



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

# **POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**DIVERSIDAD DE SUELOS Y SUS PROPIEDADES EN  
LAS ZONAS MONTAÑOSAS SUBTROPICALES,  
SIERRA SUR DE OAXACA, MÉXICO.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS (EDAFOLOGÍA)**

**P R E S E N T A:**

**ABEL IBÁÑEZ HUERTA**

DIRECTORA DE TESIS DE GRADO: NORMA EUGENIA GARCÍA CALDERÓN

MÉXICO, D. F.

MAYO 2010



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**DIVERSIDAD DE SUELOS Y SUS PROPIEDADES EN LAS ZONAS  
MONTAÑOSAS SUBTROPICALES, SIERRA SUR DE OAXACA,  
MÉXICO.**

(SOIL DIVERSITY AND PROPERTIES IN MOUNTAINOUS SUBTROPICAL  
AREAS, IN SIERRA SUR DE OAXACA, MEXICO)

N. E. García Calderón, **A. Ibáñez Huerta**; G. Álvarez Arteaga, P. V.  
Krasilnikov y A. Hernández Jiménez. 2006. Can. J. Soil Sci. 86: 61-  
76.

## DEDICATORIA

A mi mis hijos Ricardo y Rodrigo por el presente y el futuro

A Italia por compartir conmigo su fuente de vida y

experiencia sin medida

A toda mi familia por que cada uno de ustedes son

imprescindibles

## **AGRACEDIMIENTOS**

Agradezco el financiamiento recibido de los Proyectos UNAM-CONACYT 28227B y SEP-CONACYT 43702 para esta investigación. Así como, de la OCI-UNAM y de la Oficina de Cooperación Internacional de la Secretaría de Relaciones Exteriores del Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos.

A todos los miembros del jurado:

En particular a mi tutora la Dra. Norma E. García Calderón, mi más sincero agradecimiento, por sus valiosos consejos y por apoyarme de manera permanente.

Al Dr. David Flores Román por su infinito apoyo en mis actividades académicas desde hace ya varios años.

A la Dra. Teresa de Jesús Reyna Trujillo por sus comentarios al trabajo y por su amistad de hoy y de siempre.

A la Dra. María de Lourdes Flores Delgadillo, quién de manera incondicional ha revisado con detalle el trabajo y sus aportes han sido de gran valía.

A la Dra. María del Carmen Gutiérrez Castorena a quién le agradezco sus valiosos aportes y su aliento para continuar.

A todas las personas que han colaborado con esta investigación:

Al Dr. A. Safronov, Dr. J. D. Dixon y al Dr. N. White por las facilidades para realizar los análisis de Difracción de Rayos X.

A la M. en C. María del Socorro Galicia Palacios, M. en C. Elizabeth Fuentes Romero y a la Dra. Rosalía Ramos Bello por el apoyo técnico en esta investigación.

Al Profesor R. Arnold y Dr. L. Hernández por sus valiosos comentarios al artículo en su versión en inglés.

Al Señor Diego Woolrich, dueño de la Plantación de Café, por su apoyo para realizar los estudios de campo

Agradezco a mis amigos Elizabeth, Gustavo, Pavel, Norma y Tere, por compartir su tiempo de vida académica y personal.

Finalmente, a todo el personal del Laboratorio de Edafología "Nicolás Aguilera" y a los alumnos; por que todos juntos le damos razón de ser a este espacio y tiempo.

## **INDICE GENERAL**

### **AGRADECIMIENTOS**

### **RESUMEN**

<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>II. MATERIALES Y METODOS</b>	<b>3</b>
<b>III. RESULTADOS</b>	<b>8</b>
III.1 Morfología y clasificación de suelos	8
III.2 Primer grupo de suelos	9
III.3 Segundo grupo de suelos	12
III.4 Tercer y cuarto grupo de suelos	12
III.5 Propiedades químicas del suelo	14
III.6 Mineralogía del suelo	18
<b>IV. DISCUSIÓN</b>	<b>27</b>
IV.1 Propiedades del suelo	27
IV.2 El origen de las superficies expuestas	30
IV.3 Modelo pedogenético	31
<b>V. CONCLUSIONES</b>	<b>38</b>
<b>VI. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>40</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la finca cafetalera El Sinaí, Estado de Oaxaca, México	3
Figura 2. Mapa topográfico de la finca cafetalera El Sinaí. La altura está dada en metros sobre el nivel del mar. Las líneas rectas dentro del recuadro marcan el límite de la Finca. Los símbolos representan la localización de los tipos de suelo.	8
Figura 3. Difractogramas de muestras de arcilla orientada proveniente de los horizontes de un Alisol Úmbrico (La Presa).	18
Figura 4. Difractogramas de muestras de limo fino (0.002-0.005 mm) orientadas y procedentes de los horizontes de un Alisol Úmbrico (La Presa).	20
Figura 5. Difractogramas de muestras de arcilla orientada proveniente de los horizontes de un Alisol Arénico (El Mirador).	22
Figura 6. Difractogramas de muestras de arcilla orientada proveniente de los horizontes de un Alisol Arénico (La Primavera).	23
Figura 7. Difractogramas de muestras de arcilla orientada obtenidas de los horizontes de un Cambisol Mólico (El Portillo).	25
Figura 8. Propiedades de los horizontes Bt (Bw) de los suelos estudiados arreglados de acuerdo con un esquema propuesto de evolución del suelo.	34
Figura 9. Modelo propuesto para el desarrollo del suelo en la Sierra Sur de Oaxaca.	36

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción morfológica de los perfiles seleccionados en la finca cafetalera Sinaí, Estado de Oaxaca, México.	9
Tabla 2. Propiedades químicas y físicas de perfiles seleccionados en la finca cafetalera Sinaí, Estado de Oaxaca, México.	11



## **RESUMEN**

La agroforestería es una nueva práctica de uso sustentable del suelo en la zona montañosa de la Sierra Sur de Oaxaca, México. Dentro de este sistema se encuentra el cultivo de café que tiene importancia comercial relevante, dentro de la región. El objetivo de este estudio fue investigar la pedodiversidad en una zona cafetalera. El desarrollo de los suelos es muy complejo y está influenciado por parámetros como la pendiente y los materiales parentales. Algunos de los grupos de suelos reportados en el área de estudio corresponden a: Alisoles, Umbrisoles y Cambisoles. Se estudió la morfología, las propiedades químicas y la composición mineralógica de la fracción arcillosa del suelo. Los suelos varían en su grado de intemperismo, morfología y propiedades químicas, lo cual es importante para la agricultura de la zona. Muchos de los suelos derivan de materiales parentales heterogéneos.

La distribución de los principales tipos de suelos de la zona de estudio se relaciona con los movimientos en masa a lo largo de la pendiente, ocurridos tanto en el pasado como en el presente.

Los suelos estudiados representan una cronosecuencia desde Regosoles (suelos poco desarrollados), Cambisoles (suelos más desarrollados con un horizonte A), Umbrisoles (suelos con un horizonte A bien desarrollado, con saturación de bases menor del

50%) y finalmente, Luvisoles y Alisoles (suelos con un horizonte árgico, con predominio de caolinita y gibsita en la fracción arcilla).

En la zona de estudio la pedodiversidad se ha originado por la gran cantidad de deslizamientos de tierra y la formación de barrancas, los cuales han ocurrido por eventos catastróficos como terremotos y huracanes.

## **I. INTRODUCCIÓN**

La diversidad de los suelos [o pedodiversidad – término acuñado por McBratney (1992)] se considera que es la principal característica de la sustentabilidad del paisaje (Krasilnikov, 2001). Las diferentes propiedades del suelo proporcionan una amplia gama de hábitats para las plantas terrestres y organismos del suelo. Además, la diversidad de suelos da lugar a que disminuyan los riesgos en la agricultura, ya que al menos algunos suelos, mantienen su productividad en años extremadamente húmedos o secos, o después de una perturbación al agroecosistema (McBratney, 1992; Fuentes Romero *et al.*, 2002).

Las regiones montañosas se caracterizan por su alta diversidad de suelos (Feldman *et al.*, 1991). Esto se debe principalmente a la complejidad de las condiciones de formación de los suelos (Homann *et al.*, 1995; Hunckler y Schaetzl, 1997) y a los movimientos en masa de estas áreas. El material de suelo transportado a lo largo de la pendiente da lugar a una continua renovación de la parte superior del perfil del suelo (Graham *et al.*, 1990). La intensidad de este transporte depende del ángulo de la pendiente, la vegetación y de las propiedades intrínsecas del suelo.

Poco se sabe sobre la dinámica de formación de los mosaicos del suelo a partir de los procesos de ladera. La mayoría de los estudios se concentran en un modelo dualista, comparando suelos formados

sobre superficies antiguas y más recientes (p.e, Graham y Buol, 1990). Pocos estudios tratan sobre el desarrollo del suelo en una cronosecuencia de superficies expuestas (Sparling *et al.*, 2003; Wilcke *et al.*, 2003), sobre todo para un rango temporal corto. Sin embargo, las superficies expuestas, especialmente los deslizamientos de tierras, pueden proporcionar información valiosa sobre la evolución del suelo (Huggett, 1998). Los deslizamientos de tierra en diferentes épocas pueden indicar diferentes etapas de desarrollo del suelo. Así, en las regiones montañosas afectadas por continuos procesos de ladera, se puede esperar la presencia de un mosaico de suelos con diferentes grados de madurez.

Se han estudiado los suelos de la región montañosa cafetalera del Estado de Oaxaca, México; una región conocida por su alta pedodiversidad (García Calderón *et al.*, 2000; Alfaro Sánchez, 2004). La hipótesis que se plantea para este trabajo es que la diversidad de los suelos en el área de estudio está controlada, principalmente, por la organización espacial de las superficies con diferentes edades.

Los objetivos principales del presente estudio fueron: 1) caracterizar los suelos de las montañas de la Sierra Sur de Oaxaca, una zona aún poco estudiada, 2) confirmar que los mosaicos de suelos en el área, constituyen una cronosecuencia de perfiles que se han formado sobre superficies expuestas.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en la finca cafetalera Sinaí, Estado de Oaxaca, México (Fig. 1). El área de estudio está situada a  $16^{\circ} 07' 41.5''$  latitud Norte y  $97^{\circ} 06' 2.9''$  longitud Oeste.



Figura 1. Localización de la finca cafetalera El Sinaí, Estado de Oaxaca, México

Esta región tiene un paisaje representativo del escarpamiento SO de la Sierra Sur de Oaxaca, en donde el sistema se formó de un levantamiento tectónico durante el Mioceno (Morán *et al.*, 1996; Centeno-García, 2004). También ocurrieron levantamientos de menor importancia durante el Plioceno y continuaron aún en el Cuaternario. Las rocas son

principalmente de gneis y anfibolitas formadas durante la época del Paleozoico, y granitos del Cenozoico (Hernández *et al.*, 1996).

