

PROPIEDADES MORFOLOGICAS, FISICAS Y QUIMICAS, Y
CLASIFICACION DE SEIS ANDOSILES DE COSTA RICA

Tesis de Grado de Magister Scientiae

Carlos Luzuriaga T.

INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS DE LA OEA

Centro de Enseñanza e Investigación

Turrialba, Costa Rica

Abril, 1970

PROPIEDADES MORFOLOGICAS, FISICAS Y QUIMICAS, Y
CLASIFICACION DE SEIS ANDOSOLES DE COSTA RICA

Tesis

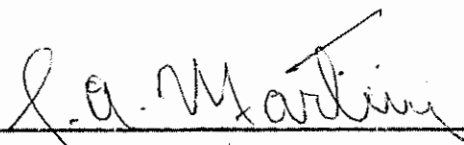
Presentada al Consejo de la Escuela para Graduados
como requisito parcial para optar al grado de

Magister Scientiae

en el


Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA

APROBADA:




J. A. Martini, Ph.D.

Consejero



E. Knox, Ph.D.

Comité



F. Maldonado, M.S.

Comité



Adalberto Gorbitz, Ing.Agr.

Comité

Abril, 1970

iii

A la memoria de mis padres

A mi esposa, Yolanda

A mi hija, Sandra

v

A los Dres.

Héctor Velástegui L. y

Gloria S. de Velástegui

AGRADECIMIENTO

El autor expresa su agradecimiento a las siguientes personas e instituciones:

Al Dr. J. A. Martini, Consejero Principal, quien, con sus amplios conocimientos y su abnegada dedicación, me ha guiado en el desarrollo del presente estudio.

Al Dr. Ellis Knox por el asesoramiento en todas las fases del trabajo, especialmente en la clasificación de los suelos.

Al Ing. Fausto Maldonado por su inestimable colaboración y generosa ayuda en el trabajo.

Al Ing. Adalberto Gorbitz por su constante ayuda y acertadas sugerencias.

A los Drs. H. W. Fassbender, Warner Forsythe e Ing. Raúl Fuentes por sus orientaciones.

Al Centro de Enseñanza e Investigación del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA y al Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador por su colaboración económica.

A mis profesores, compañeros y amigos que en una u otra forma cooperaron para que este estudio llegue a ser una realidad.

BIOGRAFIA

El autor nació en la ciudad de Ambato, Ecuador, el 23 de octubre de 1942.

En 1961 ingresó a la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Central del Ecuador, donde obtuvo el título de Ingeniero Agrónomo en abril de 1967.

Desde 1964 viene prestando sus servicios en el Departamento de Suelos del Ministerio de Agricultura y Ganadería (Ecuador).

En septiembre de 1968 ingresó al Centro de Enseñanza e Investigación del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA, para realizar estudios de posgrado en la disciplina de Fitotecnia y Suelos, terminando en abril de 1970.

CONTENIDO

	<u>Página</u>
LISTA DE CUADROS	xi
1. INTRODUCCION	1
2. REVISION DE LITERATURA	3
2.1. Definición de los Andosoles	3
2.2. Distribución geográfica	5
2.3. Características principales	6
2.3.1. Características genéticas	6
2.3.2. Características morfológicas	11
2.3.3. Características petrológicas	16
2.3.4. Características mineralógicas	17
2.3.5. Características físicas	22
2.3.6. Características químicas	24
2.3.7. Características microbiológicas	30
2.3.8. Características de fertilidad	31
2.4. Andosoles en Costa Rica	36
3. MATERIALES Y METODOS	39
3.1. Trabajo de campo	39
3.1.1. Localización y criterios para la ubica- ción de los perfiles	39
3.1.2. Método para la descripción de perfiles ..	41
3.1.3. Extracción de muestras por horizontes ...	42
3.2. Trabajo de laboratorio	42
3.2.1. Preparación de muestras	42
3.2.2. Determinaciones físicas	43
3.2.2.1. Humedad en suelos secados al aire	43
3.2.2.2. Densidad aparente	43
3.2.2.3. Densidad de partículas	43
3.2.2.4. Retención de humedad	44
3.2.2.5. Análisis granulométrico	44
3.2.2.6. Determinación del color	44
3.2.2.7. Coeficiente lineal de contrac- ción	45

	<u>Página</u>
3.2.3. Determinaciones químicas	45
3.2.3.1. Reacción del suelo (pH)	45
3.2.3.2. Materia orgánica (MO)	46
3.2.3.3. Nitrógeno total	46
3.2.3.4. Capacidad de intercambio de ca- tiones	46
3.2.3.5. Determinación de bases cambia- bles	47
3.2.3.6. Aluminio extraíble	47
3.2.3.7. Fósforo disponible	47
3.2.3.8. Determinación de alofana y óxi- dos libres de hierro	48
3.2.3.9. Potasio y hierro totales	49
3.2.3.10. Calcio y magnesio totales	49
4. RESULTADOS Y DISCUSION	51
4.1. Perfil 1 (CR-57)	51
4.1.1. Información del sitio	51
4.1.2. Descripción general del perfil	52
4.1.3. Descripción individual de los horizontes.	52
4.1.4. Propiedades físicas y químicas	54
4.1.5. Discusión	54
4.2. Perfil 2 (CR-65)	62
4.2.1. Información del sitio	62
4.2.2. Descripción general del perfil	63
4.2.3. Descripción individual de los horizontes.	63
4.2.4. Propiedades físicas y químicas	65
4.2.5. Discusión	65
4.3. Perfil 3 (CR-35)	73
4.3.1. Información del sitio	73
4.3.2. Descripción general del perfil	74
4.3.3. Descripción individual de los horizontes.	75
4.3.4. Propiedades físicas y químicas	77
4.3.5. Discusión	77
4.4. Perfil 4 (CR-56) Serie Birrisito	85
4.4.1. Información del sitio	85
4.4.2. Descripción general del perfil	86
4.4.3. Descripción individual de los horizontes.	86
4.4.4. Propiedades físicas y químicas	88
4.4.5. Discusión	88

	<u>Página</u>
4.5. Perfil 5 (CR-30) Serie Cervantes	95
4.5.1. Información del sitio	95
4.5.2. Descripción general del perfil	96
4.5.3. Descripción individual de los horizontes.	96
4.5.4. Propiedades físicas y químicas	98
4.5.5. Discusión	98
4.6. Perfil 6 (CR-67)	104
4.6.1. Información del sitio	104
4.6.2. Descripción general del perfil	105
4.6.3. Descripción individual de los horizontes.	106
4.6.4. Propiedades físicas y químicas	107
4.6.5. Discusión	107
4.7. Clasificación de los perfiles estudiados	113
5. DISCUSION POR DETERMINACIONES	119
5.1. Características morfológicas	119
5.2. Características físicas	122
5.3. Características químicas	128
6. CONCLUSIONES	137
7. RESUMEN	145
8. SUMMARY	148
LITERATURA CITADA	151

LISTA DE CUADROS

Cuadro N ^o		<u>Página</u>
1	Características físicas del perfil 1 (CR-57) .	55
2	Características químicas y análisis elemental perfil 1 (CR-57)	56
3	Características físicas del perfil 2 (CR-65) .	66
4	Características químicas y análisis elemental del perfil 2 (CR-65)	67
5	Características físicas del perfil 3 (CR-35) .	78
6	Características físicas del perfil 3 (CR-35) .	79
7	Características químicas y análisis elemental del perfil 3 (CR-35)	80
8	Características físicas del perfil 4 (CR-56) .	89
9	Características químicas y análisis elemental del perfil 4 (CR-56)	90
10	Características físicas del perfil 5 (CR-30)	99
11	Características químicas y análisis elemental del perfil 5 (CR-30)	100
12	Características físicas del perfil 6 (CR-67) .	108
13	Características químicas y análisis elemental del perfil 6 (CR-67)	109
14	Porcentaje de la fracción arcilla (análisis me cánico)	125
15	Porcentaje de la fracción limo (análisis mecá nico)	125
16	Densidad aparente (gr/cc)	126
17.	Densidad de partículas (gr/cc)	126

Cuadro N ^o		<u>Página</u>
18	Porcentaje de retención de humedad (0,01 bar).	127
19	Porcentaje de retención de humedad (15 bares).	127
20	Porcentaje de materia orgánica	134
21	Porcentaje de nitrógeno total	134

1. INTRODUCCION

Si observamos el mapa de la distribución de volcanes en el mundo, podemos ver que la mayor concentración de volcanes extinguidos y activos, se encuentran en el Japón, Indonesia, Africa, Hawaii, Alaska, América Central, América del Sur, Italia y el Mar Mediterráneo. Esto, controla así mismo, la distribución de suelos derivados de cenizas volcánicas. El sistema orográfico del Istmo Centroamericano, y por lo tanto de Costa Rica, presenta una larga cadena de volcanes cuyas continuas erupciones han depositado cantidades considerables de materiales piroclásticos, haciendo posible la formación y desarrollo de Andosoles.

Los Andosoles de Costa Rica son de gran importancia agropecuaria ya que en ellos se producen una serie de cultivos, entre los que se destacan los cultivos hortícolas e industriales como el café, caña de azúcar, algodón, banano, tabaco, patatas y pastos mejorados para la ganadería de leche, que constituye la base de la economía de dicho país.

Por los antecedentes señalados, es evidente que los suelos de cenizas volcánicas tienen un gran potencial agrícola. De ahí la necesidad urgente de conocer sus propiedades morfológicas, físicas y químicas, que permita una clasificación, manejo y uso inteligente para evitar la erosión y el deterioro de la productividad de estos suelos.

A pesar del progreso agropecuario alcanzado y de los estudios realizados en los Andosoles, quedan todavía muchos vacíos, que deberán ser llenados muy pronto dada la gran demanda de información que

pueda servir como punto de partida para cualquier programa de desarrollo agropecuario.

Una gran ventaja es que, en vista de que las propiedades de estos suelos son bastante uniformes, la información que se obtiene puede ser extrapolada con una confiabilidad relativamente alta, de un lugar a otro.

Los objetivos principales del presente trabajo fueron los de caracterizar el mayor número de propiedades de seis Andosoles de Costa Rica; establecer el grado de variación de las propiedades y hacer comparaciones entre éstas y las propiedades de otros suelos similares de diferentes regiones; clasificar estos suelos de acuerdo con el sistema norteamericano de clasificación de suelos, 7a. Aproximación (98); y establecer tentativamente la fertilidad y productividad de estos suelos con base en las propiedades morfológicas, físicas y químicas estudiadas.

2. REVISION DE LITERATURA

Los suelos derivados de cenizas volcánicas se presentan en una gran variedad de condiciones climáticas que van desde desérticas hasta húmedas y per-húmedas con temperaturas que oscilan de frías a templadas y a tropicales (27, 92, 102). Sin embargo, en la presente revisión de literatura se destacará principalmente la información sobre suelos de regiones con clima templado-fríos húmedos, donde predominan los Andosoles.

2.1. Definición de los Andosoles

El nombre "Andosol" es comparativamente reciente (64) y tiene aceptación mundial provisional. Se deriva del idioma Japonés, y quiere decir suelo oscuro ("an" - oscuro y "do" - suelo). Casi todos los suelos derivados de cenizas volcánicas de América, están dentro del grupo que Thorp y Smith (92) llamaron "suelos Ando", y corresponden a los "Andepts" en el último sistema de clasificación del USDA (98). De todos éstos, el nombre más comúnmente utilizado es el de "Andosol", escogido también durante la reunión sobre "Clasificación y correlación de suelos derivados de cenizas volcánicas", auspiciado por FAO-UNESCO en Tokyo, Japón en 1964 (70).

Debemos tener en cuenta que los suelos derivados de cenizas volcánicas han recibido muchos nombres según el país o el sistema de clasificación utilizado. Al respecto, Dudal (27) y Martini (67) advierten que todos estos nombres representan suelos similares con muchas propiedades en común; sin embargo, el peligro estriba en que

diferentes nombres tienen diferentes definiciones y límites que producen un margen de error considerable al hacer comparaciones.

En el presente trabajo se tendrá en cuenta como marco de referencia la definición establecida durante la reunión sobre Clasificación y Correlación de los suelos derivados de Cenizas Volcánicas en Tokio, Japón, 1964 (70) que dice: "Los Andosoles han sido definidos como suelos minerales en que la fracción activa está dominada por materiales amorfos (mínimo (50%). Estos suelos tienen una alta capacidad de retención de agua, un horizonte A oscuro, friable, relativamente grueso; poseen un contenido alto de materia orgánica, una densidad aparente baja y poca pegajosidad. Pueden tener un horizonte B sin mostrar cantidades significativas de arcilla iluvial; existen en condiciones climáticas húmedas y subhúmedas".

Según Flach (34) la 7a. Aproximación agrupa a ciertos suelos derivados de cenizas volcánicas en el suborden "Andept" si son bien drenados (como en los suelos objeto de nuestro estudio) y en el grupo Andaquept si son hidromórficos. Pero estos suelos no han sido incluidos en estas clases principalmente por el origen del material de partida, sino por tener en común muchas propiedades únicas y por la acentuada influencia de las cenizas volcánicas sobre su génesis.

Según la 7a. Aproximación (98) los Andepts son Inceptisoles que; a) tienen en la fracción fina del suelo una densidad aparente menor de 0,85 g/ml en el epipedon, en el horizonte cámbico o en ambos, y el complejo de cambio está dominado por materiales amorfos; o más del 60% son cenizas volcánicas vítreas, escoria volcánica, u

otros materiales piroclásticos vítreos en las fracciones limo, arena o grava; b) no se saturan con agua en ninguna estación, o carecen de las características asociadas con la humedad para los Aquepts; c) carecen de epipedon "Plaggen".

2.2. Distribución geográfica

Como el material originario de estos suelos, proviene de la actividad volcánica, será conveniente considerar la distribución de los volcanes en el mundo.

Como se anotó anteriormente, en el mapa de distribución de los volcanes en el mundo (71), se puede observar que la mayor concentración de volcanes extinguidos o activos y recientes, se encuentra en el Japón, Indonesia, Africa, Hawaii, Alaska, América Central y del Sur, Italia y el Mar Mediterráneo.

La mayor parte del Japón está formado por suelos de cenizas volcánicas, lo mismo Indonesia. En Africa aparecen en la parte sur-oriental. En América del Sur se observa especialmente en Chile, Ecuador, Colombia, y a lo largo de América Central, en el Oeste de los Estados Unidos y Alaska (20).

De acuerdo con Thornbury (91) estas regiones volcánicas comprenden el llamado Anillo de Fuego o faja circumpacífica, en donde encontramos la gran cadena volcánica del Istmo Centroamericano y las áreas dispersas del Pacífico que incluyen las islas Hawaii, el cinturón del océano Indico incluyendo Java y Sumatra hasta Nueva Zelanda.

Con fines de correlación de estos suelos con la latitud, Wright (102) designó como Andosoles de altas latitudes a los suelos del Japón y Estados Unidos con climas templado, marítimo y mediterráneo, y de bajas latitudes a los suelos del Africa, Indonesia, Centro América, Colombia, Ecuador, con clima ecuatorial.

El mismo autor (102) agrega que también se encuentran grandes áreas de suelos derivados de cenizas volcánicas en los desiertos y regiones semi-áridas; pero en condiciones de baja humedad, los suelos no desarrollan las características especiales de los Andosoles.

2.3. Características principales

2.3.1. Características genéticas

Takehara, citado por Palencia (48), dice que la formación y desarrollo de estos suelos se produce por efecto de un proceso de formación alítica, pues la relación sílice/alúmina encontrada es mucho más baja que la de los suelos no derivados de cenizas volcánicas y el contenido de alúmina libre es alto. El mecanismo de dicho proceso de meteorización es resumido por el mismo autor en la siguiente forma:

- a) Las cenizas nuevas se muestran a menudo fuertemente ácidas debido a que contienen compuestos ácidos, pero como la lluvia lixivía rápidamente estos compuestos, inmediatamente se tornan casi neutras.
- b) Como la meteorización es muy rápida en una masa pulverulenta con gran área superficial, al principio se libera gran

cantidad de bases y la capa de suelo muestra reacción básica.

- c) Las bases son lavadas rápidamente debido al clima muy húmedo, pero como en el estado inicial de meteorización hay geles de sílice y alúmina, la lixiviación de los silicatos se efectúa bajo reacción básica.
- d) Al principio la sílice y la alúmina se combinan débilmente y más tarde se produce la formación gradual de la alofana; y
- e) Conforme sigue la meteorización, la alofana se cristaliza gradualmente para producir haloisita hidratada o gibsita.

Martini (67) dice que en la génesis de los suelos volcánicos se observa en primer lugar la formación de regosoles con perfiles AC, poco profundos. Los cambios principales que han ocurrido hasta aquí son: lixiviación de bases y sílice, formación de alofanas, acumulación de materia orgánica y formación de una estructura granular fuerte y fina. Luego aparecen los Andosoles con perfiles A(B)C, en cuyo caso el B representa un horizonte cámbico o un B de color que más adelante adquiere espesor y se divide en B_{21} y B_{22} , con base en diferencias de estructura. Los perfiles adquieren espesor tanto de bido a la alteración del sustrato como a la deposición de nuevas ce nizas que se transforman para formar horizontes A. Como una consecuencia de esto, los horizontes A existentes adquieren espesor y se dividen en A_{11} y A_{12} , A_{31} y A_{32} con base en el contenido de materia orgánica, color, estructura y raíces. Aparentemente los horizontes

A, más profundos se transforman en B, debido a la descomposición de la materia orgánica y alteraciones posteriores de la CIC, color y estructura.

Besoain (7) anota que las cenizas volcánicas eluden el proceso de meteorización física que deben experimentar otros materiales parentales y son, en tal sentido, altamente eficaces para meteorizarse. Tales factores, unidos a la inestabilidad química de los vidrios volcánicos, determinan una susceptibilidad muy alta a la meteorización, esto es, el ataque químico de los líquidos que penetran en las capas de cenizas, promoviendo una rápida remoción de los productos solubles en adecuadas condiciones de drenaje. Naturalmente en sitios más próximos a los volcanes activos, este fenómeno se ve parcialmente atenuado debido a que hay un suplemento continuo de cenizas frescas, o como lo expresa Kanno "un suministro continuo de bases" (50).

La meteorización del vidrio volcánico, componente de las cenizas, tiende a producir productos amorfos entre los primeros productos de meteorización, siendo su grado de formación directamente influido por varios factores, como la calidad de los vidrios (ácidos, neutros, básicos), el régimen de temperatura y humedad existente, pendiente, drenaje, etc.

En cuanto a la génesis de la fracción orgánica, Martini (67) anota que el contenido de humus aumenta y luego disminuye con la meteorización de las cenizas y la evolución de los suelos. En los Regosoles volcánicos ligeramente meteorizados, con poca alofana, el

contenido de humus es relativamente bajo; en los Andosoles moderadamente meteorizados y con alofana abundante, el nivel del humus es máximo; en los suelos volcánicos viejos, con poca alofana y valores altos en minerales de arcilla, particularmente caolinita, el contenido de humus se reduce considerablemente. Kobo (52) sugiere que debido a la transformación de la alofana a caolinita, el humus fijado en el complejo orgánico-mineral es liberado y expuesto a los procesos de descomposición. El grado de humificación de la materia orgánica también aumenta y la relación carbono/nitrógeno disminuye a medida que se meteorizan las cenizas.

Birrell (8) dice que con la meteorización, la relación de ácidos húmico/fúlvico, aumenta en el suelo superficial. Esto debe favorecer la formación de Andosoles con mucho aluminio, ya que los ácidos fúlvicos facilitan la lixiviación de aluminio en lugar de la del hierro (8).

La relación entre ácidos orgánicos es muy importante, en Indonesia se ha utilizado como criterio muy útil para la clasificación (89).

Según Martini (67) la evolución de la fracción mineral comprende de los procesos de mayor importancia en la formación de los suelos volcánicos y es responsable de las propiedades más características de estos suelos.

En relación a la evolución de los vidrios volcánicos y la alofana, Martini (67) anota, que parece haber un consenso de opiniones en cuanto a que el vidrio volcánico se transforma, a través de la

meteorización de los silicatos, en un silicato de aluminio amorfo corrientemente denominado alofana. Esto se observa también con muestras tomadas en América Central.

La naturaleza de la alofana no ha sido establecida claramente, principalmente por la dificultad de separarla químicamente pura. Para Egawa (28) las características encontradas para la alofana, son bastante variables dependiendo este fenómeno de la contaminación con otros minerales, particularmente minerales de arcilla. Aún sí el material fraccionado como alofana es amorfo a los rayos X puede tener contaminación de otros materiales amorfos como ciertos óxidos hidratados de aluminio, hierro y silicio. Estos materiales amorfos pueden considerarse o no como alofana.

El término alofana, no está todavía bien definido; algunos autores consideran que cualquier material amorfo es alofana (67). Swindale (86) considera la alofana como un material amorfo que se distingue por ser un coloide mineral secundario, hidratado, amorfo a los rayos X, con una relación sílice/alúmina de 1 a 3 y con una gran superficie activa. Para Wright (102) la alofana es amorfa, sin ningún patrón estructural reconocible con rayos X. Sin embargo se cree que existe en más de una forma (30) y puede con el tiempo y en condiciones especiales del medio, desarrollar una organización estructural y transformarse en haloisita, montmorillonita, gibsita y caolinita (31). Los Andosoles pueden por lo tanto pasar gradualmente a suelos Pardos Forestales, Grumusoles o Latosoles; y aún más en casi todos los Andosoles, la capa más vieja y más baja generalmen

te muestra el desarrollo de las arcillas con crecientes cantidades de organización estructural - particularmente haloisita. Algunos de estos procesos de transformación tales como la formación de Gibsita, pueden estar activados por la sequía estacional del suelo. En algunos Andosoles de Chile, sujetos a una condición de intenso verano seco, hay agregados claros de gibsita en la parte superior del suelo (7). Los caolines pueden aparecer con la alofana en subsuelos expuestos a condiciones de reducción debido a la subida estacional de un manto freático pobre. La montmorillonita puede aparecer en algunos Andosoles de subsuelos influenciados temporalmente por el agua freática con muchas bases.

Jackson (47) diferenció dos formas de alofana, a una de ellas denominó "Alofana estable" que era solo ligeramente soluble en ácidos y bases diluídas, a otra llamó "Alofana inestable" que era soluble en ácidos y álcalis diluidos (79).

2.3.2. Características morfológicas

Wright (102) al describir los Andosoles de Sur América indica las características principales de estos suelos:

- perfiles de suelos profundos, muy a menudo con clara estratificación, producto de la deposición y normalmente friables en la parte superior;
- Las capas superiores del suelo tienen espesores hasta de un metro y color pardo--oscuro a negro; contienen compuestos

húmicos que son relativamente resistentes a la descomposición microbiana;

- los colores del subsuelo son especialmente pardo amarillo a pardo rojizo y cuando el suelo está húmedo el material es graso al tacto;
- los perfiles son muy livianos y porosos con una densidad aparente baja y una alta capacidad de retención de agua;
- agregación estructural más bien débil, con "peds" porosos que se pueden destruir fácilmente y que carecen de cutanes; no hay diferenciación de horizontes en el subsuelo excepto por la presencia de "duripans" en algunos suelos;
- casi no hay adherencia ni plasticidad en húmedo (excepto en capas estratificadas más viejas y más profundas) pero al secarse completamente las partículas del suelo y los "peds" finos tardan con frecuencia mucho tiempo en remojarse y pueden flotar en la superficie del agua.

Los rasgos señalados anteriormente se aplican generalmente a los suelos de este grupo alrededor del mundo, pero al extender el grupo en áreas tropicales encontramos una o dos diferencias en las características, particularmente en relación al color. Las capas superiores de estos suelos en los trópicos son oscuras pero no tan intensamente, y los colores de los subsuelos pueden ir desde pardo-amarillo hasta rojo oscuro.

Martini (67) refiriéndose a los Andosoles de Centroamérica

dice que éstos son suelos volcánicos maduros. Aún cuando ocurren bajo condiciones climáticas variables, poseen una morfología relativamente uniforme, que refleja en gran parte la influencia de materiales amorfos derivados de vidrios volcánicos presentes en el material parental. La influencia del clima y otros factores pedogenéticos se deja ver más en algunas propiedades químicas y físicas.

Según Martini (67), los perfiles de Andosoles de Centroamérica consisten en una secuencia A(B)C (67, 88), en donde el horizonte A es profundo, mayor de 50 cm y algunas veces mayor de 100 cm; oscuro, variando dentro del horizonte o entre perfiles de 10YR1/1 a 10YR3/2 en húmedo; en seco, el "value" y el "chroma" tienden a aumentar de 1 a 3 unidades, adquiriendo un matiz gris oscuro en lugar de negro. Este fuerte cambio de color en función de la humedad parece ser característico de los Andosoles. La textura es media y puede variar de franco-arenosa a franco, franco-limosa, franco-arcillo-arenosa, franco-arcillosa o franco-arcillo-limosa; la estructura es granular o en bloques subangulares, moderada y fina o muy fina; la consistencia ligeramente plástica y ligeramente pegajosa en mojado y friable o muy friable en húmedo; no hay moteados, concreciones, revestimientos ni piedras y hay abundantes raíces. La alta actividad biológica se nota en el grado de descomposición de la materia orgánica y la presencia de crotovinas, que dan como resultado una mezcla considerable del subsuelo con el suelo.

El horizonte A puede subdividirse en A_{11} y A_{12} o en A_1 y A_3 , según el espesor, color y estructura. Este horizonte corresponde,

en la 7a. Aproximación del sistema de Clasificación del USDA (98), a un epipedon úmbrico, aunque también puede ser mólico o hístico.

El límite entre los horizontes A y (B) es generalmente abrupto, aunque puede ser más gradual en áreas con muy alta precipitación pluvial.

El horizonte (B) es de color claro, pardo amarillento, pardo gris o gris amarillento con valores y cromas de 3 a 6; comúnmente el color varía entre 10YR5/3 y 10YR7/6 en húmedo; en seco los colores también tienden a ser más claros. La textura es media, similar al epipedon; la estructura es de bloques subangulares, débil, fina o media, poco visible en húmedo pero mucho más evidente en seco; la consistencia es ligeramente plástica y ligeramente pegajosa en mojado y friable o firme en húmedo; en mojado da una sensación grasosa o resbalosa y de poseer una gran capacidad de retención de agua que al exprimir el material, el agua sale. No tiene manchas, concreciones ni piedras y hay pocas raíces (67).

Este es en efecto un horizonte diagnóstico de fácil formación que corresponde a un (B) de color o a un horizonte cámbico en la 7a. Aproximación del USDA (98).

Aguilera (3) al referirse a los suelos derivados de cenizas volcánicas de México dice que en dichos suelos los perfiles presentan generalmente los horizontes A-C, A(B)C y A-B-C. Los horizontes A son negros por efectos de materia orgánica o bien por las cenizas volcánicas; si el suelo es más meteorizado, el color es pardo oscuro y los horizontes inferiores de color rojizo claro o amarillentos.

Por las cenizas volcánicas y la relativa rapidez de la meteorización de éstas, las texturas son generalmente de migajones arenosos y limosos, franco arcillosos y francos. La consistencia puede ser firme o friable, la estructura en bloques y en bloques subangulares.

Por la presencia del material mineral arcilloso especial, estos suelos se sienten untuosos y sedosos al tacto.

"Los horizontes (B) y C de algunos perfiles con drenaje impedido presentan moteado por la presencia de óxidos de hierro y manganeso. En los perfiles someros de los conos cineríticos con horizonte A-C, la capa C corresponde a la toba volcánica; ésta presenta moteado muy notable. Cuando el material se litifica es duro por cementación, originando el tepetate" (3).

Según Swindale y Sherman (88) las principales características morfológicas de los suelos derivados de cenizas volcánicas de Hawaii son:

1. El color de los suelos oscurece al aumentar la cantidad de lluvia, aumentando por lo tanto la cantidad de materia orgánica.
2. Las texturas se vuelven más finas según aumenta la lluvia y la temperatura.
3. Las estructuras de los horizontes A son fuertes en regiones cálidas subhúmedas.
4. Los horizontes que constituyen el subsuelo tienen una estructura que casi siempre es débil.

