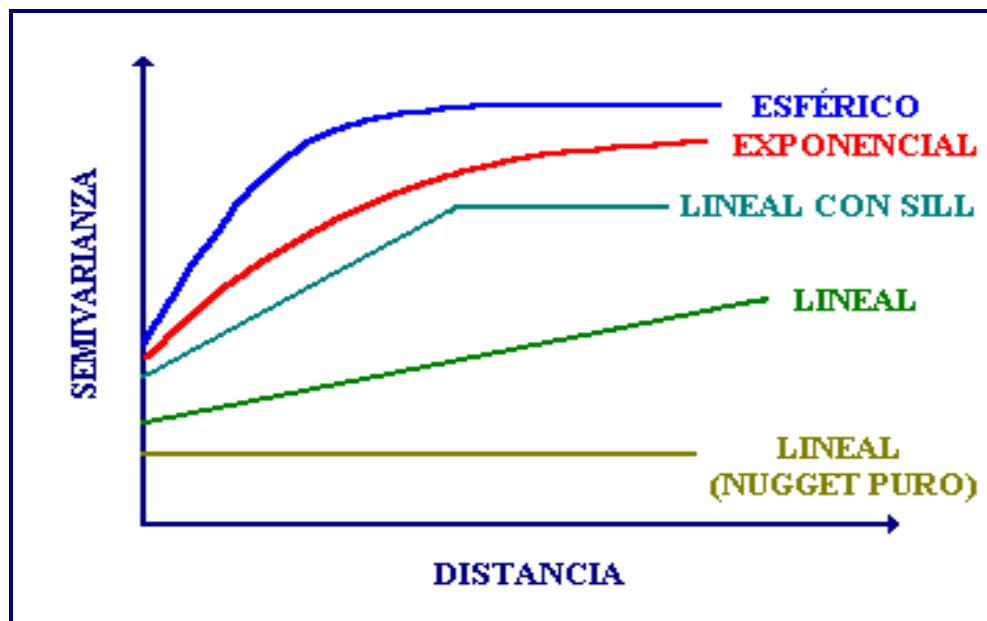


FIGURA 23.3. Modelos de semivariogramas comunes en propiedades de suelos.

Si se comparan las Figuras 23.1 y 23.2 se observa que el semivariograma, a diferencia del variograma producido en el análisis anidado, da información adicional acerca de la variable estudiada, aparte de la distancia de dependencia espacial. En la Tabla 23.5 se presentan los resultados del análisis de semivariografía para algunas propiedades de Andisoles repelentes al agua en el oriente antioqueño, obtenidos por Castillo y Gómez (1995).

TABLA 23.5. Parámetros geoestadísticos de algunas propiedades seleccionadas de Andisoles repelentes al agua en el oriente antioqueño (Tomados de Castillo y Gómez, 1995).

PROPIEDAD	RANGO (m)	SILL	NUGGET	% Co	MODELO
Contenido de Materia orgánica	14.00	187.40	63.20	33.72	Exponencial
Contenido de aluminio intercambiable	48.30	32.77	8.20	25.02	Esférico
CICE	57.50	35.01	12.20	34.85	Gausiano

Contenido de Fósforo disponible	25.60	5.42	2.12	39.11	Exponencial
Contenido de Potasio disponible	3.80	0.00567	0.00001	0.176	Gausiano
Densidad aparente	3.50	0.0048	0.00001	0.21	Gausiano

De la tabla anterior puede decirse que la densidad aparente y el contenido de potasio disponible, en estos suelos, tienen una alta dependencia espacial, en tanto que las demás variables tienen una dependencia espacial moderada.

Además, teniendo en cuenta que la distancia de muestreo en el estudio mencionado en la Tabla 23.5 fue de 10 m, la variabilidad espacial de la densidad aparente y del contenido de potasio puede considerarse de rango corto, en tanto que la de las otras propiedades será de rango medio a largo.

Al comparar el rango obtenido para la CICE y para el contenido de fósforo, con los resultados del anidado para ellos mismos (Tabla 23.4 y Figura 23.1) se observa que efectivamente la resolución de su variabilidad espacial se encontraba a una distancia mayor a los 20 m que era el máximo espaciamiento considerado en aquel análisis.

Si se hace la misma comparación expuesta en el párrafo anterior para el contenido de potasio, se observa que el rango de esta propiedad está entre las distancias de los niveles 3 y 4 del anidado, precisamente entre los que acumuló el mayor porcentaje de varianza pero, a diferencia de las otras dos propiedades mencionadas (CICE y P), el contenido de potasio presentó una alta dependencia espacial en tanto que aquellas no, lo que pudo haber determinado las diferencias anotadas en el comportamiento espacial de estas variables.

El comportamiento de la variabilidad espacial se ve afectado de una manera importante por la escala de trabajo. Cahn et al (1994) comprobaron este efecto haciendo los análisis de semivariografía en parcelas de 0.25 y de 3.3 ha, tomando 25 y 200 muestras en cada una, respectivamente, obteniendo los resultados que se presentan en la Tabla 23.6.

TABLA 23.6. Rango de dependencia espacial de algunas propiedades del horizonte A de Mollisoles, determinados en parcelas de diferente área (Cahn et al, 1994).

PROPIEDAD	RANGO POR TAMAÑO DE PARCELA (m)	
	0.25 ha	3.3 ha
Carbono orgánico	≥ 50	≥ 180
N-NO ₃	5	≤ 45
Contenido de P	≥ 50	ND*
Contenido de K	30 - 50	≤ 45

* ND: No determinado

Rogowski y Wolf (1994) encontraron que la escala de trabajo cambiaba las propiedades de los semivariogramas, presentándose más ‘ruido’ o dispersión en la distribución de los datos y mayor ciclicidad en el semivariograma, a medida que se aumentaba el espaciamiento entre muestras.

Prácticamente todas las propiedades del suelo presentan variabilidad espacial en varios rangos pero cuando se quiere conocer esta variabilidad con fines de manejo de suelos, es más importante la variabilidad de **rango corto**; la de rango largo es más útil para el entendimiento de la pedogénesis y/o de la geogénesis, como lo observaron Yost et al (1982 b).

Otro aspecto fundamental de la semivariografía es la definición del tipo de dependencia espacial que presenta la variable que se analiza.

Cuando la variabilidad espacial de la variable depende únicamente de la distancia de separación entre muestras, el semivariograma que se obtiene es **isotrópico**. Cuando la variabilidad depende, además del espaciamiento, de la dirección en que se hace el muestreo, el semivariograma es **anisotrópico**. La anisotropía está mostrando que los procesos o factores que controlan la variabilidad de determinada propiedad, ejercen dicho control de manera diferencial, de acuerdo con ciertas direcciones.

En caso de anisotropía, la propiedad presenta dos rangos extremos de variación, los cuales corresponden a dos direcciones definidas; Castillo y Gómez (1995) encontraron anisotropía en el pH de Andisoles repelentes al agua, medido en KCl, obteniendo un rango de 0.9 m para la dirección N-S y otro de 44.37 m para la dirección E-W.

2.3. APPLICACIONES

El conocimiento de la variabilidad espacial del suelo, aparte de mejorar el conocimiento que se adquiere sobre él cuando se establece, tiene varias aplicaciones prácticas como:

- Elaborar mapas de propiedades del suelo por procesos de interpolación.
- Hacer control de calidad de mapas de suelos.
- Definir el tamaño y la ubicación de unidades experimentales.
- Mejorar los sistemas de muestreo de suelos.
- Mejorar la interpretación de resultados de investigación.
- Ayudar en el manejo intensivo de los suelos.

A continuación se exponen, en forma general, las aplicaciones mencionadas anteriormente.

2.3.1. Producción de mapas de isolíneas

Conociendo las propiedades del semivariograma de alguna variable del suelo, se puede elaborar un mapa de la distribución que tienen los valores de dicha variable en toda una unidad de tierra. El mapa de isolíneas se produce mediante las técnicas de interpolación y predicción como “**Kriging**”, cuyo fundamento matemático se encuentra bien tratado en Journel y Huijbregts (1978) y en Vieira et al (1983).

Este método de interpolación es el más ventajoso, al compararlo con otros similares, pues tiene mayor precisión en las estimaciones ya que es el mejor estimador lineal insesgado, lo que permite hacer las estimaciones con el mínimo error. Con este método también se puede producir un mapa de la distribución de los errores en la interpolación, lo que ayuda en la selección de posibles sitios

experimentales o de muestreo. Un ejemplo de un mapa de isolíneas producido por Kriging puede apreciarse en la Figura 23.4.

2.3.2. Muestreo de suelos

Una muestra que se tome para evaluar alguna variable tiene un área de influencia alrededor del sitio en que se tomó; si se conoce la dependencia espacial de dicha variable, aquella zona de influencia estará representada por el área de un círculo que tenga un radio igual al rango obtenido del semivariograma, en caso de que este sea isotrópico y que se ajuste a un modelo esférico.

Cuando el semivariograma es anisotrópico y se ajusta a un modelo esférico, el área de influencia de una muestra será la que tenga una elipse cuyos radios mayor y menor correspondan a los rangos mayor y menor obtenidos con el semivariograma.

Conociendo el rango de dependencia espacial que presenta una determinada propiedad de un suelo específico, puede llevarse a cabo un muestreo que garantice la independencia de las muestras, de modo que se puedan establecer los parámetros que caracterizan la población correctamente. Para lograr esto, Gupta et al (1997) dicen que las muestras se deben tomar con una separación mayor a la “**longitud de correlación**”, la cual es una distancia igual a la del rango, cuando el modelo del semivariograma es esférico o, igual a tres veces el rango, cuando el modelo es exponencial o gausiano.

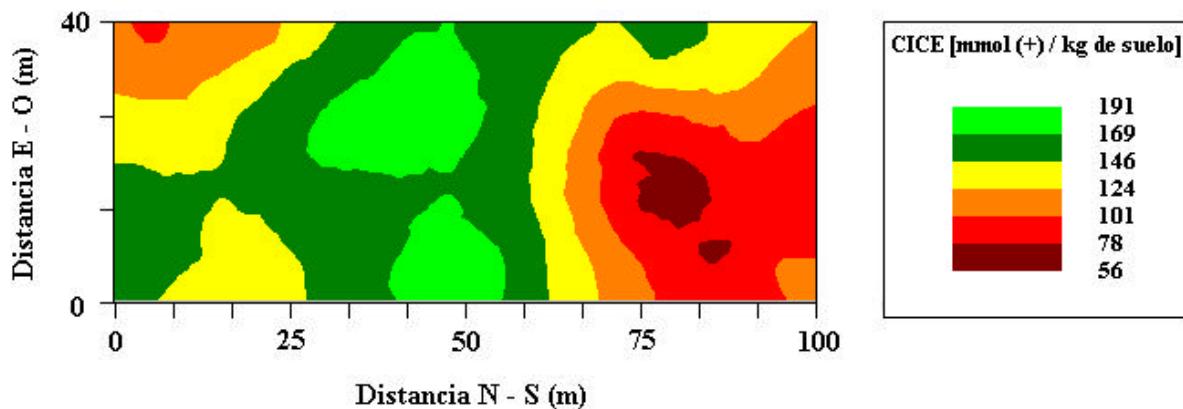


FIGURA 23.4. Mapa de isolíneas de la CICE de horizontes A hidrofóbicos de Andisoles de Antioquia (adaptado de Castillo y Gómez, 1995).

La recomendación hecha en el párrafo anterior debe tomarse con precaución pues en el caso de que la propiedad presente una variabilidad de rango corto, el rango no es un parámetro adecuado para estimar el número de muestras ya que este resultaría demasiado alto y, por tanto, prohibitivo desde el punto de vista económico. En este caso, es más prudente establecer un número arbitrario de muestras, el cual dependerá de la intensidad de uso a que esté sometido el suelo, y tomar las muestras a partir de un número alto de submuestras para cada muestra.

El muestreo también se puede mejorar notoriamente en su representatividad si se conoce la distribución espacial que presentan los valores de la variable, es decir, si se tiene un mapa de isolíneas que le corresponda. El mapa de isolíneas mostrará que tan homogénea o heterogénea es el área a estudiar y ayudará a definir, desde un punto de vista práctico, cuántos sitios de muestreo se deben tener en ella para evaluar correctamente la propiedad en cuestión; a mayor homogeneidad, menor número de muestras y viceversa.

El conocimiento de la variabilidad espacial de las variables que se evalúan también tiene implicaciones sobre el tipo de muestras que se deben tomar para caracterizarlas. Aquellas variables que presentan una alta variabilidad de rango corto o que acumulan mucha varianza en los primeros y más cortos intervalos de distancia en un análisis anidado, se deben caracterizar mediante **muestras compuestas** (muestra tomada de una mezcla de varias submuestras).

Cuando se quiera caracterizar alguna cualidad del suelo como por ejemplo fertilidad, la cual depende de varias propiedades, se puede establecer un rango de variabilidad espacial común a todas ellas, generalmente el de la propiedad más variable y con este se diseña el muestreo (Gupta et al, 1997). Si las diferencias en el rango entre variables no son grandes, puede establecerse un rango promedio para todas y se hace el diseño del muestreo con él.

2.3.3. Seleccionar el tamaño y la ubicación de unidades experimentales

El tamaño que deben tener las unidades experimentales en el campo está fuertemente influenciado por el rango de variación espacial que presenta la variable a estudiar. En el caso de variables isotrópicas estas unidades pueden ser cuadradas, de modo que el lado sea igual a 2 veces el rango; si son anisotrópicas deben ser rectangulares, cuyos lados serán el doble de los rangos mayor y menor; con este diseño se garantiza que la unidad experimental involucra toda la variabilidad que tiene la propiedad que se evalúa y que no se adiciona a ella variabilidad que debería corresponder a otra parcela.

Debe tenerse claridad en que la variabilidad espacial no es el único criterio que se utiliza para definir el tamaño de una unidad experimental; hay una buena cantidad de ellos, como los que analizan Gómez (1989) y Ovalles y Comerma (1991) que no pueden ser ignorados dentro del trabajo de selección de sitios y parcelas experimentales.

Cuando el rango de variación espacial de una propiedad es grande, el tamaño de la unidad experimental para llevar a cabo el estudio será definido dándole más peso a otros criterios relacionados con las facilidades de manejo de los experimentos.

Si se tiene un mapa de isolíneas de la variable que se estudia y/o uno de la distribución de los errores de las estimaciones, las unidades experimentales deben ubicarse en aquellos sitios donde la variabilidad en la distribución de los valores sea menor y/o donde sea menor el error de las estimaciones.

En relación con la orientación de las unidades experimentales, hay que tener especial cuidado cuando la propiedad presenta anisotropía; en este caso, las parcelas experimentales deben ser rectangulares y se deben colocar con su lado mayor en el sentido de la dirección de menor variabilidad (McBratney y Webster, 1983).

Además de lo anterior, Sabbe y Marx (1987) recomiendan que, en el caso de variables anisotrópicas, para definir la longitud de los lados de la parcela se conserve la proporción en que están las dos varianzas, es decir, si las varianzas medidas son 2 y 5 para las direcciones de menor y mayor variabilidad, los lados de la parcela deben tener una relación entre ellos de 2:5 también.

2.3.4. Interpretación de resultados de investigación

Si se determina la variabilidad espacial que se presente en las unidades experimentales utilizadas en una investigación, se puede hacer una mejor interpretación de los resultados que se obtengan en sus análisis de varianza.

Bhatti et al (1991) diseñaron dos experimentos, uno de respuesta de trigo a la aplicación de P en un diseño de bloques al azar, en Washington y otro de respuesta de algodón a la fertilización con N-P en un diseño factorial, en Pakistán. A los resultados de producción se les hizo análisis de varianza y de semivarianza, se les removió el componente espacial de la variabilidad que mostraron y se les repitieron los análisis de varianza y semivarianza. En ambos experimentos se presentó dependencia espacial de la producción.

Al llevar a cabo el análisis de varianza se presentaron diferencias entre las fuentes de variación que controlaron los experimentos. Antes de eliminar la variabilidad espacial, se presentó diferencia significativa entre bloques y entre factores pero, cuando dicha variabilidad fue eliminada y se repitieron los análisis de varianza, desaparecieron las diferencias entre bloques y entre factores y se presentaron entre tratamientos, como puede apreciarse en la Tabla 23.7. En esta tabla se observa como la variabilidad espacial del suelo puede enmascarar los efectos de los tratamientos que se están estudiando, llevando a conclusiones erróneas acerca de la necesidad o no de llevar a cabo alguna práctica de manejo de los cultivos, en este caso particular, de fertilización.

TABLA 23.7. Análisis de varianza de ensayos de respuesta a fertilización en trigo y algodón, llevados a cabo en Washington y Pakistán, antes y después de eliminar la variabilidad espacial de los datos (Tomados de Bhatti et al, 1991).

FUENTE DE VARIACIÓN	GRADOS DE LIBERTAD	ANTES DE ELIMINAR VARIABILIDAD ESPACIAL		DESPUÉS DE ELIMINAR VARIABILIDAD ESPACIAL	
		Suma de cuadrados	F	Suma de cuadrados	F
TRIGO					
Bloques	2	19754000	19.1**	3324	0.01
Tratamientos	15	14253000	1.8	15444000	6.26**
Error	29	15012000		4773300	
ALGODÓN					
Factores	3	3.84	5.7**	0.006	0.1

Tratamientos	14	2.71	0.9	2.48	6.1**
N	2	0.48	1.1	1.39	23.9**
P	4	0.83	0.9	0.47	4.0**
N x P	8	1.39	0.8	0.62	2.7*
Error	42	9.42		1.22	

*,**: Significativos al 95 y 99%, respectivamente.

2.3.5. Ayuda en el manejo de los suelos

Cuando se cuantifica la variabilidad espacial de una serie de propiedades relacionadas con alguna cualidad del suelo, mediante algunos procedimientos como los expuestos por Smith et al (1993), pueden elaborarse mapas de isolíneas que definen áreas que deben ser sometidas a prácticas de manejo similares.

La elaboración de este tipo de documentos es el primer paso para poner en práctica las técnicas de “**Manejo por sitio específico**” (Reetz, 1996; Borgelt et al, 1994; Burrough, 1993), las cuales ayudan a utilizar los recursos de la producción agropecuaria de una forma más eficiente y económica, con un menor riesgo para el ambiente.

Los mapas específicos de cualidades del suelo, procesados en Sistemas de Información Geográficos (SIG) y apoyados por Sistemas de Posicionamiento Satelital (GPS), se convierten en el conjunto ideal para llevar a cabo aquellas tareas.

Algunos autores citados por Dhillon et al (1994) y por Burrough (1993), han utilizado estos sistemas para hacer recuperación de suelos salinos, con ahorros de hasta el 30% de agua en los lavados, gracias a la utilización de dosis exactas, aplicadas en los sitios específicos en los cuales se requieren, todo controlado por computador.

Borgelt et al (1994) plantean un método para hacer el manejo de la acidez del suelo, mediante encalamiento, diseñando y controlando con la tecnología mencionada anteriormente. Gupta et al (1997) mejoraron la eficiencia en el manejo de la fertilización de un Thermic Ultic Hapludalfs de La Virginia, U.S.A., bajo rotación maíz – soya, al lograr reducir en 12% la cantidad de P a aplicar en un lote y, en 25% la cantidad de K en otro lote, con el mismo suelo; esto lo lograron al involucrar la variabilidad espacial de la distribución de los nutrientes en los estudios de fertilidad llevados a cabo en los lotes analizados.

RECORDAR

- La heterogeneidad es una característica inherente a las propiedades del suelo.
- La variabilidad de una propiedad está conformada por un componente aleatorio (azar) y por otro estructural o sistemático (determinístico).
- La variabilidad aleatoria la evalúa la estadística paramétrica clásica pero ésta no evalúa adecuadamente la sistemática; para ella se usa la Geoestadística o Estadística Espacial.