Los sedimentos recientes en el área se han estudiado poco. Existen productos de intemperismo principalmente de rocas ígneas y metamórficas, algunas veces regolitas altamente intemperizadas, redistribuidas sobre la ladera por la fuerza de gravedad y los flujos temporales de agua (Centeno-García, 2004).

Todo el territorio de la Costa del Pacífico en México es una zona de alta sismicidad (Rojas *et al.*, 1987). El primer evento sísmico reportado para la zona ocurrió en el año 1460. Posteriormente, durante el siglo XVIII y XIX se reportaron numerosos terremotos de diferentes intensidades. Los dos más intensos sucedieron en 1784 y 1787. En esta área, durante el siglo XX se han reportado varios terremotos importantes, el último ocurrió en 1999.

La Finca Sinaí se encuentra localizada en altitudes que varían desde 700 m a 1200-1300 m sobre el nivel del mar. Las laderas de las montañas son complejas; la orientación es de NE a SO, y las pendientes alcanzan los 40°. Las superficies de las laderas están disectadas por procesos erosivos, dando lugar a barrancas muy profundas. La mayoría de las barrancas se encuentran estables y con vegetación.

El clima de la región se clasifica como cálido húmedo isotérmico, con una precipitación media anual que varía de 1800 a 2000 mm, y una temperatura media anual que varía de 21 a 21.9° C (García, 1973).

La región presenta dos estaciones climáticas principales: la estación seca, que va de diciembre a mayo y la estación húmeda, de junio a noviembre. En el otoño las fuertes corrientes de aire provocadas por los huracanes, inducen la caída de árboles, favoreciendo la erosión hídrica superficial (García Calderón *et al.*, 2000). La principal actividad agrícola en la región es el cultivo del café bajo dosel cerrado, que ha sido utilizado en esta región por más de 150 años. Esta actividad consiste en la deforestación parcial de la vegetación original de bosque (Bosque tropical subcaducifolio) (Rzedowsky, 1978), y el cultivo del café (*Coffea arabica var. Typica L.*) bajo sombra con los árboles que se conservan. No se utilizan fertilizantes, excepto pulpa de café descompuesta. La productividad de estas plantaciones de café es relativamente baja, pero la calidad del café es buena (Staver, 1998).

Se conoce poco acerca de los suelos de la región. Una revisión reciente (Alfaro Sánchez, 2004) basada, principalmente, en el análisis de los mapas de suelos a escala 1:250 000, mostró más la falta de datos que un claro entendimiento de la distribución de los suelos en la región. Recientemente fue publicado un estudio local de los suelos de la zona (García Calderón *et al.*, 2000).

De acuerdo con los datos reportados, los suelos de las fincas cafetaleras de la Sierra Sur de Oaxaca son, principalmente, Acrisoles, Luvisoles y Cambisoles (FAO-ISRIC-ISSS, 1998). Los suelos de la finca Sinaí fueron parcialmente descritos por Ibañez *et al.* (2001).

El área total de la finca es de 365 ha. Se realizaron 22 perfiles de suelo en el área, de acuerdo con las características geomorfológicas actuales de la zona de estudio. Se hizo la descripción morfológica de cada perfil con base en la guía de Cuanalo (1975). Para el análisis químico del suelo, se tomaron muestras por horizontes, y se analizaron utilizando los métodos químicos y físicos de rutina.

En cada una de las muestras se determinó la textura por el método del hidrómetro (Tan, 1996); el pH por el método del potenciómetro, utilizando un electrodo de vidrio con calomel (la determinación se hizo con H<sub>2</sub>O y KCl 1N, en una relación suelo:solución 1:2.5) (McLean, 1982); carbono orgánico por combustión húmeda (Nelson y Sommers, 1982); bases intercambiables por el método del acetato de amonio (Thomas, 1982); capacidad de intercambio catiónico (CIC) como la suma de las bases intercambiables y, la acidez intercambiable por el método de cloruro de bario-trietanolamina (Tan, 1996). Este último método se utilizó en lugar del tradicional con cloruro de potasio (con determinaciones por separado del Al<sup>+++</sup> e H<sup>+</sup> intercambiables), debido a los valores sorprendentemente bajos de acidez intercambiable que fueron obtenidos, al utilizar KCl como extractante. Este hecho puede atribuirse a la fijación específica del potasio en los suelos de la zona de estudio (datos sin publicar).

En las muestras de cuatro perfiles seleccionados (perfiles tipo de la zona) se analizó su composición mineralógica. Se separó la fracción arcilla y se le realizó un pretratamiento utilizando los métodos descritos por Kunze y



Dixon (1986) y Dixon y White (1999). En las muestras de suelo de uno de los perfiles se separaron los limos finos (0.002 - 0.005 mm). Los difractogramas de rayos X se obtuvieron en un difractómetro DRON-3 (SIE "Burevestnik", San Peterburgo, Rusia, 1987), monocromador de grafito con radiación Cu-K $\alpha$ ,  $2\theta$  2-45°, U= 40 kV, I= 25 mA.

Los perfiles de suelo se ubicaron de acuerdo con las geoformas actuales del área de estudio. Desafortunadamente, para el área de estudio no hubo materiales cartográficos disponibles, por lo que, el grupo de trabajo se dio a la tarea de realizar su propio mapa topográfico, utilizando las coordenadas de un geoposicionador, y las altitudes de un altímetro de 420 puntos. Los datos se procesaron con el software SURFER ver. 6.02 (Golden Software, Inc., 1993-1996).

### III. RESULTADOS

#### III.1 Morfología y clasificación del suelo

En la Fig. 2 se muestra la localización de los perfiles de suelo en la zona de estudio en función al relieve. En general, cuatro grupos de suelo cubren el terreno de la Finca Sinaí.

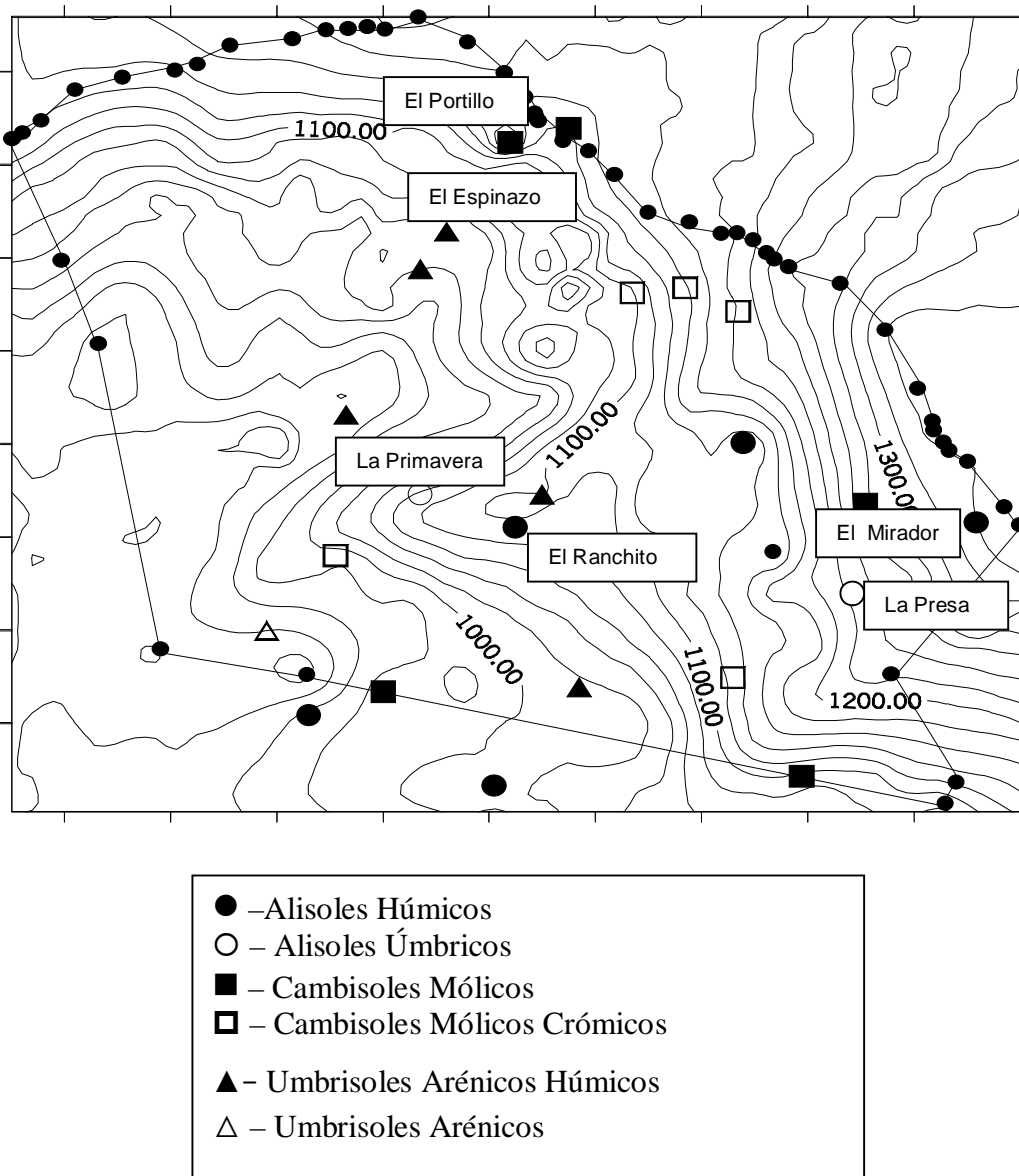


Figura 2. Mapa topográfico de la finca cafetalera El Sinaí. La altura está dada en metros sobre el nivel del mar. Las líneas rectas dentro del recuadro marcan el límite de la Finca. Los símbolos representan la localización de los tipos de suelo.

### III.2 Primer grupo de suelos

Los suelos del primer grupo están representados por perfiles arcillosos de color rojo con horizonte árgico; los cuales ocupan laderas y crestas de las partes altas, con pendientes moderadas. A su vez, estos suelos se forman de residuos antiguos superficiales aportados durante la formación de las barrancas.

Tabla 1. Descripción morfológica de los perfiles seleccionados en la finca cafetalera Sinaí, Estado de Oaxaca, México.