5. Las consistencias son friables y van perdiendo esta propiedad según aumenta la lluvia.

2.3.3. Características Petrológicas

En Colombia (58) se ha encontrado que la mayor parte de los Andosoles se derivan de cenizas ricas en materiales riolíticos, dacíticos y en menor proporción andesíticos ricos en hiperstena y hornblenda. El vidrio volcánico es por lo general ácido, incoloro.

Bueno (19) indica que la composición predominante de las rocas eruptivas de los depósitos neovolcánicos en Colombia, es de brechas bastante compactas con cantos de andesitas, bombas andesíticas, tobas, cenizas de diversos grados de compactación y derrames de cenizas andesíticas.

McConaghy (60) anota que en las Antillas, la mayor parte de las cenizas volcánicas son andesíticas con contenidos de sílice que van de 56 a 59%, aunque algunas cenizas provenientes de varias erupciones muestran más bien tipos más ácidos, con contenidos de sílice de 60 a 63,2%. En general, los tipos de rocas van desde dacitas ácidas hasta las lavas básicas.

Los macizos montañosos en el Hawaii (88) están formados por basalto con alguna diferenciación de nefelina, y por basalto andesítico; ceniza basáltica con un contenido de vidrio púmico en fragmentos de color pardo o verde parduzco, que al ser meteorizado se altera a palagonita; ceniza básica constituida por vidrio volcánico básica y ultrabásico también alterado a palagonita.

En Indonesia (89) tenemos tobas andesito-dacíticas, tobas andesíticas y lahar de basalto andesítico.

En Chile, Besoaín (7) dice que el material parental es ceniza volcánica basáltica y basalto-andesítica.

En México, Aguilera (3) informa que los depósitos de cenizas son de origen basáltico, andesítico y riolítico.

De acuerdo con Weyl (101) tenemos que el material parental de los suelos de América Central es de naturaleza andesítica y basáltica.

Kobo (52) dice que en el Japón el material parental es principalmente de naturaleza andesítica.

Wright (102) informa que el material parental de los suelos de Sudamérica está compuesto en general por un material que él describe como un magma ácido expulsado violentamente en forma de ceniza ácida rica en sílice en estado púmico y especialmente material eruptivo finamente triturado de magma ácido o básico.

Martini (67) informa que los depósitos de cenizas de Panamá, Costa Rica y Nicaragua tienden a ser básicos, en gran parte andesíticas y las cenizas de El Salvador, Guatemala y Honduras, ácidas.

2.3.4. Características mineralógicas

La composición mineralógica de los suelos de cenizas volcánicas depende esencialmente de la petrografía de las cenizas de origen y del estado de meteorización del suelo (7).

Fieldes y Swindale (33) sugieren como secuencia de meteorización; primero la descomposición de las rocas básicas y los ortosilicatos como el olivino, luego la meteorización de los piroxenos y anfíboles, después los feldespatos y vidrios volcánicos y por último el cuarzo, que es el silicato primario más resistente. Esta secuencia va de acuerdo con la serie de cristalización de Bowen (14) en la que durante la diferenciación de los magmas se forman el olivino y luego los piroxenos, anfíboles, feldespatos y, por último el cuarzo. Birrell (8) también indica que la relación entre minerales primarios de los suelos de cenizas y los de la roca de la cual derivan, está de acuerdo con las secuencias indicadas (14, 33).

Besoain (7) señala la siguiente composición mineralógica para las diferentes fracciones texturales de suelos de cenizas volcánicas.

La fracción arena (2 mm - 50 μ) contiene muchos de los minerales que se encuentran frecuentemente en los suelos no volcánicos junto a otros propios de las cenizas como son los minerales ferromagnesianos (olivino, piroxenos, anfíboles), el cuarzo y sus variedades polimórficas, (cristobalita y tridimita), la magnetita y varios silicatos accesorios. Junto a estos minerales las arenas exhiben una notable adición de vidrios.

La fracción limo (50 - 2 μ) está constituida por minerales primarios y secundarios. Estos últimos, especialmente en suelos con elevado contenido de alofana, son agregados de arcilla que, como pseudomorfos de limo y arena, se encuentran en las fracciones

gruesas. Tales pseudomorfos no son el resultado de movimientos descendentes de arcilla sino de coagulación o cementación con una matriz férrica amorfa o componentes orgánicos (67). Con cierta frecuencia tienden a acumularse gibsita y óxidos de hierro hidratados en la fracción limo fino (5 a 2 μ).

La fracción arcilla (< 2 μ) está constituida esencialmente por minerales secundarios pero es frecuente, sin embargo, la presencia de algunos minerales primarios como cristobalita, cuarzo y aún feldespatos, especialmente en la fracción arcilla gruesa (2 - 0,2 μ).

Pueden explicarse relaciones de abundancia de los minerales primarios entre las cenizas y los suelos, en general, por las secuencias de meteorización formuladas por Fieldes y Swindale (33), Birrell (8).

Minerales Secundarios. La meteorización de las cenizas volcánicas puede conducir a la formación de diversos minerales secundarios, pero, por regla general, bajo condiciones de buen drenaje y humedad, en los suelos jóvenes predominan minerales amorfos; alofana y haloisita (metahaloisita en los suelos maduros). Los suelos jóvenes se identifican, en general, con el concepto de Andosol. La secuencia de meteorización sería; alofana-haloisita/metahaloisita-caolinita.

En los suelos de las Antillas (60) la composición mineral consta principalmente de una pasta muy silicea con plagioclasas, minerales ferromagnésicos, magnetita y trazas de apatito. Los feldespatos

van desde la anortita y el labrador, pasando por formas menos ricas en calcio, hasta el feldespato sódico (albita); la mayor parte de ellos contienen un poco de potasio, aunque el contenido total de potasio es generalmente muy bajo y mucho menor que el contenido de sodio. Los materiales básicos contienen anortita, augita y olivino y también contenidos mayores de apatito que los que contienen los materiales volcánicos ácidos. Los análisis hechos por Hamilton, citado por Besoain (7), en la fracción de arena fina de los suelos de San Vicente (Antillas) muestran contenidos de feldespatos y otros minerales livianos que van de 60 a 75% con 20 a 30% de minerales pesados y 5 a 15% de magnetita.

En los Andosoles de Colombia (58) se encontró: a) pequeñas cantidades de vidrio volcánico y abundantes fitolitos en las fracciones de limo y arena fina; b) que la alofana es el principal constituyente de la fracción arcilla en la parte superior del solum; y halloisita hidratada, caolinita y gibsita se encuentran en general en los horizontes inferiores.

En Centroamérica, México y Panamá, Martini (64, 67, 69) encontró que las cenizas y, por consiguiente los suelos volcánicos, poseen los minerales primarios comúnmente encontrados en otros suelos, tales como feldespatos, piroxenos, anfíboles, olivino, magnetita y cuarzo. Sin embargo, abundan también los vidrios volcánicos pero contienen pocas micas. En los limos predominan los mismos minerales primarios, pero además se encuentran algunos minerales secundarios y materiales amorfos.

López (56) encontró cantidades significativas de vermiculita en la fracción arcilla y limo en ciertos suelos de origen volcánico en Costa Rica.

En México (3) análisis de laboratorio revelan la presencia de cenizas volcánicas ricas en materiales ferromagnesianos, particularmente piroxenos, hornblenda, cuarzo, labradorita, magnetita, plagioclasa, augita, cristobalita y vidrio volcánico. Estos materiales se encuentran en las capas profundas de los perfiles o en las capas superiores si se trata de suelos jóvenes, o bien por contaminaciones de recientes emisiones de cenizas.

En suelos volcánicos del Oeste de USA, Williams (1942), citado por Harward (44) al analizar un depósito de ceniza del Mazama encontró que consiste en dacita vítrea de hiperstena-augita con hornblenda accesoria. Los cristales son de plagioclasas, hiperstena y cantidades más pequeñas de augita y hornblenda. La relación de cristales livianos a pesados es más alta en las partes marginales del manto pumíceo que cerca de la fuente; la relación entre feldespatos y minerales oscuros va generalmente de dos a tres; las plagioclasas, son más abundantes que todos los minerales ferromagnésicos combinados; la hiperstena es generalmente el principal constituyente oscuro; los feldespatos son zonados intensamente y muestran una composición que va del labrador en el centro a la oligoclasa en los bordes de los cristales.

En el Japón (28) la mayoría de los suelos volcánicos contienen en su fracción de arena fina, minerales livianos como cuarzo,

plagioclasas, biotita, vidrio volcánico, ópalo vegetal, etc. y pesados como olivino, hiperstena, augita, hornblenda, magnetita y otros minerales opacos. En el vidrio volcánico se distinguen dos clases, una incolora y de composición ácida y otra de color pardo y de composición básica.

2.3.5. Características físicas

De las observaciones de varios investigadores de Japón, Nueva Zelandia, Hawaii, los Estados Unidos, Indonesia, las Antillas y América Latina, se pueden compilar ciertas generalizaciones sobre las propiedades físicas de los Andosoles (3, 8, 20, 27, 28, 34, 39, 48, 52, 58, 60, 64, 67, 86, 88, 89, 99, 102).

1. El horizonte superficial es negro o muy oscuro; aunque el suelo esté cultivado persiste el color, pues el contenido de materia orgánica se mantiene, 8-28% (39, 99).
2. El subsuelo es marrón-amarillo y tiene consistencia semejante a la grasa o al jabón (39).
3. Son suelos profundos, entre 50 y 100 cm de profundidad (39).
4. La textura dominante del suelo superficial es: franco, (con arena o limo en cantidades variables) y franco arenosa en el subsuelo (48) con revestimientos de óxidos o de materia orgánica (67).
5. Schalscha (83) dice que las texturas determinadas en el campo son diferentes a las determinadas en el laboratorio, esto es

debido a que la desecación del suelo por el aire produce cambios irreversibles significativos y los suelos forman agregados difíciles de dispersar.

6. La plasticidad y pegajosidad es casi nula y el suelo es difícil de rehumedecer hasta el punto que los agregados flotan en el agua por algún tiempo (64).
7. La estructura es generalmente granular y en bloques subangulares, débil, fina o media; todo el perfil es friable y blando (67, 99).
8. La densidad aparente es baja (0,2 - 0,8 g/ml) (39, 86, 99).
9. Las porosidades totales de estos suelos son altas, con una variación de 68 a 85% (58, 86, 99).
10. La densidad de partículas es baja.
11. La retención de humedad está por encima del 20%, a 15 atmósferas (bares); y estos suelos tienen en general alta capacidad de retención de agua (58, 67).
12. Los suelos que se forman en climas perhúmedos tienden a secarse irreversiblemente; aunque esta propiedad pueden presentarla suelos con otros climas, esta característica de secado irreversible es un criterio de clasificación muy útil, sin embargo, los suelos en el campo casi nunca se secan lo suficiente como para exhibir la propiedad en grado significativo (87).
13. La arcilla del suelo tiene un alto punto isoeléctrico, es ex-

tremadamente difícil de dispersar en análisis texturales (102).

14. La retención de humedad calculada en base al peso puede ser tan alta como 150% a 15 bares y de 280% a 1/3 de bar (34).
15. Normalmente son suelos permeables y el agua de lluvia puede percolar con cierta facilidad (102).

La mayoría de las propiedades se encuentran en mayor o menor grado en todos los Andosoles de todas las condiciones climáticas. Como la mayor parte de las propiedades arriba indicadas provienen de las características especiales de la alofana y como los geles de alofana son particularmente sensitivos a la sequedad, hay diferencias morfológicas y físicas menores entre los Andosoles que se encuentran bajo condiciones permanentemente húmedas (es decir donde los suelos casi nunca se secan), aquellos que están expuestos a la sequedad solamente por intervalos breves pero regulares y aquellos que están expuestos a la sequedad por largos intervalos (102).

2.3.6. Características químicas

La reactividad química de los suelos de cenizas volcánicas probablemente se debe al carácter ácido del aluminio tetraédricamente coordinado contenido en el componente alofánico (87). Fieldes y Schofield (32) han sugerido mecanismos para relacionar este carácter ácido y la coordinación tetraédrica con el orden relativo de retención de los diversos aniones por el mineral y los suelos en que se presenta. Como lo señala Swindale (86) muchas de las alofa-

nas tienen una relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ menor que dos, la cual es muy baja para estabilizar el aluminio tetracoordinado. Lai y Swindale (55) también encontraron que la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de los constituyentes alofánicos casi siempre era alrededor de 1,0 y difería notablemente de la misma relación del suelo total, aunque los suelos tenían distintos grados de meteorización. Kobo (52) dice que la relación molecular $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de la fracción de estos suelos que se descompone en HCl caliente es, cercana a 1,5. Aguilera (2) encontró una relación comprendida entre 1,0 y 2,5 y Birrell (8) una relación cercana a 2,0, cuando hay alto contenido de caolinita; de 1,0 a 2,0 cuando predomina en la fracción alofana y de 3,0 cuando hay mucha montmorillonita.

Seki, citado por Kobo (52) propuso en el Japón la definición de suelos sialíticos para aquellos que presentan una relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ mayor de 2,0 y suelos alíticos para los que la muestran menor de 2,0, en este grupo están por consiguiente los suelos volcánicos alofánicos.

En cuanto a las diversas propiedades químicas de los suelos de cenizas volcánicas, muchos investigadores anotan sus resultados obtenidos, y en la presente revisión se procurará incluir datos que se aproximen más a los Andosoles de Costa Rica, objeto de nuestro estudio.

Birrell (8) dice que los valores de pH en Andosoles generalmente indican condiciones de débil a fuertemente ácidos, aunque también encontramos suelos neutros cuando el principal componente de la fracción arcillosa es la montmorillonita. El mismo autor señala

que los valores de pH para suelos jóvenes están entre 5,0 y 6,0.

Swindale (87) señala que los valores de pH en los suelos de cenizas son generalmente mayores de 5,0 y al respecto Loganathan y Swindale citado por este último (87) dicen que es raro encontrar valores de pH mucho menores de éstos, debido a la capacidad amortiguadora de la alofana en la sección del punto isoeléctrico y la gran capacidad amortiguadora de los geles de alúmina polimerizados (87).

En Chile (99) el pH de estos suelos oscila entre 4,5 y 6,7. En México (2) los valores se encuentran entre 4,0 y 6,5. En Centroamérica para suelos superficiales (73) los valores de pH varían entre 5,2 y 7,5.

Los suelos de cenizas volcánicas generalmente contienen grandes cantidades de materia orgánica (87). Wright (102), Forsythe et al. (39) indican que los valores de materia orgánica en el horizonte A varían de 8 a 28%, con predominio de ácidos fúlvicos, y que por efecto de la melanización intensa, dicha materia orgánica se presenta en formas estables. Adachi (1) en el Japón y Tan (89) en Indonesia, han demostrado que las relaciones ácidos húmicos/ácidos fúlvicos en estos suelos generalmente están cerca de uno o aún menos.

En el Japón (48) el contenido de materia orgánica en los horizontes superficiales están entre 7,5 y 29% lo que se atribuye a la abundancia del sistema radical del pasto nativo y a que el proceso de descomposición de la materia orgánica resulta inhibido por la

gran capacidad de retención de humedad de estos suelos y por su riqueza en aluminio activo que al reaccionar con el humus, le da esta bilidad.

El alto contenido de materia orgánica, especialmente en los suelos superficiales, y el contenido de nitrógeno moderadamente alto a medio, permite que la relación C/N sea alta en comparación con la de los suelos no derivados de cenizas volcánicas (8, 52).

López (57) dice que los valores de materia orgánica usuales en los Andosoles cafeteros de Colombia se encuentran dentro del rango de 6 a 15%. La relación C/N fluctúa alrededor de 10, pudiendo considerarse en estrecho rango de 9 a 12, común para todos los suelos entre los 15°C y 25°C de temperatura media anual. A menores temperaturas en la zona de páramos esta relación es un poco mayor pudiendo llegar a 20 ó más. Birrell (8) dice que los valores de C/N encontrados para estos suelos en los horizontes superiores varían de 6,6 a 23,6. Taylor (90) encontró en suelos de Nueva Zelanda, valores de C/N comprendidos entre 9 y 26.

La capacidad de intercambio de cationes de estos suelos es alta. Kanehiro y Sherman (49) han señalado que en ciertos suelos de Hawaii, con grandes cantidades de material amorfo, la capacidad de intercambio de cationes disminuyó, al secarse y no se recuperó al remojarse. Ellos consideran que el efecto fue debido a la crystalización de elementos de la fracción amorfa al secarse o a una cementación que reduce la superficie de contacto. Como indican Birrell (8) y Frink (41), el método común de determinar la capacidad de

intercambio de cationes puede estar sujeto a errores considerables cuando se aplica a suelos que contienen coloides minerales amorfos y todas estas determinaciones deben interpretarse con cautela. El cálculo de la CIC por la suma de las bases intercambiables, hidrógeno y aluminio, puede ser el método más útil para estos suelos (87).

De acuerdo con Wright (102) la CIC de estos suelos en Sudamérica es moderada (20 a 40 me/100), pudiéndose encontrar valores altos como 78 me/100 y bajos como 18 me/100 gr de suelo. Martini (67) dice que la alta capacidad de intercambio de cationes es típica de los Andosoles, debido al alto contenido de alofana y materia orgánica y a veces a las arcillas del tipo 2:1.

En cuanto a las bases cambiables, predomina el calcio sobre el magnesio y éste sobre el potasio; sin embargo, los suelos de cenizas con alto contenido de olivino son particularmente ricos en magnesio (2, 48).

La saturación de bases en Andosoles varía mucho, así vemos que en algunos grupos de suelos, esta saturación disminuye al aumentar la cantidad de lluvia. Haciendo una recopilación de datos de los diversos investigadores, podemos señalar una variación que va de 0,5 a 80% (5, 34, 47, 61, 63, 73).

Estos suelos presentan una elevada proporción de alúmina de intercambio (99). Bornemisza e Igue (11) han encontrado un promedio de 17,3% de aluminio extraíble (calculado como Al_2O_3) en los Andosoles de Costa Rica.

El contenido de alofana es muy variable, y parece depender del grado de avance del proceso de meteorización y de la frecuencia e intensidad con la que se produzcan nuevas deposiciones (77).

Taylor (90) en Nueva Zelanda encontró contenidos de alofana que variaron entre 30 y 100%.

Estos suelos tienen una alta capacidad de fijación de fósforo (67). Gutnik et al. (42) al referirse a los suelos derivados de cenizas volcánicas dicen que presentan entre otras características la fijación en un alto porcentaje (80-90%) del fósforo suministrado como abono. Esto ha sido puesto en evidencia en varias partes del mundo (1, 2, 5, 49, 52, 55, 67, 73, 87, 88, 89, 90, 102).

Los investigadores Brown y Mibland, citados por Alamos (4) con cuerdan que en los suelos ácidos, el hierro y el aluminio tienen un papel importante entre las causas que rigen el fenómeno de la fijación del fósforo, a través de la formación de complejos de baja solubilidad con los iones fosfato. Esto ha sido también demostrado para suelos chilenos derivados de cenizas volcánicas por Alamos et al. (4, 21, 42, 84).

En investigaciones realizadas en Chile (42) se observó el cambio producido en el fenómeno de fijación de fósforo al variar el pH del medio (4,5 - 9,5) en dos suelos derivados de cenizas volcánicas que difieren notablemente en su contenido de aluminio extraíble a pH 4,8. La cantidad de fósforo retenida por los suelos a cada nivel de pH está relacionada directamente con el contenido de Al extraíble. La fijación se vio reducida notablemente a pH 7,0.

Los elementos menores, en general se encuentran en cantidades suficientes, posiblemente debido a la rápida y simultánea meteorización de la gran variedad de minerales primarios (8). Sin embargo, algunos investigadores (85) informan de deficiencias especialmente de cobalto, molibdeno, boro y zinc.

2.3.7. Características microbiológicas

Según Kobo (52) e Ishizawa (45), la población de actinomicetos y de bacterias anaeróbicas es más abundante en los suelos derivados de cenizas volcánicas en el Japón, que la generalidad de los suelos de otro origen. Sin embargo el mismo Ishizawa (45) admite que no por ser más numerosa la cantidad de actinomicetos significa que sea mayor la actividad, ya que en la población microbiana de estos suelos especialmente en las regiones altas de clima frío, la actividad de los microorganismos es menor y en ocasiones casi nula (54).

Kupper (54) al respecto agrega que en los suelos Negro Andino (derivados de cenizas volcánicas) en el Ecuador, a pesar de tener cantidades altas de materia orgánica, la nitrificación es baja y se debe a la baja temperatura del suelo.

Con relación a la actividad microbiana de Andosoles, la nitrificación y la actividad de ureasa son generalmente más altas que en los suelos que no provienen de cenizas volcánicas (45).

Martini (67) dice que los altos niveles de materia orgánica en Andosoles representan una intrazonalidad impuesta por un material parental rico en vidrios volcánicos que producen la alofana, la

cual fija la materia orgánica en tal forma, que es poco accesible a la acción de los microorganismos. No hay seguridad si este bloqueo de los microorganismos es físico o químico o ambos.

Autores japoneses (45, 75) han encontrado que los actinomicetos y las bacterias anaeróbicas predominan en la microflora de los Andosoles. Esto puede sugerir que aún cuando los suelos son porosos y bien drenados, sufren de pobre aireación. Las razones pueden ser un clima muy húmedo que mantiene el suelo cerca de la capacidad de campo o una capacidad de retención de agua tan alta que produce mala aireación dentro de las unidades estructurales con alta microporosidad. Es decir, que pueden existir dentro del suelo microambientes muy diferentes en cuanto al grado de aireación. Esto explica en parte, los altos niveles de materia orgánica.

Según Ishizawa (45) parece que las características microbiológicas citadas, son producto de las condiciones físicas de estos suelos, especialmente la estructura y la alta porosidad, pues sugiere que el suelo mantiene condiciones biológicamente secas y aeróbicas.

2.3.8. Características de fertilidad

Birrell (8) y Taylor (90) consideran que debido a la predominancia de arcillas amorfas en la fracción activa, estos suelos tienen propiedades físicas, químicas y biológicas muy peculiares y como consecuencia, los problemas relacionados con su manejo y conservación deben ser tratados en forma específica.

El alto contenido de materia orgánica, junto con la parte mineral del suelo, forma la fracción activa que es a su vez complejo coloidal orgánico-mineral (89).

La fertilidad de estos suelos puede calificarse como mediana (89) y depende mucho de que haya o no nuevas deposiciones de cenizas, pues, de ser estas deposiciones continuas, la fertilidad disminuye notablemente, a pesar de que el alto contenido de alofana propicia una estructura porosa bastante estable que aumenta la permeabilidad (47).

Fox (40) al referirse a la materia orgánica y fertilización del nitrógeno, manifiesta que informes publicados sobre suelos de cenizas, concuerdan que la materia orgánica en estos suelos es muy estable. Esta estabilidad está relacionada con la alta capacidad de retención de humedad y con la reactividad de su fracción coloidal amorfa, y la lixiviación del NH_4 por la alta permeabilidad del suelo y sobre todo por la deficiente capacidad de la alofana para retenerlo.

Martini (68) dice que la gran deficiencia de nitrógeno en los Andosoles se debe a que, aún cuando la materia orgánica es abundante, esta no se descompone eficientemente por estar fuertemente fijada o estabilizada por los materiales amorfos. Agrega que no se está seguro si esta condición tiene una explicación física (atrapamiento de la materia orgánica) o química (pH bajo, exceso de aluminio soluble, etc.) o biológica (inactividad de los microorganismos del suelo) o combinada. El clima puede ser uno de los factores

contribuyentes (68).

El fósforo es un nutrimento limitante de la producción en suelos de cenizas volcánicas, dado que el nivel de su disponibilidad para las plantas muchas veces es bajo y el fósforo aplicado en forma de fertilizante es rápidamente fijado en el suelo (29). Por esta razón, los Andosoles necesitan más altas aplicaciones de fósforo que los suelos de cenizas no volcánicas (52).

Por otro lado, la fijación del fosfato aplicado, puede ser considerado como medida de mejora de la propiedad alítica del suelo. Por ejemplo, el fosfato aplicado suprime la actividad de alúmina cambiándolo con alúmina libre del suelo. La cantidad de fósforo fijado, por lo tanto, aumenta con el aumento de acidez del suelo (52). Podemos decir entonces que las deficiencias de fósforo en los Andosoles se deben a la alta capacidad de fijación de este nutrimento asociada con la gran actividad del aluminio (68). La presencia de humus, sin embargo, favorece la respuesta a las aplicaciones posteriores de fertilizantes fosfatados, pues cuando el humus recubre íntegramente los minerales amorfos, éstos disminuyen en su reactividad para la fijación de fosfatos (90).

El estado de potasio en los suelos de cenizas volcánicas varía grandemente. Los suelos altamente meteorizados contienen poco potasio intercambiable mientras que los suelos poco meteorizados contienen mucho potasio intercambiable. Por otro lado, los suelos altamente lixiviados, son extremadamente deficientes en este elemento. Las adiciones de potasio deben ser realizadas con frecuencia varias

veces durante el ciclo correspondiente al cultivo (65). La retención de cationes por los aluminosilicatos amorfos requiere un medio alcalino y de aquí que dentro de los grados de pH normal del suelo no haya mecanismo para una conveniente fijación de potasio, y por esta razón se requieren frecuentes abonaduras con potasio si la liberación por meteorización de feldespatos no está de acuerdo con la demanda de las plantas (8).

Birrell (8) refiriéndose a las necesidades de cal, dice que si los estimamos en base al porcentaje de saturación de bases, no se ajustan a la realidad debido a que la capacidad de intercambio de cationes es ficticia por causa de las cargas dependientes del pH que son altas en suelos con gran contenido de coloides amorfos.

La práctica del encalado afecta al suelo no solamente por la corrección de su reacción sino también por la eliminación de su propiedad alítica, ya que el punto isoeléctrico del suelo es bajo. Sin embargo, debería evitarse un sobre encalado, por el efecto destructural sobre la relación de cationes, disponibilidad de elementos menores, descomposición de la materia orgánica, deterioro de la estructura del suelo y otros. En Japón el requerimiento de cal es determinado a pH 6,0 y 50% de saturación de cal por el método de análisis volumétrico de la curva de pH.

Es obvio que hay una clara correlación entre la saturación de cal y el contenido de alúmina soluble, y podría encontrarse abundancia de alúmina soluble cuando la saturación de cal es menor de 20%. Por lo tanto, las necesidades de cal en campos mejorados, algunas

veces alcanza a cifras tan altas como 5.000 kgr a 20.000 kgr. por hectárea (52).

El aluminio soluble es de importancia en el suelo por su efecto tóxico sobre las plantas, por su capacidad para fijar o insolubilizar los fosfatos del suelo y desde el punto de vista económico por la cantidad de cal requerida para reducir su actividad a un nivel que no afecte el desarrollo normal de las plantas (65).

López (57) refiriéndose al magnesio en Andosoles de Colombia dice que a veces se presentan deficiencias asociadas con deficiencias de nitrógeno. En tales casos, la deficiencia de magnesio desaparece al corregir la de nitrógeno por aplicaciones de este elemento.

Al tratar de modificar el pH con adiciones de cal, se provocan deficiencias de manganeso, detectable por síntomas visuales y por análisis foliar, principalmente. El manganeso intercambiable es del orden de 5 ppm y hay casos en que este valor es inferior a 1 ppm. En estos últimos suelos se presenta fácilmente la deficiencia de manganeso.

La deficiencia de boro se presenta temporalmente en estos suelos en épocas de escasa lluvia y es más acentuada en áreas con poco contenido de materia orgánica (57).

Se han observado en Hawaii (40) fuertes deficiencias de hierro que se manifiestan en clorosis de hierro en piña, se corrigen por rociamientos foliares de sulfato de hierro y conservando la acidez

del suelo. Se han observado también severas deficiencias de zinc en maíz cultivado en suelos de cenizas altamente meteorizadas las cuales han sido fertilizadas con fosfato.