- Los diseños anidados y los análisis de semivarianza permiten estudiar la variabilidad espacial de cualquier propiedad.
- El análisis de semivariografía produce el semivariograma y, cuando a éste se le ajusta un modelo teórico, se puede establecer la distancia hasta la cual hay dependencia espacial en los valores que toma la variable que se analiza.
- El conocimiento de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo permite:
 - Elaborar mapas de isolíneas.
 - Mejorar los sistemas de muestreo en el suelo.
 - Mejorar el diseño, la ubicación y la interpretación de experimentos.
 - Mejorar la eficiencia en el uso y manejo de los recursos de producción agropecuarios.

BIBLIOGRAFÍA

- ABRIL, M. A. y B. A. ORTIZ. 1996. Variabilidad espacial de algunas propiedades físico-químicas del horizonte A de Andisoles hidrofóbicos, bajo plantaciones de *Pinus patula*. Tesis (Ingeniero Agrónomo). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Medellín. 75 p.
- BHATTI, A. U.; D. J. MULLA; F. E. KOEHLER and A. H. GURMANI. 1991. Identifying and removing spatial correlation from yield experiments. Soil Sci. Soc. Am. J. 55: 1523-1528.
- BORGELT, S.C.; S. W. SEARCY; B. A. STOUT and D. J. MULLA. 1994. Spatially variable liming rates: A method for determination. Trans of the ASAE . 37: 1499-1507.
- BURROUGH, P.A. 1992. Sampling designs for quantifying map unit composition. En: Spatial variabilities of soils and landforms. SSSA Special publication No. 28. 2^a Ed. SSSA. Madison. pp: 89-125.
- BURROUGH, P. A. 1993. Soil variability: a late 20th century view. Soils and Fertilizers, 56 (5): 529-562.
- CAHN, M.D.; J. W. HUMMEL and B. H. BROWER. 1994. Spatial analysis of soil fertility for site-specific crop management. Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 1240-1248.
- CAMBARDELLA, C. A.; T. B. MOORMAN; J. M. NOVAK; T. B. PARKIN; D. L. KARLEN; R. F. TURCO and A. E. KONOPKA. 1994. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 1501-1511.
- CASTILLO, A. M. y J. S. GÓMEZ. 1995. Variabilidad espacial de algunas propiedades físico químicas en el horizonte A hidrofóbico de Andisoles, bajo cobertura de *Pinus patula*. Tesis (Ingeniero Agrónomo). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Medellín. 116 p.
- DHILLON, N. S.; J. S. SAMRA; U. S. SADANA and D. R. NIELSEN. 1994. Spatial variability of soil test values in a Typic Ustochrept. Soil Technology 7: 163-171.
- GÓMEZ, L. H. 1989. Estadística experimental con aplicaciones a las Ciencias Agrícolas. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Medellín. 615 p.
- GUPTA, R. K.; S. MONTAGHIMI; P. W. McCLELLAN; M. M. ALLEY and D. E. BRANN. 1997. Spatial variability and sampling strategies for NO₃ – N, P and K determinations for site – specific farming. Trans of the ASAE. 40(2): 337-343.

- HAMLETT, J. M.; R. HORTON and N. A. C. CRESSIE. 1986. Resistant and exploratory techniques for use in semivariogram analyses. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 868-875.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC). 1977. Estudio general y detallado de suelos de los municipios de Cota, Funza, Mosquera y parte de Madrid (departamento de Cundinamarca). IGAC. Bogotá. 513 p.
- JARAMILLO, D. F. 1995. Andisoles del oriente antioqueño: Caracterización química y fertilidad. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 35 p.
- JOURNEL, A. G. y CH. J. HUIJBREGTS. 1978. Mining geostatistics. Academic Press. Londres. 598 p.
- JURY, W. A.; W.R. GARDNER and W. H. GARDNER. 1991. Soil physics. 5^a Ed. John Wiley and Sons, Inc. New York. 328 p.
- OLIVER, M. A. and R. WEBSTER. 1986. Combining nested and linear sampling for determining the scale and form of spatial variation of regionalized variables. *Geographical analysis* 18 (3): 227-242.
- OVALLES, F. 1991. Evaluación de la variabilidad de suelos a nivel de parcela, para el establecimiento en lotes experimentales en el estado Cojedes. *Agronomía Tropical* 41 (1-2): 5-21.
- OVALLES, F. 1992. Metodología para determinar la superficie representada por muestras tomadas con fines de fertilidad. FONAIAP-CENIAP-IIAG. Maracay. 44 p.
- OVALLES, F. y J. COMERMA. 1991. Metodología para la selección y caracterización de sitios experimentales agropecuarios. FONAIAP-CENIAP-IIAG. Serie B No. 18. Maracay. 44 p.
- OVALLES, F. y M. C. NÚÑEZ. 1994. Métodos estadísticos para evaluar la variabilidad del suelo dentro de unidades de capacidad de uso en la depresión del lago de Valencia. *Agronomía Tropical* 44 (1): 23-40.
- OVALLES, F. y J. C. REY. 1994. Variabilidad interna de unidades de fertilidad en suelos de la depresión del lago de Valencia. *Agronomía Tropical* 44 (1): 41-65.
- OVALLES, F.; J. RODRÍGUEZ y J. De BRITO. 1989. Determinación de superficies óptimas de muestreo con fines de fertilidad de suelo en la Formación Mesa, Estado Monagas. Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo. Maturín. 18 p.
- REETZ, H. 1996. Manejo por sitio específico: Una revolución silenciosa en la finca. *Informaciones agronómicas* No. 24. INPOFOS. Quito. pp: 9 y 12.
- REY, J. C. 1994. Análisis de la variabilidad espacial para atributos seleccionados en un suelo del Estado Aragua. Informe final. Universidad Central de Venezuela. Postgrado en Ciencias del Suelo. Venezuela. 38 p.
- ROBERTSON, G. P. and K. L. GROSS. 1994. Assessing the heterogeneity of belowground resources: Quantifying pattern and scale. In: Exploitation of environmental heterogeneity by plants: Ecophysiological processes above-and belowground. Academic Press. New York. pp: 237-253.
- ROGOWSKI, A. S. and J. K. WOLF. 1994. Incorporating variability into soil map unit delineations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 163-174.
- SABBE, W. E. and D. B. MARX. 1987. Soil Sampling: Spatial and temporal variability. In: Soil testing: Sampling, correlation, calibration and interpretation. SSSA special publication No. 21. SSSA. Madison. pp: 1-14.

STARK, J. M. 1994. Causes of soil nutrient heterogeneity at different scales. In: Exploitation of environmental heterogeneity by plants: Ecophysiological processes above-and belowground. Academic Press. New York. pp: 255-284.

TRANGMAR, B.B.; R. S. YOST and G. WEHARA. 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. Advances in agronomy 28: 45-94.

UPCHURCH, D. R. and W. J. EDMONDS. 1992. Statistical procedures for specific objectives. In: Spatial variabilities of soils and landforms. SSSA Special publication No. 28. 2^a Ed. SSSA. Madison. pp: 49-71.

UTSET, S.A.; M. E. RUIZ; R. IRARRAGORRI y L. TORRES. 1989. Estructura espacial de la propiedades del suelo. III: Análisis bidimensional. Ciencias de la Agricultura. 37-38: 124-129.

VANCLIN, M. sf. Spatial Variability of soil properties. Institut de Mecanique de Grenoble. Fotocopias. 47 p.

VIEIRA, S. R.; J. L. HATFIELD; D. R. NIELSEN and J. W. BIGGAR. 1983. Geostatistic theory and application to variability of some agronomical properties. Hilgardia 51 (3): 1-75.

WARRICK, A. W.; D. E. MYERS and D. R. NIELSEN. 1986. Geostatistical methods applied to soil science. In: Methods of soils analysis. Part. I: Physical and mineralogical methods. Agronomy Monograph. No. 9. 2^a Ed. SSSA. Madison. pp: 53-82.

YOST, R. S.; G. UEHARA and R. L. FOX. 1982a. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. II. Kriging. Soil Sci. Soc. Am. J. 46: 1033-1037.

YOST, R. S.; G. UEHARA and R. L. FOX. 1982b. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. I. Semi-variograms. Soil Sci. Soc. Am. J. 46: 1028-1032.

AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Cuáles propiedades del suelo son más variables: las químicas o las físicas?.
2. ¿Cómo cambia la variabilidad de las propiedades del suelo con el uso del mismo?.
3. ¿Cuáles son los componentes de la variabilidad?. ¿Cómo se define cada uno?.
4. Enumere 4 parámetros que se utilicen para estimar la variabilidad aleatoria de un grupo de datos.
5. En una variable regionalizada, ¿de qué depende el valor que tome dicha variable en un determinado sitio?.
6. ¿Cómo se puede definir Geoestadística o Estadística Espacial?.
7. Diga dos métodos que se utilicen para estudiar la variabilidad espacial de alguna propiedad.
8. ¿Qué es un semivariograma?. ¿Cuáles son sus componentes?.
9. ¿Cuándo se considera que una propiedad tiene alta variabilidad espacial?.
10. ¿Cuáles modelos de semivariograma son los que se ajustan con mayor frecuencia a los datos de variabilidad espacial de propiedades del suelo?.
11. ¿Qué es un semivariograma isotrópico?. ¿Y anisotrópico?.
12. Diga 4 actividades que se puedan hacer más eficientemente si se involucra la variabilidad espacial del suelo.

LOS SUELOS DE COLOMBIA

CAPÍTULO 24

CONTENIDO

- ❖ Regiones naturales de Colombia
 - Amazonia
 - Región andina
 - Orinoquia
 - Llanura del Caribe
 - Andén Pacífico
 - Alto y medio Magdalena
 - Alta y media Guajira
 - Valle del río Cauca
 - Islas del Caribe
- ❖ Aptitud de uso agropecuario de los suelos colombianos
- ❖ Limitantes para el uso agropecuario de los suelos colombianos

OBJETIVOS

- ❖ Conocer la distribución de los suelos en Colombia, según sus regiones naturales
- ❖ Conocer la calidad, la aptitud y los limitantes para el uso agropecuario de los suelos de Colombia

E

n Colombia se presenta una amplia variedad de suelos debido a la gran cantidad de combinaciones que se dan entre los factores de formación de ellos. Se encuentran áreas ubicadas desde el nivel del mar hasta más de 5000 m de altitud, en los picos nevados, lo que da origen a una alta variedad de climas. Se presentan todos los tipos de rocas y de depósitos que definen una gran variedad de materiales parentales. Hay relieves planos hasta fuertemente escarpados, desde denudacionales hasta de acumulación. La vegetación y demás organismos, consecuentemente con las variaciones climáticas, presentan una amplia gama de especies, lo que implica una amplia variedad en la cantidad y en los tipos de materiales que aportan al suelo, ejerciendo un control importante en su desarrollo y propiedades.

1. REGIONES NATURALES DE COLOMBIA

A pesar de la gran cantidad de unidades diferentes que se pueden generar al combinar la variedad de condiciones expuestas anteriormente, para alcanzar los fines generales que se persiguen en este capítulo, se puede dividir el territorio colombiano en las 9 regiones naturales que se exponen en la Figura 24.1 y en la Tabla 24.1, delimitadas obedeciendo a ciertas particularidades biofísicas que ellas tienen.

TABLA 24.1. Área de las regiones naturales de Colombia.

REGIÓN	ÁREA		FUENTE
	ha	% del área del país*	
Amazonia	38 020 000	33.30	PRORADAM (1979)
Andina	30 324 000	26.56	Cortés et al (1982)
Orinoquia	25 306 620	22.16	Obtenida por diferencia
Llanura del Caribe	10 000 000	8.76	Cortés (1980)
Andén Pacífico	6 443 400	5.64	Malagón et al (1995)
Alto y medio Magdalena	2 500 000	2.19	Cortés (1982)
Alta y media Guajira	1 200 000	1.05	Córdoba et al (1978)
Valle del río Cauca	376 278	0.33	Quintero y Castilla (1992)
Islas del Caribe	4502	0.01	Cortés (1982)
Total territorio colombiano	114 174 800	100	IGAC (1988)

* El de las islas del Caribe establecido por diferencia.

A continuación se hace una descripción resumida de las principales características que tiene cada una de las regiones naturales definidas en la Tabla 24.1 y de sus suelos. Todas las fuentes de información utilizadas para este capítulo tienen los suelos clasificados con claves anteriores a 1999, por lo cual, para este texto, se hizo la actualización taxonómica con las claves publicadas en este año (Soil Survey Staff, SSS, 1999).

Los suelos se presentan clasificados al nivel de gran grupo y cuando su clasificación original es igual a la de 1999, se deja tal como está en los estudios consultados. Cuando no se tiene seguridad en la nueva clasificación por falta de información para definir el nuevo taxón, el nombre del gran grupo se presenta con signo de interrogación.

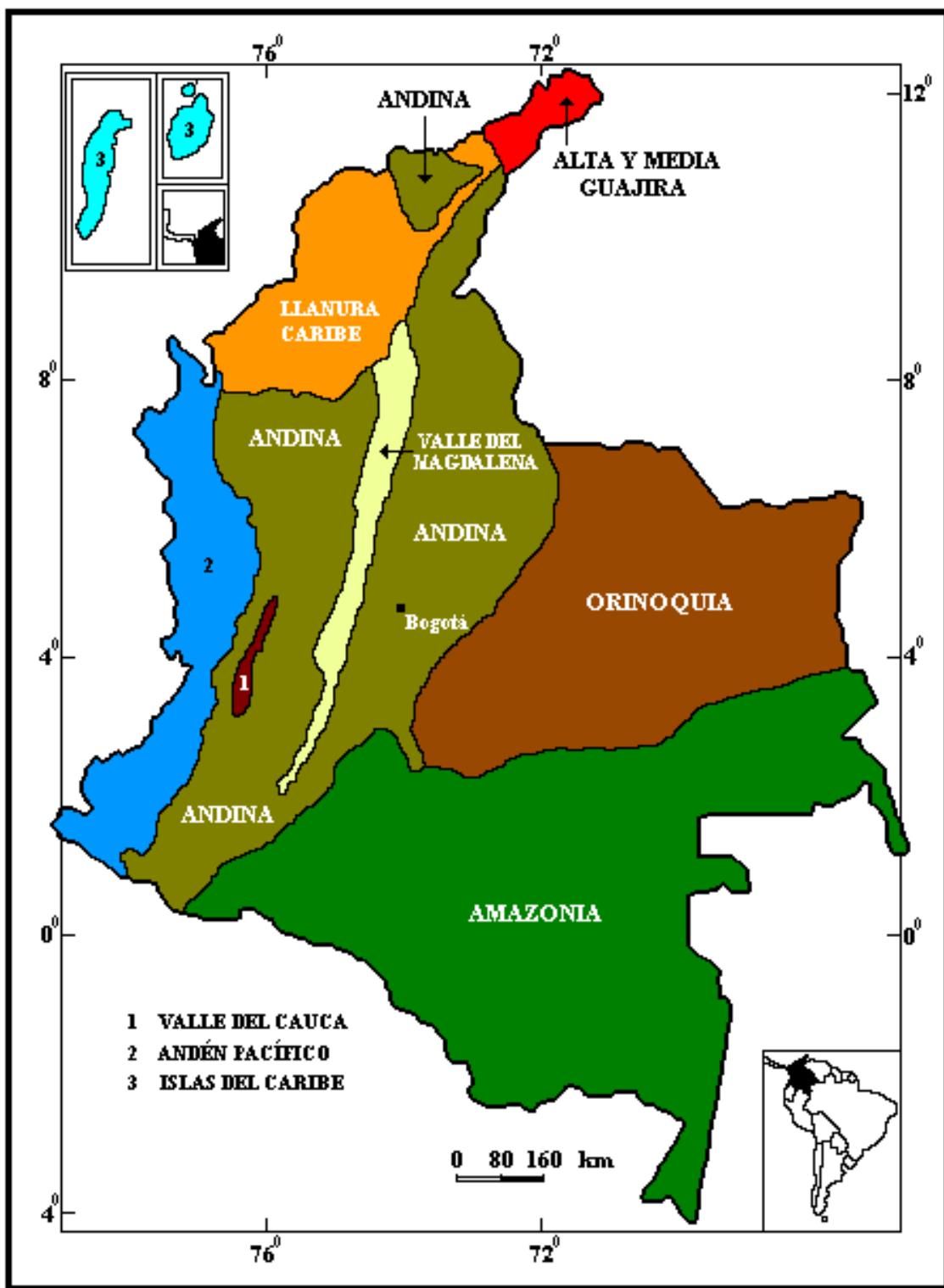


FIGURA 24.1. Regiones naturales de Colombia. (Adaptado de varios mapas presentados por Malagón et al, 1995).

1.1. AMAZONIA

Es la región natural más grande del país. Toda se ubica en el piso térmico cálido y según Botero et al (1997) es una planicie sedimentaria que tiene un alto grado de variabilidad en materiales, relieve, vegetación y suelos.

Según Botero et al (1997) las condiciones de humedad en la amazonia van desde subhúmedas hasta muy húmedas. En el mapa geológico presentado por Malagón et al (1995) se observa que los materiales litológicos que predominan en esta región son los sedimentos aluviales y algunos pocos lacustres, seguidos por rocas sedimentarias (areniscas, conglomerados, calizas y shales), rocas ígneas (migmatita, sienita, riocacita, aglomerados y tobas) y rocas metamórficas (neis, esquisto, cuarcita y anfibolita).

El régimen de humedad es ácuico en la mayoría de los valles aluviales y údico en el resto de la zona y el régimen de temperatura es isohipertérmico. Botero et al (1997) subdividen la región en varias subpaisajes para hacer la descripción de los suelos. En este documento se hace una generalización de dicha agrupación para hacer la presentación de los grandes grupos dominantes en cada subregión como se expone a continuación:

- **Suelos de planicies estructurales:** Ocupan casi el 90% de la región. Kandiudults, Paleudults, Dystrudepts, Udorthents, Acropox, Hapludox, Kandiaquults, Epiaquepts?, Endoaquepts?, Quartzipsamments, Udipsamments, Kandiudox y Haploperox.
- **Suelos de relieves colinados y montañosos:** Dystrudepts, Udorthents, Kandiudults, Udipsamments.
- **Suelos de las llanuras aluviales de piedemonte:** Paleudults, Dystrudepts, Kandiudults, Udorthents, Eutrudepts, Epiaquepts?, Endoaquepts?, Hapludox, Hapludults, Hapludalfs, Haplohumults, Hapludands y Udifluvents.
- **Suelos de las planicies fluviales y fluvio – deltaicas:** Paleudults, Kandiudults, Dystrudepts, Udorthents, Hapludox, Quartzipsamments, Udipsamments, Hapludults, Epiaquepts? y Endoaquepts?.
- **Suelos de las llanuras aluviales de los ríos amazonenses:** Dystrudepts, Plinthaquults, Kandiudults, Udipsamments, Paleudults, Epiaquepts?, Endoaquepts?, Quartzipsamments, Kandiaquults, Udifluvents y Eutrudepts.
- **Suelos de las llanuras aluviales de los ríos andinenses:** Paleaquults, Epiaquepts?, Endoaquepts?, Dystrudepts, Paleudults, Plinthaquox, Eutrudepts, Udifluvents y Hapludox.

Según PRORADAM (1979), en la amazonia predominan los **Inceptisoles distróficos**, que ocupan aproximadamente el 48% de su área; le siguen los suelos del orden **Oxisol** con 26% de cobertura areal y los **Entisoles**, también de carácter distrófico, con 24%. Lo anterior da idea de la baja fertilidad que tienen los suelos de la amazonia colombiana, a pesar de sostener, en buena parte de su área, una vegetación exuberante.

Las condiciones de pobreza de dichos suelos se confirman al observar los datos suministrados por los estudios del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 1988) que muestran que en ellos, más del 95% de la composición de la fracción arena está formada por cuarzo y que en la fracción arcilla los minerales dominantes son la caolinita y la gibsita. Además, en los mismos documentos se aprecia que en esta región todos los suelos son ácidos y tienen bajos contenidos de materia orgánica.

1.2. REGIÓN ANDINA

Aunque no es la de mayor extensión, sí es la que tiene mayor variabilidad en todos sus componentes. Comprende toda la zona montañosa colombiana, representada por las cordilleras occidental, central y oriental, por la sierra nevada de Santa Marta y por la sierra de La Macarena, además de los altiplanos que se encuentran localizados en ellas. Presenta casi todas las condiciones climáticas por efecto de la variación en la altitud con respecto al nivel del mar y prácticamente todos los materiales parentales y relieves.