Perfil	Horiz., Prof., cm	Color (seco)	Color (húmedo)	Textura de campo <sup>†</sup>	Estruc- tura <sup>‡</sup>	Fragmentos de Rocas, volumen %	Revesti- miento de Arcilla <sup>§</sup>	Raíces <sup>¶</sup>
La Presa (Alisol Úmbrico) Primer grupo	A 0-12	10YR4/3	10YR2/2	FA	gr	0	0	3
	AB 12-40	10YR4/3	10YR2/2	FA	gr, sbq	0	0	2
	Bt 40-75	5YR5/6	2.5YR4/6	FRA	sbq	<10	3	1
	BC 75-135	5YR5/8	2.5YR4/6	FRA	sbq	10-30	2	0
El Ranchito (Alisol Húmico)	A1 0-12	7.5YR4/6	5YR3/4	FR	gr	<10	0	3
	A2 12-20	7.5YR4/3	5YR3/2	FRA	gr	<10	0	3
	AB 31-48	7.5YR4/6	5YR3/4	FR	sbq	10-30	1	2
	Bt1 48-66	7.5YR5/6	5YR4/6	FR	sbq	10-30	2	1
	Bt2 66-82	7.5YR5/4	5YR4/6	FR	sbq	10-30	2	1
	C1 82-125	7.5YR6/6	5YR4/6	FA	sbq	30-50	1	1
	C2 125-150	7.5YR6/6	5YR4/6	FA	sbq	30-50	0	1
El Mirador (Alisol Arénico) Segundo grupo	A1 0-39	10YR3/3	10YR2/1	FA	gr	<10	0	3
	A2 39-54	10YR4/3	10YR2/2	FA	gr	<10	0	2
	Bt 54-76	10YR5/4	10YR3/4	FA	sbq	10-30	1	1
	BC 76-128	10YR5/4	10YR4/4	FA	sbq	10-30	1	1
La Primavera (Alisol Arénico)	A1 0-21	10YR4/3	10YR3/2	FA	gr	10-30	0	3
	A2 21-53	10YR4/3	10YR3/2	FA	gr	10-30	0	3
	Bt 53-75	10YR5/4	10YR3/3	FA	gr, sbq	30-50	0	2
	C1 75-95	10YR5/4	10YR4/3	AF	sbq	>50	1	1
	C2 95-142	10YR5/6	10YR4/4	AF	n	>50	0	0
El Espinazo (Umbrisol Arénico) Tercer grupo	A1 0-16	2.5Y5/3	10YR3/2	FA	gr	30-50	0	3
	A2 16-36	2.5Y5/3	10YR3/3	FA	gr	<10	0	2
	Bw 36-72	2.5Y7/4	10YR5/4	FA	sbq	0	1	1
	BC 72-108	2.5Y7/4	10YR5/4	AF	gr	0	0	1
	C 108-172	2.5Y7/4	10YR4/4	AF	n	0	0	1
El Portillo (Cambisol Mólico) Cuarto grupo	A 0-28	10YR5/3	10YR3/3	FA	gr	0	0	3
	Bw 28-58	10YR5/3	10YR4/4	AF	gr, sbq	0	0	2
	BC 58-103	10YR6/4	10YR4/6	AF	gr, sbq	<10	0	2
	C 103-147	10YR6/4	10YR4/4	AF	n	0	0	1

<sup>†</sup> – AF– areno francoso , FA – franco arenoso, FRA– franco arcillo-arenoso, FR – franco arcilloso

<sup>‡</sup> – gr – granular, sbq – bloque subangular, n – sin estructura

<sup>§</sup> – 0 – revestimiento de arcilla, 1 – pocos, 2 – comunes, 3 – muchos

<sup>¶</sup> – 0 – sin raíces, 1 – pocos, 2 – comunes, 3 – muchos

De acuerdo con su morfología y sus propiedades químicas de diagnóstico, estos suelos se clasifican como Alisoles Úmbricos y Alisoles Húmicos (FAO-ISRIC-ISSS, 1988). Los perfiles de La Presa y el Ranchito son representativos de este grupo, y su morfología y propiedades químicas se muestran en las Tablas 1 y 2.

El espesor de los horizontes que contienen humus varía de 35 a 90 cm en los Alisoles húmicos, y de 15 a 54 cm en los Alisoles Úmbricos. Se observó que no había uniformidad en el color de los epipedones de todos los perfiles enlistados. También, la profundidad de todos los epipedones de los suelos estudiados, varían entre 1 y 7 cm. Algunas de estas capas son de color más claro que el horizonte A; mientras que otras capas, se diferencian sólo en la textura y el contenido de grava. La textura en el horizonte árgico del Alisol es más pesada que en la capa superficial del suelo y en el material parental. En los horizontes superiores, la estructura de todos los suelos estudiados es predominantemente granular, mientras que los horizontes árgicos se caracterizan sobre todo por una estructura de bloques subangulares. En el horizonte árgico del Alisol se observó el contenido máximo de fragmentos de roca, donde la mayoría de ellos están intemperizados hasta saprolita.

En el perfil La Presa, los fragmentos de roca se concentran, principalmente, en la parte superior del horizonte árgico, formando "una línea de piedras" que se supone, es una evidencia de coluviación (Birkeland, 1999).

Tabla 2. Propiedades químicas y físicas de perfiles seleccionados en la finca cafetalera Sinaí, Estado de Oaxaca, México.

Perfil	Horizon., prof., cm	pHH <sub>2</sub> O	pHKCl	Arcilla g·kg <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Al <sup>†</sup>	CIC	CIC por kg arcilla	SB %	C g·kg <sup>-1</sup>
La Presa (Aliso Úmbrico ) Primer grupo	A 0-12	5.2	3.8	80	6.42	0.83	0.51	0.11	18.87	26.73	334	29.4	55.5
	AB 12-40	5.2	3.8	112	3.96	0.45	0.44	0.11	18.58	23.54	210	21.1	51.6
	Bt 40-75	5.3	3.9	308	0.36	0.07	0.16	0.11	9.51	10.22	33	6.9	17.3
	BC 75-135	5.4	3.9	252	0.55	0.09	0.14	0.08	10.03	10.88	43	7.8	5.0
El Ranchito (Alisol Húmico)	A1 0-12	5.4	5.0	316	7.16	3.58	0.30	1.71	8.70	21.45	68	59.4	22.0
	A2 12-20	5.5	5.2	240	7.16	3.58	0.30	0.76	11.42	23.22	97	50.8	28.7
	AB 31-48	5.5	4.8	336	4.03	2.46	0.26	0.33	9.39	16.47	49	43.0	10.0
	Bt1 48-66	5.5	4.6	376	3.58	2.24	0.30	0.87	9.95	16.94	45	41.3	10.0
	Bt2 66-82	5.6	4.7	356	3.58	2.24	0.26	1.38	10.64	18.10	51	41.2	6.3
	C1 82-125	5.5	4.7	176	1.12	1.79	0.26	1.38	7.66	12.21	69	37.3	2.7
	C2 125-150	5.9	4.6	176	1.12	1.12	0.26	1.41	n.d. <sup>‡</sup>	n.d.	n.d.	n.d.	2.7
El Mirador (Alisol Arénico) Segundo grupo	A1 0-39	5.5	4.0	92	5.91	0.68	0.51	0.08	19.03	26.21	285	27.4	28.5
	A2 39-54	5.3	4.1	92	1.02	0.07	0.36	0.08	16.04	17.57	191	8.7	10.8
	Bt 54-76	5.2	4.0	152	2.08	0.21	0.16	0.08	12.59	15.11	99	16.7	3.0
La Primavera (Alisol Arénico)	BC 76-128	5.5	4.0	112	2.13	0.22	0.18	0.11	10.38	13.02	116	20.3	2.2
	A1 0-21	5.3	4.7	76	10.3	3.36	0.21	2.00	14.68	30.55	402	51.9	31.8
	A2 21-53	5.3	4.7	76	5.60	1.56	0.23	1.71	12.83	21.93	289	41.5	22.7
	Bt 53-75	5.2	4.2	116	3.13	1.12	0.23	0.84	9.85	15.17	131	35.1	13.1
	C1 75-95	5.4	4.2	56	1.34	0.22	0.17	0.51	8.33	10.57	189	21.2	3.8
El Espinazo (Umbrisol Arénico) Tercer grupo	C2 95-142	5.5	4.3	56	1.56	0.89	0.21	0.64	5.75	9.05	162	36.5	2.8
	A1 0-16	6.5	5.3	84	3.50	0.82	0.95	0.61	11.95	17.83	212	33.0	15.2
	A2 16-36	6.5	5.3	64	2.23	0.47	0.95	0.51	9.23	13.39	209	31.1	10.1
	Bw 36-72	6.3	5.5	64	1.30	0.35	0.95	0.51	5.87	8.98	140	34.6	1.4
El Portillo (Cambisol Mólico) Cuarto grupo	BC 72-108	6.2	5.3	44	0.71	0.11	1.04	0.50	4.63	6.99	159	33.8	1.1
	C 108-172	6.3	5.8	44	0.59	0.23	1.04	0.51	3.97	6.34	144	37.4	0.3
	A 0-28	5.7	4.7	52	11.12	0.94	0.73	0.19	9.66	22.64	435	57.3	24.1
El Portillo (Cambisol Mólico) Cuarto grupo	Bw 28-58	5.5	4.6	52	10.54	0.95	0.28	0.11	6.77	18.66	359	63.7	7.4
	BC 58-103	5.7	4.3	52	6.60	0.84	0.40	0.40	10.29	18.54	356	44.5	2.0
	C 103-147	5.7	4.2	32	8.11	1.01	0.49	0.08	8.47	18.16	568	53.4	2.0

<sup>†</sup> – AI – acidez intercambiable (BaCl<sub>2</sub> – método de la triethanolamina (Tan, 1996)

<sup>‡</sup> – n.d. – no determinado

### III.3 Segundo grupo de suelos

Estos suelos, también pertenecen al grupo de los Alisoles (FAO-ISRIC-ISSS, 1998). Sin embargo, son suelos con claras diferencias en su morfología, en comparación con los suelos del primer grupo; presentan una textura de arenosa-franca a franca-arenosa, y un color pardo amarillento en el horizonte árgico (Figs. 1 y 2).

Los suelos del segundo grupo ocupan las laderas con pendientes moderadas en las montañas. En la Base de Referencia Mundial (FAO-ISRIC-ISSS., 1998) se les clasifican como Alisoles Arénicos

Todos los perfiles de suelo clasificados como Alisoles tienen mica en las fracciones de limo y arena; los suelos son de textura más ligera y presentan una mayor cantidad de láminas de mica en comparación con los suelos arcillosos.

En los horizontes árgicos de los Alisoles se identificaron revestimientos de arcilla en las superficies de los ped. La actividad biológica es alta en todos los perfiles; durante la descripción morfológica se observó la presencia de lombrices de tierra y de microartrópodos en los horizontes superiores. También, en la parte superior de todos los perfiles, las raíces son abundantes y disminuyen con la profundidad del suelo; a una profundidad de 1 m se encontraron pocas raíces.