Grandes cantidades de boro son necesarias para la producción de apio en suelos derivados de cenizas volcánicas de Hawaii (40), lo cual sugiere que el boro está siendo absorbido por el suelo, por lo que su solubilidad disminuye.

El molibdeno está en cantidades suficientemente altas para la nutrición de las plantas en estos suelos (40). Hay varias indicaciones de deficiencia de cobre en plantas de forraje que crecen sobre suelos de cenizas en Hawaii (40).

2.4. Andosoles en Costa Rica

La geología del istmo centroamericano y por lo tanto de Costa Rica, es relativamente joven y está constituida en su mayoría por formaciones volcánicas ígneas y sedimentarias que datan principalmente del cuaternario y terciario (67, 101). Un mayor rejuvenecimiento ha sido ocasionado por las continuas actividades volcánicas que han moldeado gran parte de la fisiografía y que son determinantes en las clases de suelos y agricultura que predomina hoy en día (67).

Los Andosoles en Costa Rica se extienden principalmente a lo largo de la meseta central y debido a los vientos predominantes que vienen del Este, la mayor parte de las cenizas volcánicas, se han localizado en la Vertiente del Pacífico (64).

Weyl (101) dice que los volcanes de la cordillera central han producido materiales en gran parte basálticos y andesíticos, y las cenizas de estos volcanes se han distribuido a través de toda la meseta central que mantiene una gran parte de la agricultura de Costa Rica (51).

Dóndoli y Torres (26) hacen referencia a los Andosoles de la región oriental de la meseta central, dividiéndolos en cuatro grupos principales:

Grupo A; suelos desarrollados sobre lavas recientes de Aquiares y Cervantes, ambos de tipo andesítico.

Grupo B: suelos desarrollados sobre formaciones lávicas viejas de Paraíso, Quebrada Honda y Juan Viñas, todos de tipo andesítico.

Grupo C: suelos desarrollados sobre la llamada lavina de Cartago, correntada de lava y piedras que bajó del flanco sur del Irazú y se extendió sobre el valle de Cartago precedentemente relleno por sedimentos lacustres.

Grupo CH: suelos desarrollados sobre el aglomerado del flanco derecho del río Reventazón.

Vargas y Torres (100) en su estudio preliminar de suelos de la región occidental de la meseta central, a los suelos derivados de cenizas volcánicas, los divide en dos grupos con dos series cada uno:

Primer Grupo - Serie Grecia: provienen de materiales piroclásticos en diferentes estados de meteorización arrastrados y depositados en los pequeños valles, así como de cenizas volcánicas provenientes en su mayoría del volcán Poás.

Serie Alajuela: el origen de esta serie es similar al de la anterior, es decir, proviene de la acumulación de materiales piroclásticos en diferentes estados de meteorización arrastrados y depositados en los valles.

Segundo Grupo - suelos delgados de cenizas y lavas; los situados al noreste de Heredia tienen una mayor influencia de materiales piroclásticos finos que los situados al noroeste de San Antonio de Belén. De ahí que se hayan subdividido en Serie Los Angeles y Serie San Antonio.

Serie Los Angeles: Estos suelos son provenientes de cenizas y lavas volcánicas, muy susceptibles a la erosión llegando a aflorar el material rocoso subyacente.

Serie San Antonio: estos suelos provienen de cenizas y lavas volcánicas y presentan grandes cantidades de lava con topografía de lomeríos.

Hardy (43) menciona la existencia de Andosoles en Costa Rica, que se extienden especialmente a lo largo de la Meseta Central y están formados por cenizas volcánicas en distintos grados de meteorización.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1. Trabajo de campo

3.1.1. Localización y criterios para la ubicación de los perfiles

Los suelos del presente estudio se encuentran ubicados en las unidades fisiográficas conocidas en Costa Rica como vertiente del Pacífico y vertiente del Atlántico (66).

Vertiente del Pacífico

Los perfiles CR-57, CR-65 y CR-35, correspondientes a los sitios: 8 Km de Cartago hacia el Irazú, 3 Km al Noreste de San José de la Montaña, 1 Km antes de Vara Blanca, respectivamente, están en esta vertiente. Los suelos están a 1700, 1800 y 1900 m. s.n.m. respectivamente. El clima es templado húmedo (93), las temperaturas medias anuales para cada sitio son de 17,0°C, 16°C y 15°C (23). La precipitación pluvial es muy variable y corresponde a 1179 mm, 2800 mm, 3535 mm, respectivamente. Si relacionamos la altura con la precipitación vemos que esta última aumenta progresivamente con la altitud. En esta vertiente hay una estación seca bastante definida que generalmente se extiende entre diciembre y abril, alcanzando valores inferiores a 50 mm (23).

Vertiente del Atlántico

Los perfiles CR-56, CR-50 y CR-67, correspondientes a los sitios: 5 Km de Turrialba hacia Juan Viñas (Serie Birrisito), 2 Km de Cervantes hacia Cartago (Serie Cervantes), y 2 Km de Tapesco hacia

Laguna, respectivamente, están en esta vertiente.

Los suelos están a 1.000, 1.300 y 1.600 m. s.n.m., respectivamente. El clima es tropical húmedo en los dos primeros y templado húmedo en el tercero (93). Las temperaturas medias para cada sitio son de 22°C, 19°C y 17,5°C (23). La precipitación pluvial es más uniforme y varía de 2.218 mm, 2.800 mm y 3.533 mm, respectivamente. De la misma manera que en la vertiente del Pacífico, si relacionamos la altitud con la precipitación vemos que esta última aumenta progresivamente con la altitud. En esta vertiente no hay una marcada diferencia de precipitación entre los meses, careciendo de estación seca definida; sin embargo, podemos decir que la precipitación tiende a disminuir un poco en los meses de enero y abril (23).

Para la ubicación de los perfiles se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- a. Los sitios de muestreo fueron localizados en áreas que se consideraron representativas del tipo de suelo en estudio.
- b. Areas en donde las deposiciones de cenizas volcánicas han hecho posible la formación de Andosoles.
- c. Topografía intermedia con un declive que va del 6 al 13%, con sitios bien drenados donde no hay acumulación de sales o sedimentos ni una erosión excesiva (67).
- d. Formación geológica relativamente reciente, formaciones volcánicas de Cuaternario y Terciario (67, 51).
- e. Elevaciones mayores de 1.000 m. s.n.m.

- f. Clima húmedo, templado a frío, con precipitaciones pluviales relativamente altas.
- g. Vegetación, pastizales no abonados. Se escogió esta clase de vegetación para uniformar el muestreo. No se escogió sitios con bosque natural porque es difícil encontrarlos en todos los lugares designados para el estudio. Lugares cultivados fueron descartados porque generalmente éstos son abonados.

Una vez localizados los sitios, se procedió a la apertura de calicatas lo que sirvió como base de estudio y tuvo las siguientes características:

- a. Profundidad que permitiera reconocer el material parental.
- b. Largo, 2,0 m y ancho, 1,5 m.
- c. Orientación de Este a Oeste con el fin de dar mayor iluminación para facilitar el estudio y la toma de fotografías.
- d. Corte vertical en la sección de muestreo, debidamente limpiado para evitar contaminaciones.

3.1.2. Método para la descripción de perfiles

Para la descripción del sitio y de los perfiles de suelos se siguió la técnica que recomienda la guía de FAO (76).

Para el reconocimiento, separación y descripción individual de los horizontes, se observaron las reglas propuestas por FAO (76), el Manual de Levantamiento de Suelos del USDA (96) y la Séptima

Aproximación (97).

3.1.3. Extracción de muestras por horizontes

Para la extracción de las muestras por horizontes se siguió la técnica recomendada por Cline (22), con modificaciones de acuerdo al Dr. Martini* y al autor. Las muestras fueron extraídas de la parte intermedia de cada horizonte y se recolectaron aproximadamente 2 kgr de suelo para los análisis físicos y químicos.

Simultáneamente a este muestreo, se tomaron las muestras para la determinación de la densidad aparente. Para ello se siguió la técnica de Blake (9), con un cilindro muestreador, en triplicado, y cerrando las muestras herméticamente para conservar la humedad que tenía el suelo al momento del muestreo.

3.2. Trabajo de laboratorio

3.2.1. Preparación de muestras

Para la preparación de las muestras se siguió básicamente la técnica de Cline (22).

Las muestras de suelo fueron llevadas al laboratorio donde se secaron al aire libre y en las condiciones de humedad relativa de 88-90% en Turrialba. Se pasaron por un tamiz de 2 mm y se procedió a homogenizarlas por 10 minutos en un mezclador del tipo "Twin shell dry blender". De esta mezcla se separó una submuestra de

* Comunicación personal.

200 gr, la misma que fue molida y tamizada en malla de 0,5 mm y se utilizó para las determinaciones de los análisis químicos.

Con excepción de la densidad aparente, todas las determinaciones físicas y químicas fueron hechas en muestras de suelo secado al aire.

3.2.2. Determinaciones físicas

3.2.2.1. Humedad en suelos secados al aire

Para poder calcular los resultados en base al peso de suelo secado al horno y por las condiciones de humedad relativa alta (88-90%) que tiene Turrialba, se determinó el porcentaje de humedad a partir de submuestras de 40 gr de suelo secado al aire, sometidas a 105-110°C durante 24 horas.

3.2.2.2. Densidad aparente

Para esta determinación se siguió la técnica de Blake (9).

Las muestras se tomaron en un cilindro muestreador por triplicado.

3.2.2.3. Densidad de partículas

Para esta determinación se usó la técnica original de Blake (10); método con kerosene, modificado por Forsythe (38). Este método consiste en utilizar el kerosene como medio desplazante del aire con el objeto de evitar el problema del "mojado" incompleto que ocurre en suelos arcillosos cuando se usa el agua. Esto se

debe a la atracción entre las partículas de arcilla y las moléculas de agua, por tratarse de un líquido polar (38).

3.2.2.4. Retención de humedad

En esta determinación se siguió básicamente el método de Richards (80), modificado por Forsythe (37). El suelo utilizado fue secado al aire y tamizado en malla de 2 mm.

3.2.2.5. Análisis granulométrico

Se usó el método combinado de sedimentación y tamizado, expuesto originalmente por Bouyoucos (13), modificado por Day (24) y adaptado por Forsythe (36).

Se utilizaron dos submuestras de 40 gramos de suelo secado al aire y tamizado a 2 mm. La materia orgánica fue destruida con H_2O_2 al 35% y el suelo dispersado con Calgón al 10%.

El hidrómetro utilizado fue del tipo ASTM No. 152H con la escala de Bouyoucos en gramos por litro y las lecturas fueron hechas a 0,5, 1, 4, 9, 36, 100, 196 y 484 minutos. Los tamices usados en la separación de las arenas fueron de 1.000, 500, 250, 105 y 44 micras de abertura.

Todas las fracciones fueron clasificadas de acuerdo al sistema del USDA (18) y la clase textural definida con el triángulo de texturas (76).

3.2.2.6. Determinación del color

El color de los suelos se determinó en húmedo y en seco al

aire; utilizando las tablas de Munsell (74). Las observaciones se hicieron en suelos sin disturbar.

3.2.2.7. Coefficiente lineal de contracción

Para esta determinación se siguió el procedimiento propuesto por el USDA, Soil Conservation Service (95).

Se empleó la siguiente fórmula:

$$\text{Coef.} = \frac{L_h - L_s}{L_s} = \frac{\Delta L}{L_s}$$

donde:

L_h = largo en húmedo (horizontal)

L_s = largo en seco (vertical)

ΔL = incremento negativo

Estas medidas fueron determinadas de cada uno de los horizontes componentes de los microperfiles. Se determinaron los coeficientes lineales de contracción tomados horizontalmente, y verticalmente, y el promedio.

3.2.3. Determinaciones químicas

3.2.3.1. Reacción del suelo (pH)

Para esta determinación se siguió el método recomendado por Peech et al. (78); se determinó el pH de mezclas de agua: suelo en la proporción de 1:1 y de suelo: solución 0,01M de cloruro de calcio, en la proporción 1:2, potenciómetricamente por medio del electrodo de vidrio. Las muestras fueron secadas al aire y tamizado a 2 mm.

3.2.3.2. Materia orgánica (MO)

La materia orgánica se determinó de acuerdo con el método original de Walkley-Black descrito por Jackson (47) y modificado por Sáiz del Río y Bornemisza (82). Este método se basa en la oxidación de la materia orgánica con ácido crómico y la valorización del exceso de ácido crómico con la solución "Sal de Mohr".

3.2.3.3. Nitrógeno total

El nitrógeno total se determinó por el método semimicro Kjeldahl de Bremmer (17), modificado por Díaz Romeu*. Este método se basa en el procedimiento analítico de Kjeldahl de conversión del nitrógeno en $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ por digestión del suelo con H_2SO_4 concentrado en presencia de la mezcla catalizadora de Hibbard. El amonio destilado se recibe en ácido bórico al 2% para luego titularlo con ácido sulfúrico 0,025 N, aproximadamente.

3.2.3.4. Capacidad de intercambio de cationes

Se usó el método de Bower et al. (15), modificado por Díaz Romeu y Balerdi (25). El procedimiento seguido es el siguiente: tratamiento del suelo con acetato de amonio 1N, pH 7,0 ó 4,8, para saturar con el catión amonio las cargas negativas del complejo de intercambio del suelo, inmediatamente el lavado del suelo con etanol (95%) para eliminar el exceso de acetato de amonio; luego el tratamiento con una solución de cloruro de potasio al 10% acidulado

* Técnica utilizada en el Laboratorio de Suelos, IICA-CEI.

a pH 2,5 para desplazar el amonio adsorbido, (la acidulación del cloruro de potasio se realiza con el fin de evitar la volatilización del amonio) por último la recuperación de este amonio por destilación en un aparato semi-micro Kjeldahl y la posterior titulación con ácido sulfúrico aproximadamente, 0,025 N.

3.2.3.5. Determinación de bases cambiables

Las bases cambiables, potasio, calcio y magnesio fueron extraídas siguiendo el método modificado por Díaz Romeu y Balerdi (25): tratamiento del suelo con acetato de amonio 1N, pH 7,0 ó 4,8, tres extracciones; o sea el mismo tratamiento seguido en la determinación de la CIC. El supernatante, producto de las tres extracciones, es llevado a volumen (100 ml) con la misma solución extractora y se la denomina "solución A". En esta solución se determinaron los cationes indicados, en un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer modelo 303.

3.2.3.6. Aluminio extraíble

Para la determinación de aluminio extraíble se siguió la técnica descrita por McLean (61) que consiste en una sola extracción del aluminio con acetato de amonio 1N a pH 4,8. La determinación de la concentración de aluminio se realizó por colorimetría, desarrollada por el uso de aluminona; la intensidad del color se midió en un fotocolorímetro universal Coleman.

3.2.3.7. Fósforo disponible

Para esta determinación se usó el método denominado Bray-1 (16)

modificado por Sáiz del Río y Bornemisza (82). Este método usa como solución extractora el fluoruro de amonio 0,03N en medio ácido (dado por el HCl 0,025N), que tiene la propiedad de solubilizar los fosfatos de Fe^{+++} y Al^{+++} y disolver la parte más activa de los fosfatos de calcio.

3.2.3.8. Determinación de alofana y óxidos libres de hierro

Una vez terminados todos los análisis físicos y químicos, se seleccionaron los dos perfiles más representativos del Andosol modal, para determinar su contenido de alofana de acuerdo con el valor Delta de Jackson (46).

"El Valor Delta", que corresponde a la alofana no soluble, fue determinado de la diferencia, en meq/100 gr, entre la capacidad de intercambio de cationes de las muestras tratadas con la solución de carbonato de sodio al 2% y la solución buffer de acetato a pH 3,5.

La alofana soluble se determinó por la diferencia de peso encontrado, entre la "Muestra A" tratada con acetato de sodio 1N pH 5,0 y H_2O_2 al 35% para eliminar el contenido de bases y materia orgánica y la ("Muerta B") tratada adicionalmente con citrato de sodio, bicarbonato de sodio y ditionito de sodio para eliminar el contenido de alofana soluble y óxidos libres de hierro. A la muestra B se le adicionó el peso correspondiente a la relación $Fe_2O_3/0,85$ que representa el contenido de goetita hidratada y limonita.

La alofana total es la suma de la alofana no soluble y la alofana soluble.

Los óxidos libres de hierro se determinaron siguiendo el proceso para la determinación de alofana, Jackson (46) que consiste en la remoción de los óxidos libres de hierro, tratando a la muestra con ditionito de sodio. Los resultados se expresan en porcentaje de Fe_2O_3 .

3.2.3.9. Potasio y hierro totales

Para estas determinaciones se siguió el método original de Brannoch y Berthold y de Shapiro y Brannock, modificado por Martini (63). El método consiste de los siguientes pasos: poner a digerir suelo tamizado a 0,125 mm con ácido fluorhídrico concentrado y ácido sulfúrico 1:1 para destruir los silicatos de aluminio que constituyen el 99% del suelo y la materia orgánica, respectivamente, después de la digestión y la evaporación de dichos ácidos, hasta un volumen de 3 mm, se añade ácido nítrico concentrado que sirve para destruir los residuos de materia orgánica y sobre todo volatilizar el ácido fluorhídrico restante. Una vez que se volatiliza el ácido nítrico en forma de vapores blancos se homogeniza la solución con agua destilada y se lleva a un volumen de 50 ml; ésta es la "solución A". En esta solución se determina el potasio y hierro totales en un espectrofotómetro de absorción atómica.

3.2.3.10. Calcio y magnesio totales

Para la determinación de estos elementos se siguió el procedimiento recomendado por Jackson (47) y consiste de los siguientes pasos: A partir de la "solución A", obtenida para la determinación

anterior (K y Fe totales) se procedió a la separación mediante el NH_4Cl y NH_4OH 4N del calcio y magnesio de los sesquióxidos de hierro y aluminio y del P. El Fe, Al y P interfieren con la determinación por espectrofotometría de emisión de los elementos calcio y magnesio (48).

4. RESULTADOS Y DISCUSION

A continuación se presentan los resultados y discusión de las características morfológicas, físicas y químicas de cada perfil.

La clasificación de estos suelos se realiza de acuerdo con las propiedades de los Andosoles en el mundo, correlacionadas por Dudal (27) y con el sistema norteamericano de clasificación del suelo (98) que reúne todos los requisitos y objetivos del presente estudio.

4.1. Perfil 1 (CR-57)

4.1. . Información del sitio

Nombre del suelo : Andosol (92)
Ubicación : 8 Km de Cartago hacia el Irazú. Aproximadamente 9°54'N, 83°54'O
Elevación : 1.700 m s.n.m.
Fecha de la descripción : 25 de julio, 1969.
Autor : Carlos Luzuriaga T.

Forma del terreno

Fisiografía del sitio : pendiente convexa
Forma del campo circundante : Colinoso
Pendiente : Clase 3 (6-13%) inclinado
Vegetación : Kikuyo (Pennisetum clandestinum). Antes bosque húmedo (93).

Clima	:	Húmedo montano bajo (h-M B) (93). Precipitación pluvial de 1.179,0 mm y temperatura 17,0°C (23).
Material parental	:	Cenizas andesíticas recientes del volcán Irazú.
Drenaje: Superficial	:	Bien drenado
Interno	:	Clase 5 - algo excesivamente drenado
Tabla de agua	:	Muy profunda
Evidencia de erosión	:	Ninguna visible
Influencia humana	:	Muy ligera, causada por el pastoreo.

4.1.2. Descripción general del perfil

Suelo típico de montaña, con una pendiente de 6 al 13%, profundo, bien drenado, pardo grisáceo muy oscuro a pardo oscuro, con alto contenido de materia orgánica y sin piedras, moteados ni concreciones. Encontramos revestimientos de materia orgánica. La distribución de raíces es normal, con la mayor parte de ellas en los primeros 60 cms.

4.1.3. Descripción individual de los horizontes

A₁₁ 0-30 cm Pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2) en húmedo y pardo grisáceo oscuro (10YR4/2) en seco; franco limoso; granular, fina, fuerte; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, friable en húmedo, ligeramente duro en seco; revestimientos de materia orgánica; raíces finas, abundantes; límite claro, ondulado.

- A₁₂ 30-60 cm Pardo oscuro (10YR3/3) en húmedo y pardo a pardo oscuro (10YR4/3) en seco; franco limoso; granular, fina, fuerte; ligeramente pegajoso, ligeramente plás-tica en mojado, muy friable en húmedo, ligeramente duro en seco; revestimientos de materia orgánica; raíces finas, frecuentes; límite claro, ondulado.
- A₁₃ 60-110 cm Pardo oscuro (10YR3/3) en húmedo y pardo a pardo oscuro (10YR4/3) en seco; franco limoso; granular, fina, fuerte; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, friable en húmedo, ligeramente duro en seco; revestimientos de materia orgánica; raíces finas, comunes; límite claro, ondulado.
- A₃₁ 110-155 cm Pardo oscuro (10YR3/3) en húmedo y pardo a pardo oscuro (10YR4/3) en seco; franco limoso; granular, fina, fuerte; ligeramente pegajoso, ligeramente plás-tico en mojado, friable en húmedo, suave en seco; revestimientos de materia orgánica; raíces finas, comunes; límite claro, ondulado.
- A₃₂ 155-190 cm Pardo amarillento oscuro (10YR3/4) en húmedo y pardo a pardo oscuro (10YR4/3) en seco; franco limoso; granular, fina, moderada; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, friable en húmedo, li-geramente duro en seco; revestimientos de materia orgánica; raíces finas, pocas; límite abrupto, ondulado.

B 190-198+ cm Pardo amarillento oscuro (10YR4/4) en húmedo y pardo amarillento (10YR5/4) en seco; franco; bloques subangulares, fina, débil; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, firme a muy firme en húmedo, muy duro en seco; revestimientos de materia orgánica; raíces finas, pocas.

4.1.4. Propiedades físicas y químicas

En los cuadros 1 y 2 se presentan los resultados de las características físicas y químicas.

4.1.5. Discusión

Este perfil consiste de una secuencia A(B)C, con un horizonte A bien desarrollado y muy profundo. La variabilidad en el espesor de los subhorizontes A, hace evidente la influencia de deposiciones volcánicas periódicas y recientes. El horizonte (B) no muestra ninguna iluviación y está débilmente desarrollado, lo cual es evidente también en la estructura débil. El color está relacionado con el contenido de materia orgánica y hierro, de allí que se aclara con la profundidad. En el horizonte A, el color varió en húmedo, de pardo grisáceo muy oscuro a pardo amarillento oscuro con un matiz o "hue" 10YR, un "value" de 3 en todo el horizonte y un "chroma" que varió de 2 a 4; en seco el color varió de pardo grisáceo oscuro a pardo oscuro, el "hue" se mantuvo lo mismo, el "value" varió de 3 a 4 y el "chroma" de 2 a 3. Las variaciones del "value" y del

CUADRO 1.- Características físicas del perfil 1 (CR-57)

Horizonte	Prof. (cm)	Distribución de partículas										Clase textural	Clase textual	Clase textural en el campo	
		A. muy gruesa (%)	A. gruesa (%)	A. Media (%)	A. Fina (%)	A. muy fina (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Fina (%)	A. muy fina (%)	Limo (%)				Arcilla (%)
A11	0 - 30	0,30	1,29	4,75	11,02	3,40	39,0	33,0	Fco. arcilloso	Fco. limoso					
A12	30 - 60	0,23	1,64	5,21	10,45	3,93	42,0	25,0	Franco	Fco. limoso					
A13	60 - 110	0,13	0,72	3,92	8,99	3,12	48,0	20,0	Franco	Fco. limoso					
A31	110 - 155	0,13	1,29	5,67	11,10	3,21	53,0	15,0	Fco. limoso	Fco. limoso					
A32	155 - 190	0,12	0,62	3,14	7,97	2,75	54,0	13,0	Fco. limoso	Fco. limoso					
B	190 - 198+	0,03	0,18	1,35	2,19	0,67	20,0	5,0	arenoso-franco	Franco					

Horizonte	Densidad partículas (gr/cc)	Debilidad aparente (gr/cc)	Porosidad (%)	Humedad gravimétrica (%)	Humedad volumétrica (%)	Espacio de aire (%)	Coeficiente de tracción	Horizontal		Vertical		promedio (%)
								(%)	(%)	(%)	(%)	
A11	2,28	0,91	60,3	53,5	49,5	11,6	2,2	7,9	5,1	5,1	5,1	5,1
A12	2,44	0,77	68,5	55,9	38,4	26,2	5,7	6,0	5,9	5,9	5,9	5,9
A13	2,46	0,68	72,8	58,8	39,7	32,5	4,8	1,2	3,0	3,0	3,0	3,0
A31	2,45	0,71	70,9	60,7	40,7	30,0	1,4	4,7	3,1	3,1	3,1	3,1
A32	2,43	0,63	74,1	71,6	46,6	27,5	4,2	6,4	5,3	5,3	5,3	5,3
B	2,43	0,53	78,3	111,6	56,6	22,5	-	-	-	-	-	-

Horizonte	Color	Humedad al secado al aire (%)	Retención de humedad									
			0.01 bar (%)	0.05 bar (%)	0.5 bar (%)	1 bar (%)	2 bares (%)	5 bares (%)	10 bares (%)	15 bares (%)		
A11	10YR3/2	10YR4/2	14,0	83,3	70,5	45,3	42,4	38,5	35,8	27,1	23,8	23,8
A12	10YR3/3	10YR4/3	14,0	85,0	72,9	45,8	43,7	37,8	32,8	26,9	22,9	22,9
A13	10YR3/3	10YR4/3	14,0	93,1	75,0	46,8	43,5	37,9	33,3	29,8	23,3	23,3
A31	10YR3/3	10YR4/3	16,0	101,9	80,7	60,0	42,6	36,0	31,9	27,6	22,4	22,4
A32	10YR3/4	10YR4/3	16,0	100,0	80,8	57,0	42,9	36,3	30,9	26,0	22,3	22,3
B	10YR4/4	10YR5/4	22,0	100,0	83,3	63,8	46,0	40,2	36,0	30,0	25,8	25,8

* Determinados en condiciones de campo.

CUADRO 2.- Características químicas y análisis elemental del perfil 1 (CR-57)

Horizonte	pH		Materia Orgánica (%)	Nitrógeno total (%)	C/N	Fósforo soluble (ppm)	Elementos totales			
	H ₂ O	CaCl ₂ 0.01M					K ₂ O (%)	CaO (%)	MgO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
A11	5,9	5,3	7,20	0,44	10	3,10	0,65	0,01	0,03	9,15
A12	6,6	5,7	5,13	0,27	11	1,48	0,53	1,02	0,70	8,81
A13	6,6	5,8	4,69	0,25	11	1,14	0,46	0,64	1,14	9,15
A31	6,7	6,0	4,05	0,23	10	1,10	0,42	0,70	1,50	9,15
A32	6,6	6,1	4,39	0,22	12	0,81	0,38	0,22	1,17	8,92
B	6,6	5,9	1,88	0,10	11	0,61	0,17	0,17	0,50	5,58

1 58 1

Horizonte	CIC _K Meq/100	Bases cambiables		S.B. (%)	CIC _{Ca} Meq/100	S.B. (%)	Aluminio extraíble meq/100 gr	S.B. (%)	ΔCIC _{Ca}
		K ₂ O Gramos	CaO Gramos						
A11	43,34	1,12	7,80	2,02	25,2	35,53	1,19	33,21	7,81
A12	41,72	0,26	11,00	3,18	34,6	38,23	0,86	44,21	3,49
A13	40,11	0,11	11,40	4,00	38,7	38,76	0,64	49,84	1,35
A31	45,76	0,08	12,00	4,50	36,2	41,99	1,08	44,53	3,77
A32	48,46	0,08	11,00	4,62	32,4	40,92	1,30	42,74	7,54
B	59,76	0,06	9,20	8,08	29,0	49,00	8,44	34,04	10,76

x Determinado con acetato de amonio pH 7.0
 xx " " " " pH 4.8
 xxx CIC (pH 7.0) - CIC (pH 4.8)

"chroma", en función de la humedad, son normales y características en Andosoles (67). En el horizonte (B) la variación del "value" y del "chroma" de húmedo a seco fue también notable. El color claro de este horizonte correlaciona muy bien con el bajo contenido de materia orgánica y el alto contenido de hierro total (Fe_2O_3).