Malagón et al (1995) hace un recuento de los principales materiales parentales que se presentan en las diferentes subunidades de esta región, del cual se puede sintetizar lo siguiente:

- **Cordillera occidental:** Predominan las rocas sedimentarias (arenisca, chert, caliza, conglomerado); se presentan rocas ígneas como basalto, diabasa, andesita, gabro, tonalita, granodiorita, granito y aglomerados, al igual que recubrimientos con ceniza volcánica; también se encuentran sedimentos no consolidados aluviales.
- **Cordillera central:** El principal material parental de los suelos en esta cordillera lo constituye la ceniza volcánica. Hay áreas importantes de rocas ígneas (granodiorita, cuarzodiorita, gabro, granito, tonalita, basalto, lavas, aglomerados, toba e ignimbrita), así como de rocas metamórficas (esquistos, cuarcita, filita, anfibolita, neis y mármol) y de rocas sedimentarias (arenisca, chert, conglomerado y caliza). También se encuentran áreas amplias con sedimentos aluviales y, en la partes altas, con sedimentos glaciales y lacustres.
- **Cordillera oriental:** Dominada por las rocas sedimentarias (arenisca, lutita, caliza, conglomerado y shale) también presenta importantes áreas de rocas metamórficas (esquisto, cuarcita, filita, anfibolita, mármol, pizarra y neis), así como de rocas ígneas (granodiorita, gabro, granito y sienita). Se presentan depósitos de sedimentos lacustres, aluviales, glaciales, además de amplias zonas con cobertura de ceniza volcánica.
- **Sierra nevada de Santa Marta:** Son importantes las rocas ígneas (granodiorita, tonalita granito y toba), las rocas metamórficas (esquistos, cuarcita, filita, anfibolita, neis y migmatita), las rocas sedimentarias (arenisca, chert, caliza y conglomerado) y los sedimentos aluviales, glaciales y lacustres.
- **Sierra de La Macarena:** Dominan las rocas ígneas (sienita y migmatita) y las rocas sedimentarias (shale, arenisca, conglomerado y caliza).

De las discusiones que han hecho Malagón et al (1995) y Cortés et al (1982) acerca de los suelos de esta región se presenta el siguiente resumen:

- **Suelos en relieves montañosos**
 - *En clima cálido seco:* Haplustepts?, Ustorthents, Torriorthents.
 - *En clima cálido húmedo y muy húmedo:* Eutrudepts, Hapludolls, Dystrudepts, Udorthents.
 - *En clima medio seco:* Haplustepts?, Ustorthents, Haplustalfs, Torriorthents.
 - *En clima medio húmedo y muy húmedo:* Eutrudepts, Hapludolls, Hapludalfs, Dystrudepts, Udorthents, Hapludands?.
 - *En clima frío seco:* Haplustalfs, Haplustepts?, Ustorthents, Torriorthents.
 - *En clima frío húmedo y muy húmedo:* Dystrudepts, Udorthents, Eutrudepts, Melanudands?, Hapludands?, Fulvudands?, Placudands.

- En clima muy frío y muy húmedo: Dystrudepts, Dystrocryepts, Cryorthents, Melanudands?, Hapludands?, Fulvudands?, Udivitrends, Melanocryands?, Haplocryands?, Fulvicryands?, Vitricryands?.

□ Suelos de los altiplanos

- En clima frío seco: Haplustalfs, Durustalfs, Natrustalfs, Dystrustepts?, Haplustepts?, Ustorthents.
- En climas frío y medio húmedo: Melanudands?, Dystrudepts; Jaramillo (2000) clasificó los suelos de amplias áreas en el norte de la cordillera central como Hapludands y Fulvudands.

□ Suelos de llanuras aluviales de piedemonte

- En climas cálido y medio seco: Haplustalfs, Dystrustepts?, Haplustepts?, Ustorthents, Durustalfs, Dystrudepts.
- En climas cálido y medio húmedo: Eutrudepts, Melanudands?, Hapludands?, Fulvudands?.

□ Suelos de planicies aluviales en todos los climas

- Mal drenados: Epiaquepts?, Endoaquents?, Fluvaquents, Epiaquepts?, Endoaquepts?, Psammaquents, Petraquepts, Udifluvents, Udorthents, Haplofibrists, Haplosaprists.
- Bien drenados: Ustifluvents, Dystrustepts?, Haplustepts?, Haplustolls, Udifluvents, Eutrudepts, Dystrudepts, Hapludolls.

En el resumen anterior se aprecia que la mayoría de los suelos de la región andina corresponden a los órdenes **Inceptisol** y **Entisol** y, además, que predominan los suelos con baja saturación de bases. Solamente en aquellos climas más secos se presentan suelos de los órdenes **Alfisol** y **Mollisol**, con mejores condiciones de saturación. En las áreas que presentan influencia de ceniza volcánica son dominantes los suelos del orden **Andisol**, los cuales también son desaturados (Jaramillo, 1995; Malagón et al, 1991). El régimen de humedad del suelo que tiene mayor cobertura areal es el údico.

En las claves taxonómicas anteriores a 1998 no se encuentra definido el orden **Gelisol**, por lo cual, en los estudios consultados no aparece ningún suelo clasificado en dicho orden. Sin embargo, en las zonas más altas de las cordilleras, alrededor del piso nival, pueden presentarse suelos pertenecientes a ese orden en cualesquiera de sus subórdenes: Histels, Turbels u Orthels, con una amplia gama de posibilidades de grandes grupos dentro de ellos: Folistels?, Glacistels?, Fibrilstels?, Histoturbels?, Aquiturbels?, Anhyturbels?, Umbriturbels?, Psammoturbels?, Haploturbels?, Historthels?, Aquorthels?, Anhyorthels?, Umbrorthels?, Psammorthels? o Haplorthels?; éstas posibilidades deberán ser resueltas en un futuro próximo.

Según IGAC (1988), la mayor parte de los suelos de la zona andina colombiana presentan pH ácido y contenido bajo a medio de materia orgánica. En buena parte de las cordilleras predomina el cuarzo en la fracción arena, seguido por el feldespato, los anfíboles y las micas; donde hay recubrimientos de ceniza volcánica también se presenta vidrio volcánico en esta fracción.

Según IGAC (1988), prácticamente en toda la cordillera central la fracción arcilla está dominada por alofano y caolinita, mientras que en el resto de la región el mineral dominante en la fracción arcilla es la caolinita, acompañada de cuarzo y/o gibrita.

De lo que se ha expuesto en los párrafos anteriores puede decirse, en términos generales, que los suelos de esta región natural también son pobres, químicamente, desde el punto de vista de la nutrición vegetal, excepto algunos sectores de los altiplanos cundiboyacense, de Nariño y del oriente antioqueño.

1.3. ORINOQUIA

Esta Región comprende los territorios que se encuentran entre las estribaciones de la cordillera oriental y los límites con Venezuela y corresponde a lo que se ha llamado Llanos Orientales de Colombia. Es, según Botero et al (1997), una planicie de origen sedimentario que acumuló los sedimentos provenientes de la erosión producida en la región andina, que se encuentra cubierta por sabanas y por bosques de galería y en donde el clima es cálido semihúmedo, al noreste, hasta cálido perhúmedo en las áreas de contacto con la cordillera oriental.

Según información recopilada por Malagón et al (1995), en la región predominan ampliamente los sedimentos aluviales y los eólicos como material parental de los suelos, aunque también hay áreas considerables donde se encuentran expuestas rocas metamórficas como cuarcita, neis, anfíbolita y esquisto y rocas ígneas como granito y sienita. Botero et al (1997) incluyen en esta región un área colinada estructural de las estribaciones de la cordillera oriental formada por rocas sedimentarias (arenisca, conglomerado, lutitas y calizas).

En el extremo nororiental de la zona se presenta un régimen de humedad ústico y en las principales llanuras aluviales el régimen es ácuico; en el resto de la región, el régimen de humedad del suelo es údico; el régimen de temperatura es isohipertérmico. De los trabajos realizados por Botero et al (1997) se resume el contenido pedológico de esta región natural colombiana:

- **Suelos de las colinas en rocas sedimentarias bajas:** Udorthents, Paleudults, Dystrudepts, Endoaquents, Ustothents, Paleustults, Kandiudults, Hapludox, Haploperox.
- **Suelos de la llanura aluvial de piedemonte:** Dystrudepts, Paleudults, Kandiudults, Epiaquepts?, Endoaquepts?, Ustorthents, Fluvaquents, Udorthents, Hapludox?.
- **Suelos de la llanura eólica:** Quartzipsamments, Epiaquepts?, Endoaquepts?, Dystrudepts, Umbraquults.
- **Suelos de la llanura de desborde con influencia eólica:** Dystrudept, Epiaquepts?, Endoaquepts?, Endoaquults, Quartzipsamments.
- **Suelos de las altillanuras:** Kandiustults, Haplustox, Dystrudepts, Udipsamments?, Paleudults, Endoaquods, Quartzipsamments, Epiaquepts?, Endoaquepts?.
- **Suelos del escudo Guayanés:** Kandiudults, Paleudults, Quartzipsamments, Hapludox, Alaquods, Psammaquents, Kandiudox.
- **Llanuras aluviales de ríos andinenses:** Dystrudepts, Fluvaquents, Epiaquepts?, Endoaquepts?, Endoaquents, Udorthents, Kandiustults.
- **Llanuras aluviales de ríos orinoquenses:** Epiaquepts?, Endoaquepts?, Fluvaquents, Eutrudepts, Udorthents, Udifluvents?, Udipsamments?, Dystrudepts, Paleudults.
- **Llanuras aluviales de ríos amazonenses:** Plinthaquults, Psammaquents, Dystrudepts, Alaquods, Quartzipsamments.

Del resumen anterior se destaca el amplio dominio que tienen en esta región los suelos de los órdenes **Ultisol** y **Oxisol**. Según IGAC (1988), también en estos suelos, como en los de la

amazonia, predominan el cuarzo en la fracción arena y la caolinita, con o sin gibsita, en la fracción arcilla. Además, aquí también todos los suelos son ácidos y presentan bajos contenidos de materia orgánica. Las consideraciones anteriores llevan a concluir que en esta región los suelos tienen muy baja calidad nutricional para las plantas.

1.4. LLANURA DEL CARIBE

Esta región comprende las planicies fluviales, fluvio – deltaicas, fluvio – lacustres, marinas y eólicas, así como una amplia zona colinada formada sobre rocas sedimentarias, principalmente arenisca, arcillolita, conglomerado y caliza (Malagón et al, 1995). Se ubica entre las estribaciones de las cordilleras central y occidental y el mar Caribe, en el norte del país.

Toda la región se ubica en el piso térmico cálido (régimen isohipertérmico) y presenta, según Claro (1997), las siguientes condiciones climáticas:

- Temperatura media anual de 27.6°C, con variaciones entre 25 y 31°C.
- La humedad relativa varía entre 75 y 86%.
- La precipitación aumenta desde la costa hacia el interior; se presenta un promedio cercano a los 1000 mm/año en la costa y se llega a casi 3000 mm/año en las estribaciones de las cordilleras. Entre abril y noviembre cae aproximadamente el 93% de la precipitación total. La zona más seca se ubica en el litoral entre las ciudades de Santa Marta y Cartagena y tiene una precipitación promedia anual ligeramente superior a los 500 mm.
- La evapotranspiración potencial aumenta del noroccidente hacia el nororiente con valores comprendidos entre 1300 y 2100 mm/año.

Según Malagón y Santana (1997) los suelos dominantes en esta región son:

- **Suelos de las colinas**
 - *En clima cálido húmedo y muy húmedo*: Dystrudepts, Udorthents, Hapludolls, Eutrudepts.
 - *En clima seco y muy seco*: Ustorthents, Calciustepts?, Haplustepts?, Haplusterts, Haplustolls, Calciusterts.
- **Suelos de las llanuras aluviales de piedemonte**
 - *En clima húmedo*: Eutrudepts, Hapludolls, Udorthents, Dystrudepts.
 - *En clima seco*: Calciustepts?, Haplustepts?, Haplusterts, Ustifluvents, Natrustalfs, Haplustalfs, Haplustolls.
- **Suelos de los valles aluviales**
 - *En clima seco*: Calciustepts?, Haplustepts?, Haplusterts, Epiaquepts?, Endoaquents?.
 - *En clima húmedo*: Eutrudepts, Epiaquepts?, Endoaquents?.
- **Suelos de las planicies fluvial y fluvio – lacustre, en clima húmedo**: Fluvaquents, Epiaquepts?, Endoaquepts?, Eutrudepts, Udifluvents?.
- **Suelos de la planicie fluvio – lacustre en clima seco**: Fluvaquents, Epiaquepts?, Endoaquents?, Ustifluvents, Haplusterts, Calciustepts?, Haplustepts?, Haplustolls.
- **Suelos de la planicie marina**
 - *En clima húmedo*: Udipsammets?, Psammaquents, Epiaquepts?, Endoaquepts?, Halaquepts.
 - *En clima seco*: Ustipsammets, Fluvaquents, Natrustalfs, Natrargids.

□ **Suelos de la planicie eólica seca:** Ustipsamments, Torripsamments.

De acuerdo con el recuento hecho, los suelos de esta región se ubican predominantemente en los órdenes **Inceptisol** y **Entisol**; también son comunes los suelos de los órdenes **Alfisol**, **Mollisol** y **Vertisol**. Debido a que en esta zona predominan las condiciones de clima seco (régimen de humedad ústico), los suelos se presentan con alta saturación de bases, a veces excesiva (suelos salinos, calcáreos y sódicos) y pH cercano a la neutralidad o ligeramente alcalino. Según Malagón y Santana (1997) los suelos poseen un contenido bajo a muy bajo de materia orgánica, alto contenido de potasio y tienen su fracción arcilla dominada por arcillas esmectíticas. Según IGAC (1988) en la fracción arena predominan el cuarzo y los feldespatos. Las características enumeradas anteriormente dan razón de los altos niveles de fertilidad que poseen los suelos de esta región.

1.5. ANDÉN PACÍFICO

Es el área ubicada entre las estribaciones de la cordillera occidental, en su vertiente occidental, y el océano Pacífico. Está localizada en el piso cálido y es la zona más húmeda del país: según IGAC (1988) el régimen de humedad dominante es el údico pero también se presentan áreas apreciables con regímenes perúdico y ácuico. El régimen de temperatura es isohipertérmico.

Según Malagón et al (1995) los materiales parentales de los suelos están dominados por las rocas sedimentarias (areniscas, conglomerados, shale, chert, caliza) y los sedimentos aluviales, marinos y lacustres, aunque también se encuentran rocas ígneas como gabros y peridotitas.

Los suelos de esta región, según Cortés (1982), son:

- **Suelos de colinas y serranías:** Dystrudepts, Udorthents?, Kandiudults?, Kanhapludults?, Hapludults?, Epiaquepts?, Endoaquepts?, Eutrudepts, Hapludolls.
- **Suelos de las planicies aluviales de piedemonte:** Eutrudepts, Dystruderts?, Hapluderts?, Epiaquepts?, Endoaquents?, Dystrudepts, Epiaquepts?, Endoaquepts?.
- **Suelos de las planicies aluviales**
 - *Bien drenados:* Udifluvents?, Dystrudepts, Eutrudepts.
 - *Mal drenados:* Epiaquepts?, Endoaquents?, Epiaquepts?, Endoaquepts?, Fluvaquents.
- **Suelos de la planicie marina:** Udipsamments?, Epiaquepts?, Endoaquents?, Fluvaquents, Sulfaquents, Haplofibrists, Haplohemists.

Predominan en esta región los suelos de los órdenes **Inceptisol** y **Entisol**. De los estudios de IGAC (1988) se establece que el mineral dominante en la fracción arena de estos suelos es el cuarzo y en la fracción arcilla la caolinita; además, presentan bajos contenidos de materia orgánica y todos tienen pH muy ácido. Lo anterior implica que en esta región los suelos también son de baja calidad para las labores agropecuarias.

1.6. ALTO Y MEDIO MAGDALENA

En esta región se incluyen las formas aluviales del río Magdalena y los piedemontes formados por los abanicos ligados a las vertientes oriental y occidental, respectivamente, de las cordilleras

central y oriental. Cortés (1982) ubica el valle del alto Magdalena entre los municipios de El Hobo, al sur de Neiva, en el Huila y cercanías a La Dorada, en el departamento de Caldas, y el valle medio desde La Dorada hasta Bodega Central en el sur del departamento de Bolívar.

Toda la zona se encuentra en el piso cálido y según Castro (1996), en el alto Magdalena la condición de humedad dominante es la subhúmeda, con precipitaciones promedias anuales entre 1100 y 1300 mm, con evapotranspiración entre 1400 y 2000 mm/año. Cortés (1982) define una condición de humedad entre húmeda y muy húmeda, con precipitaciones entre 2000 y aproximadamente 3500 mm/año para el Magdalena medio.

Con respecto a los materiales parentales de los suelos, según Malagón et al (1995) predominan los sedimentos aluviales y lacustres, seguidos por las formaciones rocosas sedimentarias de areniscas, conglomerados y calizas. Según el IGAC (1988) el régimen de humedad de los suelos va de ústico, en el sur, hasta ácuico en el norte, pasando por una zona de transición údica en la parte media de la región. El régimen de temperatura es isohipertérmico.

Según Castro (1996) y Cortés (1982) los suelos dominantes en esta región son:

- **Suelos del valle aluvial del río Magdalena**
 - *Bien drenados en clima subhúmedo*: Haplustalfs, Dystrustepts?, Haplustepts?, Haplustolls, Ustifluvents, Ustipsammens.
 - *Bien drenados en clima húmedo y muy húmedo*: Eutrudepts, Hapludolls, Dystruderts?, Hapluderts?, Dystrudepts, Udifluvents?, Udipsammens?, Hapludalfs?, Hapludults?, Udorthents?, Haplorthods?.
 - *Mal drenados*: Fluvaquents, Epiaquepts?, Endoaquepts?.
- **Suelos de las planicies aluviales de piedemonte**: Durustalfs, Paleustalfs, Dystrustepts?, Haplustepts?, Ustorthents, Haplustalfs, Haplustolls, Eutrudepts.
- **Suelos de colinas**: Dystrudepts, Udorthents?, Eutrudepts, Haplustepts?, Ustorthents.

En esta región los suelos se agrupan principalmente en los órdenes **Inceptisol** y **Entisol**, aunque hay áreas importantes de **Alfisoles** y **Mollisoles** en el alto Magdalena y de **Alfisoles** y **Ultisoles** en el Magdalena medio.

Los cambios de humedad controlan fuertemente el tipo de suelo que se genera en esta zona. En las áreas más húmedas (Magdalena medio), los suelos son de menor calidad agronómica puesto que, según IGAC (1988), en ellos predomina el cuarzo en la fracción arena y la caolinita y algunos intergrados en la fracción arcilla y tienen pH muy ácido, mientras que en el alto Magdalena (más seco), en la fracción arena predominan cuarzo y feldespato, en la fracción arcilla predominan las esmectitas y los pHs son moderadamente ácidos a neutros, generándose suelos de mejor calidad en esta subregión.

1.7. ALTA Y MEDIA GUAJIRA

Esta región está formada por una península ubicada en el extremo norte del país. Es la zona más seca de Colombia presentando una condición de humedad semiárida y un régimen de humedad edáfico arídico, aunque hay pequeñas áreas con régimen ústico. La condición de sequía es tan

intensa que según Córdoba et al (1978) en uno de cada dos años la estación biológicamente seca se prolonga por 8 meses o más tiempo.

Según Claro (1997) la humedad va aumentando hacia el sur de la península, siendo la precipitación máxima de casi 1000 mm/año en el sur y de menos de 500 mm/año en el litoral norte. La temperatura promedio anual de la región se encuentra entre 26 y 29°C.