#### III.4 Tercer y cuarto grupo de suelos

Los suelos del tercer y cuarto grupo, son de color pardo y pardo amarillento, con textura franco-arenosa, sin iluviación de arcilla, y con un epipedón rico en materia orgánica. En general, estos suelos están asociados a cañadas y laderas de altas pendientes. Los suelos que presentan mayores espesores de humus, generalmente, ocupan las partes más altas y las más bajas de las laderas. Mientras que, los suelos con menor espesor de humus, parecen estar relacionados con pendientes pronunciadas o con cañadas en forma de valles.

De acuerdo con la Base de Referencia Mundial (WRB) (FAO-ISRIC-ISSS, 1998), estos suelos pertenecen a la categoría de Cambisoles Mólicos y Umbrisoles Arénicos, debido a la diferencia en la saturación de bases de los epipedones. Los datos de tres perfiles representativos se presentan en las Tablas 1 y 2.

El Perfil El Espinazo se clasificó como Umbrisol Arénico; mientras que el Perfil El Portillo, se clasificó como Cambisol Mólico. La profundidad de la capa superficial del suelo en los Umbrisoles Arénicos Húmicos varía entre 55 y 76 cm; mientras que, en los Umbrisoles Arénicos la variación es de 14 a 35 cm.

Los Cambisoles Mólicos tienen un horizonte superficial que varía entre 26 y 75 cm. Observando todos los epipedones, no se encontró uniformidad en el color. Mientras que, la textura de varios epipedones varía de limosa gruesa a arenosa.

En el Umbrisol, las texturas de los horizontes subsuperficiales son menos pesadas en comparación con los horizontes superiores. En cambio, la textura en los Cambisoles Mólicos es uniforme en todo el perfil. En los horizontes superficiales, la estructura es, principalmente, de tipo granular; mientras que los horizontes cámbicos, se caracterizan por presentar una estructura en bloques subangulares suaves, o bien estructura apedal. Todos los Umbrisoles presentan pedregosidad uniforme en todo el perfil. En los Cambisoles, el contenido de pedregosidad disminuye con la profundidad.

En general, los perfiles de Cambisoles y Umbrisoles contienen micas, ligeramente intemperizadas y sin intemperizar, en las fracciones de arena y limo. En algunos casos, la distribución de la mica fue uniforme en todo el perfil y, en otros casos, fue mayor en los horizontes Bw. En los horizontes de los Umbrisoles y Cambisoles se observaron algunos revestimientos de arcilla dentro de los poros del suelo. La actividad biológica es alta y, en los horizontes ricos en humus de todos los perfiles, las raíces son abundantes y disminuyen de manera gradual con la profundidad.

### III.5 Propiedades químicas del suelo

En la Tabla 2 se presentan las propiedades químicas de los perfiles seleccionados.

El epipedón del Alisol Úmbrico (La Presa) tiene un alto contenido de carbono (C), alta capacidad de intercambio catiónico (CIC), y baja



saturación de bases. La acidez es alta, con un valor de pH (KCl 1M) menor a 3.8. El horizonte árgico se caracteriza por relativamente altos contenidos de materia orgánica, relativa alta CIC, y valores extremadamente bajos de saturación de bases. Entre las bases intercambiables, el  $\text{Ca}^{++}$  es el más abundante, el  $\text{Mg}^{++}$  y  $\text{K}^+$  se encuentran en menores cantidades; mientras que, el contenido de  $\text{Na}^+$  es bajo. El contenido de arcilla del horizonte Bt aumenta casi tres veces más, comparado con el del horizonte AB.

Los epipedones de los Alisoles Húmicos (El Ranchito) son relativamente ricos en C orgánico. Presentan un epipedón mólico, puesto que tienen una alta saturación de bases y cumplen, totalmente, con los criterios de color y estructura. El contenido de C orgánico es de alrededor de  $10 \text{ g kg}^{-1}$  en el horizonte de transición AB y en la parte superior del horizonte árgico por debajo de los 66 cm. En algunos perfiles de Alisoles Húmicos, el C orgánico de los horizontes superiores del suelo varía entre 22 y  $56 \text{ g kg}^{-1}$ . La saturación de bases en los horizontes árgicos es todavía más alta respecto al Perfil La Presa. También, es menor la diferencia del contenido de arcilla entre los epipedones y los horizontes Bt, con relación a los suelos de La Presa. El horizonte  $\text{A}_2$  tiene un contenido significativamente menor de arcilla que los horizontes  $\text{A}_1$  y AB. El calcio es el catión dominante, y éste, es seguido por el  $\text{Mg}^{++}$  y  $\text{Na}^+$ ; mientras que, el  $\text{K}^+$  está presente en menor cantidad.

El epipedón del suelo El Mirador (Alisol Arénico) tiene valores de pH bajos y baja saturación de bases. El contenido de C es alto en la parte superior del epipedón, pero disminuye con la profundidad. El contenido de C orgánico en el horizonte árgico es bajo. El contenido de arcilla se incrementa en el horizonte Bt, comparado con la parte superficial del suelo. Generalmente, la secuencia de los cationes intercambiables en el perfil es como sigue:  $\text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ . Sin embargo, el contenido de  $\text{K}^+$  en el horizonte A2 es mayor que el del magnesio.

El horizonte superficial del suelo de La Primavera (Alisol Arénico), también, es rico en materia orgánica. El horizonte A1 tiene una moderada saturación de bases (ligeramente mayor de 50%); mientras que, el horizonte A2 tiene una saturación de bases menor al 50%. La saturación de bases también es baja en el horizonte Bt y en los horizontes C1 y C2. La textura del suelo varía entre arenosa y limosa, con un incremento del contenido de arcilla en el horizonte Bt con valores entre 76 y 116 g kg<sup>-1</sup> (con un incremento de más del 3 % necesario para un horizonte árgico). La secuencia de las bases intercambiables es la siguiente:  $\text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ . Por abajo del epipedón, el contenido de  $\text{Na}^{++}$  es mayor que el del  $\text{Mg}^{++}$ .

En el suelo El Espinazo (Umbrisol Arénico), la capa superficial del suelo tiene bajo contenido de C, comparado con los Alisoles. En otros suelos de este grupo, como los Umbrisoles Arénico Húmicos, el contenido de C varía entre 32 y 42 g kg<sup>-1</sup>, y entre 15 y 41 g kg<sup>-1</sup> en

otros Umbrisoles Arénicos. Los valores de saturación de bases están en el rango de 30 a 36%, tanto en el epipedón como en el horizonte cámbico y en el material parental. El contenido de arcilla no cambia con la profundidad. La secuencia de las bases intercambiables en el horizonte superficial es  $\text{Ca}^{++} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{++} > \text{Na}^+$ , y en los horizontes inferiores es  $\text{K}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{++}$ .

En cuanto a los Cambisoles Mólicos (suelo de El Portillo), éstos tienen contenidos de C relativamente altos, y saturación de bases alta (> 50% en todos los horizontes, excepto en el horizonte transicional BC). El contenido de arcilla es uniforme a través de todo el perfil. La secuencia de las bases intercambiables es  $\text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ .

### III.6 Mineralogía del suelo

En la Fig. 3 se muestra la composición mineralógica de la fracción arcilla del suelo La Presa (Alisol Húmico).

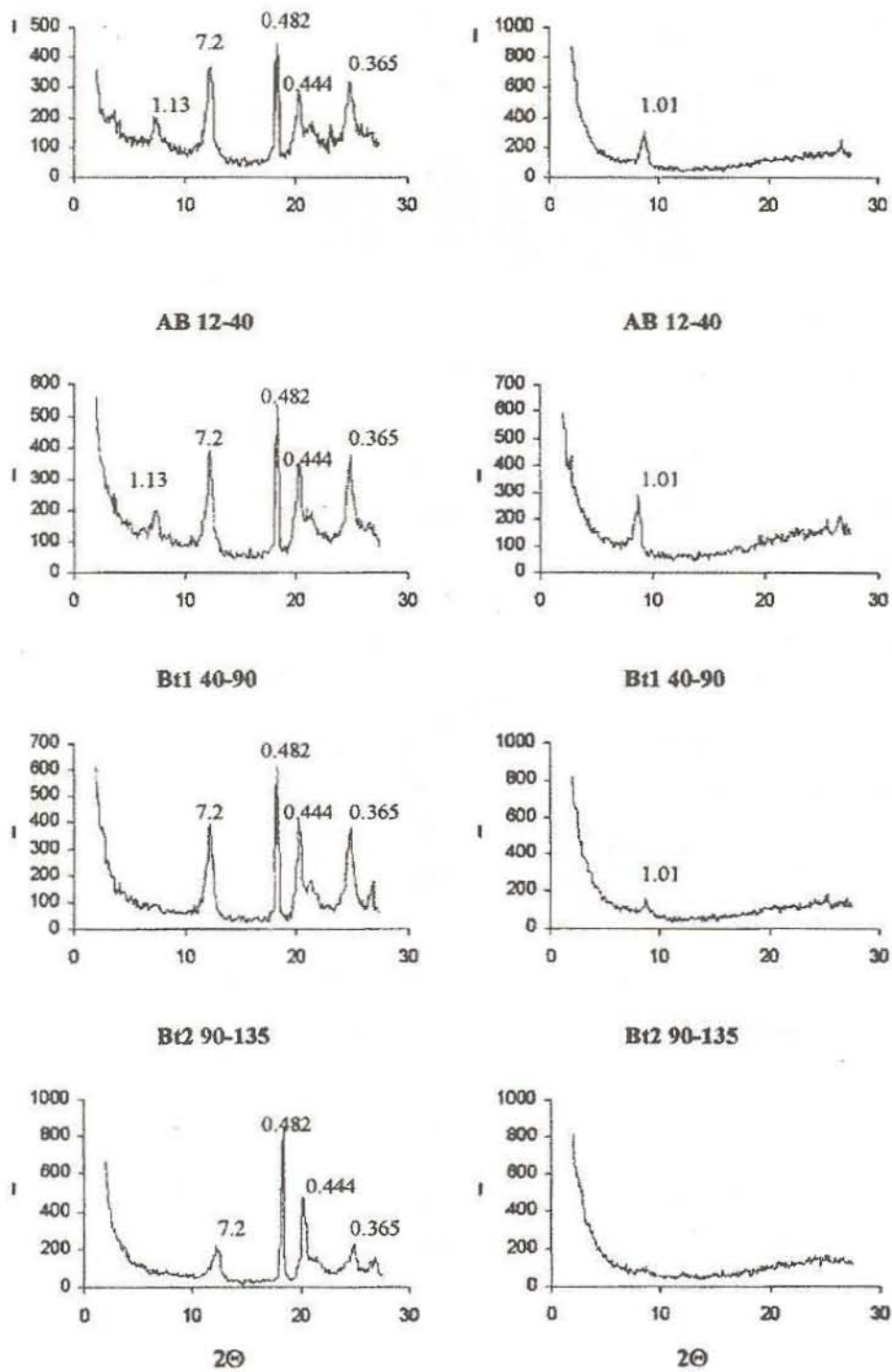


Figura 3. Difractogramas de muestras de arcilla orientada proveniente de los horizontes de un Alisol Umbrico (La Presa).