La textura de este perfil determinada en el laboratorio, varía de franco arcillosa a arenoso franca, lo cual está de acuerdo con las texturas determinadas en el campo de franco limosa y franco. Este es el único perfil en donde la textura determinada en el campo y laboratorio difieren significativamente, de lo que se deduce que los suelos sí fueron bien dispersados por el calgón. Esto se debe posiblemente a un bajo contenido de alofana, que se deja ver en la pequeña cantidad de cargas dependientes del pH que tiene este perfil. Según Aomine y Egashira (6) la falta de dispersión en los suelos de cenizas volcánicas se debe al componente alofánico.

La estructura en el horizonte A es granular, fina, fuerte a moderada; en el horizonte (B) es bloque subangular, fina, débil, característico de suelos jóvenes (67).

La poca adherencia y poca plasticidad en húmedo de estos suelos (87) es debido al bajo porcentaje de arcilla y al bajo contenido de óxido de silicio (81).

La densidad de partículas varía de 2,28 a 2,46 y hay una ligera tendencia a aumentar con la profundidad. Estos valores son bajos en comparación con el valor promedio de 2,65 g/ml asignado para

los suelos minerales, y seguramente se debe al contenido relativamente alto de materia orgánica. Vale aclarar que esta propiedad puede no tener mucho sentido en suelos volcánicos ya que los materiales amorfos tienden a no poseer partículas distintas.

La densidad aparente es baja, varía de 0,91 a 0,53 y tiende a disminuir con la profundidad, y el aumento de la humedad, porosidad y espacio de aire. La baja densidad aparente es característica en estos suelos y puede ser debido a la alta humedad ya que los suelos tienden a hincharse, favorecida por la alta porosidad. La tendencia de la densidad a bajar con la profundidad puede estar relacionado con el aumento de la humedad (39, 86).

Los valores de retención de humedad son altos, pero es necesario aclarar, que habiendo realizado esta determinación con suelo se cado al aire, los datos posiblemente sean inferiores a los que en realidad tienen estos suelos en condiciones de campo. Swindale (87) y Schalscha (83) indican que estos suelos son muy difíciles de mojar (saturar) cuando están secos, y los "peds" finos, pueden flotar por largo tiempo en la superficie del agua. Este fenómeno es debido a que las sustancias orgánicas que se adhieren a las superficies de partículas, generalmente repelen el agua y los ángulos de contacto son más grandes (87).

El coeficiente lineal de contracción varía entre 5,9 y 3%, valores que pueden considerarse como bajos, y seguramente se debe a la poca cantidad de alofana.

La humedad gravimétrica es alta debido a la baja densidad aparente y tiende a aumentar con la profundidad del perfil. El agua disponible hablando en términos volumétricos, es alta (20%) (39).

La porosidad es alta y aumenta con la profundidad del perfil y a medida que la densidad aparente disminuye.

El pH determinado en agua varió de 5,9 a 6,6, es decir que oscila de medianamente ácido a neutro (96). El pH determinado en Ca Cl_2 0,01M varía de 5,3 a 5,9 lo que indica una reacción de fuertemente ácido a medianamente ácido (96); el pH aumenta ligeramente con la profundidad, lo que indica que ha habido poca lixiviación de bases o un lavado general de todo el perfil. Por haberse determinado el pH en suelos secados al aire, probablemente estos valores son más bajos. La literatura (83, 87) indica que el pH disminuye en suelos que han sido secados al aire. En general, el pH es bajo debido a efecto acidulante de la materia orgánica y alta precipitación pluvial. Los valores del pH tienden a estabilizarse alrededor de 5,0. Según Loganathan y Swindale (87), es raro encontrar valores de pH mucho menores de éstos, debido a la capacidad amortiguadora de la alofana y de los geles de alúmina polimerizados en la sección del punto isoeléctrico.

Los valores de materia orgánica varían de 7,2 a 1,8% y disminuyen con la profundidad del perfil. Estos valores pueden considerarse bajos para suelos volcánicos (102) particularmente Andosoles, y se debe seguramente a las deposiciones recientes de cenizas (51).

El nitrógeno total varía de 0,4 a 0,1%. Estos valores son

relativamente altos con relación a otros suelos no volcánicos, pero debido a la estabilidad de la materia orgánica, su disponibilidad es baja. La disminución del nitrógeno total con la profundidad es drástica y correlaciona bien con la disminución de la materia orgánica.

La relación C/N varía entre 10 y 12 y se nota que contrariamente a muchos suelos no volcánicos, tienden a aumentar con la profundidad. Esto puede deberse a la alta fijación de materia orgánica por los materiales amorfos del subsuelo (67), o a que el subsuelo es un horizonte superficial enterrado.

La capacidad de intercambio de cationes, determinada con acetato de amonio a pH 7,0, varió de 43,3 a 59,8 y es considerada como mediana. Se registró un aumento con la profundidad que se debe en parte a las continuas y recientes deposiciones de ceniza, que van enterrando los horizontes superficiales más meteorizados y con mayores cantidades de materiales amorfos. La CIC con acetato de amonio a pH 4,8 se comporta de la misma manera. Sin embargo, sus valores disminuyeron debido a que las cargas dependientes del pH, que alcanzan a 10 meq/100 g sufrieron también una disminución.

El fenómeno ocurrido en este perfil se explica muy bien, ya que según Martini (67) estos suelos acumulativos y los perfiles se forman en parte de abajo hacia arriba mediante la deposición periódica de nuevas cenizas. En esta forma, el suelo sufre un continuo rejuvenecimiento, tiende a alcanzar gran espesor y adquiere un alto contenido de materiales orgánicos y amorfos. Este rejuvenecimiento

se deja ver en el aumento de arena y limo y en la disminución de la arcilla, materia orgánica, capacidad de cambio, bases cambiables y aluminio extraíble.

La saturación de bases varía entre 25 y 36%, valores que son bajos (62) si comparamos con el pH obtenido. Aparentemente esto se debe a la alta capacidad de cambio que resulta cuando ésta se determina a pH 7,0. El pH por el contrario tiende a mantenerse relativamente alto debido a la alta capacidad amortiguadora de la fracción activa del suelo (67).

El aluminio extraíble oscila de 1,0 a 8,0 meq/100 gr. Estos valores son bajos si comparamos con los obtenidos por Bornemisza e Igue (11) en Andosoles de Costa Rica. La tendencia del aluminio a aumentar con la profundidad especialmente en el subsuelo, se debe a una meteorización más avanzada.

El contenido de fósforo disponible varió de 3 a 0,6 ppm, valores que pueden considerarse como muy bajos debido a la gran fijación por el aluminio. El aumento de aluminio explica también la disminución del fósforo con la profundidad.

Fassbender (29) ha señalado una alta correlación para suelos de Costa Rica, entre la retención de fósforo y aluminio extraíble. Estos valores bajos son similares a los encontrados en suelos superficiales de origen volcánico por Fassbender (29), Müller (73) quienes los atribuyen también a la gran capacidad de fijación de fosfato señalada como característica en los Andosoles por otros investigadores (29, 67, 73, 87).

Los valores registrados para K_2O , CaO y MgO totales, son bastante bajos, lo cual puede estar relacionado con la composición de las cenizas. El contenido de Fe_2O_3 total varió de 6 a 9%, valores relativamente altos comparados con el Fe_2O_3 libres, lo que nos indica poca meteorización de estos suelos.

4.2. Perfil 2 (CR-65)

4.2.1. Información del sitio

Nombre del suelo : Andosol (92).
Ubicación : 3 Km al NE de San José de la Montaña.
Aproximadamente $10^{\circ}7'N$, $84^{\circ}10'O$.
Elevación : 1.800 m. s.n.m.
Fecha de observación : 12 de mayo, 1969.
Autor : Carlos Luzuriaga T.

Forma del terreno

Fisiografía del sitio : Declive convexo
Forma del campo circundante : Montañoso
Pendiente : 15 - 18% declive, uniforme
Vegetación : Kikuyo (Pennisetum clandestinum). Antes bosque muy húmedo (93).
Clima : Muy húmedo montano bajo (m h - M B) (93).
Precipitación pluvial de 2.800 mm y temperatura de $16^{\circ}C$ (23).
Material parental : Depósitos de cenizas volcánicas

Drenaje - Superficial : Bien drenado
 Interno : Clase 5 - algo excesivamente drenado
Tabla de agua : Muy profunda
Evidencia de erosión : Ninguna visible
Influencia humana : Muy ligera, causada por el pastoreo

4.2.2. Descripción general del perfil

Suelo típico de montaña, con una pendiente de 15 a 18%, muy profundo, bien drenado, negro a pardo grisáceo muy oscuro, con alto contenido de materia orgánica y sin piedras, moteados ni concreciones. En los horizontes 5 y 6 encontramos revestimientos posiblemente de materia orgánica. La distribución de raíces es normal, con la mayor parte de ellas en los primeros 30 cm.

4.2.3. Descripción individual de los horizontes

A₁₁ 0-12 cm Negro (10YR2/1) en húmedo y pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2) en seco; franco limoso; bloques subangulares a granular, fina a muy fina, fuerte a moderada; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, friable en húmedo, duro en seco; sin revestimientos; raíces finas, abundantes; límite claro, plano suave.

A₁₂ 12-30 cm Negro (10YR2/1) en húmedo y pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2) en seco; franco limoso; granular, muy fina, moderada; ligeramente pegajoso, ligeramente

duro en seco; sin revestimientos; raíces finas, frecuentes; límite claro, plano suave.

A₁₃ 30-55 cm Negro (10YR2/1) en húmedo y pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2) en seco; franco; granular, muy fina, fuerte; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, muy friable en húmedo, suave en seco; sin revestimientos; raíces finas, frecuentes; límite gradual, irregular.

A₃₁ 55-85 cm Pardo muy oscuro a pardo grisáceo muy oscuro (ó B₁₁) (10YR2/2-3/2) en húmedo y pardo a pardo oscuro (10YR4/3) en seco; franco; bloques subangulares y granular, fina, débil; ligeramente pegajosa, ligeramente plástico en mojado, friable en húmedo, ligeramente duro en seco; sin revestimientos; raíces finas, frecuentes; límite difuso, irregular.

A₃₂ 85-120 cm Pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2) en húmedo y pardo a pardo oscuro (10YR4/3) en seco; franco arcillo limoso; bloques subangulares, fina y mediana, moderada; ligeramente pegajosa, ligeramente plástica en mojado, friable en húmedo, duro en seco; revestimiento posiblemente de materia orgánica; raíces finas, comunes; límite claro, irregular.

B₂₁ 120-150 cm Pardo oscuro (10YR3/3) en húmedo y pardo amarillento (10YR5/4) en seco; franco arcillo limoso; bloques

subangulares, fina y mediana, moderada; ligeramente pegajosa, ligeramente plástica en mojado, friable a firme en húmedo, duro en seco; revestimientos posiblemente de materia orgánica; raíces finas, pocas; límite claro, irregular.

B₂₂¹⁵⁰⁻²¹⁰⁺ cm Pardo amarillento oscuro (10YR4/3) en húmedo y pardo amarillento (10YR5/6) en seco; franco arcillo limoso; bloques subangulares, fina y mediana, moderada; ligeramente pegajoso o pegajoso, ligeramente plástico a plástico en mojado, friable en húmedo, ligeramente duro en seco; sin revestimientos; raíces muy finas, muy pocas.

4.2.4. Propiedades físicas y químicas

En los cuadros 3 y 4 se presentan los resultados de las características físicas y químicas.

4.2.5. Discusión

Este perfil consiste de una secuencia A(B)C (67, 88) con un horizonte A bien desarrollado y muy profundo.

El horizonte (B) muestra algún desarrollo, traducido en su estructura bloques subangulares, fina, moderada, y el color pardo amarillento debido al aumento de óxidos de hierro libres y a la notable disminución de la materia orgánica.

CUADRO 3.- Características físicas del perfil 2 (CR-65)

Horizonte	Distribución de partículas										Clase textural	Clase textural en el campo
	Prof. (cm)	A. muy gruesa (%)	A. gruesa (%)	A. Media (%)	A. Fina (%)	A. muy fina (%)	Limo (%)	Arcilla (%)				
A11	0 - 12	0,06	0,24	1,96	7,18	1,97	46,0	12,0	Franco		Fco. limoso	
A12	12 - 30	0,10	0,56	3,56	7,00	3,65	64,0	8,0	Fco. limoso		Fco. limoso	
A13	30 - 55	0,18	0,85	4,60	7,02	1,91	59,0	6,0	Fco. limoso		Franco	
A31	55 - 85	0,17	0,97	4,22	7,74	2,06	57,0	2,0	Fco. limoso		Fco. arc. limoso	
A32	85 - 120	0,11	0,65	3,58	6,14	1,33	47,0	2,0	Fco. arenoso		Fco. arc. limoso	
B21	120 - 150	0,04	0,39	1,29	2,89	1,24	52,0	2,0	Fco. limoso		Fco. arc. limoso	
B22	150 - 210 ⁺	0,03	0,04	0,50	1,86	0,46	44,0	5,0	Fco. arenoso		arc. limoso	

Horizonte	Densidad partículas (gr/cc)	Densidad aparente (gr/cc)	Porosidad (%)	Humedad gravimétrica (%)	Humedad volumétrica (%)	Espacio de aire (%)	Coeficiente lineal de contracción ^x	
							Horizontal (%)	Vertical (%)
A11	1,99	0,45	77,2	111,6	50,3	26,7	9,2	8,8
A12	2,07	0,49	76,5	115,7	57,2	18,4	7,6	9,3
A13	2,11	0,43	79,6	120,4	51,8	27,5	8,2	2,9
A31	2,18	0,48	78,0	124,7	59,3	25,6	7,3	10,3
A32	2,21	0,48	78,1	122,8	58,1	21,2	13,2	13,4
B21	2,21	0,52	76,6	115,7	60,6	15,8	8,5	14,4
B22	2,27	0,50	78,2	128,5	62,6	18,6	12,2	15,5

Horizonte	Color		Humedad suelto al aire (%)	Retención de humedad							
	Húmedo	seco		0.01 bar (%)	0.05 bar (%)	0.5 bar (%)	1 bar (%)	2 bares (%)	5 bares (%)	10 bares (%)	15 bares (%)
A11	10YR2/1	10YR3/2	19,0	144,7	97,4	59,5	56,6	50,0	48,0	45,2	41,3
A12	10YR2/1	10YR3/2	23,0	140,5	116,3	60,5	56,6	50,6	44,4	37,1	31,0
A13	10YR2/1	10YR3/2	22,0	146,5	120,0	60,5	55,8	46,4	41,5	37,0	32,0
A31	10YR2/2	10YR4/3	14,0	139,0	115,0	61,0	57,5	44,4	40,5	37,8	32,6
A32	10YR3/2	10YR4/3	20,0	122,7	95,5	58,1	51,0	45,0	38,6	32,0	29,6
B21	10YR4/3	10YR5/4	19,0	127,7	100,0	62,5	60,0	52,6	46,0	37,8	31,1
B22	10YR4/4	10YR5/6	18,0	123,3	111,4	70,7	62,2	54,9	48,0	42,0	30,9

^x Determinados en condiciones de campo.

CUADRO 4.- Características químicas y análisis elemental del perfil 2 (CR-65)

Horizonte	pH	Materia orgánica		Nitrogeno total (%)	C/N	Fósforo soluble (ppm)	Fe2O3		Alofana		Elementos totales			
		CaCl 0.01M (%)	orgánica (%)				total (%)	libre (%)	Soluble (%)	Valor (%)	total (%)	K2O (%)	CaO (%)	MgO (%)
A11	5,5	5,2	19,63	0,97	12	0,65	2,68	4,63	15,17	19,80	0,65	0,64	1,44	5,55
A12	5,4	5,0	15,95	0,84	11	0,62	3,54	9,00	20,50	29,50	0,40	0,36	1,19	7,09
A13	5,9	5,2	14,41	0,69	12	0,61	3,94	6,02	22,55	28,57	0,39	0,52	1,50	6,46
A31(B11)	6,4	5,6	9,18	0,48	11	0,45	4,63	5,47	19,89	25,36	0,31	0,50	1,57	9,15
A32(B12)	6,5	5,4	6,57	0,35	11	0,48	4,63	4,55	23,78	28,33	0,24	0,36	1,05	9,15
B21	6,3	5,7	3,85	0,20	11	0,36	5,20	3,89	25,83	29,72	0,18	0,15	0,32	8,58
B22	6,2	5,6	2,38	0,14	10	0,35	5,71	3,57	27,88	31,45	0,16	0,10	0,32	9,15

Horizonte	CIC ^k Meq/100	Bases Cambiables		S.B. ^k (%)	CIC ^k Meq/100	K ^{mm} gramos de suelo	Ca ^{mm} Mg ^{mm}	Bases cambiables		Aluminio extraíble meq/100 gr	S.B. ^{mm} (%)	∆CIC ^{mm}
		K ^{mm}	Ca ^{mm} Mg ^{mm}					K ^{mm}	Ca ^{mm} Mg ^{mm}			
A11	51,15	0,84	4,60	3,12	16,7	41,46	1,00	1,40	3,00	5,15	15,02	9,69
A12	60,84	0,31	2,40	0,53	5,3	50,34	0,40	0,68	0,80	7,88	3,73	10,50
A13	63,53	0,19	3,90	0,46	7,2	53,30	0,21	1,40	0,60	7,11	4,15	10,23
A31(B11)	56,80	0,11	2,80	0,28	5,6	46,03	0,10	0,65	0,40	6,22	2,50	10,77
A32(B12)	53,30	0,08	2,60	0,28	5,5	44,15	0,08	0,41	0,24	6,44	1,63	9,15
B21	49,26	0,07	2,60	0,41	6,2	43,07	0,06	0,30	0,40	6,22	1,76	6,19
B22	52,49	0,16	3,44	0,66	8,1	43,07	0,16	0,78	0,80	2,44	4,04	9,42

^k Determinado con acetato de amonio pH 7.0

^{mm} " " " " " " pH 4.8

^{mm} CIC (pH 7.0) - CIC (pH 4.8)

El color negro del horizonte A tiene relación con el alto contenido de materia orgánica. En este horizonte el color varió, en húmedo, de negro a pardo grisáceo muy oscuro con un matiz o "hue" 10YR, un "value" de 2 a 3 y un "chroma" que varió de 1 a 2; en seco el color varió de pardo grisáceo muy oscuro a pardo oscuro, el "hue" se mantuvo lo mismo, el "value" varió de 3 a 4 y el "chroma" de 2 a 3. Las variaciones indicadas, en función de la humedad son normales en estos suelos.

En el horizonte (B) la variación del "value" y del "chroma" de húmedo a seco es de 2 unidades para ambos casos, adquiriendo un matiz claro, que está en relación con el aumento de hierro libre, hierro total y una reducción notable de materia orgánica en este horizonte. La textura de este perfil determinada en el laboratorio varía de franca a franca arenosa, con un porcentaje de arcilla muy bajo y alto en limo y arena. La determinada en el campo varía de franco limosa a arcillo limosa. Los elevados niveles encontrados en las fracciones arena y limo se deben a las dificultades en dispersar las arcillas ya que éstas muestran una marcada tendencia a formar pseudolimos y pseudoarenas como consecuencia de su naturaleza amorfa. También puede deberse a deposiciones recientes de arenas y cenizas volcánicas (77).

La estructura en el horizonte A es granular, fina, fuerte a moderada; en el horizonte (B) es de bloques subangulares, fina y mediana, y débil; esta estructura es típica de un suelo joven (67). La consistencia es ligeramente plástica y ligeramente pegajosa en

mojado, friable en húmedo y dura en seco y puede considerarse como típicas en estos suelos (67). La friabilidad puede deberse al alto contenido de óxidos de hierro (81).

La densidad de partículas es baja y tiende a aumentar con la profundidad, lo que correlaciona muy bien con la disminución de la materia orgánica. La densidad aparente es baja y aumenta ligeramente con la profundidad debido al aumento de la densidad de partículas y la disminución de la fracción arcilla. La humedad volumétrica, porosidad y espacio de aire permanecen estables. La alta porosidad se debe a la baja densidad aparente y a los altos contenidos de materia orgánica y materiales amorfos. Los valores de retención de humedad son altos y tienden a disminuir con la profundidad debido principalmente al menor contenido de materia orgánica. La humedad gravimétrica en condiciones de campo es muy alta, debido a la baja densidad aparente, sin embargo, en términos volumétricos, baja notablemente pero todavía podemos considerarlos como altos (mayores de 20%) (39).

El coeficiente lineal de contracción varía de 8 a 14%, valores que pueden considerarse como altos. El aumento del coeficiente de contracción con la profundidad está de acuerdo con el aumento del contenido de alofana.

El pH determinado en agua tiende a ser de medianamente a ligeramente ácido (96); el pH determinado en CaCl_2 varía de fuertemente ácido a medianamente ácido (96). El pH tiende a subir con la profundidad lo que correlaciona muy bien con la disminución de la

materia orgánica y del aluminio extraíble y el aumento del contenido de calcio y magnesio intercambiables y el porcentaje de saturación de bases.

El contenido de materia orgánica es alto, especialmente en los horizontes superiores; disminuye notablemente con la profundidad del perfil. Los valores altos de materia orgánica son semejantes a los encontrados en Andosoles del Japón (48), Sudamérica (102) y México (3). En el Japón (48), el alto contenido de materia orgánica en los Andosoles es atribuido, entre otras causas, a que el proceso de descomposición de la materia orgánica resulta inhibido por la gran capacidad de retención de humedad de estos suelos (8, 67, 72) y por su riqueza en aluminio activo que al reaccionar con el humus, le da estabilidad.

El contenido de nitrógeno total tiende a ser alto y medio, pero debido a que procede de una materia orgánica estable, que se descompone lentamente, estos suelos tienden a ser bajos en N disponible (67). La disminución del nitrógeno total con la profundidad está aparentemente relacionada con la disminución de la materia orgánica.

El alto contenido de materia orgánica, especialmente en los horizontes superficiales, permite que la relación C/N sea relativamente alta en comparación con la de los suelos no derivados de cenizas volcánicas (8).

La capacidad de intercambio de cationes es alta, con cargas

dependientes del pH altas que alcanzan a 10 meq/100 gr. En todos los horizontes, los valores permanecen estables; esto se debe a que si bien disminuye el contenido de la materia orgánica con la profundidad, aumenta el contenido de alofana, dando como consecuencia un equilibrio de los principales agentes causantes de la CIC de estos suelos.

Es necesario anotar que habiendo realizado esta determinación en suelo secado al aire, los datos son posiblemente inferiores a los que en realidad ocurren en condiciones de humedad en el campo. Schalscha (83), Kanehiro y Sherman (49) han señalado que en ciertos suelos de Chile y Hawaii respectivamente, que tienen grandes cantidades de material amorfo, la capacidad de intercambio disminuyó al ser secados y no recuperaron esta capacidad al remojarse. Ellos consideran que el efecto fue debido a la cristalización de los elementos de la fracción amorfa al secarse, y sobre todo a la formación de agregados que disminuyen la superficie de contacto y por lo tanto la CIC.

Los valores encontrados para las bases cambiables, ponen de manifiesto el predominio del calcio sobre el magnesio y de éstos sobre el potasio como lo encontraron otros investigadores de Andosoles de México (3) y del Japón (48).

La saturación de bases es muy baja en todo el perfil, habiendo una ligera tendencia a disminuir con la profundidad que se debe principalmente a un menor contenido de calcio y magnesio en los horizontes inferiores. El bajo porcentaje de saturación de bases se

debe a la capacidad de intercambio de cationes alta y no está de acuerdo con el pH relativamente alto.

El contenido de aluminio extraíble en general es relativamente alto en todo el perfil, pero se puede notar sin embargo un ligero aumento con la profundidad. Esto puede deberse al aumento de la alofana en los horizontes inferiores, que seguramente tienen un grado más avanzado de meteorización y fueron enterrados por deposiciones recientes de cenizas.

El contenido de fósforo disponible es sumamente bajo, disminuye notablemente con la profundidad. Este fenómeno se debe al aumento de aluminio extraíble y óxidos libres de hierro, que fijan el fósforo. Palencia (77) al correlacionar el fósforo disponible con el aluminio extraíble y óxidos libres de hierro encontró que el fósforo disponible tiende a bajar al incrementarse el contenido de aluminio extraíble y de Fe_2O_3 .

Los valores de óxidos libres de hierro y hierro total, pueden considerarse como medianos a altos, incrementándose notablemente con la profundidad. Esto puede deberse a que sucesivas deposiciones de cenizas fueron enterrando horizontes con meteorización más avanzada que por lo tanto contenían mayores cantidades de óxidos libres de hierro, aluminio extraíble y alofana que las capas suprayacentes con menor meteorización.

Los valores de alofana son altos, tienden a aumentar con la profundidad como consecuencia del menor grado de meteorización del

debe a la capacidad de intercambio de cationes alta y no está de acuerdo con el pH relativamente alto.

El contenido de aluminio extraíble en general es relativamente alto en todo el perfil, pero se puede notar sin embargo un ligero aumento con la profundidad. Esto puede deberse al aumento de la alofana en los horizontes inferiores, que seguramente tienen un grado más avanzado de meteorización y fueron enterrados por deposiciones recientes de cenizas.

El contenido de fósforo disponible es sumamente bajo, disminuye notablemente con la profundidad. Este fenómeno se debe al aumento de aluminio extraíble y óxidos libres de hierro, que fijan el fósforo. Palencia (77) al correlacionar el fósforo disponible con el aluminio extraíble y óxidos libres de hierro encontró que el fósforo disponible tiende a bajar al incrementarse el contenido de aluminio extraíble y de Fe_2O_3 .

Los valores de óxidos libres de hierro y hierro total, pueden considerarse como medianos a altos, incrementándose notablemente con la profundidad. Esto puede deberse a que sucesivas deposiciones de cenizas fueron enterrando horizontes con meteorización más avanzada que por lo tanto contenían mayores cantidades de óxidos libres de hierro, aluminio extraíble y alofana que las capas suprayacentes con menor meteorización.

Los valores de alofana son altos, tienden a aumentar con la profundidad como consecuencia del menor grado de meteorización del

vidrio volcánico en los horizontes superiores que son el producto de deposiciones recientes de cenizas que sepultaron horizontes con diferentes grados de meteorización.

El aumento del contenido de alofana con la profundidad está relacionado con el incremento de aluminio extraíble, óxidos libres y totales de hierro.

Los valores de alofana están expresados con base a suelo entero, pero si se expresan como porcentaje de la fracción activa, el contenido de alofana aumentaría a niveles mucho más altos.

Los valores encontrados para los óxidos totales de calcio, magnesio y potasio, son bajos y puede deberse al origen, composición y alteración de las cenizas.

4.3. Perfil 3 (CR-35)

4.3.1. Información del sitio

Nombre del suelo : Andosol (92)
Ubicación : Finca "La Suiza" 1 Km antes de Vara Blanca. Aproximadamente 10°9'N, 84°12'O.
Elevación : 1.900 m. s.n.m.
Fecha de descripción : 22 de agosto, 1969.
Autor : Carlos Luzuriaga T.

Forma del terreno

Fisiografía del sitio : Pendiente convexa.

Forma del campo circundante	:	Montañoso
Pendiente	:	Clase 3 (6-13%) inclinado
Microtopografía	:	Pendiente
Vegetación	:	Kikuyo (<u>Pennisetum clandestinum</u>). Antes bosque muy húmedo (93).
Clima	:	Muy húmedo montano bajo (m h - M B) (93). Precipitación pluvial de 3.533,9 mm y temperatura 15°C (23).
Material parental	:	Depósitos de ceniza volcánica provenientes del volcán Poás.
Drenaje - Superficial	:	Bien drenado
Interno	:	Clase 5 - algo excesivamente drenado.
Tabla de agua	:	Muy profunda
Evidencia de erosión	:	Moderada
Influencia humana	:	Poca, causada por el pastoreo.