Malagón et al (1995) resaltan los sedimentos aluviales, marinos y eólicos como los principales materiales parentales de los suelos, seguidos por las rocas sedimentarias (caliza, arenisca, conglomerado, lutita), las metamórficas (esquisto, filita, neis, anfibolita) y las ígneas (granodiorita, diorita, riocacita).

De los trabajos de Malagón y Santana (1997) y de Córdoba et al (1978) se resumen los aspectos edáficos como sigue:

- **Suelos de serranías, cerros y colinas:** Petrocambids?, Haplocambids?, Torriorthents, Ustorthents, Haplustolls, Haplustepts?, Calciustepts?, Rhodustalfs.
- **Suelos de glacis:** Petrocambids?, Haplocambids?, Torriorthents, Natrargids, Haplargids, Haplocalcids?.
- **Suelos de la planicie marina:** Petrocambids?, Haplocambids?, Haplargids, Natrargids, Haplocalcids?, Natrustalfs.
- **Suelos de planicies aluviales de piedemonte:** Haplargids, Petrocambids?, Haplocambids?, Torriorthents.
- **Suelos de llanuras aluviales:** Haplustepts?, Calciustepts?, Torrifluvents.
- **Suelos de planicie eólica:** Torripsamments, Ustipsamments.

Como se observa en el resumen anterior, en esta región predominan ampliamente los suelos del orden **Aridisol**, con bastantes grandes grupos de suelos calcáreos y sódicos, acompañados frecuentemente por suelos del orden **Entisol**.

Las características secas de esta región limitan el lavado de bases y de sales del suelo, favoreciendo su acumulación en el mismo. Además, dichas condiciones tampoco permiten una evolución importante en el suelo que garantice un medio físico adecuado para el desarrollo de las plantas, condiciones que hacen que el recurso suelo en esta zona se pueda considerar de muy baja calidad, a pesar de tener altas cantidades de elementos nutricionales, siendo su principal limitante para el uso el déficit de agua en la región; otra sería la situación si se contara con un suministro adecuado de este insumo de la producción agropecuaria.

El solo hecho de que los nutrientes estén presentes no es garantía suficiente para una buena nutrición vegetal. Los elementos nutritivos deben estar bajo ciertas condiciones químicas y en determinadas proporciones, con respecto al resto de nutrientes, para que puedan ser aprovechados por la planta y este equilibrio no se da en los suelos de esta región.

Según IGAC (1988) en la fracción arena predominan el cuarzo y los feldespatos y en la fracción arcilla las esmectitas. En esta región se encuentran los suelos con los menores contenidos de materia orgánica del país y, prácticamente en todos, la reacción es alcalina ($\text{pH}>7.5$).

1.8. VALLE DEL RÍO CAUCA

Esta región comprende el valle aluvial del río Cauca y las llanuras de piedemonte aledañas a él, así como algunas áreas de colinas desarrolladas en rocas sedimentarias que bordean los grandes paisajes anteriores, sobretodo en el norte. Estas áreas están ubicadas en los departamentos del Valle del Cauca y Cauca, entre los municipios de Santander de Quilichao, al sur y Cartago, al norte.

Según Malagón et al (1995) los materiales parentales que predominan en esta región corresponden a sedimentos aluviales y algunos lacustres. Las colinas que se incluyen en ella se han desarrollado sobre rocas sedimentarias como arcillolita, arenisca, conglomerado, caliza y diatomita. Cortés y García (1981) describen el clima regional como cálido, con variaciones importantes en humedad: húmedo al sur, pasando a seco hacia el norte. El régimen de temperatura de los suelos es isohipertérmico y en cuanto a régimen de humedad se encuentran el ústico, údico y ácuico.

Con base en trabajos de Quintero y Castilla (1992), Cortés y García (1981), IGAC (1980) y Jaramillo et al (1979) se presenta el siguiente resumen de los suelos de esta región:

- **Suelos del valle aluvial**
 - *Bien drenados*: Calciustepts?, Dystrustepts?, Haplustepts?, Eutrudepts, Dystrudepts?, Ustifluvents, Udifluvents?, Udipsammets?.
 - *Mal drenados*: Epiaquepts?, Endoaquepts?, Fluvaquents, Epiaquents?, Endoaquents?, Haplofibrists?.
- **Suelos de la planicie fluvio – lacustre**: Dystrusterts? Haplusterts?, Dystruderts? Hapluderts?.
- **Suelos de llanura aluvial de piedemonte**
 - *En clima seco*: Haplustolls, Calciustepts?, Dystrustepts?, Haplustepts?, Ustorthents, Dystrusterts? Haplusterts?, Haplustalfs, Natrustalfs, Durustalfs.
 - *En clima húmedo*: Hapludolls, Argiudolls, Dystrudepts, Eutrudepts, Udoorthents?, Dystruderts? Hapluderts?, Epiqualfs?, Endoaqualfs?, Hapludalfs?, Hapludults?.
- **Suelos de Colinas**: Haplustalfs, Natrustalfs, Durustalfs, Ustorthents.

Según cálculos presentados por Quintero y Castilla (1992), en esta región predominan los suelos del orden **Mollisol** (36% del área), seguidos por los órdenes **Inceptisol** (26%), **Vertisol** (21%), **Entisol** (10%) y **Alfisol** (5%).

Según IGAC (1988) en la región predominan los suelos con pH en el rango neutro, con contenido medio de materia orgánica, con una fracción de arena compuesta por feldespato, anfíboles y cuarzo y de arcilla por esmectitas y caolinita. Aunque se presentan áreas importantes de suelos afectados por sales y por sodio, los suelos de esta región son, en su mayoría, de alta calidad para las actividades agropecuarias.

1.9. ISLAS DEL CARIBE

Incluye las islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, ubicadas en el mar Caribe colombiano. Según Malagón et al (1995) en la isla de San Andrés predominan las calizas y los

sedimentos aluviales y marinos coralinos como materiales parentales de los suelos en tanto que, en las otras dos islas, dominan las rocas ígneas basalto y andesita sobre las sedimentarias caliza y conglomerado y sobre los sedimentos aluviales y marinos coralinos.

Todas las islas se encuentran en el piso cálido, con temperaturas promedias anuales superiores a los 25 °C, siendo un poco más fresco el clima de Providencia. La precipitación promedia anual se acerca a los 1800 mm, según Cortés (1982). El régimen de temperatura edáfica es isohipertérmico y el régimen de humedad dominante es ústico, aunque se encuentran áreas con régimen údico o ácuico.

Según Cortés (1982) los suelos dominantes en las islas son:

- **Suelos de colinas**
 - En San Andrés: Eutrudepts, Calciustolls, Haprendolls
 - En Providencia y Santa Catalina: Calciustepts?, Haplustepts?, Dystrustepts.
- **Suelos en coluvios**
 - En San Andrés: Eutrudepts, Fluvaquents.
 - En Providencia y Santa Catalina: Calciustepts?, Haplustepts?, Calciusterts?, Haplusterts?, Udorthents?.
- **Suelos de formas litorales**
 - En San Andrés: Fluvaquents, Haplofibrists?.
 - En Providencia y Santa Catalina: Fluvaquents, Ustipsamments.
- **Suelos en terrazas coralinas de San Andrés**: Eutrudepts, Udorthents?, Udisamments?, Ustipsamments.

En las islas del Caribe colombiano predominan los suelos del orden **Inceptisol**, compartiendo áreas importantes con suelos del orden **Entisol**. De acuerdo con IGAC (1988), en San Andrés la fracción arena de los suelos está compuesta de cuarzo, calcita y feldespato principalmente, en tanto que en las otras dos islas predominan en dicha fracción gruesa feldespatos, micas y algunos otros minerales alterados. En la fracción arcilla de los suelos de todas las islas predominan la montmorillonita y la caolinita. El pH de los suelos está entre ligeramente ácido y neutro y el contenido de materia orgánica es bajo. El nivel de fertilidad es alto.

2. APTITUD DE USO AGROPECUARIO DE LOS SUELOS COLOMBIANOS

Cuando se quieren establecer las posibilidades de uso que tienen los suelos de una determinada zona, realmente hay que hablar en términos de la aptitud que tienen las **unidades de tierra** que componen dicha zona (ver numeral 1.4 del Capítulo 22), ya que el suelo es sólo uno de los elementos que condicionan la utilización específica que se haga de una determinada área de terreno.

En términos generales se podría definir una **unidad de tierra** como una *porción de la superficie de la corteza terrestre que tiene cierto grado de homogeneidad topográfica y climática, así como en los suelos que la componen o, por lo menos, en las características que más se relacionan con las posibilidades y con los limitantes de uso que éstos tienen*.

Como se aprecia en la definición anterior, para definir el uso más adecuado de un determinado terreno no basta sólo con conocer el suelo que predomina en él sino que, también, hay que evaluar el entorno en que ese suelo se encuentra y la interacción que ejerce con dicho entorno.

La definición que se ha presentado pone de manifiesto, además, que en los estudios de suelos realmente se definen unidades de tierra en lugar de definir, estrictamente, unidades de suelos. También, entonces, cuando se hace la interpretación de un levantamiento de suelos, lo que se hace es una clasificación de tierras.

La **clasificación de tierras** consiste en evaluar y ordenar de forma preferencial, las posibilidades de uso que presentan las unidades cartográficas de un estudio de suelos, con el fin de establecer cual es el uso más adecuado que se les debe dar, de manera que conserven o mejoren sus potencialidades productivas. Como se ve, esa clasificación es jerárquica por lo que en cada unidad se establecen las posibilidades de uso, general o específico dependiendo del tipo de estudio que se haya realizado, con diferentes alternativas, ordenándolas de mejor a peor aptitud, es decir, implícitamente, de menor a mayor riesgo de deterioro del suelo.

Con el proceso anterior se llega a agrupar unidades cartográficas de suelos y a definir unidades de tierra (ver Figura 24.2) que presentan limitantes de uso similares y que, por tanto, deben tener un manejo específico acorde con sus posibilidades y deben responder de forma muy parecida, en toda su extensión, a dichas prácticas de manejo.

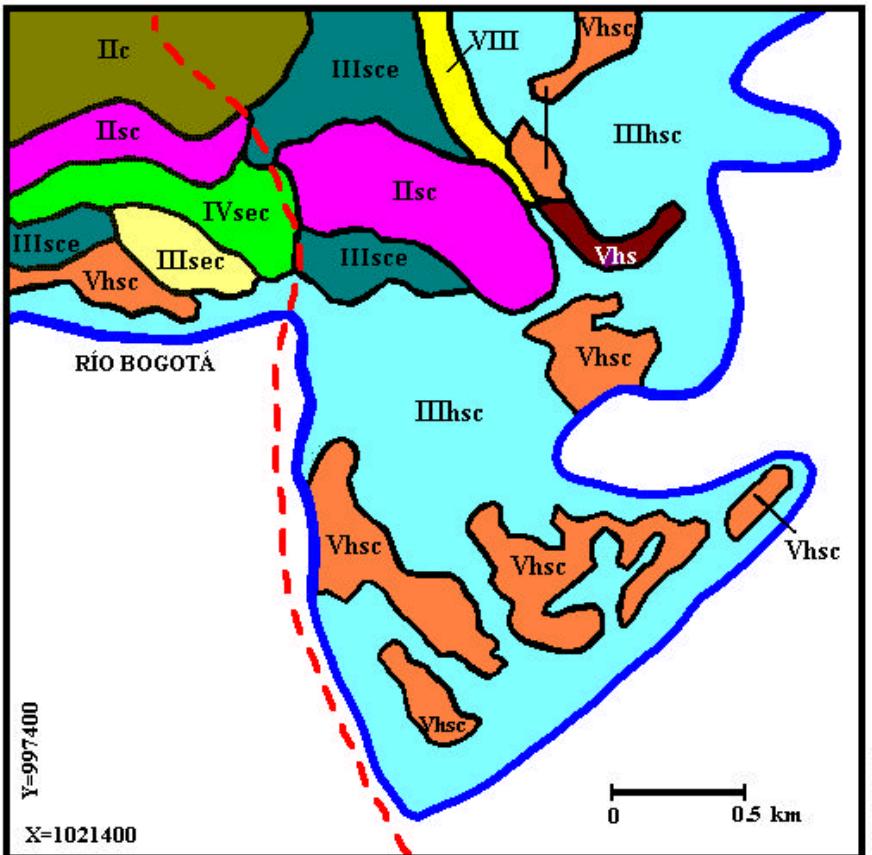
En Colombia se utiliza el sistema propuesto por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), conocido como el “Sistema de las 8 clases agrológicas” para la clasificación de tierras, como ya se expuso en el Capítulo 22. A este sistema se le han hecho algunas adaptaciones para las condiciones del país y éstas y ejemplos de sus aplicaciones pueden consultarse en Mosquera (1986), IGAC (1978) y De Rojas (1975).

De acuerdo con los resultados expuestos en la Tabla 22.2 del Capítulo 22, la aptitud dominante de los suelos de Colombia es forestal. El IGAC (1988) estimó en 78 301 484 ha (68.5% del área total del país) el área con vocación netamente forestal, la cual distribuyó en:

- Bosque protector - productor con posibilidades de uso agropecuario: 11 208 275 ha.
- Bosque protector - productor sin posibilidades de uso agropecuario: 42 518 876 ha.
- Áreas de protección y/o de reforestación, también sin posibilidades de uso agropecuario: 24 574 049 ha.

Malagón (1986) recopila información del IGAC relacionada con la aptitud de las tierras en Colombia de donde se extrae que el área con vocación ganadera es de 19 251 400 ha y que el área con vocación agrícola es de 14 362 867 ha, de las cuales 3 499 000 ha se deben explotar contando con riego suplementario. Las regiones naturales que mayor cantidad de área poseen con condiciones adecuadas para el uso agropecuario intensivo son el valle del río Cauca, la región Caribe y el alto y medio Magdalena.

X=1023000



CONVENCIONES

- Limite de suelos
- Río
- Carretera

LEYENDA		
CLASE	SUBCLASE	SÍMBOLO DE LAS UNIDADES CARTOGRÁFICAS DEL MAPA DE SUELOS INCLUIDAS*
II	c	BCa
II	sc	ZPa, SJb
III	hsc	AYa, RBa, NGa, (AYb-PVc), (ALb-PVa)
III	sce	ZPc, SJc
III	sec	DEb
IV	sec	ZPd
V	hs	MLa
V	hsc	RBb, LBa
VIII	-	PN

* Ver Figura 21.2, Páginas 525-526.

FIGURA 24.2. Transformación de un mapa de suelos en un mapa de aptitud agrológica de tierras. El mapa de suelos correspondiente y su leyenda se encuentran en la Figura 21.2, Páginas 525-526. (La leyenda simplificada para la presentación, el mapa elaborado por el autor de este texto, con base en la información de IGAC, 1977).

3. LIMITANTES PARA EL USO AGROPECUARIO DE LOS SUELOS COLOMBIANOS

Con la información que se ha suministrado en los apartes anteriores, se pueden establecer, a grandes rasgos, los principales limitantes que tienen las diferentes regiones naturales del país para que su recurso tierra sea utilizado intensivamente en actividades comerciales agropecuarias.

Un limitante que es común a la mayor parte del territorio nacional es la baja fertilidad que presentan sus suelos (ver Figura 24.3), la cual se manifiesta en condiciones de alta acidez, con altos contenidos de Al intercambiable; bajo contenido de elementos nutricionales para las plantas como P, K, Ca y Mg; baja capacidad de suministrar nutrientes como N y S debido a la presencia de bajos contenidos y/o a la mala calidad de la materia orgánica que se ha acumulado en ellos; presencia de altos contenidos de materiales coloidales inorgánicos de baja actividad en la fracción arcilla. Cabe aclarar que no en todos los suelos se presentan, necesariamente, todas las condiciones negativas mencionadas para calificarlos como de baja fertilidad.

De acuerdo con el IGAC (1988), los rangos de valores de pH de los suelos del país se presentan en las áreas que se dan en la Tabla 24.2. En esta tabla se aprecia que en más del 80% del territorio nacional los suelos tienen valores de pH que favorecen la presencia de cantidades altas de Al intercambiable, tóxico para la mayoría de las plantas de uso comercial.

TABLA 24.2. Valores de pH de los suelos colombianos, de acuerdo con IGAC (1988).

RANGO DE pH	% DEL ÁREA DEL PAÍS	REGIÓN DONDE PREDOMINA
<5.0	57.6	Amazonia, Orinoquia, Pacífico, Magdalena medio, Andina
5.1 – 5.5	27.5	Andina, Amazonia, Orinoquia
5.6 – 6.5	9.68	Caribe, Alto Magdalena, Valle del Cauca, Islas del Caribe
6.6 – 7.5	3.78	Caribe, Valle del Cauca
>7.5	0.86	Guajira, Caribe

Aparte de lo anterior y con base en el mismo estudio del IGAC (1988), en la Amazonía, la Orinoquia, el Andén Pacífico, el Valle del Magdalena y las islas del Caribe predominan los contenidos bajos de materia orgánica (entre 1 y 1.5% de carbono orgánico), en la región Caribe el contenido de carbono orgánico está entre 0.5 y 1% y en la Guajira es menor de 0.5%; el comportamiento de esta propiedad en la región andina es muy variable debido a la gran cantidad de condiciones ambientales que se presentan en ella.

En los suelos del 98% del país se presenta deficiencia de fósforo para las plantas (IGAC, 1988) y esta situación se agrava si se tiene en cuenta que el 11.6% de los suelos de Colombia son Andisoles (Malagón et al, 1991), es decir, tienen propiedades ándicas que dificultan el manejo de este elemento esencial debido a la alta capacidad de fijación de fosfatos inherente a dichos suelos; Jaramillo (2000) encontró valores de hasta 100% de capacidad de fijación de fosfatos en Andisoles de San Félix, departamento de Caldas.

En las regiones Guajira, Caribe y Valle del río Cauca se encuentran amplias áreas con suelos afectados por sales y/o por sodio, características que imponen limitaciones fuertes para su uso agropecuario intensivo. Pulido (2000) estudió la distribución de diferentes formas de salinidad en los suelos de las regiones Caribe y Guajira y encontró que el 28.3% del área de ellas (3 506 033 ha) estaba afectada por algún tipo de salinidad.

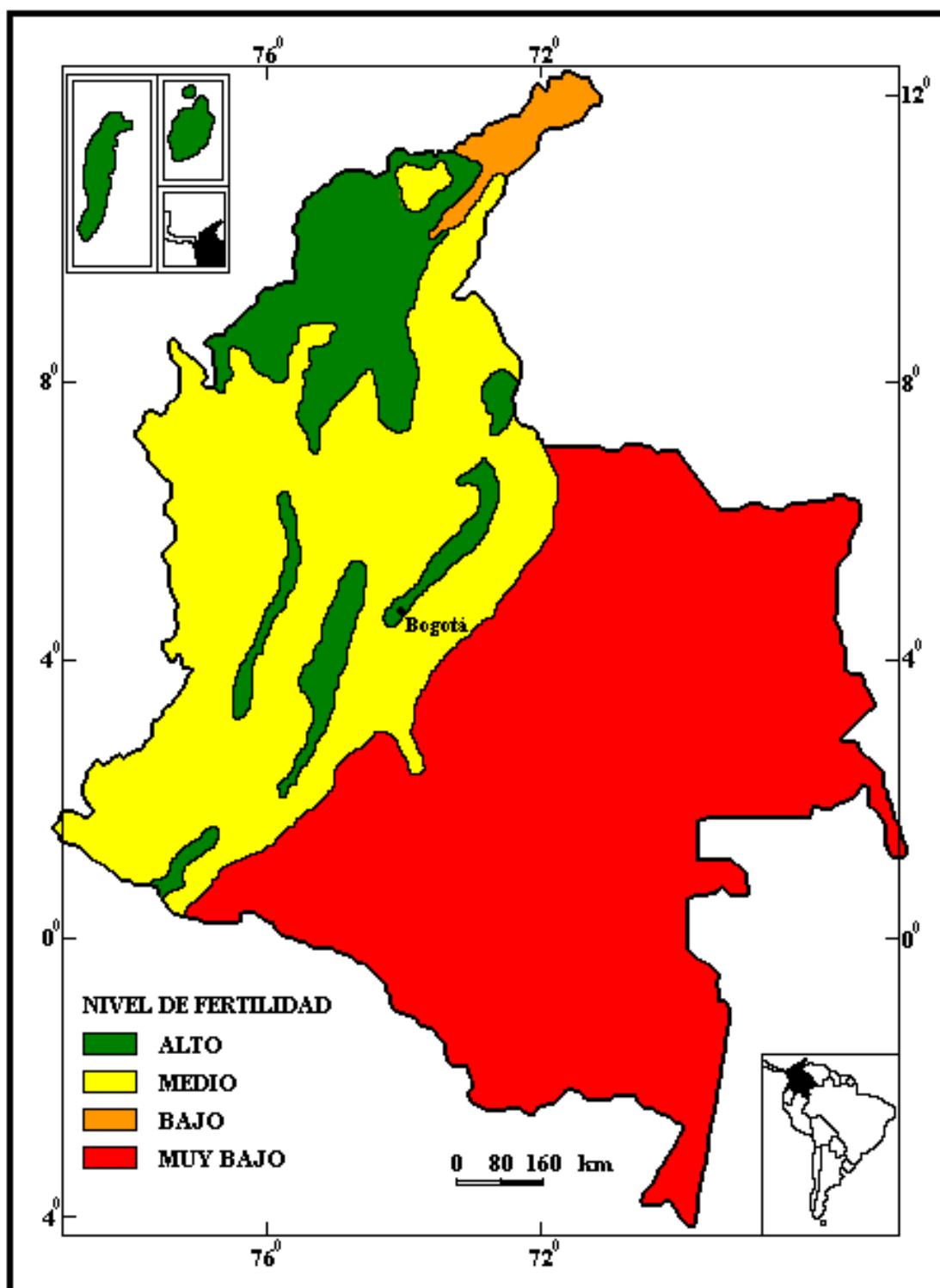


FIGURA 24.3. Mapa de la fertilidad natural de los suelos de Colombia. (Adaptado de Jaramillo et al, 1994).