Los dos horizontes superficiales tienen similar composición mineralógica. Los principales componentes son caolinita (señales basales en 0.72 y 0.36 nm), y gibsitita (pico en 0.492 nm). El grupo del caolín está representado por caolinita y haloisita deshidratada, la cual se detecta a una intensidad de señal no basal de 0.444 nm (Dixon 1989).

Los minerales 2:1 están representados por una mezcla de capas de mica-vermiculita, que muestran un pico en 1.13 nm cuando se secan al aire y, 1.01 nm después del calentamiento. Una señal débil entre 2.2 y 2.3 nm en el patrón de difracción de rayos X (DRX) de una muestra del horizonte A, sugiere la presencia de una estratificación bien ordenada. El contenido de mica-vermiculita es ligeramente mayor en el horizonte AB, que en el horizonte A. Los horizontes Bt son claramente diferentes de la capa superficial del suelo ya que éstos prácticamente carecen de minerales 2:1, a excepción de un pequeño pico en 1.01 nm en el horizonte Bt1, después de calentar la muestra. Ninguna otra evidencia de estos minerales se observó en la DRX.

También, se estudió composición mineralógica de la fracción de limo fino del suelo La Presa (Fig. 4). La CIC de la tierra fina de los suelos estudiados fue excepcionalmente alta debido a la asociación caolinita-gibsitita. Se ha planteado la hipótesis de que la fracción limo podría contribuir a la capacidad de intercambio de estos suelos.

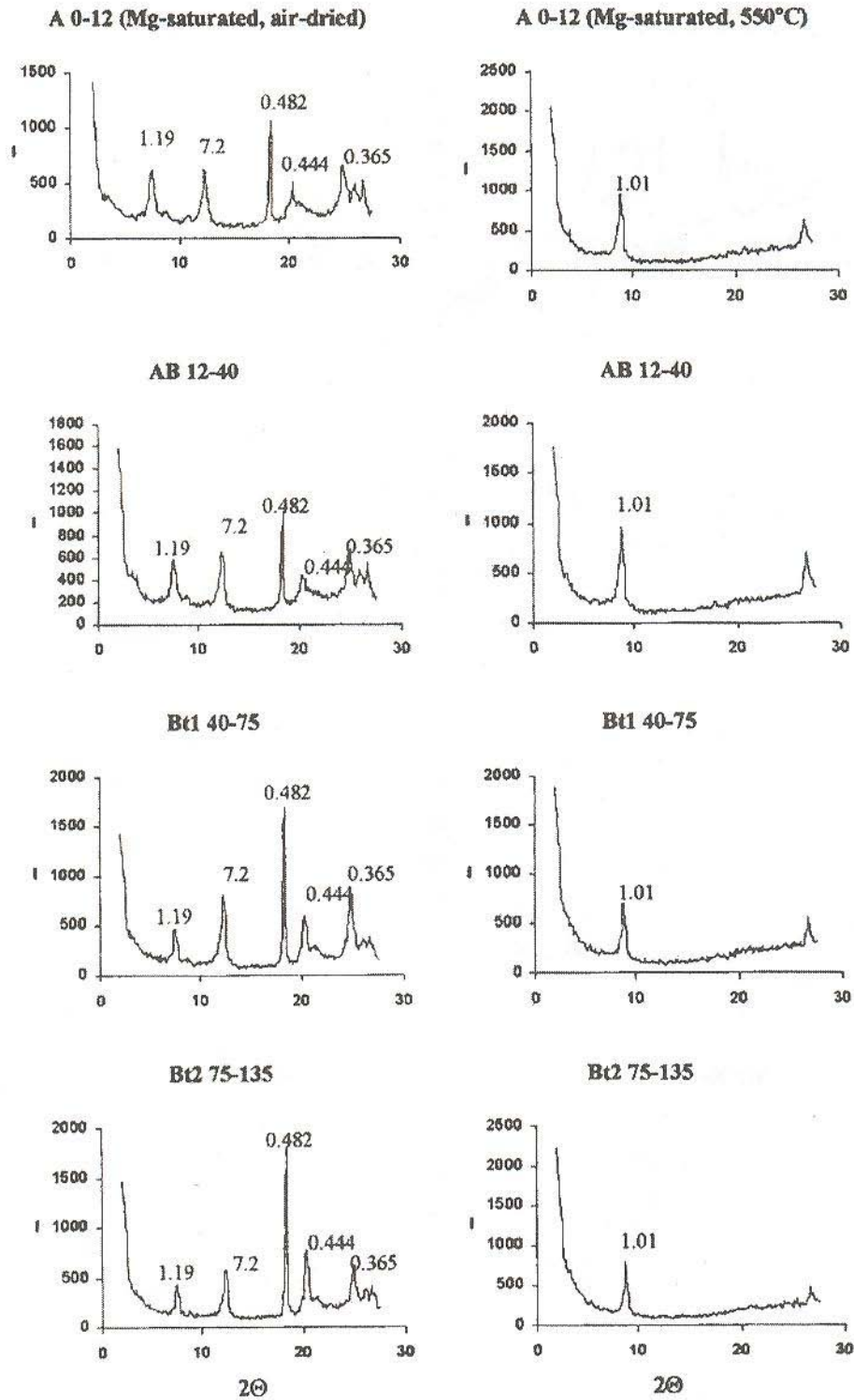


Figura 4. Difractogramas de muestras de limo fino (0.002-0.005 mm) orientadas y procedentes de los horizontes de un Alisol Úmbrico (La Presa).

El limo fino de dos horizontes superficiales tuvo una composición casi idéntica a la de la fracción arcilla; esto debido a un ligero aumento

del espacio "d" de la mica vermiculita, lo que demuestra una gran proporción de vermiculita en la mezcla de minerales 2:1 en la fracción de limo fino. En los horizontes Bt de los suelos, la fracción limo tiene una cantidad significativa del mineral mica-vermiculita, con una señal de 1.19 nm, la cual no está presente en la fracción arcilla de estos suelos.

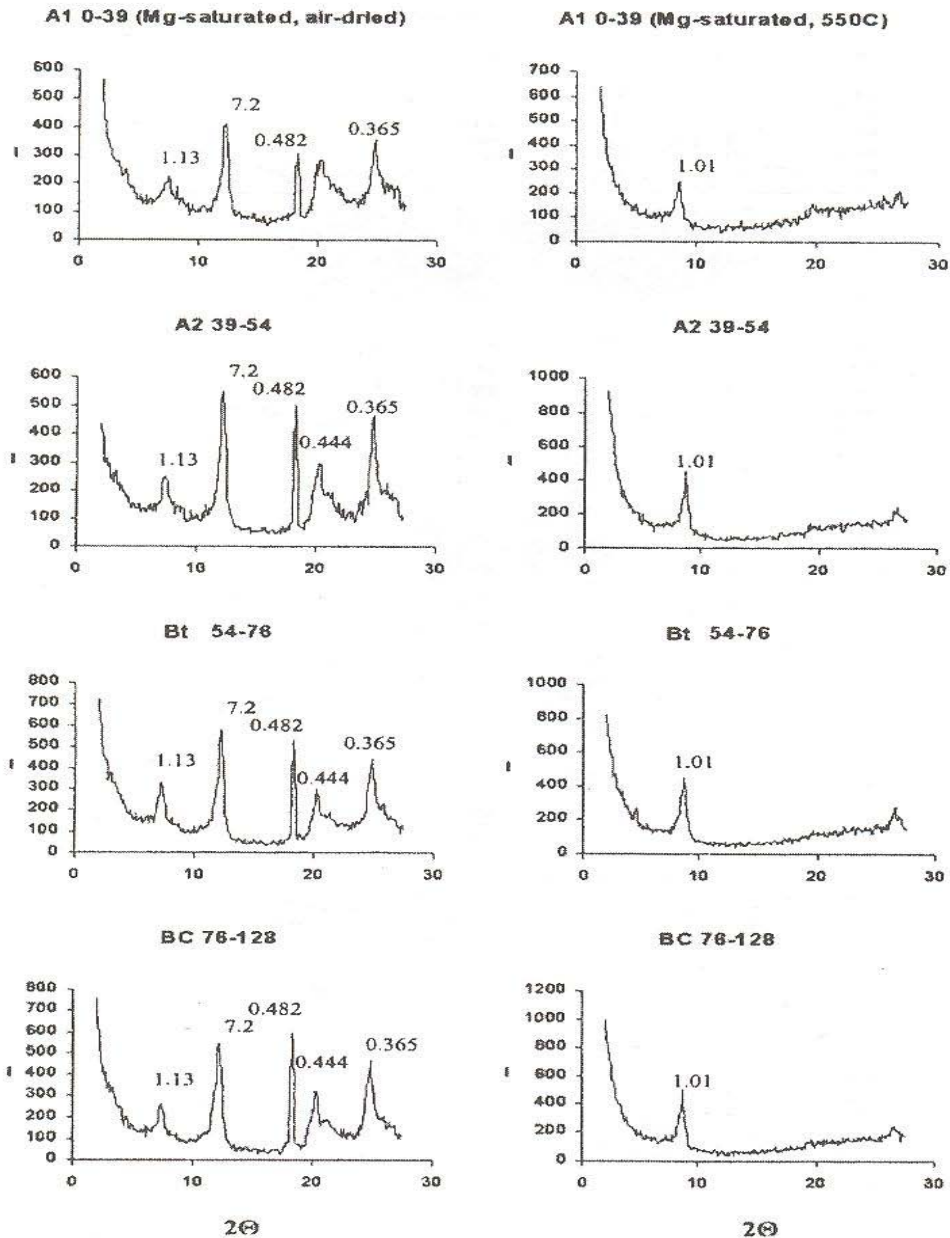


Figura 5. Difractogramas de muestras de arcilla orientada proveniente de los horizontes de un Alisol Arénico (El Mirador).

En la Fig 5 se muestran los patrones de difracción de rayos X de las fracciones de arcilla, que se obtuvieron de los horizontes del suelo El Mirador (Alisol Arénico).

En todos los horizontes del perfil dominan los minerales del caolín y gibbsite. Una parte importante de los minerales del caolín corresponde



a haloisita deshidrata. Los minerales 2:1 están representados por la mezcla de capas mica-vermiculita, según la señal de 1.13 nm. La composición mineralógica de la fracción arcilla es uniforme en este perfil, pero con un contenido ligeramente más bajo de gibsita en el horizonte A1.