4.3.2. Descripción general del perfil

Perfil profundo, bien drenado, el color oscila entre pardo muy oscuro a pardo amarillento con un declive de 8%, alto contenido de materia orgánica y sin piedras, moteados ni concreciones.

A partir de los 95 cm de profundidad encontramos un perfil enterado con características típicas de los Andosoles y aun más acen- tuados que en el perfil superpuesto. Todos los horizontes B al fro- tar entre los dedos se tornan más amarillentos. El 5o. horizonte es una ceniza amarillenta y el 8o. horizonte es una ceniza negra. La

distribución de las raíces es normal, con la mayor parte de ellas en los primeros 30 cm.

4.3.3. Descripción individual de los horizontes

- A₁₁ 0 - 15 cm Pardo muy oscuro (10YR2/2) en húmedo y pardo oscuro (10YR3/3) en seco; franco arenoso; granular, fina, fuerte; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, friable en húmedo, duro en seco; sin revestimientos; raíces medianas, abundantes; límite abrupto, plano suave.
- A₁₂ 15 - 30 cm Pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2) en húmedo y pardo grisáceo oscuro (10YR4/2) en seco; franco arenoso; granular, fina, moderada; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, friable en húmedo, ligeramente duro en seco; sin revestimientos; raíces medianas, abundantes; límite claro, plano suave.
- A₃ 30 - 60 cm Pardo oscuro (10YR3/3) en húmedo y pardo a pardo oscuro (10YR4/3) en seco; franco arenoso; bloques subangulares, fina, débil; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, friable en húmedo, ligeramente duro en seco; al frotar el suelo entre los dedos se torna más amarillento, raíces medianas, frecuentes; límite claro, plano suave.
- B 60 - 75 cm Pardo amarillento oscuro (10YR3/4) en húmedo y paro amarillento oscuro (10YR4/4) en seco; franco areo

noso; bloques subangulares, mediana, débil; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, friable en húmedo, ligeramente duro en seco al frotar el suelo entre los dedos se torna más amarillento; raíces finas, comunes; límite claro, plano suave.

- C₁ 75 - 95 cm Pardo amarillento oscuro a pardo amarillento (10YR 4/4-5/6) en húmedo y pardo amarillento (10YR5/8) en seco; franco arenoso (gravoso); bloques subangulares, mediana, débil; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, friable en húmedo, ligeramente duro en seco; es una ceniza amarillenta; raíces finas, pocas, límite claro, plano suave.
- II A₁b 95-115 cm Pardo amarillento oscuro (10YR3/4) en húmedo y pardo a pardo oscuro (10YR4/3) en seco; franco arenoso; bloques subangulares, mediana, débil; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, friable en húmedo, duro en seco; al frotar el suelo entre los dedos, se torna más amarillento; raíces finas, pocas; límite claro, plano suave.
- II Bb 115-140 cm Pardo oscuro (10YR3/3) en húmedo y pardo amarillento oscuro (10YR4/4) en seco; franco arenoso; bloques subangulares, mediana, débil; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, friable en húmedo, duro en seco; al frotar el suelo entre los dedos, se torna más amarillento; raíces finas, pocas; límite claro, plano suave.

II C₂ 140-170⁺ cm Negro a gris muy oscuro (10YR2/1-3/1) en húmedo y pardo pálido (10YR6/3) en seco; franco arenoso; sin estructura; se trata de una capa dura de ceniza negra.

4.3.4. Propiedades físicas y químicas

En los cuadros 5, 6 y 7 se presentan los resultados de las características físicas y químicas.

4.3.5. Discusión

Este perfil consiste en dos secuencias A(B)C, siendo la inferior un perfil enterrado. Los horizontes A del perfil superpuesto son más profundos y desarrollados que el subyacente. Los horizontes (B) de ambas secuencias presentan una profundidad muy similar. Son débilmente desarrollados lo que está evidenciado por su estructura débil.

El horizonte C de la secuencia superior se ha desarrollado a partir de una ceniza amarillenta y el horizonte IIC₂ a partir de una ceniza negra. Es bien notorio que el C de la secuencia superior tiene un mayor grado de meteorización que su similar de la secuencia subyacente.

En el horizonte A de la secuencia superior, el color varió en húmedo de pardo muy oscuro a pardo oscuro y en la secuencia inferior el color es pardo grisáceo muy oscuro; en seco el color en el horizonte indicado varió de pardo a pardo oscuro y pardo a pardo oscuro respectivamente en las dos secuencias.

CUADRO 5.- Características físicas del perfil 3 (CR-35)

Horizonte	Prof. (cm)	Distribución de partículas							Clase textural	Clase textural en el campo
		A. muy gruesa (%)	A. gruesa (%)	A. Media (%)	A. Fina (%)	A. muy fina (%)	Limo (%)	Arcilla (%)		
A11	0 - 15	0,90	2,39	3,32	5,22	1,06	26,0	24,0	Fco. arc. arenoso	Fco. arenoso
A12	15 - 30	0,44	2,18	4,51	5,80	1,60	32,0	20,0	Franco	Fco. arenoso
A3	30 - 60	0,47	3,40	7,98	7,01	1,05	22,0	8,0	Fco. arenoso	Fco. arenoso
B	60 - 75	1,58	7,72	13,84	11,78	2,00	20,0	6,0	Fco. arenoso	Fco. arenoso
C1	75 - 95	4,67	20,92	19,52	11,35	1,92	22,0	4,0	Arenoso Fco.	Fco. arenoso
IIA1b	95 - 115	0,30	2,46	9,26	7,18	1,35	18,0	6,0	Arenoso Fco.	Fco. arenoso
IIBb	115 - 140	0,23	2,59	10,07	8,07	0,79	16,0	6,0	Arenoso Fco.	Fco. arenoso
IIC2	140 - 170 ⁺	0,95	5,78	20,06	21,93	5,69	28,0	6,0	Fco. Arenoso	Ceniza Negra

CUADRO 6.- Características físicas del perfil 3 (CR-35)

Horizonte	Densidad partículas (gr/cc)	Densidad aparente (gr/cc)	Porosidad (%)	Humedad gravimétrica (%)	Humedad volumétrica (%)	Espacio de aire (%)	Coeficiente lineal de contracción*		
							Horizontal (%)	Vertical (%)	
A11	1,87	0,27	85,9	316,4	84,4	1,8	22,7	33,0	27,9
A12	2,01	0,34	82,8	230,5	70,5	11,5	30,0	34,4	32,2
A3	2,08	0,28	86,6	239,6	67,4	18,3	27,3	33,0	30,2
B	2,35	0,29	87,2	231,0	63,5	23,4	12,2	19,4	15,8
C1	2,57	0,59	79,7	110,3	61,6	19,9	1,4	1,7	1,6
IIA1b	2,07	0,27	86,6	265,5	73,3	18,9	54,0	58,7	56,4
IIBb	2,26	0,28	87,3	285,2	78,7	9,4	31,4	29,5	30,5
IIC2	2,50	0,69	76,0	120,6	68,8	7,2	1,7	2,5	2,1

Horizonte	Color		Humedad suelta al aire (%)	Retención de humedad							
	Húmedo	seco		0.01 bar (%)	0.05 bar (%)	0.5 bar (%)	1 bar (%)	2 bares (%)	5 bares (%)	10 bares (%)	15 bares (%)
A11	10YR2/2	10YR3/3	14,0	142,1	102,4	80,5	71,5	61,2	57,8	50,0	46,6
A12	10YR3/2	10YR4/2	25,0	94,1	79,0	62,0	50,6	42,7	35,4	30,6	28,1
A3	10YR3/3	10YR4/3	20,0	89,1	61,1	49,7	38,6	33,4	27,8	24,8	21,0
B	10YR3/4	10YR4/4	19,0	83,3	66,2	43,3	38,3	31,1	26,8	21,2	20,2
C1	10YR4/4	10YR5/8	16,0	82,0	63,5	49,7	38,3	30,3	23,4	20,8	18,0
IIA1b	10YR3/4	10YR4/3	16,0	86,8	68,2	56,8	47,7	40,2	34,6	30,8	25,9
IIBb	10YR3/3	10YR4/4	19,0	96,0	73,5	56,2	48,9	41,8	42,6	29,9	23,6
IIC2	10YR2/1	10YR6/3	18,0	79,6	68,2	50,2	42,5	31,6	25,9	23,1	21,5

* Determinados en condiciones de campo.

El color relativamente claro de los horizontes A de las dos secuencias se debe posiblemente al alto contenido de hierro que oculta la influencia de la materia orgánica.

En el horizonte (B) de las dos secuencias, el color en húmedo se aclara notablemente tornándose pardo amarillento oscuro y pardo oscuro; en seco el color para las dos secuencias es pardo amarillento oscuro, o sea que de húmedo a seco no hubo variación significativa.

El horizonte C de la secuencia superior es una ceniza amarillenta con alto contenido de hierro y el de la secuencia inferior es una ceniza negra.

La textura de este perfil, determinada en el laboratorio, varía de franco arcillo arenosa a arena franca, lo cual está de acuerdo con las texturas determinadas en el campo, franco arenoso (gravo so), pudiendo decir por lo tanto que hubo una buena dispersión. Esto puede deberse a que estos suelos al ser secados al aire, permanecieron con alto porcentaje de humedad (hasta 25%), por lo tanto, los agregados que se forman al perder humedad fueron muy débiles, y el calgón pudo dispersarles en grado significativo.

Las estructuras de los horizontes A de las dos secuencias son granular fina, fuerte a moderada. El horizonte (B) de las dos secuencias tiene la misma estructura en bloques subangulares, mediana, débil. El horizonte C de la secuencia superior tiene la misma estructura de los horizontes (B), en cambio el horizonte C, de la se-

cuencia inferior, no tiene estructura por ser una ceniza negra endú recida.

Todo el perfil tiene poca adherencia y poca plasticidad en mojado y es friable en húmedo, muy característico en Andosoles.

La densidad de partículas es baja. Es notorio que en los horizontes A(B)C de ambas secuencias la densidad de partículas es muy similar y posiblemente se debe a la misma naturaleza de las cenizas.

La densidad aparente es muy baja; en este perfil registramos los niveles más bajos que en todos los suelos estudiados y se debe a que la humedad también muy alta provoca la hinchazón de estos sue los, acompañada de una porosidad muy alta.

Es muy importante hacer notar que las densidades para los hori zontes A(B)C de las dos secuencias son prácticamente iguales y se debe a condiciones similares de humedad, dando como resultado una porosidad alta, similar en los horizontes de cada secuencia.

Los valores de 0,2 gr/cc de densidad aparente encontrados en este perfil están de acuerdo con los encontrados en Hawaii, en donde inclusive se hallaron valores inferiores a 0,2 gr/cc (72).

La retención de humedad es alta en todo el perfil y tiende a disminuir con la profundidad en cada secuencia.

La humedad gravimétrica es alta, aunque el agua disponible en términos volumétricos, disminuye drásticamente debido a la densidad aparente baja, sin embargo, podemos considerarlos como medios

(15%) (39).

El coeficiente lineal de contracción en este perfil, alcanza su mayor grado, hasta 56%, se nota que los horizontes de la secuencia inferior alcanzan valores más altos.

El pH determinado en agua tiende a ser ligeramente ácido en todo el perfil (96), el pH determinado en CaCl_2 0,01M es fuertemente ácido (96). Es notorio que la reacción de los horizontes A(B)C de cada secuencia es igual.

El pH se mantiene estable en todo el perfil a pesar de la disminución notable de la materia orgánica con la profundidad, lo cual puede deberse a que sus valores están alrededor del punto isoeléctrico 5,0 (87). Algunos investigadores (8, 67, 86, 87 90) informan de la alta capacidad tampón de estos suelos en su punto isoeléctrico debido a la presencia de alofana y otros compuestos amorfos de aluminio.

El contenido de materia orgánica es alto en todo el perfil y disminuye notablemente con la profundidad en ambas secuencias. La secuencia superior tiene valores de materia orgánica más altos que la inferior; esto puede deberse a que los horizontes superiores del perfil están en contacto directo con los agentes más importantes de la meteorización, razón por la cual hay una mayor transformación de los vidrios volcánicos a alofana, y ésta según informan algunos investigadores (8, 67, 87) fija la materia orgánica.

La relación C/N es mediana, especialmente en los subhorizontes

A de cada secuencia; esto se debe a la mayor cantidad de materia orgánica que se mineraliza lentamente, ya sea porque gran parte es fijada (87) o porque las condiciones de clima son desfavorables para su nitrificación.

La capacidad de intercambio de cationes varía de mediana a alta. En cada secuencia disminuye con la profundidad lo cual se debe a la reducción en el contenido de materia orgánica y seguramente a la disminución de la alofana como se deja ver en la disminución de las cargas dependientes del pH con la profundidad. La CIC determinada a pH 4,8 es similar que la de pH 7,0. Sin embargo, sus valores disminuyen notablemente debido a las cargas dependientes del pH que en los horizontes A de cada secuencia alcanzan a 11 meq/100 gr, para luego disminuir significativamente en los horizontes (B) y C.

El contenido de bases cambiabiles en ambas secuencias es bajo y hay una notable disminución con la profundidad lo que indica que hubo un lavado general del perfil.

El porcentaje de saturación de bases es sumamente bajo y se debe a la alta capacidad de intercambio de cationes, al alto contenido de aluminio extraíble y al pH bajo. En las dos secuencias tiende a bajar con la profundidad.

El aluminio es alto en todo el perfil. Se nota una estabilidad en todos los horizontes de las dos secuencias lo que está relacionado con el pH también estable y bajo.

El contenido de fósforo disponible, sumamente bajo en las dos

secuencias, refleja la alta fijación por el aluminio soluble, en este perfil alcanza caracteres de mayor significación.

Entre los elementos totales, K_2O , MgO , CaO y Fe_2O_3 , se destaca nítidamente el contenido alto de hierro, especialmente en los horizontes A de cada secuencia, esto puede estar relacionado con el origen de las cenizas y una meteorización más avanzada de estos horizontes. Es importante destacar que el horizonte C de la secuencia superior, que es una ceniza amarilla, tiene alto contenido de hierro lo que contrasta con el bajo contenido del horizonte C en la secuencia que es una ceniza negra, o sea que el color estaría determinado por el contenido de hierro.

4.4. Perfil 4 (CR-56) Serie Birrisito

4.4.1. Información del sitio

Nombre del suelo : Andosol (92)
Ubicación : 5 Km de Turrialba hacia Juan Viñas. Aproximadamente $9^{\circ}53'N$, $83^{\circ}44'O$.
Elevación : 1.000 m. s.n.m.
Fecha de descripción : 14 de agosto, 1969.
Autor : Carlos Luzuriaga T.

Forma del terreno

Fisiografía del sitio : Pendiente convexa.
Forma del campo circundante : Colinoso
Pendiente : Clase 3 (6-13%) 10% inclinado.

- Vegetación : Kikuyo (Pennisetum clandestinum). Antes bosque muy húmedo (93).
- Clima : Muy húmedo premontano (m h - P) (93). Pre cipitación pluvial de 2.218,4 mm y tempera tura 22°C (23).
- Material parental : Depósitos cenizas sobre lavas viejas de ti po Andesítico (26).
- Drenaje - Superficial : Buen drenaje
- Interno : Clase 5 - algo excesivamente drenado
- Tabla de agua : Muy profunda
- Evidencia de erosión : Ninguna visible
- Influencia humana : Muy ligera, causada por el pastoreo.

4.4.2. Descripción general del perfil

Perfil muy profundo, bien drenado, el color oscila entre negro a pardo amarillento, con un declive de 10%, alto contenido de materia orgánica, presencia de crotovinas en todo el perfil y sin piedras, moteados ni concreciones, el C₁ presenta pseudomorfos de mate rial parental y la distribución de raíces es normal, con la mayor parte de ellas en los primeros 25 cm.

4.4.3. Descripción individual de los horizontes

A₁₁ 0 - 25 cm Pardo muy oscuro (10YR2/2) en húmedo y pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2) en seco; franco limoso; granular, fina, fuerte; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, friable en húmedo,

duro en seco; presencia de crotovinas; raíces finas, abundantes; límite claro, plano suave.

A₁₂ 25 - 65 cm Negro (10YR2/1) en húmedo y gris muy oscuro (10YR3/1) en seco; franco limoso; granular, muy fino, fuerte; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, muy friable en húmedo, ligeramente duro en seco; presencia de crotovinas; raíces finas, frecuentes; límite abrupto, quebrado.

B₂₁ 65 - 110 cm Pardo amarillento oscuro (10YR4/4) en húmedo y pardo amarillento (10YR5/4) en seco; franco limoso; bloques subangulares, débil, mediano; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado; friable en húmedo, duro en seco; presencia de crotovinas; raíces finas. comunes; límite claro, plano suave.

B₂₂ 110-135 cm Pardo amarillento oscuro (10YR4/4) en húmedo y pardo amarillento (10YR5/4) en seco; franco limoso; bloques subangulares, grueso, débil; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, friable en húmedo, ligeramente duro en seco; presencia de crotovinas; raíces finas, comunes; límite claro, plano suave.

B₃ 135 - 170 cm Pardo amarillento (10YR5/4) en húmedo y pardo amarillento (10YR5/4) en seco; franco limoso; bloques subangulares, mediano, débil; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, friable

en húmedo, muy duro en seco; presencia de crotovinas; raíces finas, pocas; límite claro, plano suave.

C₁ 170-210 cm Pardo amarillento (10YR5/6) en húmedo y pardo pálido (10YR6/3) en seco; franco limoso; bloques (ó B₃₂) subangulares, mediana, débil; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, friable en húmedo, ligeramente duro en seco; presencia de crotovinas; raíces finas, muy pocas.

4.4.4. Propiedades físicas y químicas

En los cuadros 8 y 9 se presentan los resultados de las características físicas y químicas.

4.4.5. Discusión

Este perfil consiste de una secuencia A(B)C, con un horizonte A bien desarrollado y muy profundo.

El horizonte (B) es profundo y bien desarrollado; no muestra ninguna aluviación, lo que seguramente se debe a la deficiente dispersión lograda y por lo cual los porcentajes de arcilla en los sub horizontes (B) son muy dudosos.

La estructura en el horizonte A, es granular, fina, fuerte, característico de Andosoles jóvenes, por las recientes deposiciones de cenizas (26). En cambio el horizonte (B) muestra una estructura más desarrollada, bloques subangulares, mediano a grueso, débil a

CUADRO 8.- Características Físicas del perfil 4 (CR-56)

Distribución de partículas											
Horizonte	Prof. (cm)	A. muy gruesa (%)		A. Gruesa (%)		A. Media (%)		A. Fina (%)		Clase textural	Clase textural en el campo
		A. muy gruesa (%)	A. Gruesa (%)	A. Media (%)	A. Fina (%)	A. muy Fina (%)	Limo (%)	Arcilla (%)			
A11	0 - 25	0,78	1,38	1,44	1,65	0,70	31,0	36,0	Fco. arcilloso	Fco. limoso	
A12	25 - 65	0,46	2,42	3,92	4,47	1,10	45,0	25,0	Franco	Fco. limoso	
B21	65 - 110	0,78	1,95	2,76	3,74	0,87	18,0	4,0	Arenoso Fco.	Fco. limoso	
B22	110 - 135	4,35	6,11	4,42	3,88	0,88	20,0	6,0	Fco. Arenoso	Fco. limoso	
B3 (B31)	135 - 170	1,74	3,00	2,31	2,80	0,88	18,0	10,0	Fco. Arenoso	Fco. limoso	
C1 (B32)	170 - 210 ⁺	0,39	1,05	1,52	2,21	0,30	18,0	6,0	Arenoso Fco.	Fco. limoso	

Horizonte	Densidad partículas (gr/cc)	Densidad aparente (gr/cc)	Porosidad (%)	Humedad gravimétrica (%)	Humedad volumétrica (%)	Espacio de aire (%)	Coeficiente lineal de contracción ¹	
							Horizontal (%)	Vertical (%)
A11	1,96	0,47	75,3	119,9	56,3	17,3	14,3	14,4
A12	2,03	0,37	82,1	155,9	57,7	24,2	15,4	13,9
B21	2,40	0,44	81,4	141,2	64,4	17,3	23,9	30,2
B22	2,48	0,63	74,4	103,3	65,9	10,6	13,9	18,8
B3 (B31)	2,42	0,74	69,0	82,7	61,8	8,6	21,1	23,0
C1 (B32)	2,19	0,52	76,4	142,6	74,2	2,0	26,5	23,6

Horizonte	Color	Humedad seco	Humedad sueco al aire (%)	Retención de humedad							
				0.01 bar (%)	0.05 bar (%)	0.5 bar (%)	1 bar (%)	2 bares (%)	5 bares (%)		
A11	10YR2/2	10YR3/2	25,0	123,9	88,0	68,9	54,8	45,0	40,8	38,1	30,8
A12	10YR2/1	10YR3/1	23,0	136,6	85,7	70,2	53,2	44,2	40,1	36,0	29,0
B21	10YR4/4	10YR5/4	19,0	72,2	68,9	58,0	46,0	39,7	32,8	27,2	22,3
B22	10YR4/4	10YR5/4	12,0	75,4	70,2	55,0	43,0	36,0	31,0	24,5	21,1
B3 (B31)	10YR5/4	10YR5/4	12,0	55,7	50,2	46,0	40,2	32,6	29,2	25,0	21,7
C1 (B32)	10YR5/6	10YR6/3	19,0	60,7	56,0	50,0	44,0	34,2	30,0	24,2	20,8

¹ Determinados en condiciones de campo.

CUADRO 9.- Características químicas y análisis elemental del perfil 4 (CR-56)

Horizonte	pH	Materia orgánica		Nitrogeno total (%)	C/N	Fósforo soluble (ppm)		Fe2O3 libre (%)	Alofana		Elementos totales			
		CaCl 0.01M (%)	H2O (%)			Soluble (%)	Valor (%)		Total (%)	K2O (%)	CaO (%)	MgO (%)	Fe2O3 (%)	
A11	5,4	4,6	22,78	0,86	15	2,13	4,34	27,86	13,74	41,60	0,12	0,11	0,27	5,95
A12	5,2	4,7	23,52	0,63	22	1,54	5,26	8,55	22,35	30,90	0,10	0,06	0,30	6,29
B21	5,5	5,3	4,46	0,17	15	1,07	6,97	4,68	11,07	15,78	0,07	0,03	0,05	11,44
B22	5,5	5,3	2,75	0,12	13	0,88	7,26	4,76	11,68	16,44	0,11	0,01	0,02	15,67
B3(B31)	5,1	5,0	2,31	0,09	15	0,56	4,91	3,58	13,53	17,11	0,11	0,01	0,03	12,47
C1(B32)	5,2	5,3	2,01	0,09	13	0,45	2,17	1,28	13,12	14,40	0,08	0,01	0,02	4,80

Horizonte	CIC μ Meq/100	Bases Cambiables		Ca μ gramos de suelo	Mg μ gramos de suelo	S.B. (%)	CIC μ Meq/100	K μ gramos	Bases Cambiables		Aluminio extraíble meq/100 gr	S.B. μ Δ CIC (%)
		K μ gramos	Ca μ gramos de suelo						Mg μ gramos de suelo			
A11	62,59	0,52	1,00	0,35	3,0	51,69	0,60	0,04	0,40	2,11	2,01	10,90
A12	76,18	0,10	0,05	0,07	0,3	56,68	0,12	0,01	0,05	10,16	0,31	17,50
B21	37,01	0,06	0,05	0,04	0,4	31,23	0,08	0,00	0,03	6,00	0,35	5,78
B22	31,50	0,20	0,05	0,03	0,9	29,61	0,27	0,01	0,02	5,77	1,01	1,89
B3(B31)	33,92	0,14	0,10	0,04	0,8	29,61	0,18	0,01	0,05	6,33	0,81	4,31
C1(B32)	48,05	0,05	0,13	0,05	0,5	42,00	0,05	0,01	0,03	7,11	2,14	6,05

μ Determinado con acetato de amonio pH 7.0
 μ " " " " pH 4.8
 μ CIC (pH 7.0) - CIC (pH 4.8)

moderado; esto nos da la idea de que se trata de un horizonte maduro. Esta característica está de acuerdo con lo que dice Dóndoli y Torres (26), que son suelos desarrollados sobre formaciones lávicas viejas pero que han recibido cenizas volcánicas recientes que generalmente forman el horizonte A.

En el horizonte A el color varía en húmedo de negro a pardo amarillento oscuro; en seco, el color varía de pardo grisáceo muy oscuro a pardo amarillento. En el horizonte (B) el color en húmedo es pardo amarillento oscuro, en seco es pardo amarillento. En el horizonte C el color en húmedo es pardo amarillento, en seco es pardo pálido.

La transición del color entre los horizontes A y (B) es brusca y entre el (B) y C, difusa, lo cual hace aparecer este perfil muy característico por el contraste de colores.

La textura de este perfil determinada en el laboratorio varía: en el horizonte A, de franco arcilloso a franco; la cual está de acuerdo con las texturas determinadas en el campo que son franco limosos. De aquí podemos decir que si hubo una buena dispersión y puede deberse a que los suelos secados al aire permanecieron con un alto porcentaje de humedad (25%) y no formaron agregados difíciles de dispersar. En los horizontes (B) y C, la textura determinada en el laboratorio varía de franco arenoso a arenoso franco; la determinada en el campo es franco limoso, lo cual nos indica que hubo una dispersión deficiente debido a que la humedad baja notablemente (16%).

Los valores de densidad aparente son bajos, tienden a aumentar con la profundidad debido a la disminución de la humedad y porosidad causada por la presencia de cantidades más altas de limo y arena que tienen menos capacidad de retención de agua y densidades más altas.

La retención de humedad es alta, disminuye con la profundidad, esto puede deberse a la baja notable del contenido de alofana que según algunos investigadores (8, 87) tiene alta capacidad de retención de agua.

El porcentaje gravimétrico de retención es muy alto, pero el porcentaje volumétrico debido a la densidad aparente baja, disminuye notablemente. El agua disponible es mediana (39).

El coeficiente lineal de contracción es alto y aumenta con la profundidad. Esto puede deberse a que la cantidad de humedad es más alta en los horizontes inferiores, la cual al perderse por secado al aire, produce una mayor contracción en dichos horizontes.

El pH determinado en agua tiende a ser fuertemente ácido, incrementándose la acidez con la profundidad, seguramente por que los horizontes (B) y C de este perfil son maduros y han sufrido lixiviación de bases; esto lo demuestra claramente la pobreza casi absoluta en calcio y magnesio totales y cambiante de estos suelos. El pH determinado en CaCl_2 varía de muy fuertemente ácido a fuertemente ácido; los valores más bajos se registran en el horizonte A debido al efecto acidulante del alto contenido de materia orgánica.

El contenido de materia orgánica en el horizonte A es muy alto y concuerda con el alto contenido de alofana en este horizonte, la cual fija la materia orgánica. En los horizontes (B) y C, el contenido de materia orgánica baja drásticamente y está relacionado con una baja similar de la alofana. Este fenómeno puede deberse a que por tratarse de horizontes maduros, hubo una notable cristalización de la alofana a minerales arcillosos del tipo 2:1 y 1:1, aunque las condiciones de acidez no son propicias para la formación de arcillas 2:1.

La relación C/N es alta, registrándose en este perfil los valores más altos de todos los estudiados. En el horizonte A la relación C/N llega a 22 y posiblemente se debe a la alta cantidad de alofana que fija la materia orgánica.

La capacidad de intercambio de cationes varía de mediana a alta. En el horizonte A se registran los valores más altos debido al alto contenido de materia orgánica y alofana. En los horizontes (B) y C, la CIC disminuye por una disminución similar de la materia orgánica y alofana.