En las regiones Caribe, Valle del río Cauca y Alto Magdalena son frecuentes también las limitaciones de carácter físico para el uso del suelo, relacionadas con la presencia de propiedades vírticas, de horizontes endurecidos, de deterioro estructural y de alta susceptibilidad a la erosión.

A manera de síntesis, en la Tabla 24.3 se exponen los limitantes de uso que afectan mayor cantidad de suelos en las diferentes regiones naturales del país.

TABLA 24.3. Principales limitantes para el uso intensivo agropecuario de los suelos en las diferentes regiones naturales de Colombia.

REGIÓN o SUB-REGIÓN	PRINCIPALES LIMITANTES
Amazonia	Clima húmedo, baja fertilidad, alta susceptibilidad a la erosión, arcillas LAC
Andina	Pendientes fuertes, baja fertilidad, alta susceptibilidad a la erosión, propiedades ándicas, erosión actual moderada a severa
Orinoquia	Clima húmedo, baja fertilidad, alta susceptibilidad a la erosión, arcillas LAC, mal drenaje, erosión actual severa
Caribe	Clima seco, salinidad, alta susceptibilidad a la erosión, propiedades vírticas, horizontes endurecidos, erosión actual moderada a severa
Andén Pacífico	Clima muy húmedo, baja fertilidad, alta susceptibilidad a la erosión, arcillas LAC, mal drenaje
Alto Magdalena	Clima seco, salinidad, alta susceptibilidad a la erosión, propiedades vírticas, horizontes endurecidos, erosión actual severa
Magdalena Medio	Clima húmedo, baja fertilidad, alta susceptibilidad a la erosión, arcillas LAC, mal drenaje
Alta y Media Guajira	Clima muy seco, salinidad, alta susceptibilidad a la erosión, horizontes endurecidos, erosión actual muy severa
Valle del Cauca Sur	Clima húmedo, baja fertilidad, alta susceptibilidad a la erosión, arcillas LAC, mal drenaje
Valle del Cauca Norte	Clima seco, salinidad, alta susceptibilidad a la erosión, propiedades vírticas, horizontes endurecidos, erosión actual severa
Islas del caribe	Clima seco, salinidad, alta susceptibilidad a la erosión, horizontes endurecidos, erosión actual moderada a severa

RECORDAR

- **Colombia se divide en nueve regiones naturales; la más extensa es la Amazonia, la de relieve más variable la Andina, la más húmeda el Andén Pacífico y la más seca la Alta y Media Guajira.**
- **El orden de suelos que más abunda en el país es el Inceptisol, seguido por el Entisol.**
- **La aptitud de la mayoría de los suelos del país es forestal.**
- **La mayor parte de los suelos de Colombia son de baja fertilidad, ácidos, susceptibles a la erosión, con bajo contenido de materia orgánica y con coloides inorgánicos de baja actividad. Sólo en el Valle del río Cauca, la región Caribe, algunos sectores de la Media Guajira y del altiplano cundiboyacense y el Alto Magdalena se presentan suelos químicamente fértiles, pero con limitaciones físicas y climáticas para su uso agropecuario.**

BIBLIOGRAFÍA

- BOTERO, P. J.; B. JIMÉNEZ; N. RODRÍGUEZ; J. M. HERRERA; J. V. RODRÍGUEZ; Y. MENDOZA y A. PINILLA. 1997. Estudio fisiográfico de la orinoquia – amazonia colombiana. Revista CIAF 15(1): 7-62.
- CASTRO, H. 1996. Bases técnicas para el conocimiento y manejo de los suelos del valle cálido del Alto Magdalena. CORPOICA. Regional 6. Produmedios. Santafé de Bogotá. 107 p.
- CLARO, F. 1997. Agroclimatología de la región del Caribe colombiano. Suelos Ecuatoriales 27: 7-14.
- CÓRDOBA, H. et al. 1978. Estudio general de suelos Alta y Media Guajira. Departamento de La Guajira. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá. 577 p.
- CORTÉS, A. 1982. Geografía de los suelos de Colombia. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá. 161 p.
- CORTÉS, A. 1980. Capacidad de uso de los suelos de la llanura del Caribe. IGAC. Bogotá. 33 p.
- CORTÉS, A. y A. GARCÍA. 1981. Los suelos del valle geográfico del río Cauca. IGAC. Bogotá. 39 p.
- CORTÉS, A.; M. A. CORTÉS y A. M. PALACINO. 1982. Los suelos de las cordilleras andinas y su aptitud de uso. IGAC. Bogotá. 48 p.
- DE ROJAS, P. E. 1975. Clasificación de las tierras por su capacidad de uso. IGAC. Bogotá. 21 p.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC). 1988. Suelos y bosques de Colombia. IGAC. Bogotá. 135 p.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC). 1980. Estudio semidetallado de suelos del valle geográfico del río Cauca. IGAC. Bogotá. 582 p.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC). 1978. Programa nacional de inventario y clasificación de tierras. Memoria explicativa. 2^a Ed. IGAC. Bogotá. 65 p.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC). 1977. Estudio general y detallado de suelos de los municipios de Cota, Funza, Mosquera y parte Madrid (departamento de Cundinamarca). IGAC. Bogotá. 513 p.
- JARAMILLO, D. F. 2000. Clasificación taxonómica de los suelos del altiplano de San Félix, departamento de Caldas. Rev. Fac. Nal. Agr. Med. 53(2): 1059-1076.
- JARAMILLO, D. F. 1995. Andisoles del oriente antioqueño: Caracterización química y fertilidad. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 35 p.
- JARAMILLO, D. F.; L. N. PARRA y L. H. GONZALEZ. 1994. El recurso suelo en Colombia: Distribución y Evaluación. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 88 p.
- JARAMILLO, D. F.; E. FERNÁNDEZ y C. LOMBARDO. 1979. Levantamiento semidetallado de suelos de la zona plana del Valle del Cauca entre Buga - Sonso. Centro Interamericano de Fotointerpretación (CIAF). Bogotá. 109 p.
- MALAGÓN, D. 1986. Levantamientos de suelos en Colombia: Importancia, realizaciones y proyectos. Suelos Ecuatoriales 16(1): 41-51.
- MALAGÓN, D. y L. M. SANTANA. 1997. Los suelos de la región del Caribe colombiano. Suelos Ecuatoriales 27: 15-26.

MALAGÓN, D.; C. PULIDO y R. LLINÁS. 1991. Génesis y taxonomía de los Andisoles colombianos. Investigaciones Vol. 3 Nº 1. IGAC. Santafé de Bogotá. 118 p.

MALAGÓN, D.; C. PULIDO; R. LLINÁS y C. CHAMORRO. 1995. Suelos de Colombia: Origen, evolución, clasificación, distribución y uso. IGAC. Bogotá. 632 p.

MOSQUERA, L. 1986. Clasificación de las tierras por su capacidad de uso. IGAC. Bogotá. 37 p.

PRORADAM. 1979. La Amazonia colombiana y sus recursos. Proyecto Radargramétrico del Amazonas. Bogotá. 590 p.

PULIDO, C. 2000. Distribución geográfica de sales solubles, sodio intercambiable y carbonato de calcio en la región del Caribe colombiano. Suelos Ecuatoriales 30(1): 44-49.

QUINTERO, R. y C. CASTILLA. 1992. Agrupación de los suelos del valle geográfico del río Cauca. Cenicaña. Cali. 19 p.

SOIL SURVEY STAFF. (SSS) 1999. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2^a. Ed. Agriculture Handbook Nº 436. Soil Survey Staff. Washington D. C. 869 p.

AUTOEVALUACIÓN

1. Enumerar las regiones naturales de Colombia. ¿Cuál es la más extensa?.
2. Determine los órdenes de suelos dominantes en cada una de las regiones naturales de Colombia.
3. ¿Cuál es la aptitud de uso de la mayoría de los suelos colombianos?.
4. En términos generales, ¿cómo puede calificarse la fertilidad de los suelos colombianos?.
5. ¿En cuáles regiones se encuentran los suelos de mejor fertilidad de Colombia?.
6. ¿Cuáles son los limitantes más importantes para el uso agropecuario intensivo de los suelos de las diferentes regiones naturales de Colombia?.
7. ¿En cuáles regiones naturales se encuentran los suelos con problemas de salinidad en Colombia?.

EVALUACIÓN

Relacionar los limitantes de uso agropecuario de los suelos de las regiones naturales de Colombia con los factores de formación que hay en cada una de ellas.

ÍNDICE ALFABÉTICO

- Abono 435
líquido 436
orgánico 418
semilíquido 436
sólido 436
Abono verde 283, 284, 441, 445, 446, 447
Abundancia de fragmentos de roca en el suelo 141
Abundancia de poros y raíces en el suelo 142
Abundancia y tamaño de los moteos 140
Acaulospora 402
Acetobacter 395, 396, 398, 399
Acidez 345, 358, 362, 464, 589
 activa 356
 del suelo 332, 569
 fuentes 354
 extractable 325, 326
 fuentes de acidez en el suelo 354
 intercambiable 321, 328, 356, 357, 360, 462
 Interpretación 359
 titulable o potencial 356
 total 356
Acidificación 88
Ácido 345
 carbónico 30
 conjugado 345
 nucleico 46
 soluble 355
 sulfúrico 355, 496
Ácidos de la materia orgánica 355
 fúlvidos 63, 421, 428
 contenido en abonos orgánicos 435
 himatomelánicos 63
 húmicos 63, 119, 421, 428
Ácidos de los coloides inorgánicos del suelo 354
Acondicionadores físicos de suelos 284, 463
 naturales 284, 285
 orgánicos 285
 sintéticos 284, 286, 287, 288
 Acetato de polivinilo (PVAc) 286
 Alcohol polivinílico (PVA) 286
 Emulsión asfáltica o bitumen 286, 288, 290
 Poliacrilamidas (PAM) 286, 287
Acreción 84
Acrisoles 516, 517
Actinomicetos 50, 406, 408
Acumulación de diferencias 491
Adensamiento 85, 461
Adiciones 83, 84
Adsorción 208, 319
 específica o selectiva 333
 de aniones 332, 334
 de cationes 334
Aeróbicos 47, 395, 406
Aflojamiento 85
Afloramientos rocosos 140
Agaricus 51, 401
Agentes modeladores del relieve 66
Aglomerado 22
Agregación de suelos 101, 175, 383
Agregados 95, 99, 284
 cuneiformes 103
 distribución de tamaños 103, 107, 278, 279, 280
 estables al agua 109
 extremos (AE) 110
 finos (AF) 110
Agricultura de precisión 482
Agrobacterium 50, 56
Agroquímicos 259, 387, 399, 407, 417
Agua aprovechable o disponible 212, 213, 216, 258, 281, 364, 500
Agua de hidratación 306
Agua en forma de vapor 223
Agua en forma líquida 223
Aireación 101, 108, 113, 120, 192, 195, 239, 258, 269, 270, 271, 276, 417
Albita 363
Álcali blanco 364
Álcali negro 315, 364
Alcalinidad 345, 526
 fuentes en el suelo 363
Alcalinización 86
Alfisoles 17, 18, 85, 86, 107, 131, 264, 265, 309, 331, 363, 370, 440, 505, 508, 514, 579, 582, 583, 585
Algas 48, 52, 393, 394
 verdes 52
Alisoles 516, 517
Alitización 87
Alofano 36, 38, 204, 312, 320, 322, 329, 330, 354, 579
Alta y media Guajira 501, 575, 576, 583
Altiplanura 356, 406
Altiplano cundiboyacense 358, 370, 462, 580
Altitud 13, 422, 423, 500
Alto Magdalena 583, 591
Alto y medio Magdalena 575, 582, 587
Aluminio intercambiable 356, 357
 contenido 17, 54, 331, 355, 357, 563
Aluminosilicatos 33
 no cristalinos 36, 311, 312, 314, 329
Amanita 51, 401
Amazonia 25, 26, 36, 87, 324, 358, 387, 388, 422, 423, 500, 523, 575, 577, 589

- Amebas 52
Amoeba 52
 Amonificación 408
 Amplitud del rango 554
Anabaena 50, 396, 398, 448
 Anabolismo 46
 Anaeróbicos 47, 395
 facultativos 47
 Análisis de varianza anidado 557, 558, 559
 Análisis de semivariografía o de semivarianza 560, 561, 563
 Análisis de varianza 567, 568
 Análisis exploratorio de datos 561
 Análisis fisiográfico 483, 523, 524
 Análisis micromorfológico 194
 Andén Pacífico o Costa Pacífica 13, 21, 25, 26, 36, 87, 479, 501, 575, 582, 589
 Andesita 21, 22, 23, 42
Andisoles 59, 60, 86, 87, 107, 131, 172, 189, 204, 241, 245, 249, 268, 288, 311, 321, 324, 330, 332, 333, 347, 353, 354, 357, 359, 362, 370, 383, 384, 385, 388, 397, 418, 420, 423, 429, 466, 505, 506, 509, 514, 515, 518, 555, 556, 558, 579, 589
Andisoles repelentes al agua 425, 559, 563, 566
 Andolización 87
Andosoles 516
 Anélidos 53
 Anfiboles 29, 31, 579, 585
 Anfibolita 25, 44, 323
 Ángulo de contacto 288
 Anhidrita 30
 Anillos infiltrómetros 224
 Aniones 303, 314, 333
 intercambiables 332
 Anteproyectos 481
Anthrobacter 50
Anthrosoles 516
 Antioquia 322, 323, 349, 350, 353, 399, 418, 444, 462, 566
 Antrosolización 86
 Antroturbación 86
 Apatitos 30
 Arachnida (Arácnida, Arácnidos) 53, 384
 Arada 258, 367
 Arado 261
 de cinceles 258, 259, 262, 266
 rígido 260
 vibratorio 260
 de discos 259, 260
 de vertedera 259, 261
 rotatorio 258
 Arauca 385
 Archaeobacterias 46, 51
 Arcilla 100
 de baja actividad o arcillas LAC 17, 19, 37, 74, 312, 332, 517, 591
 contenido 108, 120, 213, 237, 240, 322, 324
 dispersa 175, 240
 dispersable 245
 silicatada 120, 496
 tipo 1:1 34, 38, 309, 311, 313
 tipo 2:1 34, 35, 38, 309, 314
 expansiva, expansible o esmectita 34, 38, 86, 95, 108, 204, 241, 310, 312, 320, 582, 583, 584, 585
 tipo 2:1:1 34, 35, 38, 309
 Arcillolitas 17, 18, 24, 40, 44, 45, 66
 Arcosa 24
 Área mínima de mapeo 528
 Área de muestreo o área piloto 484, 527
 Área miscelánea 531, 533, 534
Areias quartzosas 517
 Arena 28, 31, 165, 170, 367
 Arenisca 24, 44,
 arenisca cuarcítica o cuarzoarenita 24, 39, 45, 66, 356
Arenosoles 516
 Argiloturbación 86, 95
 Argiluviación o lessivage 86
Aridisoles 85, 86, 369, 505, 514, 584
 Artrópodos 53, 54
 Ascenso capilar 288, 364
 Asociación 480, 532, 533
 Asociaciones vegetales 13
Aspergillus 51, 387, 388
 Atmobiós 48
 Átomo 303
 Atributos de una vertiente 67
 Atributos del sistema USDA de clasificación de suelos 491
 Autótrofos 47, 395
 Avalúos catastrales 481
Azolla 398, 448
Azomonas 399
Azospirillum 394, 395, 396, 399, 404
Azotobacter 50, 395, 396, 399, 404, 408
 Azufre 358
- Bacillus*** 56, 388, 396
 Bacterias 48, 360, 388, 392, 393, 394, 396, 407, 408
 amonificantes 393
 clasificación 50
 fijadoras de nitrógeno 394, 395
 de vida libre 395, 396
 endófitas 395
 rizosféricas 406
 Bacteriófagos 406
 Bacteroides 397
 Barbecho 403
 Barreno para tomar muestras de suelo sin disturbar 187, 188

- Basalto 21, 22, 23
 Bases 345
 conjugadas 345
 del suelo 43, 87, 321
 contenido 17, 19, 357, 358, 364, 462, 464
 totales (BT) 325, 328
 determinación 325
 Base genética 491
 Basuras 449
Beauveria 387, 388
Beijerinckia 50, 394, 395, 396, 399
 Bioestructura 99, 101, 105
 Biomasa *Azolla* 448
 Biomasa leguminosas 446
 Biomasa microbial 55, 56, 387, 405, 420
 Biomasa de macrofauna 386
 Biomasa radicular 272
 Biosíntesis 46
 Biota del suelo 47
 efectos sobre el suelo 55
 Biotemperatura 13
 Biotita 41, 42
 Bioturbación 86
 Bog 460
Boletus 51, 401
 Bomba volcánica 22
 Bosque 277, 278, 280, 385
 Bosque andino 60, 406
Botrytis 51
Bradyrhizobium 50, 397, 399, 400
 Braunificación 85
 Brecha sedimentaria 24
 Brecha volcánicos 22
 Brucita 30, 35
Brunizéms 517
Burkholderia 398
- Cabeza de potencial total o cabeza hidráulica 210
 para suelo no saturado 210
 para suelo saturado 210
 Cal agrícola 360, 361, 442
 Cal apagada 360
 Cal dolomítica 360, 400
 Cal viva 360
 Calcificación 86
 Calcio 43, 497
Calcsoles 516, 517
 Calcita 30, 363, 586
 Calcopirita 30
 Caldas 333, 357, 392, 393, 422, 589
 Calicata 137, 525, 526
 Calidad de las aguas para riego 276
 Caliza 24
Calothrix 50, 398
 Calvas 270
- Cambio de volumen del suelo 250
 interpretación 251
 Cambios de estado de consistencia 242, 246
Cambisoles 516, 517
Cambissolos 517
 Canditas o Kanditas 34, 38, 312, 332
 Cantidad y nitidez de los cutanes 142
 Caolini 35, 36, 38, 41, 42, 70, 120, 320, 322, 329, 333, 577, 579, 581, 582, 583, 585, 586
 Capa (en filosilicatos) 33
 Capa compactada 268, 269
 Capa de litter 47, 384, 385, 386
 Capa glásica 513
 Capa unitaria 33, 34
 Capacidad buffer del suelo 353, 354
 del humus 63, 417
 Capacidad de almacenamiento de agua 192, 195, 262, 358
 Capacidad de campo 186, 212, 216, 217, 251, 281, 390, 556, 559
 Capacidad de intercambio aniónico (ver CIA) 332
 Capacidad de intercambio catiónico (ver CIC) 321, 328
 Capacidad de uso de la tierra 543
 Capa en el perfil del suelo 129
 Capas C 130
 Capas compactadas 258, 262
 Capas gélidas 502
 Capas O 84
 Capas R 130
 Capas W 129
 Capilaridad 208, 463
 Características diagnósticas 491, 494
 Características modales 525
 Características subordinadas 134, 135
 Carbamatos 387
 Carbón 24, 120
 Carbonatos 30, 304
 de calcio 120, 241, 366, 401, 496, 497
 Carbono activo 420
 Carbono lento 421
 Carbono orgánico 386, 390, 418, 426
 contenido 54, 423, 425, 426, 462, 463, 495
 Carbono pasivo 421
 Carga 303, 306
 Carga de capa 35
 Carga de los coloides del suelo 308, 319, 320
 identificación del tipo 352
 importancia 313
 permanente 309, 311
 negativa 309, 310, 311
 positiva 311
 variable o dependiente del pH 309, 310, 311, 330
 en compuestos húmicos 313, 459
 en sesquióxidos 313