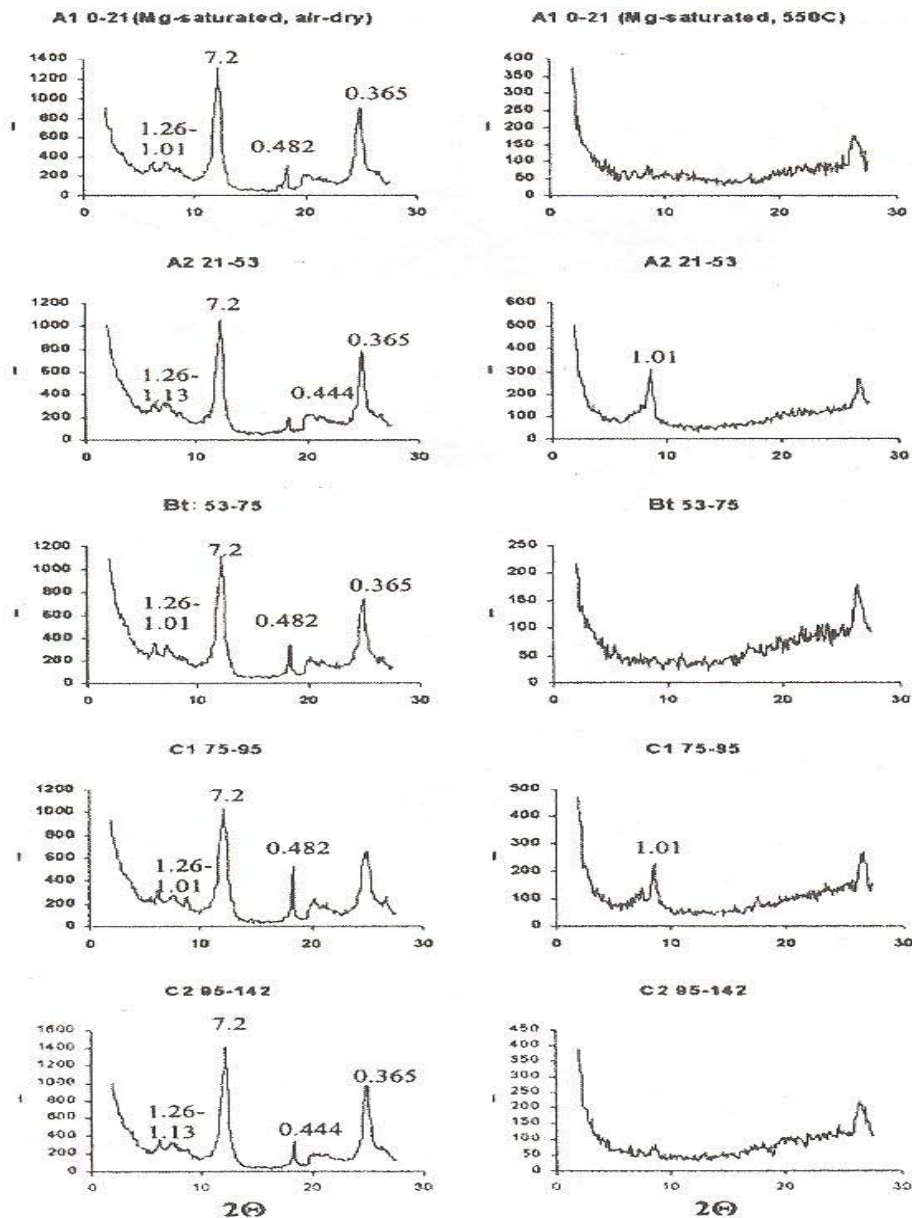


Figura 6. Difractogramas de muestras de arcilla orientada proveniente de los horizontes de un Alisol Arénico (La Primavera).

En la Fig. 6 se muestra la composición mineralógica de la fracción arcilla de los horizontes genéticos del suelo La Primavera (Alisol Arénico). En todos los horizontes los minerales dominantes fueron los del grupo del caolín. Se puede suponer la presencia de minerales del tipo de la haloisita deshidratada, debido a una cierta asimetría en el pico de 0,72 nm y la presencia de un pico relativamente bueno en 0,444 nm, típico de haloisita. Sin embargo, la caolinita es el mineral dominante en el suelo. El contenido de gibsita varía a través de todo el perfil, siendo menor su contenido, por debajo del horizonte superficial, a la vez que se distribuye gradualmente en el horizonte cámbico y C1. Finalmente, el contenido de gibsita disminuye en la parte inferior del perfil, en la zona del material parental (C2).

Los minerales 2:1 dan una serie de señales bajas con valores de 1,01, 1,13 y 1,26 nm. Su comportamiento después de que se calienta la muestra, es diferente en todos los horizontes. El colapso total de la estructura cristalina a la señal de 1.01 nm, sólo se detecta en los horizontes A2 y C1. Se encontró mica en la muestra secada al aire, con una señal a 1.01 nm, además de minerales interestratificados de mica-vermiculita (1.13 y 1.26 nm). La baja intensidad de estas señales y la ausencia de picos basales de segundo y tercer orden, no permiten establecer la estructura cristalina de estos minerales. La asimetría del pico en 1.01 nm en la muestra del horizonte A<sub>2</sub> después de calentar, y la presencia de un pequeño pico de 1.10 nm en el horizonte C1, indican que la mica-vermiculita de estos horizontes,

puede contener aluminio interlaminar. Las señales de los minerales 2:1 desaparecen casi por completo en los otros tres horizontes (A1, Bw, y C2). Esto puede atribuirse a su menor tamaño y a su menor cristalinidad; el calentamiento podría causar desorientación de las partículas minerales de la arcilla.

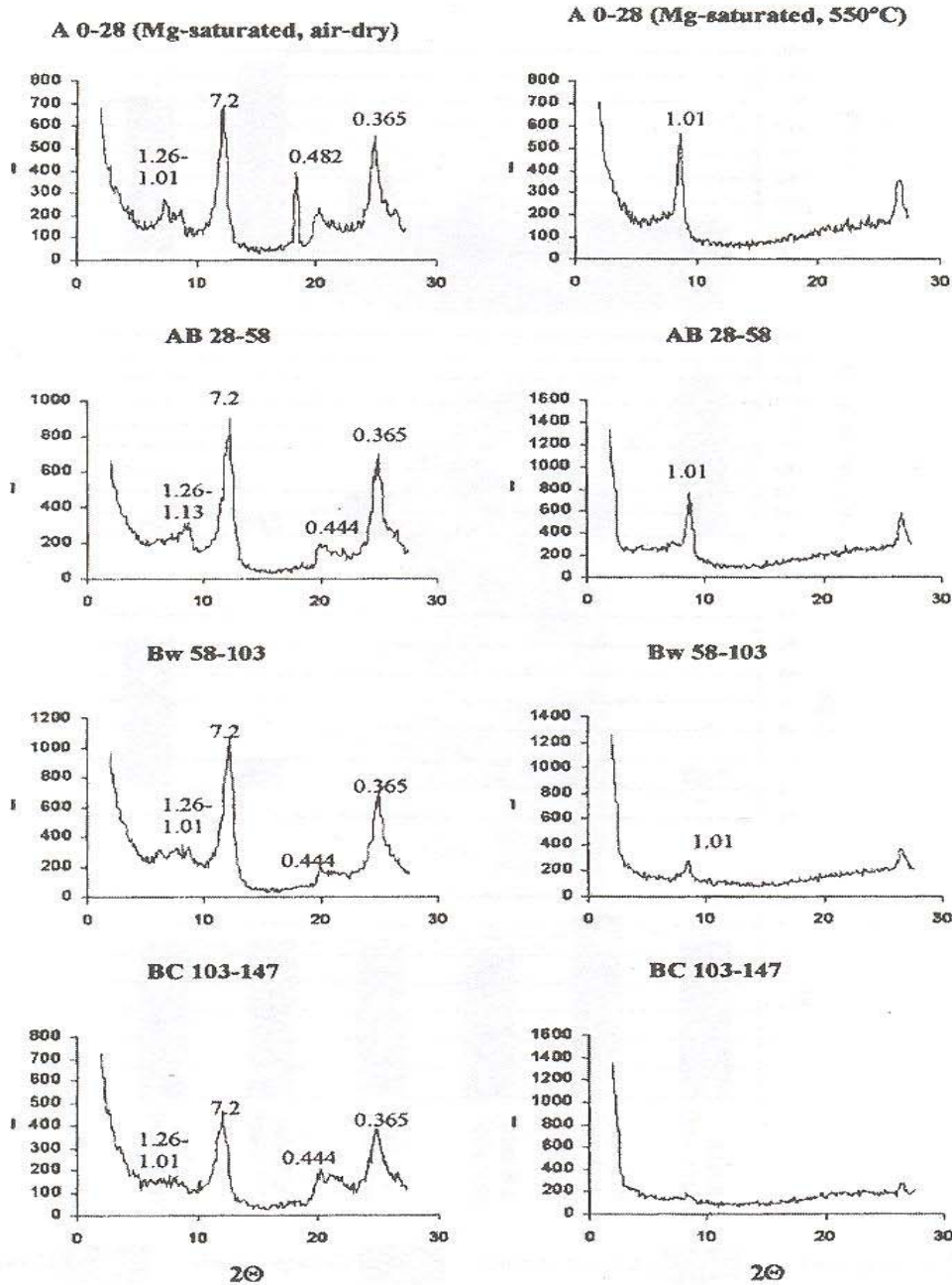


Figura 7. Difractogramas de muestras de arcilla orientada obtenidas de los horizontes de un Cambisol Mólico (El Portillo).

En la Fig. 7 se presentan los difractogramas obtenidos para las fracciones de arcilla del perfil El Portillo. El grupo mineral dominante es el caolín. Todos los difractogramas también tienen señales no basales a 0,444 nm, indicando la presencia de haloisita deshidratada. Únicamente, el horizonte A presenta evidencias de tener una cantidad significativa de gibsita. Los minerales 2:1 están representados por la mica (1.01 nm), y por la mezcla de capas mica-vermiculita (1.26 nm). Ambos tipos de minerales 2:1 están presentes en el horizonte A. El pico de 1.01 nm sólo se detecta en el horizonte cámbico Bw, pero con una asimetría significativa hacia los ángulos inferiores. Casi ninguno de los minerales 2:1 están presentes en el subsuelo.

## IV. DISCUSIÓN

### IV. 1 Propiedades del suelo

Los suelos del primer grupo (Alisoles Húmicos y Alisoles Úmbricos) fueron considerados como los más desarrollados en la zona de estudio. Los Alisoles generalmente se forman a través de procesos fuertes de intemperismo y lixiviación. El intemperismo se hace evidente a través de la asociación de los minerales caolinita y gibsita en la fracción arcilla de los horizontes Bt de los perfiles estudiados (Fig. 3). Se considera que estos minerales corresponden a las etapas finales de la secuencia de intemperismo de los minerales del suelo (Dixon, 1989).