La CIC dependiente del pH varía de alta a baja y esta variación está directamente relacionada con el contenido de alofana. En el horizonte A, donde la alofana y la materia orgánica alcanzan los valores más altos, la CIC dependiente del pH sube a 17 meq/100 gr, lo que nos demuestra que la alofana y la materia orgánica son las fracciones coloidales con cargas dependientes de pH más altas.

En los horizontes (B) y C, la CIC dependiente del pH baja proporcionalmente a la disminución de alofana y materia orgánica.

Los porcentajes de saturación de bases son sumamente bajos, alcanzando a 0,3%, lo que está relacionado con la alta capacidad de intercambio de cationes, el bajo contenido de bases cambiables y el pH también bajo.

Es notable en este perfil el bajo contenido de bases cambiables, lo que nos da la idea que se trata de suelos que debido a la alta precipitación pluvial han sufrido un lavado general del perfil.

El contenido de aluminio extraíble es alto y tiende a aumentar con la profundidad, especialmente en el subsuelo debido a que son suelos con una meteorización más avanzada. El aumento del aluminio extraíble con la profundidad está de acuerdo con la disminución del pH.

La pobreza de estos suelos en fósforo disponible nos demuestra la alta fijación que sufren los fosfatos por acción del aluminio en suelos derivados de cenizas volcánicas. El fósforo disminuye con la profundidad y se debe al aumento de aluminio extraíble que fija a éste especialmente en forma de fosfatos de aluminio.

El contenido de alofana varía de alto a mediano en los horizontes A y (B) C, respectivamente. Como se puede observar, hubo una disminución notable con la profundidad, lo cual sugiere que debido a una meteorización más avanzada, de los horizontes inferiores, la alofana se transformó en arcillas cristalinas.

Entre los elementos totales sobresale el alto contenido de hierro, especialmente en el subsuelo, el cual juntamente con el aluminio extraíble alto y óxidos libres de hierro también altos, nos dan la evidencia de que el subsuelo tiene un grado avanzado de meteorización.

4.5. Perfil 5 (CR-30) Serie Cervantes

4.5.1. Información del sitio

Nombre del suelo : Andosol (92)
Ubicación : 2 Km de Cervantes hacia Cartago, aproximadamente 9°52'N, 83°48'O.
Elevación : 1.300 m. s.n.m.
Fecha de la descripción: 21 de agosto, 1969
Autor : Carlos Luzuriaga T.

Forma del terreno

Fisiografía del sitio : Pendiente convexa
Forma del campo circundante : Fuertemente ondulado
Pendiente : Clase 2 (2 a 6%) suavemente inclinado
Microtopografía : Pendiente
Vegetación : Pasto Calingüero (Melinis minutiflora).
Antes bosque muy húmedo (93)
Clima : Muy húmedo premontano (m h - P) (93).
Precipitación pluvial de 2.800 mm y temperatura 19°C (23).

Material parental : Colada de lava reciente de tipo Andesítico (26) y posiblemente algo de cenizas volcánicas en la superficie.

Drenaje - Superficial : Buen drenaje

 Interno : Clase 5 - algo excesivamente drenado

Tabla de agua : Muy profunda

Presencia de piedras : Clase 3 - extremadamente pedregosa o tierra pedregosa, de 3 a 15% de la superficie cubierta en los alrededores

Evidencia de erosión : Ninguna visible

Influencia humana : Muy poca, pastoreo ocasional.

4.5.2. Descripción general del perfil

Perfil superficial, poco desarrollado, bien drenado, el color oscila entre negro a pardo amarillento, con un declive de 6%, alto contenido de materia orgánica, presencia de pocas crotovinas y sin moteados ni concreciones. La cantidad de piedras aumenta progresivamente con la profundidad del perfil hasta llegar a saturar el suelo. Todos los horizontes B, al frotar entre los dedos se tornan más amarillentos debido a la remoción de los revestimientos, quizás de materia orgánica. La distribución de raíces es normal con la mayor parte de ellas en los primeros 40 cm.

4.5.3. Descripción individual de los horizontes

A₁₁ 0 - 20 cm Negro (10YR2/1) en húmedo y gris muy oscuro (10YR3/1) en seco; franco; granular, fina, fuerte;

ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, friable en húmedo, duro en seco; sin revestimientos; raíces muy finas, abundantes; presencia de pocas piedras; límite claro, plano suave.

A₁₂ 20 - 40 cm Negro (10YR2/1) en húmedo y gris muy oscuro (10YR3/1) en seco; franco; granular, fina, fuerte; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, muy friable en húmedo, ligeramente duro en seco; sin revestimientos; raíces muy finas abundantes; muy pedregoso; límite abrupto, ondulado.

A₃₁ 40 - 65 cm Pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2) en húmedo y pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2) en seco; franco limoso; bloques subangulares, mediano débil; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, friable en húmedo, duro en seco; presencia de pocas crotovinas; al frotar el suelo entre los dedos se torna más amarillento; raíces finas, frecuentes; extremadamente pedregoso; límite gradual, plano suave.

A₃₂ 65 - 90 cm Pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2) en húmedo y pardo oscuro (10YR3/3) en seco; franco limoso; bloques subangulares, mediano, débil; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, friable en húmedo, ligeramente duro en seco; presencia de pocas crotovinas; al frotar el suelo entre los

dedos se torna más amarillento; raíces finas, frecuentes; pedregoso; límite abrupto ondulado.

B 90-100 cm Pardo (10YR5/3) en húmedo y gris pardo claro (10YR6/2) en seco; franco arcillo limoso; bloques subangulares, mediano, débil; pegajoso, plástico en mojado, friable en húmedo, ligeramente duro en seco; al frotar el suelo entre los dedos se torna más amarillento; raíces muy finas, pocas; muy pedregoso; límite claro, quebrado.

C₁ 100-140+ cm Pardo amarillento (10YR5/4) en húmedo y amarillo parduzco (10YR6/3) en seco; arenoso (gravoso); sin estructura; no pegajoso, no plástico en mojado, muy friable en húmedo, ligeramente duro en seco; sin revestimientos; sin raíces; tierra extremadamente pedregosa.

4.5.4. Propiedades físicas y químicas

En los cuadros 10 y 11 se presentan los resultados de las características físicas y químicas.

4.5.5. Discusión

Este perfil consiste de una secuencia A(B)C, aunque parece que se trata mejor de un regosol con un perfil AC poco profundo.

CUADRO 10.- Características físicas del perfil 5 (CR-30)

Distribución de partículas											
Horizonte	Prof. (cm)	A. muy gruesa (%)		A. Gruesa (%)		A. Media A. Fina (%)		Limo Arcilla (%)		Clase textural	Clase textural en el campo
		1	2	3	4	5	6	7	8		
A11	0 - 20	0,95	1,85	2,47	2,26	3,08	40,0	22,0	Franco	Franco	
A12	20 - 40	0,37	1,75	3,00	3,98	1,52	48,0	20,0	Franco	Franco	
A31	40 - 65	2,46	1,93	3,58	4,40	1,16	20,0	10,0	Fco. Arenoso	Fco. limoso	
A32	65 - 90	0,61	2,56	3,74	3,43	1,14	12,0	8,0	Arenoso Fco.	Fco. limoso	
B	90 - 100	1,38	6,04	8,01	6,76	1,45	14,0	6,0	Arenoso Fco.	Fco. arc. lim.	
C1	100 - 140 ⁺	13,96	20,86	16,02	10,10	1,73	15,0	7,0	Arenoso Fco.	Arenoso (grav)	

Horizonte	Densidad partículas (gr/cc)	Densidad aparente (gr/cc)	Porosidad (%)	Humedad gravimétrica (%)	Humedad volumétrica (%)	Espacio de aire (%)	Coeficiente lineal de tracción ^x	
							horizontal (%)	vertical (%)
A11	1,86	0,44	75,9	121,5	57,5	20,3	5,1	10,8
A12	1,88	0,59	78,9	172,0	63,2	12,5	14,3	23,0
A31	2,04	0,44	80,6	176,1	70,3	10,4	25,6	53,0
A32	2,12	-	-	-	-	-	23,1	24,9
B	2,37	-	-	-	-	-	4,0	15,0
C1	2,67	-	-	-	-	-	0,8	2,9

Horizonte	Color	Humedad sueco		Retención de humedad							
		Húmedo	Seco	0.01 bar	0.05 bar	0.5 bar	1 bar	5 bares	10 bares	15 bares	
A11	10YR2/1	18,0	10YR3/1	140,5	91,0	83,2	69,0	59,1	49,5	46,6	40,0
A12	10YR2/1	23,0	10YR3/1	133,3	95,4	79,1	69,1	60,6	55,6	51,2	48,9
A31	10YR3/2	19,0	10YR3/2	109,8	84,5	75,2	60,6	53,1	42,9	38,6	35,2
A32	10YR3/2	15,0	10YR3/3	110,4	82,7	71,0	56,4	49,6	42,2	36,2	31,8
B	10YR5/3	18,0	10YR6/2	92,9	71,2	60,1	51,8	45,5	35,8	30,8	29,6
C1	10YR5/4	14,0	10YR6/3	82,9	69,0	48,8	40,1	33,7	28,2	22,4	20,4

^x Determinados en condiciones de campo.

CUADRO 11.- Características químicas y análisis elemental del perfil 5 (CR-30)

Horizonte	pH		Materia orgánica (%)	Nitrogeno total (%)	C/N	Fosforo soluble (ppm)	Elementos totales			
	H ₂ O	CaCl ₂ 0.01M					CaCl ₂ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	MgO (%)
A11	5,6	5,2	25,39	1,03	14	3,10	0,32	0,53	1,34	5,15
A12	5,9	5,2	25,86	1,03	15	1,18	0,28	0,39	0,50	5,49
A31	5,9	5,2	12,53	0,53	14	1,11	0,24	0,35	0,50	7,55
A32	5,9	5,2	10,08	0,44	13	0,89	0,30	0,39	0,15	8,35
B	6,0	5,4	4,02	0,20	12	0,63	0,90	0,50	0,13	8,01
C1	6,1	5,5	1,34	0,06	13	0,47	3,10	0,55	0,20	12,98

100

Horizonte	Bases cambiables		CaM	MgM	S.B. (%)	CIC Meg/100	CICM	Bases cambiables		Aluminio extraíble mM	S.B. mM ΔCICM	
	KM	gramos de suelo						CaM	MgM			gramos de suelo
A11	67,30	0,31	6,80	2,80	10,8	59,22	0,42	6,20	3,20	4,89	16,58	8,08
A12	70,80	0,16	7,90	2,20	11,5	61,92	0,21	5,20	2,60	7,33	12,94	8,88
A31	64,88	0,09	2,20	0,58	4,4	53,19	0,11	0,22	0,60	7,89	1,68	9,69
A32	60,57	0,09	1,00	0,31	2,3	43,00	0,11	0,10	0,21	8,44	0,86	11,57
B	45,50	0,05	0,28	0,29	1,4	33,30	0,06	0,01	0,13	12,78	0,51	6,20
C1	29,88	0,05	0,24	0,14	1,4	27,46	0,06	0,02	0,08	4,67	0,58	2,42

M Determinado con acetato de amonio pH 7.0

MM " " " " " " pH 4.8

MMM CIC (pH 7.0) - CIC -(pH 4.8)

El horizonte A alcanza 90 cm de profundidad, lo que nos indica que se trata de un horizonte profundo, producto seguramente de varias deposiciones recientes de cenizas poco meteorizadas.

El horizonte (B) es más bien un C con ligeras características de (B); o se trata de un horizonte (B) de transición con pocas características de un (B) y más parecido al C. El C es un horizonte poco meteorizado formado por lavas recientes, muy pedregoso.

La estructura granular, fina, fuerte de los subhorizontes A y en bloques subangulares medianos, débil del (B) nos demuestra que se trata de un perfil muy joven. El C no tiene estructura.

El color, en húmedo, del horizonte A varía de negro a pardo grisáceo muy oscuro; en seco el color varía de gris muy oscuro a pardo grisáceo muy oscuro. El color está relacionado con el alto contenido de materia orgánica y el origen de las cenizas.

En el horizonte (B), el color en húmedo es pardo; en seco es gris pardo claro; la transición brusca del color entre los horizontes A y B se debe a una disminución también brusca de la materia orgánica y porque el horizonte A está formado por cenizas negras recientes en donde ha habido acumulación de materia orgánica como uno de los primeros pasos para la formación del perfil AC en regosoles. En el horizonte C el color en húmedo es pardo amarillento, en seco es amarillo parduzco, este color puede estar relacionado con el origen de la lava y con el alto contenido de hierro total.

La textura del horizonte A, determinada en el laboratorio,

varía entre franco y arenoso franco. La textura en los subhorizontes A_{11} y A_{12} , determinadas tanto en el laboratorio como en el campo, son francas; esto nos indica que si hubo una buena dispersión debido seguramente a que por tratarse de cenizas recientes, los vidrios volcánicos han sufrido poca transformación a alofana. Justamente estos dos subhorizontes tiene las cargas dependientes del pH más bajas y por consiguiente es de esperar que tengan menos alofana.

En los subhorizontes A_{31} y A_{32} la textura determinada en el laboratorio varía de franco arenosa a arenosa franco, contrastando notablemente con la determinada en el campo que fue franco limosa. Esto puede deberse a la deficiente dispersión lograda en el análisis mecánico producido por cantidades más altas de alofana. En el horizonte (B), la textura determinada en el laboratorio fue arenosa franco y la determinada en el campo fue franco arcillo arenosa; esta diferencia se debe a las pseudo arenas y pseudo limos que forman estos suelos al secarse.

La retención de humedad en los subhorizontes A es alta y aumenta con la profundidad; esto puede deberse a que las capas inferiores tienen más alofana que las superiores. El agua disponible, hablando en términos volumétricos es alta, mayor de 20% (39).

El coeficiente lineal de contracción es alto especialmente en los subhorizontes A_{31} y A_{32} , donde hay también un mayor contenido de materiales amorfos (87).

El pH determinado en agua tiende a ser medianamente ácido y el

determinado en CaCl_2 0,01M tiende a ser fuertemente ácido. Se nota un ligero aumento con la profundidad, lo que indica que por tratarse de suelos muy jóvenes ha habido poca lixiviación de sales, o simplemente se trata del efecto acidulante de la materia orgánica en los horizontes superiores donde el contenido de ésta es más alto.

El contenido de materia orgánica es alto en todo el perfil. En el horizonte A encontramos los valores más altos para todos los suelos estudiados (25%). Esto puede deberse a la alta humedad que produce un alto crecimiento vegetativo y sobre todo al clima húmedo templado que favorece la acumulación de materia orgánica. En los horizontes (B) y C, la materia orgánica disminuye notablemente y se debe a que por tratarse de horizontes muy jóvenes en formación, el proceso de acumulación de materia orgánica se circunscribe sólo a los horizontes superficiales. La disminución de la materia orgánica con la profundidad, está relacionada con el aumento del pH.

La capacidad de intercambio de cationes varía de alta a mediana. En el horizonte A los valores son altos y se debe al alto contenido de la materia orgánica y posiblemente de alofana. En los horizontes (B) y C, baja sensiblemente y está relacionada con la disminución notable de materia orgánica y de alofana.

La CIC determinada a pH 4,8 se comporta de la misma manera que la determinada a pH 7,0, pero sus valores son inferiores debido a las cargas dependientes del pH que en los subhorizontes A_{31} y A_{32} alcanzan los valores más altos. Esto puede deberse a que estos subhorizontes tienen un mayor grado de meteorización de los vidrios

volcánicos, por lo tanto, mayor contenido de alofana; luego dichos horizontes fueron sepultados por deposiciones recientes de cenizas que tienen menor grado de meteorización.

El porcentaje de saturación de bases es bajo debido a la alta capacidad de intercambio de cationes y a la poca meteorización del material de partida lo cual se traduce en una lenta liberación de las bases cambiabiles, las mismas que por la alta precipitación son lixiviadas inmediatamente.

Los valores encontrados para los óxidos totales de calcio, magnesio y potasio son bajos y están relacionados con la poca meteorización de estos suelos y la precipitación alta que lava el perfil.

4.6. Perfil 6 (CR-67)

4.6.1. Información del sitio

Nombre del suelo : Andosol (92)
Ubicación : 2 Km de Tapesco hacia Laguna, aproximadamente $10^{\circ}13'N$, $84^{\circ}24'O$.
Elevación : 1.600 m. s.n.m.
Fecha de descripción : 29 de agosto, 1969
Autor : Carlos Luzuriaga T.

Forma del terreno

Fisiografía del sitio : Pendiente convexa
Forma del campo circundante : Montañoso

Pendiente	:	Clase 3 (6 - 13%) 10% suavemente inclinado.
Microtopografía	:	Pendiente
Vegetación	:	Pasto natural. Antes bosque muy húmedo (93).
Clima	:	Muy húmedo montano bajo (m h - H B) (93). Precipitación pluvial de 3.533,9 mm y temperatura 17,5°C (23).
Material parental	:	Cenizas volcánicas arenosas del Poás
Drenaje - Superficial	:	Bien drenado
Interno	:	Clase 5 - algo excesivamente drenado
Tabla de agua	:	Muy profunda
Evidencia de erosión	:	Moderada
Influencia humana	:	Poca, causada por el pastoreo.

4.6.2. Descripción general del perfil

Perfil profundo; bien drenado, el color oscila de pardo muy oscuro a pardo grisáceo oscuro, con un declive de 10%, alto contenido de materia orgánica y sin piedras, moteados ni concreciones.

A partir de los 90 cm de profundidad encontramos un perfil enterrado, con características muy similares al superpuesto. En los tres horizontes inferiores encontramos crotovinas y en estos horizontes, el suelo se torna más amarillento al frotar entre los dedos. La distribución de raíces es normal, con la mayor parte de ellas en los primeros 45 cm.

4.6.3. Descripción individual de los horizontes

- A₁₁ 0 - 22 cm Pardo muy oscuro (10YR2/2) en húmedo y pardo grisáceo oscuro (10YR4/2) en seco; franco arenoso; granular, fina, fuerte; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, friable en húmedo, ligeramente duro en seco; sin revestimientos; raíces finas, abundantes; límite claro, plano suave.
- A₁₂ 22 - 45 cm Pardo muy oscuro (10YR2/2) en húmedo y pardo a pardo oscuro (10YR4/3) en seco; franco arenoso; granular, muy fino, fuerte; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, muy friable en húmedo. ligeramente duro en seco; sin revestimientos; raíces finas, abundantes; límite abrupto, ondulado.
- B 45 - 90 cm Pardo oscuro a pardo amarillento oscuro (10YR4/3-4/4) en húmedo y pardo amarillento (10YR5/3) en seco; franco arenoso; bloques subangulares, mediano, débil; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, friable en húmedo, ligeramente duro en seco; presencia de crotovinas; al frotar el suelo entre los dedos se torna más amarillento; raíces finas, frecuentes; límite claro, ondulado.

II A₁b 90-145 cm Pardo oscuro (10YR3/3) en húmedo y pardo a pardo oscuro (10YR4/3) en seco; franco arenoso; bloques subangulares, mediana, débil; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, friable en húmedo, duro en seco; presencia de crotovinas; al frotar el suelo entre los dedos se torna más amarillento; raíces finas, comunes; límite claro, ondulado.

II Bb 145-175⁺ cm Pardo grisáceo oscuro - pardo a pardo oscuro (10YR4/2-4/3) en húmedo y pardo amarillento (10YR5/4) en seco; franco arenoso; bloques subangulares, mediana, débil; ligeramente pegajoso, ligeramente plástico en mojado, friable en húmedo, duro en seco; presencia de crotovinas; al frotar el suelo entre los dedos, se torna más amarillento; raíces finas, pocas.

4.6.4. Propiedades físicas y químicas

En los Cuadros 12 y 13 se presentan los resultados de las características físicas y químicas.

4.6.5. Discusión

Este perfil consiste en dos secuencias A(B), donde la secuencia inferior corresponde a un perfil enterrado.

CUADRO 12.- Características Físicas del perfil 6 (CR-67)

Horizonte	Prof. (cm)	Distribución de partículas							Clase textural	Clase textural en el campo
		A.muy Gruesa (%)	A.Gruesa (%)	A.Mediana (%)	A.Fina (%)	A.muy Fina (%)	Límo (%)	Arcilla (%)		
A11	0 - 22	1,41	2,68	4,68	9,05	2,96	58,0	30,0	Fco. arcilloso	Fco. arenoso
A12	22 - 45	2,43	6,53	7,10	5,30	0,96	52,0	18,0	Fco. limoso	Fco. arenoso
B	45 - 90	3,79	6,97	11,66	12,30	1,67	44,0	6,0	Fco. arenoso	Fco. arenoso
IIA1b	90 - 145	1,65	4,70	9,80	9,05	1,20	56,0	12,0	Fco. limoso	Fco. arenoso
IIBb	145 - 175+	1,51	0,91	4,69	6,22	0,84	32,0	14,0	Fco. arenoso	Fco. arenoso

Horizonte	Densidad partículas (gr/cc)	Densidad aparente (gr/cc)	Porosidad (%)	Humedad gravimétrica (%)	Humedad volumétrica (%)	Espacio de aire (%)	Coeficiente lineal de contracción	
							Horizontal (%)	Vertical (%)
A11	2,13	0,63	70,2	95,4	59,4	10,5	7,3	7,9
A12	2,43	0,73	70,4	66,8	49,9	20,8	4,8	7,9
B	2,43	0,74	68,8	68,4	49,3	22,7	4,8	10,8
IIA1b	2,50	0,73	70,3	76,8	56,1	14,5	6,4	15,5
IIBb	2,64	0,76	71,8	77,6	57,3	14,3	10,2	16,0

Horizonte	Color Húmedo	Color seco	Humedad sueco al aire (%)	Retención de Humedad									
				0.01 bar (%)	0.05 bar (%)	0.5 bar (%)	1 bar (%)	2 bares (%)	5 bares (%)	10 bares (%)	15 bares (%)		
A11	10YR2/2	10YR4/2	12,0	126,8	105,5	76,0	52,0	43,8	39,6	31,2	25,8		
A12	10YR2/2	10YR4/3	14,0	94,5	79,2	58,8	44,2	34,2	29,8	24,2	21,6		
B	10YR4/3	10YR5/4	22,0	108,0	82,4	56,2	44,6	35,7	28,0	23,6	21,5		
IIA1b	10YR3/3	10YR4/3	25,0	100,0	80,4	54,8	47,3	38,2	33,3	28,2	24,8		
IIBb	10YR4/2	10YR5/4	15,0	82,0	60,3	48,3	40,2	34,3	30,1	27,9	23,8		

* Determinados en condiciones de campo.

CUADRO 13.- Características químicas y análisis elemental del perfil 6 (CR-67)

Horizonte	pH		Materia orgánica (%)	Nitrogeno total (%)	C/N	Fósforo soluble (ppm)	Elementos totales			
	H ₂ O	CaCl ₂ 0.01M					K ₂ O (%)	CaO (%)	MgO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
A11	5,5	5,0	15,88	1,00	9	1,46	0,40	0,38	1,05	8,58
A12	5,9	5,2	4,09	0,35	7	1,40	0,32	0,29	1,10	11,78
B	6,3	5,4	3,69	0,26	8	0,98	0,36	0,32	1,50	12,01
IIA1b	6,6	5,4	3,82	0,25	9	0,69	0,27	0,18	1,30	13,16
IIBb	6,3	5,6	0,60	0,08	4	0,40	0,17	0,01	0,02	14,87

Horizonte	Bases cambiables K ₂ Meq/100		Ca ⁺⁺ gramos de suelo	Mg ⁺⁺ Meq/100	S.B. (%)	CIC Meq/100	Ca ⁺⁺ Meq/100	Bases cambiables Ca ⁺⁺ Meq/100	Aluminio extraíble Meq/100 gr	S.B. %	ΔCIC
	CIC Meq/100	K ₂ Meq/100									
A11	47,38	0,90	4,20	1,70	14,4	42,00	1,80	1,80	6,67	11,43	5,38
A12	44,28	1,50	6,00	1,66	20,7	37,69	1,80	4,20	4,89	20,69	6,59
B	43,07	0,72	4,80	0,98	15,1	40,38	1,00	1,40	7,11	8,91	2,69
IIA1b	48,19	1,02	8,20	1,34	21,9	38,76	1,20	6,80	4,78	24,25	9,43
IIBb	38,76	0,31	8,20	1,34	25,4	34,46	0,41	6,80	1,25	24,98	4,30

x Determinado con acetato de amonio pH 7.0
 xx " " " " pH 4.8
 xxx CIC (pH 7.0) - CIC -(pH 4.8).

La primera secuencia y posiblemente la segunda son incompletas, debido a que el depósito de cenizas fue probablemente muy delgado, y al meteorizarse se transformaron todas en A y (B).

Los horizontes A de ambas secuencias tienen una profundidad y desarrollo similar que puede deberse al espesor también similar de la deposición de cenizas y a un grado de meteorización muy similar.

Los horizontes (B) de la misma manera muestran un espesor muy parecido.

El color de los horizontes A de ambas secuencias varía en húmedo, de pardo muy oscuro a pardo oscuro; en seco el color varía de pardo grisáceo oscuro a pardo oscuro. Las variaciones del color de húmedo a seco no son significativas.

En los horizontes (B) de las dos secuencias, el color en húmedo varía de pardo oscuro a pardo amarillento oscuro y en seco es pardo amarillento. Estas variaciones del color de húmedo a seco pueden considerarse como normales.

La textura de este perfil, determinada en el laboratorio, varía de franco arcilloso a franco arenoso, lo cual está de acuerdo con las texturas determinadas en el campo que fueron franco arenosa en todo el perfil. De aquí que se deduce que los suelos si fueron bien dispersados y esto puede deberse posiblemente a un bajo contenido de alofana que se deja ver en la pequeña cantidad de cargas de ependientes del pH que tiene este perfil.

La estructura de los horizontes A en las dos secuencias es

granular, fina, fuerte. El horizonte (B) de las dos secuencias tiene una estructura en bloques subangulares, mediano, débil, muy característico en estos suelos bastante jóvenes.

La estructura, muy similar en los horizontes de cada secuencia, nos inducen a pensar que se trata de suelos con un mismo grado de meteorización y desarrollo causado seguramente por un material de partida similar.

La densidad aparente es baja. Es notorio como la densidad aparente de los horizontes A y (B) de cada secuencia, es prácticamente la misma, pudiendo deberse a condiciones muy similares de humedad y a una densidad de partículas semejante.

Los valores de retención de humedad son altos, sin embargo en este perfil disminuyó notablemente con relación a los demás y esto puede deberse al contenido bajo de alofana.

El coeficiente lineal de contracción varía de medio a alto. Los valores más altos se registran en la secuencia inferior y puede deberse al mayor contenido de alofana.

El pH determinado en agua tiende a ser, en la secuencia superior, medianamente ácido y en la secuencia inferior, ligeramente ácido (96). El horizonte (B) de las dos secuencias tiene igual reacción, ligeramente ácido. El pH determinado en CaCl_2 0,01M tiene de a ser fuertemente ácido; el pH aumenta con la profundidad en el perfil en general y en cada secuencia en particular y se debe a la disminución de la materia orgánica, del aluminio extraíble y a un

aumento de calcio y magnesio cambiables y totales.

La tendencia del pH a aumentar con la profundidad debe ser producida por la alta precipitación pluvial (3.533 mm) que propicia la lixiviación de bases, o un lavado general de todo el perfil.

El contenido de materia orgánica varía de alto a mediano en todo el perfil, disminuye drásticamente con la profundidad en cada secuencia.

Es importante anotar que aparentemente en este perfil hubo una mineralización alta de la materia orgánica. Esto puede deberse a que los depósitos de cenizas fueron de poco espesor, de tal manera que favorecidas por las condiciones climáticas sufrieron una meteorización rápida y no dio lugar para acumulaciones altas de materia orgánica.

La relación C/N varía de mediana a baja, lo que nos indica que la mineralización de la materia orgánica fue alta. Esto puede deberse al bajo contenido de alofana evidenciado por las cargas dependientes del pH sumamente bajas.

La CIC varía en todo el perfil de mediana a baja, disminuye sensiblemente con la profundidad de cada secuencia y se debe a la baja en el contenido de materia orgánica y alofana.