- en silicatos laminares tipo 1:1 313
- negativa 309, 310, 311, 312
- positiva 309, 310, 311, 312, 314
- Carga de los iones 303, 309, 310, 320, 335
 - negativa 303, 309, 310
 - positiva 303, 309, 310
- Carga del suelo 309, 314, 354
 - negativa 321, 334, 354
 - permanente 309, 324, 351, 354
 - positiva 332, 334
 - variable 311, 314, 324, 328, 329, 334, 351, 354
- Cartografía de suelos 483, 523, 533
- Catabolismo 46
- Cationes 303, 321, 333
 - intercambiables 321
 - básicos 353
 - monovalentes 337
 - polivalentes 99
- Cazuela de Casagrande 246, 247
- Celda unitaria 28
- Celulosa 387
- Cementación 240, 497
- Cementante 240, 241
- Ceniza volcánica 22, 26, 31, 103, 578, 579
- Centro Interamericano de Fotointerpretación (CIAF) 523
- Chernozems* 516, 517
- Chlamydomonas* 52
- Chlorella* 52
- Chlorophyta 52
- Chocó 479
- Chroma 121, 122, 494, 495, 496
- Chrysophyta 52
- Cianobacterias 50
- CIC 17, 63, 321, 333
 - aplicaciones 329
 - de abonos orgánicos 435
 - de coloides del suelo 322, 329
 - de la arcilla 321
 - LAC 332
 - de la materia orgánica 321, 459, 462
 - del humus 63, 322
 - del suelo 321, 322, 323, 324, 337, 354, 358, 365, 417, 462
 - determinación 324
 - a pH 7 con NH_4OA_c 1N (CIC 7) 324, 327
 - a pH 8.2 (CIC 8.2) 324, 325
 - con acetato de sodio 326
 - por suma de cationes 325
 - al pH del suelo (CICE) 327
 - por colorimetría 328
 - total 325
- CIC 7 329, 330, 331, 332, 496, 497
- CIC 8.2 326, 330, 331
- CIC efectiva (CICE) 327, 328, 329, 330, 331, 332, 496, 497, 556, 559, 563, 566
- CIC variable (CICV) 329, 330, 463
- Ciclo de las rocas 20
- Ciclo del carbono 387
- Ciclo del fósforo 388
- Ciclosilicatos 29
- Ciliophora 53
- Claridad (ver Value) 121, 122
- Clase textural de suelo 168, 170, 171, 173
- Clases de capacidad de uso de la tierra o Clases agrológicas 543, 544, 587, 588
- Clases por actividad de intercambio catiónico 508
- Clases por grietas 510
- Clases por mineralogía 508
- Clases por presencia de carbonatos y reacción 509
- Clases por profundidad del suelo 509
- Clases por recubrimientos en arenas 510
- Clases por régimen de temperatura 509
- Clases por resistencia a la ruptura 510
- Clases por tamaño de partículas 508
- Clasificación de tierras 587
 - sistema USDA 543
- Clasificación natural de suelos 489
- Clastos 24
- Clave taxonómica 512, 513
 - simplificada de los órdenes 514
- Claypan 240
- Clima 11, 575
 - árido 500
 - cálido 424
 - clasificación 13
 - edáfico 498
 - frío 424
 - húmedo 501
 - medio 424
 - perhúmedo 501
 - seco 120, 364
 - semiárido
 - tropical 88, 518
- Clonostachys* 387
- Clorita 35, 38, 320, 322
- Cloruros 304, 364
- Clostridium* 388, 396
- Cobertura vegetal 59, 277
- Cobertura vegetal natural 405
 - caracterización 60, 139
- Codornaza 436, 437
- Coeficiente de dispersión (CD) 175
 - procedimiento 175
 - nivel crítico 177
- Coeficiente de extensibilidad lineal (COLE) 249, 502
 - interpretación 251
- Coeficiente de variación 555, 556
- Coeficiente higroscópico 216
- Coleóptera (Coleópteros) 384, 385, 386

- Collémbola 383, 384
 Coloides 101
 del suelo 100, 308, 309, 313, 319, 321, 333
 minerales 312, 319
 orgánico 312, 311, 322
 humus 63
 Color del suelo 119, 390, 417, 496
 determinación 120, 122
 factores que influyen en ella 124
 descripción 122
 Color litocrómico 120
 Color Munsell 122
 blanco 120
 claro 121
 gris 85, 120
 oscuro 119, 120, 121
 rojo 120
 Coluviación 84
 Compactación del suelo 102, 190, 195, 197, 205, 224, 237, 239, 240, 259, 267, 268, 269, 270, 271, 277, 281, 441, 464
 Competitividad 399
 Complejo 532, 533
 Complejos órgano-minerales 120, 420, 428
 Composición física ideal del suelo 157
 Composición granulométrica del suelo 508
 Compost 441, 442, 450, 451
 Compostaje 443
 Compresión no confinada del suelo 243
 Concentración de una solución 305
 Concepto central del gran grupo 507
 Concreciones y nódulos en el suelo 114, 175, 358
 caracterización 142
 Condición de drenaje 262, 463
 caracterización 140
 Condición de humedad ambiental 13
 Conductividad eléctrica en el extracto de saturación del suelo 214, 364, 369, 497, 555
 Conductividad eléctrica en el extracto de saturación de abonos orgánicos 435, 437, 449
 Conductividad hidráulica del suelo 223, 228
 saturada 68, 226, 228, 231, 245, 280, 281, 440, 459, 555
 determinación 229
 interpretación 230
 Congelamiento 86, 505
 Conglomerado 24, 39
 Conjunto 533
 Consistencia del suelo 237, 262, 417
 caracterización en húmedo 141
 caracterización en mojado 141
 caracterización en seco 142
 evaluación 242, 246
 interpretación 250
 Consociación 481, 532, 533
 Constantes de humedad del suelo 216, 217
 Contacto denso 502
 Contacto lítico 502, 507
 Contacto paralítico 502
 Contacto petroférreo 502, 507
 Contaminación de suelos 43, 332, 417
 Contaminantes 449, 452
 Contenido de humedad (o de agua) en el suelo 190, 203, 220, 224, 228, 417
 gravimétrico 109, 111, 160, 212, 213, 216, 247, 248
 determinación 217
 volumétrico 160, 218
 Contracción 249, 314
 Coquina 24
 Cordillera central 499, 523, 578
 Cordillera occidental 498, 499, 578
 Cordillera Oriental 578
 Corindón 29
 Corrección por humedad 109, 176, 189
 Costa Atlántica o Llanura del Caribe 370, 479, 480, 575, 581
 Costras superficiales 240
 salinas 364
 Crílico 499
 Crioturbación 86, 502
 Cristal 28, 33
 Crustáceos 53
 Cuarcita 25, 356
 Cuarzo 29, 31, 38, 41, 45, 120, 577, 579, 581, 582, 583, 584, 585, 586
 Cuarzoarenita 24
 Cuarzodiorita 21, 41, 70
 Cuaternario 72, 73
 Cuencas hidrográficas 480
 Cultivada 258
 Cumulización 84
 Cundinamarca 383, 384, 395, 406
 Curva característica o de retención de humedad del suelo 220
 Curvas de reflectancia espectral 120

 Dacita 23
 Daño mecánico en las raíces 241
 Decalcificación 86
 Déficit de agua 12, 363
 Delimitación de los cuerpos de suelos 523
 Delineación de suelos 531
 Delta de pH (Δ pH) 352, 353
 Desnitritificación 389
 Densidad aparente del suelo 101, 160, 183, 186, 196, 197, 218, 245, 249, 262, 264, 267, 268, 269, 272, 277, 280, 281, 283, 284, 287, 386, 440, 463, 464, 502, 555, 556, 563
 con texturas finas 190
 con texturas gruesas 190

- con texturas medias 190
 determinación 186
 - Método del cilindro biselado 186, 187, 188,
 - Método de la cajuela 189
 mineral 189
 - Andisol 189
 importancia 190
 interpretación 189, 190
 orgánico 463, 464
- Densidad aparente en humus 63
- Densidad aparente en materiales orgánicos 459, 462
- fibrosos 190
 - sápricos 190
- Densidad de carga 319, 320
- Densidad de observaciones 526
- Densidad real del suelo 159, 183, 185, 186
- determinación 184, 185
 - método del picnómetro 184, 185
 - interpretación 186
- Dependencia espacial 559, 561, 562, 563, 564
- Depósitos piroclásticos 21
- Depósitos orgánicos 459, 461
- Dexia*** 50, 396, 399
- Desalcalinización 86
- Desalinización 85
- Desarrollo del perfil 69
- Desarrollo estructural o de la estructura 83, 101, 102, 103, 104, 141, 224, 240, 245, 366
- Desarrollo radicular 195, 258, 269, 276, 277, 417
- Descomposición 62
- Descongelamiento 86
- Descripción de unidades de mapeo 542
- Descripción de perfiles de suelos 137, 547
- modales 545
- Disgregación de partículas 87
- Desilicación 87
- Deslizamientos 272
- Desnitritificación 56, 394
- Desulfovibrio*** 389, 396
- Desviación estándar 554, 556
- Deterioro estructural 101, 102, 108
- Deterioro físico del suelo 103, 175, 190, 195, 257, 269
- Diagénesis 19
- Diagramas de variación 22
- Diámetro geométrico medio 110, 111, 113
- Diámetro medio estimado 110
- Diámetro ponderado medio 110, 111
- Diáspora 30
- Diatomeas 52
- Diatomita 24
- Diazotrofismo 395
- Diorita 22, 23
- Diplópoda 385
- Díptera (Dípteros) 384, 385, 386
- Discontinuidad litológica 136, 502
- Diseño anidado 557, 558, 560
- Disociación 532, 533
- Dispersión de suelos 167, 169, 172, 314
- Dispersión de coloides 335, 337, 365
- Distancia de muestreo 557, 558
- Distribución de la precipitación 12
- Distribución espacial de los suelos 527
- Distritos de riegos y drenajes 480, 481
- Divisoria de aguas 66
- DNA 46
- Doble capa difusa (DCD) 334, 349
- capa externa difusa 335
 - capa interna rígida 335, 337
 - espesor 335, 336, 349
- Dolomita (dolomía) 24, 30
- Drenaje 108, 120, 192, 195, 218, 228, 239, 276, 282, 356, 364, 417, 463
- beneficios 277
 - subterráneo 276
 - superficial 276
- Dunita 23, 366
- Duración de las inundaciones 139
- Ectendomicorras 403
- Ectomicorras 51, 401, 402, 404
- Edad de las rocas 71
- Edad del material parental 71
- Edad del relieve 71
- Edad del suelo 70, 71, 73
- Edad geológica 71
- Edafobios 48
- Edafófilos 48
- Edafoturbación 86
- Edafóxenos 48
- Efecto de estallido 109, 112
- Efecto residual ácido 356
- Efecto residual alcalino 364
- Efectos alelopáticos 393
- Efectos del mal drenaje 276
- Efecto del manejo sobre su meso y macrofauna 383
- Efecto del manejo sobre sus microorganismos 404
- Eisenia*** 54, 56
- Eje c 33, 35
- Elamphomyces*** 402
- Electronegatividad 308
- Electrones 303, 307
- Electrones de valencia 307
- Elemento formativo de orden 504, 505
- Elementos formativos de los grandes grupos 506
- Elementos formativos del suborden 506
- Elementos mayores 22
- Elementos menores 22, 364, 369
- Elementos tóxicos 43, 403, 417, 449, 452
- Elementos traza 22

- Eluvación 85, 88, 95, 120, 362
 Emergencia de plántulas 240, 242, 243, 251
 Encalamiento 353, 360, 464
 Encharcamientos 69, 241
 Enchytridae 53
 Encrostramiento superficial 224, 237, 240, 243, 269, 286, 366, 417, 441
 Endógeas 53
 Endomicorras 51, 401, 404, 407
 arbustulares (MVA) 402, 404
 Endopedones 496
 ágrico 85, 120, 419, 496, 512
 álbico 85, 120, 421, 497, 512, 513
 argílico 85, 86, 107, 331, 496, 512, 513
 cálcico 86, 496, 512, 513
 cámico 85, 107, 496, 512, 513
 de transformación 496
 duripán 87, 241, 497, 512, 513
 espódico 85, 88, 419, 421, 496, 497, 510, 512, 513
 fragipán 241, 497, 512, 513
 glósico 497, 513
 gypsico, gípsico o yesífero 276, 496, 512, 513
 iluviales 496
 kándico 85, 331, 497, 508, 512, 513
 nátrico 85, 86, 107, 240, 331, 496, 512, 513
 orstein 241, 497, 510, 512
 óxico 85, 107, 331, 496, 512, 513
 petrocálcico 86, 241, 497, 512, 513
 petrogíplico 241, 497, 512, 513
 plácico 85, 241, 497, 512, 513
 sálico 85, 497, 505, 512, 513
 sómbrico 85, 331, 419, 496, 507, 512, 513
 sulfúrico 352, 496, 513
 Endorrosfera 391
 Endurecimiento 85
 Energía cinética 205
 Energía de hidratación 320, 333
 Energía potencial 205
 del agua del suelo 205
 Enfermedades 441, 447, 452
 Enfriamiento del magma 20
 Enlace químico 306, 307
 covalente 308
 de hidrógeno 308, 312
 de van der WAALS 308
 iónico o electrovalente 307
 Enmienda 368, 464
 orgánica 435
 química 367, 368
 Enriquecimiento 69
Entisoles 86, 131, 362, 370, 385, 505, 509, 514, 577, 579, 582, 583, 584, 585, 586
Entamoeba 52
 Entrecapa 33, 34, 307
Entrophospora 402
 Epigeas 53
Epipedón 84, 419, 466, 494
 Antrópico 84, 86, 120, 419, 495, 512, 513
 folístico 495, 512, 513
 hístico 84, 466, 495, 512, 513
 melánico 84, 107, 120, 419, 494, 505, 512, 513
 mólico 84, 86, 107, 120, 331, 419, 494, 512, 513
 Ócrico 84, 120, 419, 495, 512, 513
 Plágano 86, 495, 512, 513
 Úmbrico 84, 86, 107, 120, 331, 419, 495, 512, 513
 Equivalente 303, 305
 Erosión 19, 39, 87, 257, 269, 275, 281, 283, 288, 403, 439, 464
 eólica 103
 hídrica 67, 139
 laminar 270
 selectiva 40, 497
 Erupción volcánica 20
 freatomagmática 20
 Escala de un mapa 480, 481, 527, 528, 531
 Escarificadores 258
 Escorrentía 67, 68, 87, 240, 257, 269, 270, 275, 277, 278, 288, 289, 290', 439
 Especificidad 399, 401, 402, 404
 Espectro visible 120, 430
Espodosoles 59, 85, 88, 311, 362, 419, 505, 510, 514
 Esponjamiento 85
 Esquisto 25, 40, 44
 Esquistosidad 25
 Estabilidad estructural o de agregados 101, 108, 111, 114, 175, 237, 240, 279, 280, 287, 417, 443
 caracterización 109
 método de Henin 112
 método de Yoder 109, 111
 curva de adición porcentual 110
 Estados de consistencia del suelo 237
 coherente 237
 de fluidez 239
 de friabilidad o de fragilidad 238
 determinación 246
 en campo 246
 en laboratorio 246
 plástico 173, 239
 Estiércol 436, 443
 Estrenguita 388
 Estrés de agua 257
 Estrés de aireación 257
 Estructura del suelo 56, 95, 158, 190, 192, 208, 229, 250, 262, 264, 277, 283, 285, 286, 289, 358, 365, 367, 385, 417, 464, 496
 bloques 105, 107
 angulares 104
 subangulares 104
 caracterización 103, 104

- clase 103, 104
- columnar 104, 105, 107, 366, 496
- cuneiforme 103, 108
- granular 104, 107
- laminar 104, 105, 107
- masiva 108
- migajosa 104, 107
- prismática 104, 105, 107
- suelta 103
- tipo 103, 104, 105
- Eubacterias* 46, 48, 49, 50
- Eucariotes* 46
- Euglena* 52
- Eutrófica 460
- Evaporación de agua superficial 363, 439
- Evapotranspiración 87, 203, 501
 - potencial 11, 355, 363
- Evolución del suelo 95, 101, 120, 362, 544
- Exceso de mecanización 257, 269, 270
- Exorrizosfera 391
- Expansión y contracción 241, 249, 252
 - interpretación 251
- Explosión de agregados 109
- Extensibilidad lineal 250, 251, 502
- Extragrado 507
- Exudados radiculares 391, 392, 393, 396, 403
- Factores de formación del suelo 11, 75, 483, 489
- Familia 467, 503, 512, 515, 533
- Familia textural 170, 171
- Fangueo 270
- Fase 533, 534
- Fase fisiográfica 533
- Fase gaseosa 101, 153, 157
- Fase líquida 101, 153, 157, 203
- Fase sólida 101, 153, 157
- Fauna del suelo 383
- Feldespato 29, 31, 42, 579, 582, 583, 584, 585, 586
- Félscicos 23
- Fen 460
- Fenocristales 21
- Ferralitización 88
- Ferralización 87
- Ferralsoles* 516, 517
- Ferrihidrita 37, 119, 312
- Ferritización 87
- Ferruginación 74, 85, 88
- Fertilidad del suelo 69, 74, 266, 299, 330, 358, 424, 459, 577, 582, 586, 589
- Fertilidad natural 40, 590
- Fertilización 283, 356, 463, 464
 - edáfica 369
 - foliar 369
- Fertilizantes 259, 399
 - fosfóricos 403
- Fibras 461
- Fijación biológica de nitrógeno 395, 398, 408, 445, 447
 - en forma libre 395
 - en forma simbiótica 397
 - por asociación 396
 - condiciones que afectan a los fijadores 399
- Filosilicatos 18, 29, 307, 308, 312
 - dioctaédricos 35
 - estructuras básicas 29, 34, 309
 - interestratificados 35
 - secundarios 33
 - clasificación 34
 - Trioctaédricos 35
- Firmeza 246
- Fisiografía 483
- Fitotoxicidad 449
- Fitotóxicos 439
- Floculación 99, 100, 167, 314, 335, 336
- Flujo de agua en el suelo 222
 - dirección 210, 222
 - flujo no saturado 223
 - flujo saturado 223
- Fluvisoles* 516, 517
- Foliación 25
- Formaciones de márgenes de ríos 60
- Formaciones xerófitas 60
- Fosfatos 30, 314, 332
- Fósforo o fosfato 357, 358, 360, 362, 364, 369, 388, 394, 403, 463, 589
 - contenido 559, 563, 564
 - disponibilidad 357
 - fijación 314, 332, 357, 502, 589
- Fotografías aéreas 482, 528
- Fotointerpretación 482, 525, 528
 - ajustada 484
 - preliminar 482, 483, 523
- Fotótrofos 46
- Fracción de tamaño arcilla 17, 33, 241, 362, 420
- Fracción húmica 428
- Fracción no húmica 428
- Fraccionamiento de la materia orgánica 427
- Fragipán 241, 497, 512, 513
- Fragmentación del magma 20
- Fragmentos de roca 141, 508
- Frankia* 50, 397, 404
- Frecuencia de inundaciones 139
- Frente de humedecimiento 228, 229, 288
- Friabilidad 246
- Friable 261
- Fuerzas de adhesión 237, 239
- Fuerzas de cohesión 237
- Fumigaciones 403
- Fungicidas 408
- Fusarium* 51, 387, 389