La caolinita se puede formar directamente del intemperismo de la biotita, tal como se ha observado en suelos tropicales con similares características donde se han encontrado granos de biotita del tamaño de arena (Kretzschmar *et al.*, 1997).

Por otra parte, la caolinita también podría ser un producto de la deshidratación de la haloisita, que proviene de los feldespatos o del intemperismo de la biotita en diversos ambientes edáficos (Singer *et al.*, 2004). La presencia de gibsita quizá se deba al alto contenido de aluminio en la roca madre, mineral que no había sido reportado antes para el área de estudio (García Calderón, 2000). La presencia de anortosita, rica en aluminio, puede explicar la presencia de gibsita en los suelos poco intemperizados del segundo grupo.

A pesar de que los Alisoles arcillosos se originan de sustratos aparentemente muy intemperizados y que se asocian a arcillas de baja actividad, los valores observados de CIC son excepcionalmente altos. El fenómeno puede explicarse por un alto contenido de minerales activos (micas-vermiculitas) en la fracción limo, como se demostró con los datos de DRX para el suelo de La Presa (Fig. 4). Los datos son similares a los reportados por otros investigadores, quienes muestran que la illita puede ser bastante estable en las fracciones gruesas de los suelos tropicales, en comparación con los feldespatos (Rutherford, 1987).

Tanto la morfología del suelo (Tabla 1) como los datos de textura (Tabla 2), indican iluviación de arcilla en el horizonte Bt. Estudios relativamente recientes (Drees *et al.*, 2003), muestran que suelos con un horizonte árgico pueden desarrollarse en pendientes muy pronunciadas; los resultados de campo del presente estudio realizado en las montañas de México, y aún sin publicar, también confirman la diversidad de los suelos con iluviación de arcilla sobre laderas de altas pendientes.

Los suelos del segundo grupo presentan propiedades morfológicas, químicas y mineralógicas de la fracción arcilla, similares a las de los suelos del primer grupo. Sin embargo, existen algunas diferencias importantes. La textura del suelo es más gruesa, y su coloración es menos roja; en la fracción arcilla, junto con caolinita y gibsita, se observa haloisita y una mezcla en capas de mica-vermiculita. Un pico

asimétrico a 1.01 nm, después de calentar, es indicativo de minerales 2:1 con Al interlaminar, característica común para los horizontes iluviales de suelos de bosque templado (Pai *et al.*, 2004). El conjunto de estas propiedades indica que estos suelos están menos intemperizados que los suelos del primer grupo. En los perfiles del segundo grupo, tanto la morfología como la textura, indican menor iluviación de arcilla respecto a los suelos del primer grupo.

En general, se puede considerar a los Alisoles Arénicos como menos desarrollados, si se comparan con el desarrollo de los Alisoles Úmbricos o Húmicos; este hecho probablemente se debe a la diferencia en el tiempo de desarrollo del suelo, ó a la mayor intensidad de la pedogénesis en unos que en otros. Sin embargo, esta última hipótesis (pedogénesis) no puede ser del todo cierta, ya que, todos los perfiles estudiados se desarrollan bajo el mismo clima y vegetación. Además, no se encontró una estricta correspondencia en el ángulo de la pendiente, o en la exposición entre los dos grupos de suelos, que suele afectar la pedogénesis en las zonas de montaña. Por lo tanto, sería más adecuado considerar que la explicación más probable de las diferencias existentes entre los dos grupos de suelos, se debe al tiempo de desarrollo del suelo.

Los suelos del tercer grupo tienen características similares a las de los suelos del segundo grupo, por ejemplo, la textura y varias propiedades químicas como saturación de bases y actividad de la arcilla, pero no presentan ninguna evidencia morfológica ni analítica

del proceso de iluviación de arcilla. Esto también es aplicable, para los suelos del cuarto grupo, que también tienen alta saturación de bases, indicando aún menos lixiviación en el perfil.

Sin embargo, los minerales de arcilla de estos suelos se siguen caracterizando por el predominio del caolín. La diferencia en los minerales de arcilla de los suelos del primer y segundo grupo, se debe principalmente a una mayor proporción de haloisita y minerales 2:1. Una característica importante de la distribución de los minerales 2:1 de la fracción arcilla en el Cambisol Mólico (El Portillo), es que las fracciones de arcilla en los horizontes superiores del perfil, tienen una mayor proporción de illita y una mezcla de capas desordenadas de illita-vermiculita. El fenómeno podría ser atribuido a la acumulación de material coluvial fresco en la superficie, o a la fijación del potasio en la illita-vermiculita (Ghabru *et al.*, 1987), lo que provoca una regradación a illita en los horizontes superficiales. Esta última hipótesis se apoya en datos químicos que muestran, que el contenido de potasio intercambiable es relativamente alto en los horizontes superficiales de un Cambisol Mólico, debido al reciclamiento biológico de la materia orgánica.

Las propiedades morfológicas, químicas y físicas, así como la composición mineralógica de las fracciones de arcilla de los suelos estudiados, apoyan la hipótesis planteada inicialmente, la cual establece que los suelos de la zona de estudio constituyen una cronosecuencia.



## IV.2 El origen de las superficies expuestas (denudadas)

El origen de las superficies expuestas se puede atribuir, parcialmente, a la erosión por barrancas. La formación de las barrancas es especialmente intensa durante los eventos climáticos catastróficos. La gente del lugar mostró al grupo de trabajo del presente estudio, la gran profundidad de una barranca formada en un sólo día por el huracán Paulina en 1998. A su vez, algunos suelos "jóvenes" se desarrollan en pendientes moderadas (cóncavas, convexas y lineales), probablemente, debido a la remoción en masa inducida por la sismicidad, que es un fenómeno común en las zonas tectónicamente inestables (Cetin *et al.*, 2004; Chang *et al.*, 2005). Como se mencionó anteriormente, la Costa del Pacífico de México es una zona sísmicamente activa (Rojas *et al.*, 1987).

El terremoto más reciente, de 1999, condujo a un deslizamiento de tierra en las laderas de la finca cafetalera El Sinaí. Algunos afloramientos inducidos por deslizamientos de tierra, aún se pueden observar en la zona de estudio.

Es importante señalar que los deslizamientos en la zona de estudio, ocurren en áreas con superficies cubiertas con suelos rojos arcillosos. Este hecho concuerda con los datos de la literatura, los cuales muestran que los suelos altamente intemperizados son los que, principalmente, se encuentran sometidos a procesos de deslizamientos (Dykes, 2002); ya que los suelos más jóvenes son menos arcillosos, y tienen mejor conductividad hidráulica. El

movimiento en masa inducida por un terremoto también puede provocar una intensa denudación de materiales del suelo a lo largo de las laderas (Wilcke *et al.*, 2003). Así, el desarrollo de los suelos en la región estudiada depende de acontecimientos catastróficos que, periódicamente, exponen superficies frescas y dan lugar a la formación de suelos incipientes.

Además, la formación de suelos con diferentes edades sobre saprolitas arenosas, se puede explicar por la presencia de terremotos y/o huracanes que causan los deslizamientos de tierra. Los suelos formados sobre superficies expuestas deben tener edades diferentes. Desafortunadamente, es difícil establecer la edad absoluta de tales eventos, aún cuando muchos de estos terremotos en la región se han detectado en tiempos relativamente recientes.

#### IV. 3 Modelo Pedogenético

La hipótesis de que los perfiles estudiados forman una cronosecuencia se debe verificar. Los suelos se arreglaron en una sucesión provisional, desde los más jóvenes (grupo cuatro) hasta los más antiguos (grupo uno). Para dicho arreglo se utilizaron, principalmente, criterios de morfología del suelo, por ejemplo, los suelos de color amarillo y pardo, con textura más gruesa fueron considerados como los más jóvenes, y los suelos rojos arcillosos se consideraron como los más viejos. También, se estableció la hipótesis de que la saturación de bases disminuye con el tiempo,

debido a la lixiviación de las bases. Por lo tanto, en este trabajo se propone un modelo para el desarrollo de los suelos sobre superficies expuestas, desde los suelos con una alta saturación hasta los que tienen una baja saturación de bases y, finalmente, los suelos con lixiviación de arcillas.

Las tendencias generales en las propiedades del suelo se presentan en la Figura 8. Se analizaron los cambios en las propiedades de los horizontes B del suelo (a una profundidad aproximada de 50-70 cm) para una cronosecuencia hipotética (Fig. 8). En dicha cronosecuencia se logra observar que el contenido de arcilla aumenta en gran medida con el transcurso del desarrollo del suelo (Fig. 8a); la capacidad de intercambio catiónico, recalculada para el contenido de arcilla, disminuye (Fig. 8b); los incrementos de C orgánico ocurren, principalmente, en los dos perfiles más desarrollados (Fig. 8c), y los valores de pH muestran sólo una ligera tendencia a disminuir con el tiempo (Fig. 8d).