Entre las bases cambiables es notorio el alto contenido de calcio y magnesio, los mismos que aumentan considerablemente con la profundidad, especialmente el calcio. Este fenómeno seguramente se debe a la lixiviación de este elemento hacia los horizontes inferiores.

El porcentaje de saturación de bases es bajo, sube notablemente con la profundidad a medida que disminuye la CIC y aumenta el contenido de bases cambiables.

El contenido de fósforo disponible es bajo en ambas secuencias del perfil, como en todos estos suelos derivados de cenizas volcánicas. Se nota que su contenido disminuye levemente con la profundidad en comparación con los otros perfiles estudiados en los que el fósforo disminuye drásticamente y puede deberse a que en este perfil se opera una baja notable del aluminio extraíble y alofana que son los causantes directos de la fijación del fósforo (29, 73, 87).

4.7. Clasificación de los perfiles estudiados

Los suelos de los perfiles CR-57, CR-65, CR-35, CR-30 y CR-67, de acuerdo con sus propiedades morfológicas, físicas, químicas, con condiciones de temperatura y humedad, son clasificados como Typic Dystrandepsts, familia medial, isothermic (35, 97, 98). El perfil CR-56, Serie Birrisito (26), que constituyó la excepción de los seis estudiados es clasificado como Hydric Dystrandepst, familia: thixotropic, isohyperthermic (35, 97, 98).

Los criterios para la clasificación en las diferentes categorías se discuten a continuación:

Orden: Inceptisol

Las características que presentan todos los perfiles son consideradas apropiadas para ubicarlos en el Orden Inceptisol, de

acuerdo al suplemento de la 7a. Aproximación (98).

Las siguientes características de los perfiles definen a estos suelos como Inceptisoles:

1. Son suelos minerales que no tienen horizonte espódico, argílico, nátrico, ni óxico, a menos que sea enterrado.
2. No tiene plintita que forme una fase continua dentro de los primeros 30 cm a partir de la superficie.
3. Una o más de las siguientes alternativas:
 - a. Puede tener:
 - 1) epipedon úmbrico
 - 2) epipedon hístico
 - 3) epipedon de "plaggen"
 - b. En suelos húmedos y sin horizonte sálico ni gípsico pueden tener las siguientes alternativas:
 - 1) horizonte cámbico
 - 2) cálcico
 - 3) duripan, o
 - 4) fragipan sin revestimientos de arcilla.
 - c. Saturación de bases determinada con sodio más del 15% en los primeros 50 cm a partir de la superficie, y disminuye con la profundidad debajo de los 50 cm.
 - d. Puede tener un epipedon mólico, con una o más de las siguientes propiedades:

- 1) Densidad aparente, a la capacidad de campo, de la fracción de tierra fina, menor de 0,85 gr/cc en el epipedon, o en el horizonte cámbico, o en los dos y el complejo de intercambio está dominado por materiales amorfos.
- 2) Un horizonte cámbico con saturación de bases menor del 50% (determinado en NH_4OAc) en todas partes o que decrece a menos de 50% a una profundidad de 1,8 m debajo de la superficie.
- 3) Las temperaturas medias del suelo, de verano e invierno, difieren en menos de 5°C a 50 cm de profundidad; y una de las características siguientes o las dos:
 - i) 35% o más de arcilla del tipo 2:1 y el epipedon descansa sobre materiales con menos del 40% de carbonato equivalente.
 - ii) El "value" en húmedo y en seco del epipedon mólico no es más oscuro que el de los horizontes subyacentes.

Las siguientes características sirven como criterio para ubicar estos suelos dentro del suborden Andept.

1. Debe tener una u otra de las siguientes propiedades:
 - a. Tienen en la fracción fina del suelo, una densidad aparente menor de 0,85 g/cc en el epipedon, en el horizono

te cámbico o en ambos, y el complejo de cambio está dominado por materiales amorfos.

b. Más del 60% son cenizas volcánicas vítreas, escoria volcánica u otros materiales piroclásticos vítreos en las fracciones limo, arena o grava.

2. No se saturan con agua en ninguna estación, o carecen de las características asociadas con la humedad para los Aquepts.

3. Carecen de epipedon de "Plaggen".

Para considerar estos suelos dentro del Gran Grupo de los Dystrandeps, presentan las siguientes características:

1. Tienen epipedon úmbrico u ócrico, y una u otra de las siguientes propiedades:

a. Son tixotrópicos en algún horizonte;

b. La retención de humedad a 15 bares es de 20% o más en la sección de control de 25 cm a 1 m de profundidad.

2. Carecen de arcilla que se deshidrata irreversiblemente en el tamaño de gravas.

3. Tienen temperaturas más calientes que de los Cryandeps; y

4. No tienen duripan.

La única característica que separa a los Dystrandeps de los Hydrandeps es que estos últimos tienen arcilla que se deshidratan irreversiblemente formando agregados del tamaño de grava. Al

respecto es necesario anotar que el suelo del perfil CR-56 (Serie Birrisito) presenta esta característica pero en forma leve por lo que se ha clasificado dentro del Gran Grupo Hydrandepts. Sin embargo, se podría considerar, dentro de este Gran Grupo, como una alternativa.

Por las características que a continuación se describen, es posible clasificar a los perfiles CR-57, CR-65, CR-35, CR-30, y CR-67 dentro del subgrupo Typic Dystrandeps:

1. Carecen de moteados con "chromas" de 2 ó menos dentro de 1 m a partir de la superficie.
2. Tienen un epipedon úmbrico de 25 cm o más de espesor.
3. No son tixotrópicos en ningún horizonte, en la sección de control entre 25 cm y 1 m.
4. Carecen de contacto lítico dentro de 50 cm a partir de la superficie.
5. Tienen CIC de más de 30 meq/100 gr de suelo (determinado en NH_4OAc) en todos los horizontes que se encuentran encima de un contacto lítico o hasta 1 m de profundidad.

Los suelos del perfil CR-56 se clasifican dentro del subgrupo Hydric Dystrandeps porque éste presenta tixotropismo, constituyendo la única diferencia con los Typic Dystrandeps.

Los siguientes criterios definen a la familia:

Thixotropic; bajo presión del suelo se funde repentinamente;

cuando se interrumpe la presión, regresa a su estado sólido (35).

Mendial; no es tixotrópica y la mayor parte tiene menor que 2 mm (35).

Se supone que las temperaturas medias del suelo de verano e invierno difieren en menos de 5°C.

Isothermic; son aquellos suelos cuya temperatura varía de 15°C a 22°C a 50 cm de profundidad.

Isohyperthermic; son suelos con temperaturas mayores de 22°C a 50 cm de profundidad.

5. DISCUSION POR DETERMINACIONES

En este capítulo se presenta la discusión por determinaciones con el objeto de poder comparar mejor cada propiedad entre los diferentes perfiles y horizontes de los suelos en estudio.

Esto nos permitirá relacionar las características morfológicas, físicas y químicas en forma global, a fin de poder uniformar los criterios sobre las propiedades más sobresalientes y de esta manera obtener un criterio unificado, claro y lógico para la clasificación de estos suelos.

5.1. Características morfológicas

Profundidad y espesor de los horizontes

Todos los perfiles estudiados consisten en una secuencia A(B)C (67, 88). Dos de estos son perfiles enterrados formados por dos secuencias también A(B)C (67, 88).

El horizonte A es bien desarrollado y profundo; de los seis perfiles estudiados, en cuatro de ellos, la profundidad de este horizonte pasa de 100 cm y en los dos restantes uno llega a 60 cm y otro a 45 cm.

El horizonte (B) (67, 88) en todos los perfiles está poco desarrollado, posee una estructura débil, no muestra ninguna evidencia de iluviación.

La variabilidad encontrada en el tipo y espesor de los hori-

zontes (especialmente A), hace evidente la influencia de deposiciones de cenizas volcánicas, no sólo periódicas sino también recientes.

Color

En el horizonte A el color en húmedo varió de negro a pardo muy oscuro con un matiz o "hue" 10YR en todos los subhorizontes, y con un "value" y un "chroma" que varían de 2 a 3 y de 1 a 3, respectivamente. El color determinado en seco fue más claro que el determinado en húmedo; las variaciones del "value" y del "chroma" en función de la humedad son normales y parece ser característico en Andosoles (67).

El horizonte (B) en húmedo mostró un color pardo amarillento oscuro con un "hue" 10YR, el "value" varió de 3 a 5 y el "chroma" de 3 a 4. El color determinado en seco fue más claro, en general pardo amarillento con un "hue" 10YR; el "value" varió de 4 a 6 y el "chroma" de 3 a 4.

En el horizonte C el color tanto en húmedo como en seco, en general tiende a aclararse con excepción del C en el perfil 3 (CR-35) que es una ceniza negra.

El "value" y el "chroma" en el horizonte A muestran cifras bajas lo que está íntimamente relacionado con el alto contenido de materia orgánica. El aumento de estas cifras tanto en el "value" como en el "chroma" en el horizonte B y C, está estrechamente asociado a la disminución de la materia orgánica y el aumento de

óxidos de hierro libres.

Estos suelos no muestran concreciones, moteados ni piedras. Sólo el perfil de la Serie Cervantes, por tratarse de un suelo muy joven formado sobre lavas recientes y deposiciones de cenizas también recientes, es muy pedregoso.

Estructura

La estructura en el horizonte A de todos los perfiles es granular, fina, fuerte. Esto se debe a que en los horizontes superficiales la materia orgánica es abundante y forma complejos orgánico-minerales que constituyen unidades estructurales muy aparentes que son bastante estables.

En el horizonte (B), dada la gran uniformidad de estructura de estos suelos, podemos generalizar diciendo que es de bloques subangulares, fina y mediana, débil. Se dice que la estructura es débil porque es poco visible especialmente en húmedo; pero es más evidente en seco (67). Parece que la estructura débil se debe según Martini (67) al alto contenido de materiales amorfos, materia orgánica y alta humedad, ya que al humedecerse y secarse el material se expande y contrae evitando de esta manera, la formación de una estructura estable. Investigaciones realizadas en Hawaii (88, 94) demostraron que una de las causas para que estos suelos tengan estructura débil es el alto contenido de materiales amorfos, ópticamente isotrópicos que impiden la orientación unidireccional de las partículas de arcilla, manteniendo una estructura débil.

Consistencia

Una de las características más uniformes en los suelos estudiados es la consistencia. En todos los horizontes, es ligeramente pegajosa, ligeramente plástica en mojado y friable a muy friable en húmedo, lo cual se debe al bajo porcentaje de arcilla o a su baja dispersabilidad.

Límite de horizontes

El límite entre los horizontes A y (B) que predomina en estos suelos, es abrupto a claro, con topografía variada.

Esta clase de límite está de acuerdo con los encontrados por Martini (67) en Andosoles de Centroamérica.

La distribución de raíces es normal (76) en todos los perfiles estudiados, con un mayor número de ellas en los primeros 40 cm.

5.2. Características físicas

Porcentaje de arcilla (Cuadro 14)

El porcentaje más alto de arcilla se registra en el perfil CR-57, el cual se encuentra a menor elevación; sin embargo, con el aumento de elevación no se observa una disminución definida de arcilla.

El grado de meteorización y la profundidad de los perfiles, sí concuerda con un aumento definido de la fracción arcilla. En el perfil CR-57 se opera un pequeño incremento en el nivel de la

fracción de arcilla en el horizonte (B), lo que sugiere que ha habido cierto grado de iluviación de arcillas principalmente cristalinas.

Los elevados niveles encontrados de las fracciones de limo (Cuadro 15) y especialmente de arena en comparación con los de la fracción arcilla, puede deberse a la deficiente dispersión lograda en el proceso de análisis mecánico. Estos suelos muestran una tendencia muy marcada a la formación de pseudo limos y pseudo arenas como consecuencia del alto contenido de materiales amorfos.

El perfil CR-56, que se encuentra a menor elevación, tiene los porcentajes más altos de arcilla. De la misma manera, el mayor grado de meteorización y la profundidad se asocian con un aumento definido de arcilla; así, el perfil CR-56 (Serie Birrisito) que según Dóndoli y Torres (26) es originado sobre formaciones lávicas viejas, es el perfil más meteorizado y tiene los porcentajes más altos de arcilla.

La mayor abundancia de lluvia en esta vertiente parece que no ejerció ninguna influencia en el aumento de la fracción arcillosa en estos suelos.

Densidad aparente (Cuadro 16)

La densidad aparente es baja en todos los perfiles estudiados. Esta densidad baja está relacionada principalmente con el alto contenido de materiales amorfos y orgánicos.

En los perfiles localizados en la vertiente del Pacífico, se nota una tendencia bien definida en que la densidad aparente disminuye a medida que aumenta la altitud, y la precipitación.

La densidad aparente está directamente relacionada con la densidad de partículas (Cuadro 17).

En los perfiles de la vertiente del Atlántico, la densidad aparente también disminuye a medida que aumenta la altura y la precipitación, con la excepción del perfil CR-67 que a pesar de estar localizado a mayor altitud y con mayor precipitación tiene la densidad aparente más alta. Esto está relacionado con un aumento muy notable de la densidad de partículas y sobre todo con la drástica disminución de la alofana.

Retención de humedad a 15 bares (Cuadro 19)

La retención de humedad a 15 bares es alta, notándose que los suelos con un mayor contenido de alofana, densidad aparente más baja y alta porosidad, tienen los valores más altos de retención de humedad.

A pesar del alto contenido de humedad, estos suelos tienen una humedad disponible que varía de media a alta (15-20%) (39).

La 7a. Aproximación 97 utiliza la retención de humedad a 15 bares como uno de los criterios para la clasificación en el suborden Andept y otras categorías. La retención de humedad a 15 bares se utiliza en este sistema de clasificación como sustituto de los

CUADRO 16.- Densidad aparente (gr/cc)

Perfiles			
Pacífico		Atlántico	
(CR-57)	(CR-65)	(CR-56)	(CR-67)
0,91	0,45	0,47	0,44
0,77	0,49	0,37	0,39
0,68	0,43	0,44	0,44
0,71	0,48	0,63	-
0,63	0,48	0,74	-
0,53	0,52	0,52	-
	0,50		
	0,27		
	0,34		
	0,28		
	0,29		
	0,59		
	0,27		
	0,28		
	0,69		
			0,63
			0,73
			0,74
			0,73
			0,76

Cuadro 17.- Densidad de partículas (gr/cc)

Perfiles			
Pacífico		Atlántico	
(CR-57)	(CR-65)	(CR-56)	(CR-67)
2,28	1,99	1,96	1,86
2,44	2,07	2,03	1,88
2,46	2,11	2,40	2,04
2,45	2,18	2,48	2,12
2,43	2,21	2,42	2,37
2,43	2,21	2,19	2,67
	2,27		
	1,87		
	2,01		
	2,08		
	2,35		
	2,57		
	2,07		
	2,26		
	2,50		
			2,15
			2,45
			2,43
			2,50
			2,64

CUADRO 18.- Porcentaje de retención de humedad (0,01 bar)

Perfiles			
Pacífico		Atlántico	
(CR-57)	(CR-65)	(CR-56)	(CR-67)
83,3	144,7	123,9	140,5
85,0	140,5	136,6	133,3
93,1	146,5	72,2	109,8
101,9	139,0	75,4	110,4
100,0	122,7	55,7	92,9
100,0	127,7	60,7	82,9
	123,3		
			126,8
			94,5
			108,0
			100,0
			82,0

CUADRO 19.- Porcentaje de retención de humedad (15 bares)

Perfiles			
Pacífico		Atlántico	
(CR-57)	(CR-65)	(CR-56)	(CR-67)
23,8	41,3	30,8	40,0
22,9	31,0	29,0	48,9
23,3	32,0	22,3	35,2
22,4	32,6	21,1	31,8
22,3	29,6	21,7	29,6
25,8	31,1	20,8	20,4
	30,9		
			25,8
			21,6
			21,5
			24,8
			25,8

porcentajes de arcilla en suelos donde esta fracción es difícil de dispersar. El uso de este parámetro está basado en la observación hecha por Lund en 1959 (59) que, en ausencia de grandes cantidades de materia orgánica, la retención de humedad a 15 bares, tiene una alta correlación con el porcentaje de arcilla en suelos de difícil dispersión (59).

5.3. Características químicas

Materia Orgánica (Cuadro 20)

En el Cuadro 20 se presenta el contenido de materia orgánica en todos los perfiles estudiados, como se puede observar en los horizontes A, la materia orgánica es alta, y en los horizontes (B) y C, varía de mediana a baja, respectivamente.

Es notoria la disminución drástica del contenido de materia orgánica con la profundidad. La mayor acumulación de materia orgánica ocurre en los dos o tres primeros subhorizontes para luego decrecer en más del 50% en los horizontes inferiores. Takehara (48) dice que la acumulación de materia orgánica en los horizontes superficiales en Andosoles del Japón, se debe a la abundancia del sistema radical del pasto nativo y a que el proceso de descomposición de la materia orgánica resulta inhibido por la gran capacidad de retención de humedad de estos suelos y por su riqueza en aluminio activo que al reaccionar con el humus, le da estabilidad. Los altos contenidos de materia orgánica encontrados en los suelos, objeto del presente estudio, parecen tener la misma explicación.

La tendencia de la materia orgánica a subir, a medida que aumenta la altitud y la precipitación y disminuye la temperatura, en los suelos de ambas vertientes, podría explicarse en términos del balance entre la adición de residuos vegetales y su lenta descomposición. La acumulación de materia orgánica se debe a que la mayor precipitación favorece un mayor crecimiento vegetativo, aun a grandes elevaciones donde la temperatura es baja, y reduce la actividad de los microorganismos responsables de su mineralización.

El efecto que ejerce el aluminio activo y otros materiales amorfos sobre la estabilización de la materia orgánica es muy notorio. Así vemos que el aluminio extraíble tiende a aumentar a medida que se incrementa la altitud y la precipitación y baja la temperatura, trayendo consigo un aumento similar de materia orgánica. Este fenómeno es por demás evidente en los perfiles de ambas vertientes.

El contenido de alofana está asociado directamente con el contenido de materia orgánica. Así vemos que los perfiles CR-65 y CR-35 de la vertiente del Pacífico, y CR-56 y CR-30 de la vertiente del Atlántico, que tienen el contenido de alofana más alto (evidenciado ya sea por determinación directa o por las cargas dependientes del pH), tienen también las cantidades más altas de materia orgánica. Esto es debido a que la alofana fija la materia orgánica en tal forma, que es poco accesible a la acción de los microorganismos (67).

En estos suelos, en que sus horizontes superficiales sufren un

continuo rejuvenecimiento por deposición frecuentes de cenizas, la variación en el contenido de materia orgánica está de acuerdo con el proceso de meteorización de dichas cenizas. Así, en cenizas muy frescas, donde los vidrios volcánicos han sufrido poca transformación a alofana, el contenido de materia orgánica es bajo; a medida que la meteorización de dichos vidrios volcánicos aumenta, el contenido de alofana y por lo tanto de materia orgánica alcanzan valores altos. En suelos más viejos, no incluidos en este estudio, la alofana se va transformando en arcillas cristalinas con la consiguiente disminución de alofana y materia orgánica.

El efecto de la materia orgánica sobre la CIC es evidente. Si relacionamos el contenido de materia orgánica y la CIC en todos los perfiles estudiados, vemos que esta última tiende a ser mayor a medida que aumenta la materia orgánica debido a su alta capacidad de intercambio de cationes y a los elevados niveles en que se encuentra.

La influencia de la materia orgánica sobre el pH es evidente. Así vemos que el pH tiende a subir a medida que baja el contenido de materia orgánica y aluminio extraíble y aumenta el contenido de calcio y magnesio cambiante y el porcentaje de saturación de bases.

El alto contenido de materia orgánica bien estabilizada (8, 48) (por lo tanto de difícil descomposición), resulta en una mineralización lenta del nitrógeno orgánico y en una relación C/N alta.

Capacidad de intercambio de cationes (Cuadros 22 y 23)

La CIC en todos los perfiles estudiados varía de media a alta. La CIC de los horizontes superficiales coincide con el rango de variación señalado por Aguilera (2) para suelos de México (15-60 meq/100 gr de suelo). También coincide con la CIC encontrada para Andosoles del Japón (30-60 meq/100 gr de suelo) por Kobo (52).

Existe una tendencia bien definida, en que la CIC en el horizonte A se incrementa al aumentar la altitud y la precipitación y bajan la temperatura. Esto sugiere que dicha tendencia está íntimamente relacionada con la materia orgánica y aluminio extraíble que también se asocian con los mismos factores climáticos.

Aparentemente las arcillas cristalinas no ejercen una influencia muy notable sobre la CIC ya que el complejo de cambio en estos suelos se ve dominado por la alofana y la materia orgánica. En los perfiles CR-57 y CR-56, que son los que mayor porcentaje de arcilla tienen, la CIC se debe casi íntimamente a la alofana y materia orgánica, ya que la disminución drástica de éstas, con la profundidad trae consigo una disminución similar de la CIC, aunque los horizontes presenten cantidades relativamente altas de arcilla.

La influencia del aluminio extraíble sobre la CIC, se debe a que en parte este aluminio es amorfo; por lo tanto, puede ser uno de los constituyentes de la alofana.

La CIC determinada con acetato de amonio a pH 7,0, arroja valores artificialmente altos, ya que debido al alto contenido de

materia orgánica y alofana, la capacidad de intercambio es altamente dependiente del pH (8, 52, 67). Esto quedó evidenciado al determinar la CIC con acetato de amonio a pH 4,8, los valores se redujeron hasta en 17 meq/100 gr de suelo, justamente en los perfiles con mayor contenido de materia orgánica y alofana.

Porcentaje de saturación de bases (Cuadros 24 y 25)

El porcentaje de saturación de bases es sumamente bajo en todos los perfiles estudiados, y esto se debe a la alta CIC y a la baja concentración de bases cambiables.

La baja concentración de bases, puede deberse a que siendo el material de partida reciente, y el clima frío, la meteorización es lenta, lo que contribuye a que haya poca liberación de cationes. Además debido a la alta precipitación, los pocos cationes liberados, son lixiviados inmediatamente.

El porcentaje de saturación de bases muestra una tendencia a aumentar con la profundidad; éste puede explicarse debido a que el contenido de bases y de materia orgánica disminuye con la profundidad, pero esta última en una proporción muy superior a la de las bases. De aquí que el porcentaje de saturación de bases aumente, no solo por haber disminuido la CIC total, sino porque el contenido de bases disminuye en una proporción comparativamente más pequeña.

Si relacionamos el porcentaje de saturación de bases con la altitud, precipitación y temperatura, vemos que el porcentaje tiende a bajar a medida que aumenta la altitud y la precipitación y que

disminuye la temperatura. Esto se debe a que en estas condiciones, la CIC total, tiende a aumentar por el efecto del incremento que también se produce en la materia orgánica y aluminio extraíble. Además, el aumento de la precipitación no sólo influye en la acumulación de materia orgánica, sino también en la lixiviación de bases, por lo tanto, al producirse un aumento de la CIC total y una disminución del contenido de cationes cambiabiles, el porcentaje de saturación de bases se reduce.

CUADRO 20.- Porcentaje de Materia Orgánica

P e r f i l e s			
P a c í f i c o		A t l á n t i c o	
(CR--57)	(CR-65)	(CR-55)	(CR-30)
7,20	19,63	22,78	25,39
5,13	15,95	23,52	25,86
4,69	14,41	4,46	12,53
4,05	9,18	2,75	10,08
4,39	6,57	2,31	4,02
1,88	3,85	2,01	1,34
	2,38		
			15,88
			4,09
			3,69
			3,82
			0,60

CUADRO 21.- Porcentaje de Nitrógeno Total

P e r f i l e s			
P a c í f i c o		A t l á n t i c o	
(CR-57)	(CR-65)	(CR-56)	(CR-30)
0,44	0,97	0,86	1,03
0,27	0,84	0,63	1,03
0,25	0,69	0,17	0,53
0,23	0,48	0,12	0,44
0,22	0,35	0,09	0,20
0,10	0,20	0,09	0,06
	0,34		
	0,15		
			1,00
			0,35
			0,26
			0,25
			0,08

CUADRO 22.- Capacidad de Intercambio de Cationes del suelo^{xx} (meq/100 gr)

Perfiles			
Pacífico		Atlántico	
(CR-57)	(CR-65)	(CR-56)	(CR-67)
43,34	51,15	62,59	67,30
41,72	60,84	76,18	70,80
40,11	63,53	37,01	64,88
45,76	56,80	31,50	60,57
48,46	53,30	33,92	45,50
59,76	49,26	48,05	29,88
	52,49		
	45,76		47,38
	53,57		44,28
	52,22		43,07
	38,22		48,19
	38,22		38,76
	46,44		
	58,68		
	33,78		

CUADRO 23.- Capacidad de Intercambio de Cationes del suelo^{xx} (meq/100 gr)

Perfiles			
Pacífico		Atlántico	
(CR-57)	(CR-65)	(CR-56)	(CR-67)
35,53	41,46	51,69	59,22
38,23	50,34	38,68	61,92
38,76	53,30	31,23	55,19
41,99	46,03	29,61	49,00
40,92	44,15	29,61	39,30
49,00	43,07	42,00	27,46
	43,07		
	35,53		42,00
	42,53		37,69
	42,53		40,38
	32,57		38,76
	31,76		34,46
	37,15		
	46,84		
	30,15		

xx Determinado con acetato de amonio pH 7.0
 " " " " " " pH 4.8

CUADRO 24.- Porcentaje de Saturación de Bases^N

Perfiles			
Pacífico		Atlántico	
(CR-57)	(CR-35)	(CR-56)	(CR-57)
25,2	16,7	9,3	10,8
34,6	5,3	5,4	11,5
38,7	7,2	1,2	4,4
36,2	5,6	1,0	2,3
32,4	5,5	1,0	1,4
29,0	6,2	1,0	1,4
	8,1	0,7	
		0,7	
			14,4
			20,7
			15,1
			21,9
			25,4

CUADRO 25.- Porcentaje de Saturación de Bases^N

Perfiles			
Pacífico		Atlántico	
(CR-57)	(CR-35)	(CR-56)	(CR-67)
33,2	13,0	9,9	16,6
44,2	3,7	2,3	12,9
49,8	4,2	0,8	1,7
44,5	2,5	0,5	0,9
42,7	1,6	0,4	0,5
34,0	1,8	0,5	0,6
	4,0	2,1	
		0,3	
		1,5	
			11,4
			20,7
			8,9
			24,3
			25,0

^N Determinado con acetato de amonio pH 7.0
^N " " " " pH 4.8

6. CONCLUSIONES

Una vez analizadas las propiedades morfológicas, físicas y químicas y habiendo clasificado los suelos dentro de un sistema com prensivo y adecuado (97), podemos llegar a las siguientes conclu siones:

1. Los Andosoles estudiados se encuentran localizados dentro de un área ecológica de bosque muy húmedo a bosque húmedo montano bajo, a más de 1000 m de altura; topografía inter media, con un declive que va del 6 al 13%; una precipitación media anual de 1.179 a 3.533 mm y una temperatura media anual comprendida entre 15°C y 22°C, trayendo como consecuencia que estos suelos se formen en condiciones de clima frío y templado húmedo (23).
2. Estos suelos se han desarrollado sobre un material parental relativamente reciente; cenizas volcánicas del Pleistoceno o del Terciario tardío y con frecuencia han sufrido un rejuvenecimiento por nuevas deposiciones de cenizas.
3. En base a sus propiedades morfológicas, nos permite establecer que:
 - a) Estos suelos consisten de una secuencia del tipo A(B)C (67, 88) con un horizonte A bien desarrollado y de pro fundidad variable, debido a las continuas deposiciones de cenizas. Este horizonte corresponde en la 7a. Aproximación (98) a un epipedon úmbrico aunque también

puede ser mólico o hístico. El horizonte (B) (67, 88) es poco desarrollado y corresponde según la 7a. Aproximación (98) a un horizonte cámbico.