- Gabro 21, 22, 23
 Galena 30
 Gallinaza 418
 Gasterópodos 386
 Gato hidráulico 243
Gelisoles 86, 466, 505, 509, 514, 579
 Geoestadística o Estadística Espacial 482, 560, 557
 Geoformas 65
 Geogénesis 564
 Geomorfología 65, 73
 Germinación de las semillas 258, 269, 277
 Gibbsita 37, 42, 70, 329, 577, 579, 581
Gigaspora 402
 Glácica 512
Gleissolos 517
 Gleización 74, 85, 130
 Gleysoles 516, 517
Glomus 402, 404
 Glósico 497, 512, 513
 Gneis o neis 25
 Goetita 37, 119, 329
 Gradiente de la pendiente 138
 Gradiente térmico 13
 Gradiente de potencial total del agua 222
 Grado de evolución del suelo 73, 74, 108
 Grado de hidratación de los iones 333
 Gramíneas 362, 396, 438
 Gran grupo 467, 503, 512, 514, 575
 Gran paisaje 524
 Granito 21, 22, 23
 Granjas experimentales 480, 481
 Granulometría 45
 Grauvaca 24
 Gravas 114
 Gravillas 114
Greyzems 516, 517
 Grietas 241, 502
 Grupo principal de suelo 515, 516
 Grupo textural 171
 Gruss 41
 Guajira 12, 25, 36, 369, 423, 589
 Gypsisoles 516, 517

 Haloidita 35, 38, 41, 322, 329
 Haploidización 95
 Hematita 37, 119
Herbaspirillum 395, 396, 398
 Herbicidas 261, 408
 Herbívoros 47, 384
Heterodera 55
 Heterótrofos 47, 395
 Hidratación 306
 Hidrobios 48
 Hidrofobicidad 51, 64, 288, 417, 464, 526

 Hidrógeno 17, 303
 Hidrómetro 99, 166, 167, 168
 Hidromica 42
 Hidronio 345
 Hidróxido 345
 Hifas 401
 septadas 403
 Histel 466, 467
Histosoles 353, 355, 363, 384, 385, 418, 462, 466, 467, 505, 509, 514, 516
 Hoja 33, 34
 Hongos 48, 51, 387, 388, 389, 393, 394, 406, 407, 408
 clasificación 51
 micorrízogenos 395, 401
 Horizonación 95
 Horizonte de suelo 129
 A 84, 107, 129, 259, 264, 283, 284, 347, 384, 385, 421, 423, 425, 564, 566
 B 107, 130, 347, 385, 496
 C 107, 130
 cementado 242
 compactado 242
 diagnóstico 241, 494, 512, 513
 E 85, 130
 eluvial 88,
 de materia orgánica 421
 endurecido 591
 enterrado 134
 genético 44, 129, 497, 512
 iluvial de arcilla 240
 iluvial de materia orgánica 421
 maestro 129, 131
 melánico 505
 mezclado 133
 o capa O 84, 129
 rojo 95
 salino 276
 sódico 276
 transicional 131, 133
 Hormigas 54, 383, 386
 Hornblenda 29, 41
 Hue 121, 122
 Humificación 50, 51, 56, 62, 84, 87, 88, 285, 383, 429, 436, 461, 495
 Humina 63, 421, 428
 heredada 429
 ligada a las arcillas 429
 ligada al Fe 428, 429
 secuestrada 429
 total 429
 Humus 61, 62, 63, 84, 100, 417, 437, 441, 443, 452, 496
 propiedades 63
 tipos 63

- Illita 35, 320, 322, 329, 333, 363
 Ilmenita 29
 Iluviación 85, 88, 95
 de arcilla 497
 de humus 86, 362
 Imágenes de radar 482, 528
 Imágenes de satélite 482, 528
 Spot 528
 Impedancia mecánica 257
 Implementos para el laboreo del suelo 260
 Inasociación 532, 533
 Incendios 463
Inceptisoles 73, 85, 86, 87, 107, 114, 131, 351, 357, 362, 366, 370, 384, 385, 419, 505, 509, 514, 555, 556, 577, 579, 582, 583, 585, 586
 Inclusión total 491
 Independencia de las muestras 565
 Indicador 347
 Índice de estructura 110, 111
 Índice de humedad 15
 de Thornthwaite 16, 138
 Índice de inestabilidad 112, 113
 Índice de plasticidad 248, 252
 Índice melánico 494, 495
 Infiltración 192, 223, 239, 262, 266, 269, 272, 277, 278, 281, 286, 287, 287, 288, 289, 417, 441, 452, 555
 determinación 224
 factores que la afectan 224
 infiltración acumulada 226, 228
 infiltración básica 226, 228, 266, 267, 272
 infiltración instantánea 226, 227, 228
 Inmadurez del compost 449
 Inoculación con Micorrizas 404
 Inoculación de semillas con fijadores de nitrógeno 400
 Inóculo 404
 Inosilicatos 29, 38
 Insecticidas 408
 Insectos 53
 Interacciones benéficas 394
 Interacciones neutras 393
 Interacciones nocivas 394
 Interacciones Rizosfera – microorganismos 392
 Intercambio gaseoso 240
 Intercambio iónico 37, 319
 factores que lo controlan 319
 las propiedades del cambiador 319
 las propiedades del ión 320
 Interceptación de lluvia 439
 Intergrado 507
 andic o ándico 241
 vertic o vértico 241, 252
 Interpretación de un levantamiento de suelos 543
 Iones 101, 303, 304, 306, 313
 intercambiables 335
 Irrómetro 221
 Islas del Caribe 575, 585, 589
 Iso- regímenes de temperatura 499
 Isópodos 386
 Jarosita 49
Kastanozem 516, 517
 Kilopascal 211
 Kriging 565
 Ksat 280
 Laboreo del suelo 108, 196, 237, 238, 239, 241, 248, 250, 257, 280, 386, 387, 394, 406
 Labranza 257, 282
 cero 261, 267, 269, 271, 406, 407
 con discos 196
 convencional 261, 264, 266, 269, 270, 271, 406, 407
 Criterios para seleccionar sistemas de 263
 horizontal 262
 mínima 261, 406
 primaria 259
 profunda 262, 264, 267
 reducida 261, 269, 270, 271
 secundaria 261
 vertical 262
Lactarius 401
 Lamelas 502, 512, 513
 Lámina de agua 218, 219
 Lapilli 22
 Laterización 88
Latossolos 517
 Lavado de bases 266, 363, 584
 Lavado de sales 584
 Lavado del suelo 366, 367, 368
 Lava 21
 Lectura del hidrómetro 169
 Lectura del tensiómetro 215, 216
 Leguminosas 283, 284, 362, 395, 397, 403, 408, 438, 441, 445
 Lepidocrocita 119
Leptosoles 516, 517
 Lessivage 86
 Leucinización 86, 88
 Levantamientos de suelos 479
 el informe 541
 memoria técnica 541, 546
 el mapa 527, 541, 546
 cómo extraer información 547
 usuarios 546
 con bajos conocimientos en suelos 546

- con conocimientos moderados en suelos 547
- personas especializadas en suelos 547
- etapas para hacer los levantamientos de suelos 482
- tipos o niveles 479, 482, 503, 525, 526, 533, 534
 - detailed o de segundo orden 479, 481, 482, 525, 526, 528, 533, 534
 - esquemático 479
 - exploratorio 479, 480, 482, 525, 526, 528, 533, 534
 - general o de cuarto orden 479, 480, 482, 525, 526, 528, 533, 534
 - muy detallado o de primer orden 479
 - quinto orden 479
 - semidetallado o de tercer orden 479, 481, 482, 525, 526, 528, 533, 534, 542
 - sexto orden 479
 - ultradetallado 482
- Ley de Stokes 99, 166
- Leyenda de un mapa de suelos 534, 535, 546
- Leyenda fisiográfica 524
- Lignina 53, 420, 421, 429
- Limitantes para el uso agropecuario de los suelos en Colombia 589, 591
- Límite abrupto 136
- Límite difuso 133
- Límite superior del suelo 492
- Límites de Atterberg 246, 252
 - Límite de soltura, de glutinosidad o de pegajosidad 238, 246, 251
 - determinación 248
 - interpretación 250
 - Límite inferior de plasticidad o límite plástico 239, 246, 281
 - determinación 248
 - Interpretación 252
- Límite superior de plasticidad o límite líquido 239, 247, 248, 252, 281
 - determinación 246
 - interpretación 252
- Límite inferior del suelo 492
- Límites laterales del suelo 492
- Limo 28, 165, 170
- Limolita 24
- Líquenes 50, 398
- Lisatos 392
- Litificación 19
- Litótrofos 46
- Litter 51, 383
- Littering 84
- Lixisoles* 516, 517
- Lixiviación o lavado 17, 42, 45, 69, 87, 275, 314, 321, 337, 369, 437
 - de bases 87, 88, 355, 356, 362
- Lixiviados 335
- Llanos orientales 357, 362, 386, 441, 479, 580
- Lodos de aguas residuales 451, 453
- Lombriz de tierra 53, 54, 101, 383, 385, 386, 406, 443
 - factores que afectan su población 387
- Lombricompostaje 443
- Lombricomposto 443
- Longitud de la raíz 268
- Lumbricidae 53
- Lumbricus* 54
- Lutitas o shales 24, 40, 43
 - negras 120
- Luvisol* 516
- Macrofauna del suelo 53, 384, 385, 386
- Macroorganismos 48, 56
 - efecto del manejo del suelo sobre ellos 383
 - importancia 383
- Macroporos 108, 204, 216, 268, 280, 417, 440
- Macroporosidad 192, 193, 195, 239, 264, 289
- Macrorrelieve 65
- Maduración (ripening) 461
- Máficos 23
- Magdalena 389, 407
- Magdalena Medio 480, 583
- Maghemita 119
- Magma 19
- Magmáticas 20
- Magnetita 29, 120
- Mal drenaje 85, 120, 239, 241, 257
- Malezas 447
- Malos olores 443, 452, 453
- Manchas 125
- Manejo del suelo por sitio específico 482, 568
- Manganoso 362
- Manganita 37
- Manglares 60
- Mapa 546, 547
 - de isolíneas 527, 565, 566, 567, 568
 - de suelos 527, 528, 529, 531
- Mapeo de suelos 479, 526
 - en red 526
 - en transectos 526
 - libre 527
- Mármol 25, 43
- Marronización 74, 85, 88
- Mastigophora 52
- Materia orgánica del suelo 56, 61, 112, 262, 333, 360, 362, 364, 367, 407, 417, 421, 426, 428, 436, 447, 495, 497
 - caracterización de su composición 430
 - conservación 283, 423
 - contenido 17, 19, 45, 108, 119, 192, 203, 213, 237, 245, 262, 272, 281, 324, 354, 358, 361,

- 364, 368, 419, 421, 422, 424, 425, 426, 427, 448, 496, 555, 563, 577, 581, 582, 584, 586, 589
 niveles críticos 424
 descomposición de la materia orgánica 383, 387, 420, 461, 463, 464
 determinación 424
 método de calcinación 425, 426
 método de Walkley y Black 425, 428
 oxidación con peróxido de hidrógeno 427
 distribución 101, 421
 en el interior del suelo 421
 espacial 422
 grupos 61
 fresca (MF) 61, 62, 428, 429
 húmica (MH) 61, 63, 428, 429
 no húmica (MNH) 61, 63
 unida a las arcillas 428
 unida a los sesquioxídos de Fe y Al 428
 importancia 64, 417
 pérdidas 257, 270, 423
Material orgánico 418, 461, 464
 grupos 461
 Fibríco 461, 462
 Hémico 461, 462
 Sáprico 461, 462
 propiedades 462
Material parental 19, 45
Materiales álbicos 497, 502
Materiales aluviales 84
Materiales ándicos 419
Materiales densos 240, 502
Materiales espódicos 120, 241, 352, 362, 419, 496, 497, 502
Materiales gélicos 502
Materiales hidrofóbicos 224
Materiales inertes 435
Materiales minerales del suelo 493
Materiales no cristalinos 241, 420
Materiales paralíticos 502
Materiales sulfídicos 502
Matiz 121, 122, 124
Mecanización del suelo 86, 257, 464
Megarrelieve 65
Melanización 86, 88
Meloidogyne 55
Mesofauna del suelo 53, 384, 385, 386
Mesoorganismos 48, 56
 efecto del manejo del suelo sobre ellos 383
 importancia 383
Mesoporos 280, 440
Metales pesados 452
Metales tóxicos 435
Metamorfismo 19
Metarhizium 388
Meteorización 37, 39, 43, 45, 95, 120, 355, 363
Mica 29, 31, 579, 586
Mica hidratada 34
Micorrizas 51, 401, 403
 condiciones que afectan su desarrollo 403
 importancia 403
 tipos 401
 efecto del manejo del suelo sobre ellas 405
Micorrizas de orquídeas u orquidoides 402
Micorrizas ericoides 402
Micorrizas vesículo-arbusculares 402
Micotrofia 403
Microaerófilos 47
Microagregados 288
Microorganismos o microbiota del suelo 48, 55, 84, 101, 556
 aeróbicos 406
 efecto del manejo del suelo sobre ellos 405
 importancia de los microorganismos 387
 microfauna 48
 microflora 48
Microporos 193, 205, 280, 440
Microporosidad 192, 386, 463, 464
Microrrelieve 65
Minerales 26, 28
 meteorizables 362, 502
 primarios 28, 30, 38, 40, 41, 95
 secundarios 28, 32, 33, 38, 41
Mineralización 56, 62, 84, 383, 390, 406, 417, 436, 447, 461
 de la materia orgánica 355, 420, 423
 de materia orgánica nativa 270
Mineralogía 17
Minicalcitas 525
Miriápodos 53, 386
Misceláneos 534
Modelo esférico 566
Modelo exponencial 566
Modelo gausiano 566
Modelo lineal 562
Modelo de Chapman y Guoy 334, 335
Modelo de Helmholtz 334, 335
Modelo de Stern 334, 335
Módulo de ruptura 243, 244, 245
 interpretación 251
Mol 303
Molalidad 305
Molaridad 305
Molécula 303
 polar 306
Molibdeno 357, 364
Mollisoles 84, 85, 86, 245, 309, 321, 351, 370, 505, 509, 514, 556, 564, 579, 582, 583, 585
Moluscos 54
Monas 52
Monocultivo 257, 399, 403

- Montmorillonita 35, 38, 310, 320, 322, 329, 333, 363, 586
Mortierella 388
 Moscovita 29, 38
 Moteos 85, 120
 - abundancia 125
 - nitidez 125, 140
 - tamaño 125
 Movimientos en masa 272
 Mucigel 392
 Muck 460
 Muestras compuestas 566
 Muestreo de suelos 565
 Mufla 425
 Mulch o coberturas muertas 240, 406, 407, 439
 - vegetal 439, 440, 441
 - plástico 440
 Nanorrelieve 65
 Nariño 385, 386, 580
Navicula 52
 Nebulizadores 240
 Neis 25, 43, 44
 Neisosidad 25
 Nematicidas 387
 Nemátodos 55, 406
 - de vida libre 392
 Nesosilicatos 29
 Neutrones 303
 Nitidez entre límites de horizontes 143
Nitisoles 516, 517
 Nitratos 314, 332, 364, 406, 437
 Nitrificación 408
Nitrobacter 50, 388
 Nitrogenasa 395, 399
 Nitrógeno 17, 357, 360, 364, 369, 403, 445, 447, 448
 - deficiencia 357
 - mineral 399
 - orgánico 393
 - pérdidas 277, 389*Nitrosomonas* 50, 388
 Nivel freático 69, 85, 213, 262, 266, 275, 276, 364, 463, 501
 Nivelación 259
 Niveles de energía 307
 Niveles de terraza 70
Nocardia 388
 Nodulación 394, 403
 Nódulos 397, 400, 401, 408
 - efectivos 397
 Nombre de la familia 508, 510
 Nombre de subgrupo 507
 Nombre de suborden 505
 Nombre del gran grupo 505
 Nombres de orden 504, 505

 Nombres de serie 511
 Nomenclatura de horizontes y capas maestros 134

 Nomenclatura taxonómica del USDA 503
 - reglas para su uso 511
 Nordeste antioqueño 358
 Normalidad 305
Nostoc 50, 396, 398
 Notación Munsell 122
 Nugget 562, 563
 Número de muestras 566
 Número de oxidación 303, 304
 Nutrientes 42, 45, 74, 321, 417, 436, 438, 446, 449
 - disponibilidad 352, 383
 Objetivos del laboreo del suelo 257, 258
 Observaciones de suelos 525
 - de comprobación 525, 526
 - detalladas 525, 526
 Obsidiana 21
 Octaedros 29, 33, 309, 310
 Oficina de correlación de suelos 515
 Oligochaeta 53
 Oligotrófica 460
 Olivino 29
 Ollas de presión 219, 221, 223
 Operaciones de labranza del suelo 258
 Orbitales 307
 Orden 503, 512, 515
 Organismos 45
 - del suelo 47
 - clasificación 48
 - grupos 46, 47
 Organofosforados 387
 Organótrofos 46
 Orientación de las unidades experimentales 567
 Oriente antioqueño 330, 351, 357, 397, 422, 423, 451, 555, 556, 558, 559, 563, 580
 Orinoquia 25, 26, 36, 87, 429, 500, 575, 580, 589
 Orthóptera 384
 Ortoclasa 29, 363
 Ortosa 29
 Óxidos 29
 - de hierro, aluminio, silicio y/o manganeso 100, 109, 120, 204, 312, 354
 - hidratados de hierro, aluminio y/o silicio 312
 Óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio 33, 36, 309
 Oxihidróxidos 30
Oxisoles 73, 85, 87, 88, 131, 172, 204, 311, 332, 353, 355, 357, 358, 362, 386, 387, 388, 429, 505, 507, 508, 509, 514, 577, 580

 Paglioclasa 41

- Paisaje fisiográfico 483, 523, 524, 533
 Paludización 461
Paramecium 53
 Páramo 60
 Parásitos 47
 Partes por billón 306
 Partes por millón 306
 Pastoreo 240, 270
 - alterno 270
 - continuo 270, 271, 277
 - efectos del pastoreo sobre el suelo 271
 - en confinamiento 271
 - en fajas 271
 - en rotación 271
 Pastos mejorados 271
 Patógenos 393, 403, 404, 435, 443, 449, 452
 - de la raíz 394
 Patrón de distribución de los suelos 483, 527, 531, 532
 Patrones especiales de color 124
 Pedogénesis 7, 39, 45, 355, 363, 524, 564
 Pedotúbulos 496
 Pedoturbación 86
 Pedregosidad 40
 - superficial 139
 Peds 95, 99
 Pegajosidad 140, 173, 174, 246, 462
 Peletizar 400, 401
 Pendiente 289
 Penetración de las raíces 239, 251
 Penetrómetro 242, 251
 - de bolsillo 242
 - de cono 242***Penicillium*** 51, 56, 387, 388
 Percolación 39, 266, 275, 285
 Pérdida de agua por escorrentía 277, 278, 288, 289
 Pérdida de suelo por erosión 68, 269, 270, 277, 278, 287, 288, 289
 Pérdidas de base 43, 355
 Perfil del suelo 129, 131, 224, 479, 484
 Perfil modal 545, 547
 Peridotita 23
 Permafrost 502
 Permeabilidad 101, 224, 241, 277, 365, 367, 463
 Permeámetros 229
 - de cabeza constante 229
 - de cabeza variable 229
 Peso atómico 303
 Peso de 1 equivalente 304
 Peso fórmula 303
 Peso iónico 304
 Peso molecular 303
 Pesticidas 386
Pezizella 402
 pH del suelo 17, 281, 310, 319, 322, 323, 324, 332, 335, 345, 403, 417, 420, 452, 459, 462, 555, 559, 589
 - calificación 351
 - general 351
 determinación 345
 - métodos colorimétricos 347
 - método de Hellige-Truog 348
 - método potenciométrico 345
 - pH en agua 345
 factores que afectan la medida del pH 348
 - efecto de dilución 349, 350
 - efecto de las sales 349
 - efecto del contenido de CO₂ 350
 importancia 352
 interpretación y aplicaciones
 - pH en agua 348, 349, 351, 352, 358, 496
 - pH en CaCl₂ 0.01M 349, 353, 509
 - pH en KCl 1N 349, 351, 353
 - pH en NaF 349, 353
 pH de la rizósfera 392
 pH óptimo para las plantas 359
Phaeozems 516, 517
Phytiump 401
Phytophthora 389, 401
 Picrómetro 184
 Piedra pómez 21
 Piezómetros 213
 Pilas de compost 442
Pinnularia 52
 Pirlita 30, 355
 Piroclastos 84
 Pirofilita 38, 309, 310
 Pirolusita 29
 Piroxenos 29, 38
 Piso altitudinal 13, 15, 138
 Piso o pie de arado 196, 239, 243, 267
 Pisoteo del ganado 271
 Pista de pata de vaca 240
 Pizarra 25
 Pizarrosidad 25
 Plagas 441, 447
 Planes de ordenamiento territorial departamentales 480
 Planes de ordenamiento territorial municipales 481
 Plano 33
Planosoles 516, 517
Planossolos 517
 Plantas tolerantes a la acidez 362
Plasmodium 53
 Plasticidad 63, 140, 174, 246, 462
 Plato de porcelana 194
 Platos de presión 219, 221, 223
 Pleistoceno 71
Plinthosoles 516, 517
 Plintita 502
Plintossolos 517
 Pluvial 87
 Población microbiana 109, 277

- Poblaciones de lombrices 387
Podzoles 516, 517
 Podzolización 59, 88
Podzols 517
Podzoluvisoles 516, 517
 Porcentaje de sodio intercambiable (PSI) 331, 364, 364, 365, 496
 Pórfitos 22
 Poros 192, 224
 clasificación por tamaño 192
 Porosidad del suelo 101, 160, 190, 191, 193, 194, 196, 204, 264, 267, 268, 272, 277, 280, 283, 284, 285, 287, 289, 365, 383, 386, 417, 440, 459, 555
 calificación 195
 determinación 192
 distribución de la porosidad 195, 196
 interpretación 195, 197
 porosidad estructural 192
 porosidad textural 192
 Porosímetro de mercurio 193
 Potasio 360, 369, 582
 contenido 559, 563, 564
 Potencial de humedecimiento (Ψ_w) 207, 208, 216
 Potencial de presión de aire o neumático (Ψ_a) 207, 209, 214, 215
 Potencial de presión hidrostática (Ψ_p) 207, 209, 213
 Potencial de presión tensiométrica (Ψ_{tm}) 207, 219
 Potencial de sobrecarga (Ψ_b) 207, 208, 213, 216
 Potencial gravitacional (Ψ_g) 207, 209, 213
 Potencial mátrico (Ψ_m) 207, 208, 209, 215
 Potencial osmótico (Ψ_o) 207, 210, 214, 364
 Potencial total del agua del suelo (Ψ_t) 206, 211, 219, 220
 para suelo no saturado 210
 para suelo saturado 210
 Potenciómetro 346
 Precipitación 11, 17, 87, 355, 363, 423, 501
 promedia anual 278
 Predadores 47, 55, 383, 384
 Prensa hidráulica 243, 245
 Problemas fitosanitarios 387
 Problemas ocasionados por la mala labranza 263
 Procariontes 46
 Procesos pedogenéticos 11, 83
 específicos 84
 de adiciones 84
 de pérdidas 87
 de transformaciones 84
 de translocaciones 85
 globales 83
 adiciones 83, 84
 pérdidas 12, 83, 84
 transformaciones 12, 56, 62, 83, 84
 translocaciones 56, 83, 84
 Producción de biomasa 386
 por meso y macroorganismos 57
 Profundidad efectiva 140
 Promedio 556
 Propágulo 404
 Propiedades ándicas 332, 424, 494, 502, 589
 Propiedades físicas del suelo 272, 277, 280, 283, 358, 447, 555
 Propiedades modales 525
 Propiedades vérticas 18, 86, 502, 591
 Protones 303, 345
 Protozoarios 48, 52, 392, 394, 406
 Provincia fisiográfica 523
 Proyectos de riego 481
 Pseudoagregados 99, 101
Pseudomonas 50, 56, 389, 396
 Pseudopiramidal 103
 Pulverización 269
 Pumita 21
 Punto de carga cero (PCC) 310, 314, 322
 Punto de carga neta cero (PCNC) 311
 Punto de cero efecto de sales (PCES) 311
 Punto de deterción 238
 Punto de marchitez permanente 212, 216
 Pureza (ver Chroma) 121, 122, 124

 Quelatación 88
 Quemas 283, 403
 Química de suelos 299
 Quitina 387, 388

 Radicales iónicos 308
 Radio cristalográfico del ión 320, 321
 Radio iónico 306, 309
 hidratado 320, 321, 337
 Radiolarita 24
 Rango 556, 561, 563, 566, 567
 corto 563, 564, 566
 largo 563, 564
 Rastra de discos 261
 Rastra pesada 259
 Rastrillada 258
 Rastrillo pulidor 260
 Rastrillo de disco 261
 Rastrojo 278
 Reacción del suelo 345
 ácida 358
 alcalina 584
 Régimen de humedad del suelo 138, 494, 500
 ácuico 85, 120, 421, 577, 580, 582, 583, 585, 586
 arídico 501, 583
 perácuico 501
 perídico 501, 582
 údico 501, 505, 577, 579, 580, 582, 583, 586

- ústico 501, 507, 580, 582, 583, 585, 586
- Xérico 501
- Régimen de temperatura del suelo 138, 494, 498, 499, 509
 - Isofrígeo 499, 500
 - Isohipertérmico 499, 500, 577, 580, 581, 582, 583, 585, 586
 - Isomegatérmico 500
 - Isomésico 499, 500
 - Isotérmico 499, 500
- Región Andina 13, 15, 16, 21, 25, 26, 36, 575, 578, 589
- Región Caribe 25, 26, 36, 366, 587, 589, 591
- Regiones áridas 363
- Regiones naturales 523
 - Regiones naturales de Colombia 575, 576
 - Regiones semiáridas 363
 - Regiones tropicales 312
 - Regosoles* 516, 517
 - Regossolo* 517
 - Relación C/N 53, 62, 420, 435, 436, 437, 438, 443, 450, 454
 - Relación Fisiografía – Suelos 523, 525, 527
 - Relación paisaje – suelo 523
 - Relación R/S 393, 394
 - Relieve 65, 66, 524
 - de acumulación 66
 - denudativo o erosional 66
 - depositacional 66
 - estructural 65
 - Rendzinas* 517
 - Renovación de pastizales 259
 - Renovadora de praderas 260
 - Reptación 272
 - Residuos de cosecha 438
 - Residuos sólidos urbanos 448, 450
 - Residuos vegetales 417, 420, 437, 442
 - Resilicación 87
 - Resistencia a la penetración 242, 268, 271, 272, 287
 - interpretación 251
 - Resistencia a la ruptura 242, 243, 245
 - Respiración de la planta 276
 - Respiración de la raíz 392
 - Retención de fosfatos 334
 - Retención de la humedad del suelo 63, 205, 211, 441, 443
 - determinación en campo 219
 - determinación en laboratorio 219
 - Retención de silicatos 334
 - Retención de sulfatos 334
 - Revisión de literatura 482
 - Rhizobium*** 50, 397, 399, 400, 403, 404, 408, 409
 - Rhizoctonia*** 51, 401, 402
 - Riego 218, 219, 221, 224, 240, 241, 272, 281, 282, 286, 337, 364, 367, 463, 464, 501
 - efectos nocivos 275
 - localizado 274
 - por goteo 274
 - por aspersión 224, 273, 286
 - superficial 224, 272
 - en surcos 190, 272
 - Riolita 21, 22, 23
 - Rizoplano 391, 393
 - Rizosfera 48, 388, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 403
 - RNA 46
 - ribosómico 46
 - Roca de sal 24
 - Roca fosfórica 360, 401, 442
 - Rocas ígneas 19, 20, 27, 577, 578, 580, 582, 584, 586
 - clasificación simplificada de campo 23
 - extrusivas, efusivas o volcánicas 21, 27
 - félscicas, graníticas o ácidas 23
 - hipoabiales 21
 - intermedias o andesíticas 23
 - intrusivas o plutónicas 21, 27
 - máficas, basálticas o básicas 23
 - piroclásticas 21
 - clasificación 22
 - ultramáficas o ultrabásicas 23
 - Rocas metamórficas 19, 20, 25, 27, 107, 577, 578, 580, 584
 - clasificación 25
 - Rocas sedimentarias 19, 20, 24, 27, 107, 577, 578, 580, 581, 582, 583, 584, 585, 586
 - clásticas 24
 - clasificación 24
 - no clásticas 24
 - clasificación 24
 - orgánicas 24
 - químicas 24
 - Rotación de cultivos 283, 284, 394
 - Rotavator o arado rotatorio 258, 260
 - Rubefacción 85, 88
 - Rubificación 85
 - Russula*** 401
 - Sabana 60
 - nativa 271, 280, 306
 - natural 278
 - Sabana de Bogotá 59, 268, 288, 357, 385, 397, 429, 480, 511, 529, 555, 556
 - Sales 101, 266, 275, 363, 364, 365, 366, 449, 497, 585, 589
 - contenido 364
 - Salinidad 403, 481, 526, 589
 - Salinización 85
 - Saprolito 19, 37, 39, 41, 45, 130, 393
 - Sapróvoros 47, 384
 - Sarcodina 52

- Saturación con agua 69, 160, 239
 Saturación con aluminio intercambiable 331, 359, 360, 361
 Saturación con magnesio intercambiable 365, 366
 Saturación de bases 331, 462, 496, 579, 582
Sclerocystis 402
Scleroderma 401
Scutellospora 402
Scytonema 398
 Secreciones 392, 393
 Sedentarios 55
 Sedimentos no consolidados 19, 20, 26, 27, 107, 130
 aluviales 28, 577, 578, 580, 582, 583, 584, 585, 586
 coluviales 28
 coralinos 586
 eólicos 28, 580, 584
 glaciales 578
 lacustres 28, 40, 578, 582, 583, 585
 marinos 28, 582, 584, 586
 torrenciales 28
 Selenio 43
 Sellamiento superficial 224, 269, 439, 441
 Selva andina 60
 Selva basal 60
 Semivarianza 560, 561, 562
 Semivariograma 557, 560, 561, 562, 563, 564, 564, 566
 anisotrópico 564, 565
 isotrópico 564, 565
 no transicional 561
 transicional 561
 Sensores remotos 482
 Separados del suelo 165
 clasificación 165
 propiedades 172
 de la arcilla 173
 de la arena 172
 del limo 173
 Sequum o secuencias de horizontes o capas 137
 Serie 503, 510, 515, 533, 534
 Serie liotrópica 333, 334
 Series de alteración 31
 Serpentinita 25, 44
 Sesquióxidos de hierro y aluminio 36, 311, 330, 332, 358, 362, 517
 contenido 120, 322
 Setas 51
 Sienita 23
 Sierra de la Macarena 578
 Sierra Nevada de Santa Marta 578
 Sílex (Chert) 24
 Silicatos primarios 28, 332
 grupos 29
 Sílice 17, 87, 88, 241, 497
 Silicificación 87
 Sill 562, 563
 Símbolo cartográfico 531
 Simuladores de lluvia 109
 Síntesis 87, 95
 Sistema de clasificación científico (natural) 490
 Sistema brasileros de clasificación de suelos 517
 Sistema FAO/UNESO de clasificación de suelos 515
 Sistema de clasificación Técnico (práctico) 490
 Sistema de drenaje 367, 368
 Sistema Taxonómico Norteamericano o del USDA de clasificación de suelos 490
 Sistemas de pastoreo 270
 Sistemas de riego 272, 366
 Sobremecanización 283
 Sobrepastoreo 270, 283
 Sodio intercambiable 107, 108, 275, 365, 585, 589
 Solifluxión 272
Solonchaks 516, 517
Solonetz solodizados 517
Solonetzs 516, 517
Solos aluviais 517
Solos Brunos não-Cálcicos 517
Solos litólicos 517
Solos orgánicos 517
Solos podzólicos 517
Solos salinos 517
 Soluciones 304
 binarias 304
 concentración 305
 del suelo 214, 313, 335, 337, 349, 363
 externa 335, 349
 Solum 44, 45, 73, 129, 525
 Soluto 304, 305
 Solvatación 306
 Solvente 304, 305
 Sorosilicatos 29
Sphagnum 460
 Sporozoa 53
Streptomyces 56, 388
 Subdivisiones verticales 135
 Subgrupo 467, 503, 512, 514, 516
 Submuestras 566
 Subniveles de energía 307
 Suborden 467, 503, 512, 515
 Subpaisaje 524
 Subsidencia 463, 464
 Subsolada 258, 367
 Subsolador 258, 262
 Subunidades de suelos 516
 Suelo v, vi, vii, 45, 492
 ácido 101, 321, 324, 351, 354, 362, 399, 452, 577, 581
 clasificación taxonómica 362
 formación 355
 grupos 357
 minerales con pH < 4.5 357

- minerales con pH entre 4.5 y 5.5
357
- minerales con pH entre 5.5 y 6.5
357
- manejo de los suelos ácidos minerales
359
- propiedades 357
- alcalino 324, 326, 452
- básico 351, 363
 - clasificación taxonómica 369
 - formación 363
 - grupos 364
 - manejo 366
 - propiedades 364
- calcáreo 366, 370, 582, 584
- cementado 113
- compactado 284
- con carga permanente 309, 324
- con carga variable 314
- con pH < 5.5 360
- con pH entre 5.5 y 6.5 359
- decapitado 69, 130
- desnudo 277, 278
- disímil 532
- distrófico 331
- enterrado 69, 136, 421, 492
- expansivo 207, 208, 213, 216
- franco 170
- magnésico 365, 366, 370
- micorrílico 404
- mineral 492, 508, 509
- neutro 351
- no expansivo 213
- rizosférico 391
- orgánico 249, 347, 358, 418, 461, 463, 465, 467, 508, 509
- salino 326, 364, 366, 370, 569, 582
- salino-sódico 336, 365, 368
- saturado 205, 209, 226
- seco 237, 500
 - al horno 216
 - cohesivo 237
 - no cohesivo 237
- sódico 287, 326, 331, 364, 367, 370, 582, 584
- superficial 69
- tropical 35, 36, 362
- Sulfatos 30, 314, 332, 355, 364, 365, 464
- Sulfuros 30, 496
- Superficie específica 45, 63, 288, 308, 319, 320
 - externa 320
 - interna 320
- Susceptibilidad del suelo a la erosión 108, 113, 175, 269, 280, 591
- Sustancia iónica 303, 307
- Sustitución isomórfica 33, 34, 35, 37, 309
- Tabla de colores Munsell 121, 122
- Tamaño de las unidades experimentales 567
- Tamaño de los iones hidratados 333
- Tamaño de los poros y raíces del suelo 142, 208
- Tamaño de partículas 508
- Tamizado en húmedo 109
- Tasa de respiración del suelo 390
- Taxadjunto 533, 534
- Techo de separación intercategórica 491
- Tectosilicatos 29, 38
- Temperatura 11, 17, 403, 420
- Temperatura del suelo 192, 387, 500
- Temperatura estabilizada del suelo 498, 499
- Tensiómetros 219
 - de mercurio 215, 220
 - con vacuómetro 220, 221
- Termitas 54, 383, 386
- Terracetas 272
- Terras Roxas y Terras Brunas* 517
- Tetraedro de sílice 28, 29, 33, 309
- Textura del suelo 24, 99, 101, 158, 165, 192, 203, 208, 220, 229, 262, 281, 496, 508, 555
 - determinación 166
 - al tacto 172
 - limitaciones 174
 - método del hidrómetro o de Bouyoucos 166, 167
 - limitaciones 172,
 - fina 166, 224
 - gruesa 166
 - pesada 267
- Textura de roca 20, 39
 - afanítica 21
 - fanerítica o granular 21
 - porfídica 22
 - vítrea 21
- Thiobacillus* 49, 56, 388, 389
- Tiempo 71
- Tiempo geológico 72
 - en el cuaternario 73
- Tierra fina 165, 508
- Tipos de RNA 46
- Titulaciones potenciométricas 310
- Toba 22
- Tolerancia de las plantas a la salinidad 369
- Tolerancia de las plantas al PSI 369
- Tolima 400, 437
- Topografía de los límites entre horizontes o capas del suelo 142
- Toxicidad con aluminio 331, 357, 360, 362
- Toxicidad con manganeso 357, 362
- Trabajo de campo 482, 483, 484
- Triángulo textural 168, 170
- Triazina 387
- Trichoderma* 51, 387, 388, 393

- Turba 459, 460
 clasificación 460
 de madera 460
 de musgo 460
 herbácea 460
 mucky 460
 sedimentaria 460
- Turberas 459
 clasificación ecológica 460
- Údico 501
- Ulothrix* 52
- Ultisoles* 73, 85, 86, 87, 107, 114, 278, 311, 331, 333, 351, 355, 358, 362, 387, 388, 452, 505, 508, 514, 580, 583
- Ultrasonido 429
- Unidad cartográfica o de mapeo 480, 481, 526, 531, 532, 533, 534, 542, 543, 547, 587
 monotáxica 531, 532
 polítáxica 531
- Unidad climática 524
- Unidad de suelo 516
- Unidades (categorías) taxonómicas 503, 531, 533, 547
 básicas 533
 funcionales 533
- Unidades de tierra 586, 587
- Unidades estructurales 95, 99
- Unidades fisiográficas 483
- Unidades formadoras de colonia (UFC) 393
- Urea 355
- USDA 489
- Uso de la tierra 277, 280, 383, 384, 524, 587
- Uso potencial del suelo 543
- Valencia 303
- Valle del Cauca o Valle del río Cauca 26, 36, 326, 333, 365, 366, 370, 402, 418, 480, 575, 585, 587, 589, 591
- Valle del Magdalena 26, 36, 501, 589
- Value 119, 121, 122, 124, 494, 495, 496
- Variabilidad aleatoria 553, 554
- Variabilidad espacial 527, 556, 558, 562, 564, 566, 567, 568
- Variabilidad espacial del suelo 557, 560
 de rango corto 559
- Variabilidad sistemática 553, 556
- Variabilidad temporal 556
- Variables anisotrópicas 567
- Variables isotrópicas 567
- Variables regionalizadas 557
- Variación estacional del pH del suelo 350
- Varianza 554, 556
- Varianza acumulada 559
- Variante 533, 534
- Variograma 558, 559, 563
- Variscita 388
- Vegetación 58
- Vegetación natural o nativa 383, 384, 524
 caracterización 60, 277
- Vermiculita 35, 38, 320, 322, 329
- Verticilum* 387
- Vertiente 66
 forma 67, 69
 gradiente 67, 68
 longitud 67, 68
 orientación 68
- Vertisoles* 86, 95, 103, 108, 190, 204, 241, 309, 366, 370, 388, 505, 514, 516, 582, 585
- Vertissolos* 517
- Vertización 86
- Vida media 58, 59
- Vidrio volcánico 21, 31, 579
- Viento 11
- Vocación agrícola 587
- Vocación forestal 587
- Vocación ganadera 587
- Vocal de enlace 504
- Volatilización 277, 437
- Vorticella* 53
- W 129
- Yoso 24, 30, 241, 497
- Zona andina 479
- Zona de vida 13
- Zona difusa 336
- Zonas de ladera 261
- Zonas morfoclimáticas 66