- b) El color negro a pardo muy oscuro es predominante en los horizontes A por el alto contenido de materia orgánica y pardo amarillento en los horizontes (B), por el alto contenido de hierro total y bajo contenido de materia orgánica.
 - c) No tienen moteados, concreciones, revestimientos ni piedras, las raíces son abundantes especialmente en los horizontes superficiales; tienen pocas crotovinas.
 - d) La estructura en general en los horizontes A es granular, fina, fuerte. En los horizontes (B) es de bloques subangulares, fina y mediana, dévil.
 - e) La consistencia es uniforme en todos los horizontes del perfil; ligeramente plástica; ligeramente pegajosa en mojado, friable a muy friable en húmedo y en casi todos, es dura en seco.
 - f) El límite entre los horizontes A y (B) es abrupto a claro con predominancia del primero.
4. De acuerdo a las características físicas, sacamos las siguientes conclusiones:
- a) La textura media es la predominante y estos suelos, con porcentajes muy bajos de arcilla, son de difícil

dispersión en el análisis mecánico cuando han sido secados al aire.

- b) Todos los horizontes tienen una densidad aparente menor de 0,85 gr/cc, que es el límite para que estos suelos sean clasificados como Andepts según la 7a. Aproxímación (98).
- c) La densidad de partículas, en todos los perfiles, es baja en comparación con el valor promedio de 2,65 g/ml asignado para los suelos minerales, y se debe al alto contenido de materia orgánica.
- d) La retención de humedad es alta, tiene una estrecha relación con la densidad aparente, porosidad, materia orgánica y alofana. El porcentaje de humedad gravimétrica es alto en todos los perfiles debido a la densidad aparente baja. Hablando en términos volumétricos, disminuye drásticamente. En general podemos considerar que el agua disponible varía de mediana a alta.
- e) Todos los suelos una vez que han sido secados al aire son difíciles de rehumedecer, o sea presentan en mayor o menor grado, un secado irreversible, debido al alto contenido de materiales orgánicos y amorfos.
- f) Tienen alta porosidad, pero debido a la alta cantidad de agua que alojan, la aereación puede ser deficiente, lo que puede causar una baja actividad de los microorganismos.

5. De acuerdo con las características químicas sacamos las siguientes conclusiones:

- a) El pH determinado en agua varía de medianamente ácido a ligeramente ácido; el pH determinado en CaCl_2 0,01M es fuertemente ácido. Aunque estas dos mediciones guardan una estrecha relación, la reacción del suelo en CaCl_2 0,01M siempre fue menor que en agua, entre 0,5 y una unidad de pH.
- b) La materia orgánica es alta en todos los perfiles, pero debido a un clima húmedo frío, la poca actividad de los microorganismos y a las altas cantidades de alofana y aluminio (que fijan la materia orgánica), ésta es de difícil descomposición. Esto se traduce en una baja mineralización del nitrógeno orgánico y relaciones C/N altas.
- (c) La CIC es alta debido a contenidos altos de materia orgánica y alofana. La materia orgánica ejerce gran influencia sobre la CIC total especialmente en los horizontes superficiales donde su contenido es abundante. La alofana influye en la CIC ya sea por la propiedad que tiene de fijar la materia orgánica y por su alta capacidad de intercambio de cationes.
- d) La CIC dependiente del pH es alta debido a contenidos también altos de materia orgánica y alofana.

- e) El porcentaje de saturación de bases es sumamente bajo en todos los perfiles y se debe a la alta CIC y a la baja concentración de bases cambiables. El contenido bajo de bases cambiables nos sugiere que se trata de suelos que sufren una meteorización lenta, y que debido a la alta precipitación, los cationes son lixivios rápidamente.
 - f) El contenido de fósforo disponible es muy bajo debido a la alta capacidad de fijación de los fosfatos en estos suelos. Los fosfatos más abundantes son los de aluminio y hierro.
 - g) El contenido de alofana a pesar de haber sido determinado en base a suelo entero, es alto; lo que nos indica que si se expresa como porcentaje de la fracción activa, el contenido de alofana subiría mucho más. El alto contenido de aluminio extraíble está relacionado con el alto contenido de materiales amorfos.
 - h) El análisis elemental de los óxidos de Ca, Mg, K y Fe, revela el alto contenido de Fe_2O_3 , lo que puede deberse al origen y a la alteración de las cenizas.
6. La clasificación de estos suelos se realizó de acuerdo con el sistema norteamericano de clasificación de suelos, 7a. Aproximación (97).
- a) Todos los perfiles se clasificaron dentro del Orden In

ceptisol, sub-orden Andepts, Gran Grupo Dystrandeps. Los perfiles CR-57, CR-65, CR-35, CR-30 y CR-67 fueron clasificados dentro del subgrupo Typic Dystrandeps, pertenecientes a la familia medial, isothermic. El perfil CR-56 se clasificó dentro del subgrupo Hydric Dystrandeps correspondientes a la familia Thixotropic, Isohyperthermic. Esto nos indica que con excepción del último perfil mencionado, los suelos escogidos para el presente estudio, son los más representativos del Andosol modal.

7. Con base a sus propiedades físicas y químicas, se establecen en forma tentativa algunas conclusiones sobre la fertilidad de estos suelos:
 - a) En general podemos decir que son suelos relativamente fértiles, aunque debido a las continuas deposiciones de ceniza, ésta se ve notablemente disminuida.
 - b) El alto contenido de materiales amorfos y orgánicos, propicia una estructura porosa bastante estable (47) que aumenta la permeabilidad y predispone al suelo a sufrir pérdidas considerables de elementos nutritivos por lixiviación.
 - c) El contenido de materia orgánica alto, pero fuertemente estabilizado por los materiales amorfos, hace que ésta no se descomponga eficientemente, por lo que es

necesario la aplicación de cantidades considerables de fertilizante nitrogenado.

- d) Por el contenido muy bajo de fósforo, podemos decir que este es un elemento limitante de la producción en Andosoles. Las deficiencias de fósforo se deben a la alta capacidad de fijación de este nutrimento, asociado con la gran actividad del aluminio y hierro y a la presencia de los materiales amorfos.
 - e) Las aplicaciones de cal al suelo, son quizás necesarias no sólo para la corrección de su reacción sino también para la eliminación de la propiedad alítica. De esta manera se disminuye la reactividad del aluminio causante de la fijación del fósforo. Pero debido a la alta capacidad tampón es necesario grandes aplicaciones de cal lo que además de ser antieconómico, puede provocar desbalances nutricionales y otras deficiencias principalmente de algunos elementos menores.
8. En cuanto a su uso, podemos decir que estos suelos mantienen una parte considerable de la agricultura de Costa Rica. En ellos se asientan especialmente cultivos hortícolas, café, caña de azúcar, y pastos mejorados para la ganadería de leche.
9. El manejo de estos suelos se ve notoriamente facilitado por las buenas condiciones físicas. Debido a la topografía bastante irregular, estos suelos son muy propensos a

la erosión, por lo cual deben tomarse estrictas medidas para evitarla, tales como: construcción de terrazas, rotación adecuada de cultivos y sobre todo el establecimiento de cultivos perennes como pastos, café y posiblemente forestación en áreas muy inclinadas.

7. RESUMEN

Con el propósito de contribuir al mejor conocimiento de la naturaleza de uno de los grandes grupos de suelos más importantes de Costa Rica, se estudiaron las propiedades morfológicas, físicas y químicas de seis Andosoles procedentes del área más afectada por la actividad volcánica, localizada principalmente a lo largo de la meseta central. Una vez estudiadas estas propiedades, los suelos fueron clasificados de acuerdo al sistema norteamericano de clasificación, 7a. Aproximación (35, 97, 98).

Se describieron seis perfiles, localizados, tres en la vertiente del Pacífico y tres en la vertiente del Atlántico. Los perfiles CR-57, CR-65 y CR-35 forman parte de la vertiente del Pacífico, localizados a 1.700, 1.800 y 1.900 m. s.n.m. respectivamente. El clima es templado húmedo, las temperaturas medias anuales para cada perfil son de 17,0°C, 16,0°C y 15,0°C y la precipitación pluvial corresponde a 1,179 mm, 2.800 mm, 3.553 mm, respectivamente.

Los perfiles CR-56, CR-30 y CR-67, están en la vertiente del Atlántico, localizados a 1.000, 1.300 y 1.600 m. s.n.m., respectivamente. El clima es tropical húmedo en los dos primeros y templado húmedo en el tercero; las temperaturas medias para cada sitio son de 22°C, 19°C y 17,5°C; la precipitación pluvial es de 2.218 mm, 2.800 mm y 3.533 mm, respectivamente

El material parental predominante en estos suelos es de naturaleza andesítica y basáltica (101).

En la morfología de estos suelos, predominan los perfiles A(B)C y los enterrados. El horizonte A es bien desarrollado, profundo de un color negro a pardo muy oscuro; textura media; estructura granular, fina, fuerte; consistencia ligeramente plástica y ligeramente pegajosa en mojado, friable a muy friable en húmedo. Este horizonte corresponde en la 7a. Aproximación a un epipedon úmbrico (98). El horizonte (B) es poco desarrollado, de un color pardo amarillento; textura media; estructura de bloques subangulares, fina y mediana, débil; consistencia ligeramente plástica y ligeramente pegajosa en mojado, friable en húmedo. Este horizonte corresponde en la 7a. Aproximación a un horizonte cámbico (98).

En cuanto a las propiedades físicas, la densidad aparente de todos los horizontes es menor de 0,85 g/cc que es el límite para que sean clasificados como Andepts según la 7a. Aproximación; la densidad de partículas es inferior a 2,65 g/cc asignado a los suelos minerales y se debe al alto contenido de materia orgánica; la retención de humedad es alta y está relacionada con la porosidad, materia orgánica y alofana. El agua disponible, en términos volumétricos, es alta.

Todos los suelos, una vez secados al aire, son difíciles de rehumedecer, o sea que presentan un secado irreversible y tienden a formar agregados que son difíciles de dispersar para el análisis mecánico.

De acuerdo con las propiedades químicas, podemos decir que, el bajo porcentaje de saturación de bases y el alto contenido de

aluminio extraíble, son los causante de que estos suelos tengan una reacción que varía de fuertemente ácida a medianamente ácida, determinada en CaCl_2 0,01M y agua, respectivamente. El alto contenido de materia orgánica, asociado con el aluminio extraíble, con el cual forma complejos, da como resultado que la mineralización del nitrógeno orgánico sea baja y esto es evidenciado en la alta relación C/N.

La capacidad de intercambio de cationes total fue alta debido a contenidos igualmente altos de materia orgánica y alofana, lo que trae consigo que las cargas dependientes del pH sean altas.

El porcentaje de saturación de bases es bajo, debido a la alta CIC y a la baja concentración de bases cambiables.

El contenido de fósforo disponible fue en general muy bajo, debido a la gran capacidad de fijación de fosfato de estos suelos, asociada con la reactividad del aluminio y hierro.

El contenido de alofana del suelo es alto, y sería mucho mayor si se expresa como porcentaje de la fracción activa.

El análisis elemental indica que el Fe_2O_3 es alto en todos estos suelos, debido a la composición química de las cenizas y su alteración.

De acuerdo a las propiedades morfológicas, físicas y químicas, y condiciones de temperatura y humedad del suelo, los perfiles CR-57, CR-65, CR-35, CR-30 y CR-67, fueron clasificados como Typic Dystrandeps, medial, isothermic. El perfil CR-56 constituyó la única excepción y fue clasificado como Hydric Dystrandep, thixotropic, isohyperthermic (35, 97, 98).

8. SUMMARY

In order to have a better knowledge of one of the most important Great Soil Groups from Costa Rica, the morphological physical and chemical properties of six Andosols located along the Meseta Central in the area most affected with volcanic activity were studied. On the basis of these properties, the soils were classified according to the new Soil Classification System of the USDA (7th Approximation) (35, 97, 98).

Six profiles were described, three of them located in the Pacific slopes and three in the Atlantic slopes. Profiles CR-57, CR-65 and CR-35 are from the Pacific side located at 1,700, 1,800 and 1,900 meters of elevation above sea level, respectively. Climate is temperate and humid, the mean annual temperature for each profile are of 17.0°C, 16.0°C and 15.0°C, and rainfall correspond to around 1,179 mm, 2,800 mm and 3,553 mm respectively.

Profiles CR-56, CR-30, and CR-67 are located in the Atlantic side at 1,000, 1,300 and 1,600 meters of elevation above sea level respectively. The climate is tropical and humid in the first two and temperate and humid in the last profile; the mean annual temperatures are 22°C, 19°C and 17.5°C, and rainfall is of 2,218 mm, 2,800 mm and 3,533 mm respectively.

The parent material prevailing in these soils has an andesitic and basaltic composition (10).

With respect to the morphology of these profiles, the A(B)C

sequence and the buried profiles are dominant. Horizon A is well developed, deep, black to dark gray in color; medium textured, with strong fine, granular, structure; slightly plastic and slightly sticky consistence when wet, friable to very friable when moist. According to the 7th approximation this horizon corresponds to an umbric epipedon (98). Horizon (B) is less developed, with a yellowish brown color; medium textured; weak, fine and medium, subangular blocky structure; slightly plastic and slightly sticky consistence when wet, friable when moist. According to the 7th approximation this is a cambic horizon.

Physical properties. The bulk density of all horizons is lower than 0.85 g/cc, which is the limit to classify these soils as Andepts; the particle density is lower than the 2.65 g/cc value assigned to the mineral soil due to the high content of organic matter; moisture retention is high and is related to the porosity and the content of organic matter and allophane. Available water is high.

These soils tend to dry irreversibly. Therefore, once they are allowed to dry, it is difficult to get a good dispersion for mechanical analysis and to rewet for the determination of moisture retention curves.

Chemical properties. The low percent of base saturation and the high content of extractable aluminum, are responsible for the strong acidity and moderate acidity, determined in 0.01M CaCl₂ and water, respectively. Organic matter and exchangeable Al seem to

form stable organo-minerallic complexes and for this reason, mineralization of organic N is slow and C/N ratios tend to be higher than in non-volcanic soils.

Total CEC and pH dependent charges are high due to the high contents of organic matter and allophane.

The base saturation is low, due to the high CEC and the low concentration of exchangeable bases.

The content of available phosphorus is very low, due to the large phosphate fixing capacity of these soils, associated with the high aluminum and iron activity.

The content of allophane is high and it would be higher if it were expressed as percentage of the active fraction.

Elemental analysis indicates that Fe_2O_3 is high in all of these soils, due to the chemical composition of the ash.

According to the morphological, physical and chemical characteristics and to the temperature and moisture conditions of the soils, profiles CR-57, CR-65, CR-35, CR-30 and CR-67 were classified as Typic Dystrandeps, medial, isothermic. Profile CR-56 was the only exception and it was classified as Hydric Dystrandep, thixotropic, isohyperthermic (35, 97, 98).

LITERATURA CITADA

1. ADACHI, T. The humus composition of volcanic ash soils in Japan. *Pedologist* 7:2-14. 1963.
2. AGUILERA, H. N. Suelos de ando; génesis, morfología y clasificación. Chapingo, México, Escuela Nacional de Agricultura. Serie de Investigación no. 6. 1965. 12 p.
3. _____. Distribución geográfica y características de los suelos derivados de cenizas volcánicas de México. *In* Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina, Turrialba, 1969. FAO/IICA. A-6, 11 p.
4. ALAMOS, P. Relaciones suelo-fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas. *Agricultura Técnica (Chile)* 27(3): 120-129. 1967.
5. ALCAYAGA, A. Relaciones entre algunas características químicas y físicas de suelos derivados de cenizas volcánicas. *Agricultura Técnica (Chile)* 25:9-18. 1965.
6. AOMINE, S. y EGASHIRA, K. Flocculation of allophanic clays by electrolytes. *Soil Science Plant Nutrition* 14:94-98. 1968.
7. BESOAIN, E. M. Mineralogía de las arcillas de los suelos de cenizas volcánicas. *In* Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina, Turrialba, 1969, FAO/IICA. B-1, pp. 1-17.
8. BIRRELL, K. S. Some properties of volcanic ash soils. *In* Meeting on the Classification and Correlation of Soils from Volcanic Ash, Tokyo, June 11-27, 1964. FAO. World Soil Resources Reports no. 14. 1964. pp. 74-81.
9. BLAKE, G.R. Bulk density. *In* Black, C.A. et al., eds. *Methods of soil analysis*. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. pp. 374-390.
10. _____. Particle density. *In* Black, C.A. et al., eds. *Methods of soil analysis*. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. pp. 371-373.
11. BORNEMISZA, E. e IGUE, K. Oxidos libres de hierro y aluminio en suelos tropicales. *Turrialba* 17(1):23-30. 1967.

12. BORNEMISEA, E. e IGUE, K. Minerales de arcilla en suelos centroamericanos y de Panamá. Turrialba 19(1):97-102. 1969.
13. BOUYOCUCOS, C.J. Recalibration of hydrometer method for making mechanical analysis of soils. Agronomy journal 43(9): 434-438. 1951.
14. BOWEN, N. L. The evolution of the igneous rocks. New York. Dover Publications. 1956.
15. BOWER, C. A. et al. Exchangeable cation analysis of saline and alkaline soils. Soil Science 73(4):251-261. 1952.
16. BRAY, R. H. y KURTZ, L. T. Determination of total organic and available forms of phosphorus in soils. Soil Science 59(1):39-45. 1945.
17. BREMNER, J. M. Total nitrogen. In Black, C. A. et al., eds. Methods of soil analysis. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. pp. 1171-1175.
18. BUCKMAN, H. O. y BRADY, N. C. The nature and properties of soils. 6th ed. New York, MacMillan, 1960. 567 p.
19. BUENO, J. Estudio geológico de Nariño. Bogotá, Ministerio de Minas y Petróleos. Informe no. 625. 1946.
20. CACERES, J. Suelos derivados de cenizas volcánicas del Ecuador. Turrialba, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. 1968. 24 p. (Mimeo).
21. CHILE. UNIVERSIDAD DE CHILE, FACULTAD DE AGRONOMIA. Fijación de fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas; informe preliminar. Santiago, Departamento de Suelos. 1967. 147 p. (Mimeo).
22. CLINE, M. G. Methods of collecting and preparing soil samples. Soil Science 59(1):3-5. 1945.
23. COSTA RICA. MINISTERIO DE AGRICULTURA. Anuario meteorológico. 1966. San José, 1967. 61 p.
24. DAY, R. P. Particle fractionation and particle size analysis. In Black, C. A. et al., eds., Methods of soil analysis. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. pp. 545-567.

25. DIAZ-ROMEY, R. y BALERDI, F. Determinación de la capacidad de intercambio de cationes del suelo. Turrialba, IICA, 1967. 3 p. (Mimeo).
26. DONDOLI, C. y TORRES, J. A. Estudio geoagronómico de la región oriental de la Meseta Central. San José, Ministerio de Agricultura e Industrias, 1954. 180 p.
27. DUDAL, R. Correlation of soils derived from volcanic ash. In Meeting on the Classification and Correlation of Soils from Volcanic Ash, Tokyo, June 11-27, 1964. FAO. World Soil Resources Reports no. 14. 1964. pp. 134-137.
28. EGATA, T. Mineralogical properties of volcanic ash soils in Japan. In Meeting on the Classification and Correlation of Soils from Volcanic Ash, Tokyo, June 11-27, 1964. FAO. World Soil Resources Report no. 14. 1964. pp. 89-93.
29. FASSBENDER, H. W. Deficiencia y fijación de fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas en América Central. In Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina, Turrialba, 1969. FAO/IICA. B-4, pp. 1-10.
30. FIELDS, M. Clay mineralogy of New Zealand soils. P. + 2. Allophane and related mineral colloids. New Zealand, Journal Science and Technical Bulletin 37:336-350. 1955.
31. _____ y PERROT, K. W. The nature of allophane in soils. III. Rapid field and laboratory test for allophane. New Zealand Journal of Science 9(3):623-629. 1966.
32. _____ y SCHOFIELD, R. K. Mechanisms of ion absorption by inorganic soil colloids. New Zealand Journal of Science 3:563-579. 1960.
33. _____ y SWINDALE, L. D. Chemical weathering of silicates in soil formation. New Zealand Journal of Science Technical Bulletin. 36:140-154. 1954.
34. FLACH, K. Genesis and morphology of ash-derived soils. In Meeting on the Classification and Correlation of Soils from Volcanic Ash, Tokyo, June 11-27, 1964. FAO. World Soil Resources Report no. 14. 1964. pp. 111-114.
35. _____. El uso de la "7a. aproximación" para la clasificación de suelos de cenizas volcánicas. In Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina, Turrialba, 1969. FAO/IICA. A-7, pp. 1-18.

36. FORSYTHE, W. Progresos recientes en el análisis de las partículas de los suelos por medio del método del hidrómetro. *Agronomía (Perú)* 33(1):16-27. 1966.
37. _____. Curva de retención de humedad. Turrialba, IICA, 1967. 10 p. (Mimeo).
38. _____. Densidad de partículas de suelo, método con agua y kerosene. Turrialba, IICA, 1967. 10 p. (Mimeo).
39. _____; GAVANDE, S. A. y GONZALEZ, M. A. Propiedades físicas de suelos derivados de cenizas volcánicas considerando algunos suelos de América Latina. *In Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina*. Turrialba, 1969. FAO/IICA. B-3, pp. 1-7.
40. FOX, R. L. Fertilization of volcanic ash soils in Hawaii. *In Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina*, Turrialba, 1969. FAO/IICA. C-6. pp. 1-14.
41. FRINK, C. R. The effect of wash solvents on cation exchange capacity measurements. *Soil Science Society of America Proceedings* 28:506-511. 1964.
42. GUTNIK, V. *et al.* Influencia del pH sobre la fijación de fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas. *Agricultura Técnica (Chile)* 25(4):141-144. 1967.
43. HARDY, F. The soils of the IAIAS. Part I area. Turrialba, IAIAS, 1961. 76 p. (Mimeo).
44. HARVARD, M. E. y BORCHARDT, G. A. Mineralogía y contenido de elementos menores de los suelos de ceniza y pómez en el noroeste pacífico de Estados Unidos. *In Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina*, Turrialba, 1969. FAO/IICA. B-5, pp. 1-12.
45. ISHIZAWA, S. Microbiology of volcanic ash soils in Japan. *In Meeting on the Classification and Correlation of Soils from Volcanic Ash*, Tokyo, June 11-27, 1964. FAO. World Soil Resources Report no. 14. 1964. pp. 87-88.
46. JACKSON, M. L. Soil chemical analysis; advanced course. Madison, University of Wisconsin, 1956. 991 p.
47. _____. Soil chemical analysis. New Jersey, Prentice-Hall, 1958. 498 p.

48. JAPAN. "MINISTRY OF AGRICULTURE AND FORESTRY". Volcanic ash soils in Japan. Tokyo, Sakurai-Kosaido, 1964. 211 p.
49. KANEHIRO, Y. y SHERMAN, G. Effect of dehydration-rehydration on cation exchange capacity of Hawaiian soils. Soil Science Society of American Proceedings 20:341-344. 1956.
50. KANNO, I. Genesis and classification of humic allophane soils in Japan. Trans. Comms. IV & V, International Society of Soil Science, Wellington. 1962. pp. 422-427.
51. KNOX, E. G. y MALDONADO, F. A. Suelos de cenizas volcánicas, excursión al volcán Irazú. In Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina, Turrialba, 1969. FAO/IICA. A-8, pp. 1-12.
52. KOBO, K. Properties of volcanic ash soils. In Meeting on the Classification and Correlation of Soils from Volcanic Ash, Tokyo, June 11-27, 1964. FAO. World Soil Resources Report No. 14. 1964. pp. 71-73.
53. KOHKE, H. Soil physics. New York, McGraw-Hill, 1968. 224 p.
54. KUPFER, A. Clasificación de los suelos. Quito, Universidad Central, 1959. 172 p.
55. LAI, S. y SWINDALE, L. D. Chemical properties of allophane from Hawaiian and Japanese soils. Soil Science Society of American Proceedings. 1969.
56. LOPEZ, C. A. Identificación y clasificación de los minerales de arcilla presentes en nueve suelos de Costa Rica, San José, Universidad de Costa Rica, Facultad de Agronomía, 1963. 56 p.
57. LOPEZ, M. Problemas de fertilización en suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. In Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina, Turrialba, 1969. FAO/IICA. C-1, pp. 1-8.
58. LUNA, C. Aspectos gnéticos de "Andosoles" en Colombia. In Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina, Turrialba, 1969. FAO/IICA. A-3, pp. 1-13.

59. LUND, Z. F. Available water holding capacity of alluvial soils in Louisiana. Soil Science of American Proceedings 23:1-3. 1959.
60. MCCONIGHY, E. Distribución geográfica y características de los suelos de cenizas volcánicas de las Antillas. In Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina, Turrialba, 1969. FAO/IICA. A-4, pp. 1-13.
61. McLEAN, E. O. Aluminium. In Black, C. A. et al., eds. Methods of soil analysis. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. pp. 978-997.
62. MALAVOLTA, E. Determinação da necessidade de adubação. In Manual de química agrícola, adubos e adubação. São Paulo, Cres, 1967. pp. 360-364.
63. MARTINI, J. A. Chemical, mineralogical and physical properties of seven surface soils from Panamá with special reference to cation exchange capacity and potassium status. Ph.D. Thesis. Ithaca, New York, Cornell University, 1966. 190 p. (Mimeo).
64. _____. Principales grandes grupos de suelos de América Central y México. Fitotecnia Latinoamericana 4(1):57-79. 1967.
65. _____. Algunas notas sobre el problema del encalado en los suelos del trópico. Turrialba 18:249-256. 1968.
66. _____. Algunas consideraciones sobre los suelos de Centroamérica, referencia especial al desarrollo del trópico húmedo. Fitotecnia Latinoamericana 6(1):127-147. 1969.
67. _____. Distribución geográfica y características de los suelos derivados de cenizas volcánicas de Centroamérica. In Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina, Turrialba, 1969. FAO/IICA. A-5, pp. 1-19.
68. _____. Caracterización del estado nutricional de los principales Andosoles de Costa Rica, mediante la técnica del elemento faltante en el invernadero, Turrialba, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. 1969. 27 p. (Mimeo).

69. MARTINI, J. A. Mineralogía de las arcillas, limos y arenas en seis suelos de Panamá. Turrialba 19(2):199-207. 1969.
70. MEETING ON THE CLASSIFICATION AND CORRELATION OF SOILS FROM VOLCANIC ASH. Report no. 14. Tokyo, June 11-27, 1964. FAO. World Soil Resources. 1964. 169 p.
71. MEINESZ, N. Mapa de la distribución de volcanes en el mundo. s.n.t. 1964. p. 1.
72. MULLER, A. Volcanic ash-derived soils. Tropical Abstracts 24(6):353-358. 1969.
73. MULLER, L. et al. Estudio del fósforo en suelos de América Central. I. Ubicación, características físicas y químicas de los suelos estudiados. Turrialba 18(4):319-332. 1968.
74. MUNSELL COLOR COMPANY. Munsell soil color charts. Baltimore, Maryland, 1954. 20 p.
75. OHMURA, M. Scope of volcanic ash soils; their extent and distribution. In Meeting on the Classification and Correlation of Soils from Volcanic Ash, Tokyo, June 11-27, 1964. FAO. World Soil Resources, Report No. 14, 1964. pp. 7-8.
76. ORGANIZACION DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACION. Guías para la descripción de perfiles de suelos. Roma, 1968. 60 p.
77. PELENCIA, J. A. Caracterización de algunos suelos derivados de cenizas volcánicas en Centroamérica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, IICA, 1969. 168 p. (Mimeo).
78. PEECH, M. et al. Methods of soil analysis for soil fertility investigations. U.S. Department of Agriculture. Circular no. 757. 1947. 25 p.
79. PINEDA, J.R. Alofana. Turrialba, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. 1968. 30 p. (Mimeo).
80. RICHARDS, L. A. Physical condition of water in soil. In Black, C. A. et al., eds. Methods of soil analysis. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. pp. 128-152.