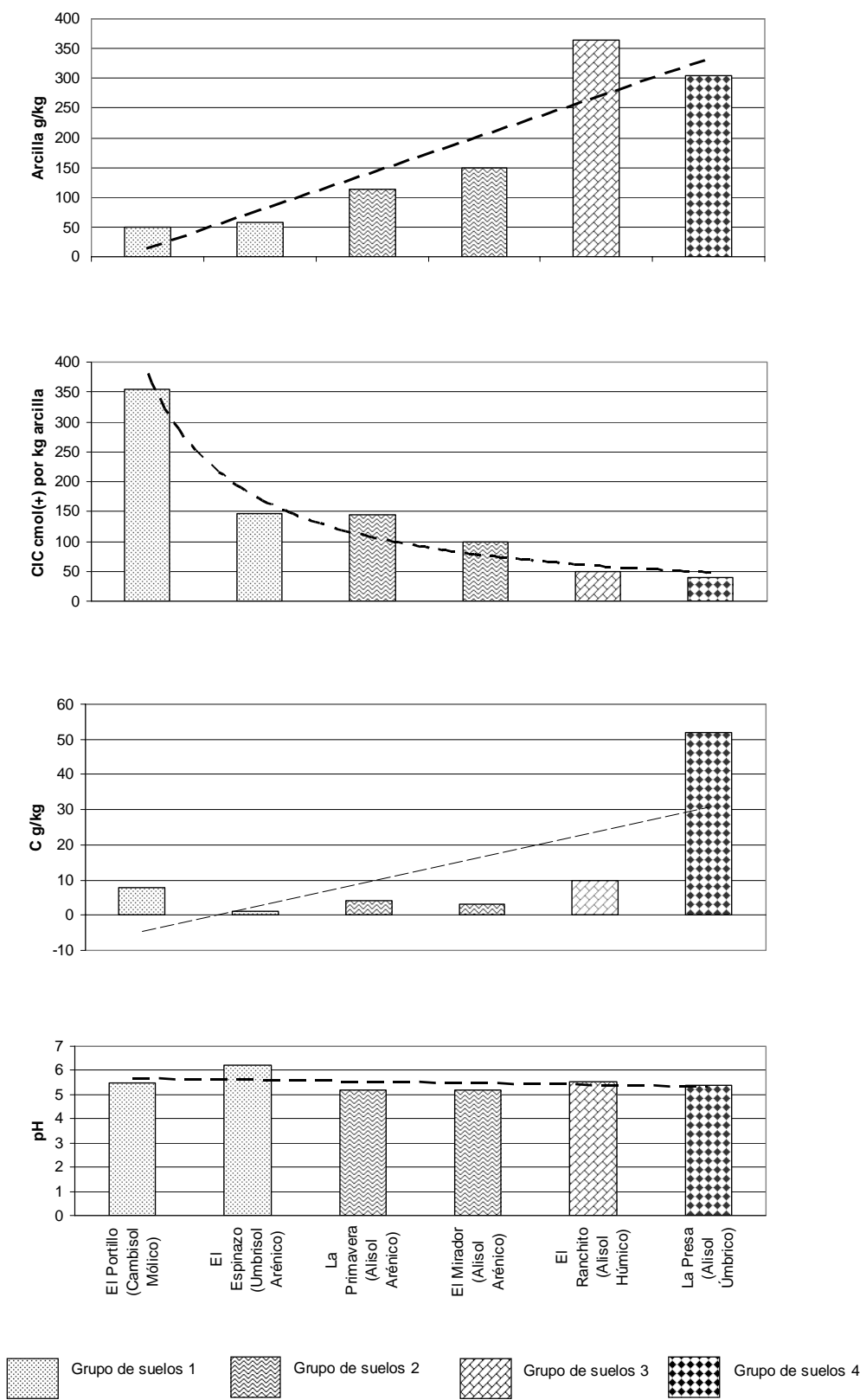


Figura 8. Propiedades de los horizontes Bt (Bw) de los suelos estudiados arreglados de acuerdo con un esquema propuesto de evolución del suelo.

El aumento de C orgánico en los horizontes Bt de los Alisoles en combinación con la disminución de la CIC, puede parecer extraño porque la acumulación de materia orgánica, por lo general, resulta en un aumento de la CIC.

Los autores de este trabajo atribuimos esta contradicción, a la baja actividad de la materia orgánica acumulada; lo que puede indicar una diferencia significativa en la edad absoluta de la materia orgánica respecto a los Alisoles arcillosos rojos. Si se considera a los Alisoles arcillosos rojos como los suelos más antiguos, se pueden establecer las siguientes preguntas: ¿son éstos producto de la misma ruta de desarrollo del suelo? o ¿son los restos de la antigua formación de suelo, que podría ser completamente diferente a la actual? En otras palabras, ¿los suelos arcillosos de color rojo son paleosuelos que afloran en la superficie?, o ¿se ajustan estos suelos a la misma secuencia evolutiva que los demás suelos?

El esquema de la Figura 8 es compatible con la hipótesis de una continua evolución del suelo. La cronosecuencia incluye suelos de diferentes épocas, con diferentes grados de lixiviación de bases y translocación de arcilla. La hipótesis se sustenta, en gran parte, por la relativa uniformidad en la composición mineralógica de los suelos estudiados. Tanto los suelos arcillosos como los arenosos, están dominados por minerales de caolinita y, en la mayoría de los casos, por gibbsite. Ambos grupos muestran, al menos en algunos horizontes, la presencia de minerales 2:1.

El modelo de pedogénesis en el área de estudio se resume en la Figura 9. La incipiente formación del suelo da inicio cuando las superficies recién expuestas son ocupadas por la vegetación. Posteriormente, el agua se infiltra y los organismos vivos dan lugar a la formación de un horizonte superficial de humus con una alteración del material del subsuelo, dando lugar a la formación de los Cambisoles. El lixiviado de las bases intercambiables da como resultado la formación de los Umbrisoles. El intemperismo de los minerales y la iluviación de arcilla llevan, finalmente, a la formación de suelos con horizonte árgico: Luvisoles y Alisoles.

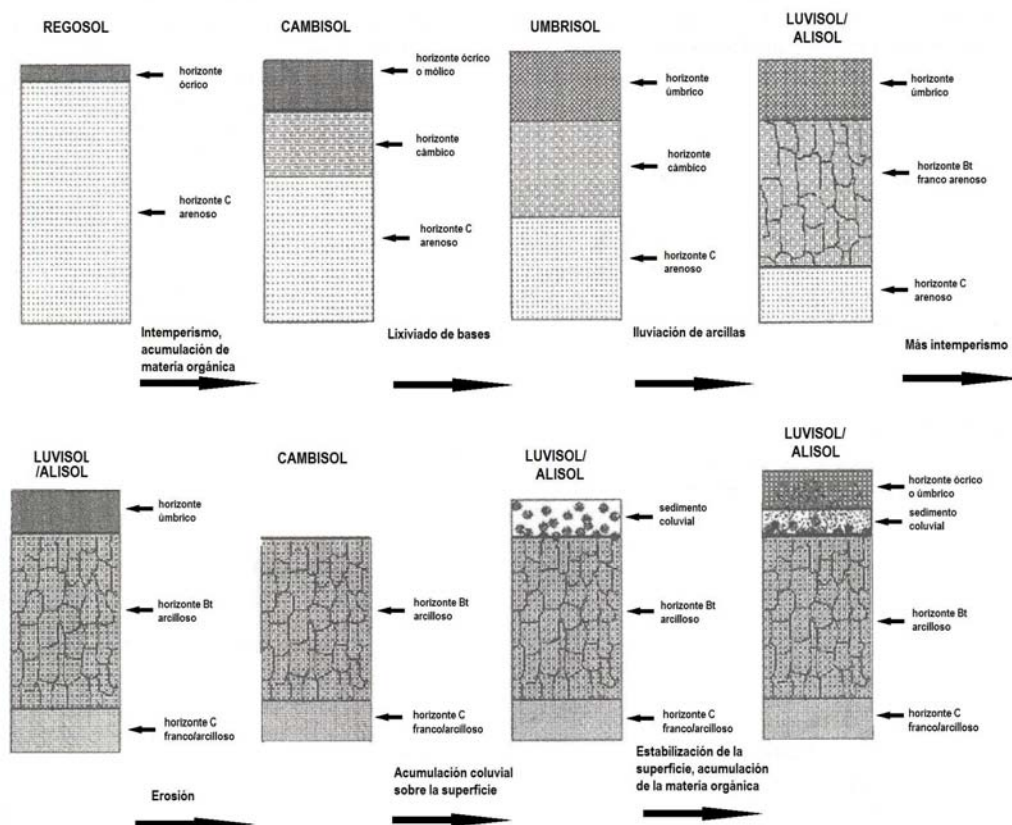


Figura 9. Modelo propuesto para el desarrollo del suelo en la Sierra Sur de Oaxaca.

A su vez, en el desarrollo del suelo sólo se puede especular. En una condición geomorfológicamente estable, estos suelos podrían transformarse en Acrisoles, es decir, suelos con arcillas de baja actividad. Sin embargo, en el área de estudio los procesos de ladera suelen afectar a estos suelos. Algunos de estos suelos pueden ser destruidos completamente por los deslizamientos de tierra, dando lugar a un nuevo ciclo de formación del suelo. A la vez que, algunos suelos pueden ser truncados en forma parcial (Fig. 9). Independientemente de la presencia de películas de arcilla (cutanes), los suelos truncados sin diferenciación textural se clasifican como Cambisoles (FAO-ISRIC-ISSS, 1998). En la mayoría de los casos, hay pruebas de acumulación de material fresco sobre la superficie de estos suelos, que conforman los horizontes superficiales, con texturas más gruesas, y algunas capas con horizontes superficiales ricos en humus. Hay líneas de piedra en algunos perfiles. Los horizontes superficiales contienen a menudo minerales 2:1 en la fracción arcilla, a diferencia de los horizontes Bt, donde estos minerales casi no existen (Fig. 3). En consecuencia, se puede señalar que en el área de estudio, algunos de los perfiles que se desarrollan son complejos.

## **V. CONCLUSIONES**

1. Los suelos de la Finca Sinaí, una finca cafetalera en la región montañosa del Estado de Oaxaca, México, forman un mosaico complejo de Alisoles, Umbrisoles y Cambisoles.

2. Los suelos que se estudiaron difieren en sus propiedades físicas y químicas. La fracción arcillosa está dominada por caolinita y gibsitita en todas las unidades de suelo estudiadas. La principal diferencia entre los suelos está en la proporción de haloisita y la mezcla de capas de illita-vermiculita, estas arcillas aumentan de los Cambisoles a los Alisoles. Incluso en Alisoles intemperizados, con únicamente caolinita y gibsitita en la fracción arcilla, tienen CIC relativamente elevada debido a la presencia activa de los minerales 2:1 en la fracción limosa.

3. Las propiedades del suelo y su clasificación dependen, principalmente, de la edad (tiempo de desarrollo de los suelos). Los suelos se forman sobre las superficies expuestas durante los períodos de intensa erosión y deslizamientos de tierra. La periodicidad puede atribuirse a los eventos de remoción en masa provocados por los huracanes y terremotos.



4. Se propone un modelo para el desarrollo del suelo en el área de estudio. El grado de lixiviación de bases y la translocación de arcilla se incrementa con el tiempo de exposición de la superficie. De acuerdo con el esquema propuesto, los suelos se desarrollan de Cambisoles a Umbrisoles, y después a Alisoles. La secuencia evolutiva es complicada, debido a los procesos de ladera que provocan truncamiento del suelo y acumulación de material coluvial en la superficie del suelo.

## **VI. BIBLIOGRAFÍA**

Alfaro Sánchez, G. 2004. Suelos. Pages 55-66 *in* A. J. García-Mendoza, M. de Jesús Ordóñez, and M. Briones-Salas, eds. Biodiversidad de Oaxaca. UNAM-FOCN-WWF, México, DF.

Birkeland, P. W. 1999. Soils and geomorphology. 3rd ed. Oxford University Press, New York, NY. 342 pp.

Centeno-García, E. 2004. Configuración geológica del estado. Pages 29-42 *in* A. J. García-Mendoza, M. de Jesús Ordóñez, and M. Briones-Salas, eds. Biodiversidad de Oaxaca. UNAM – FOCN - WWF, México, DF.

Cetin, K. O., Isik, N. and Unutmaz, B. 2004. Seismically induced landslide at Degirmendere Nose, Izmit Bay during Kocaeli (Izmit)-Turkey earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 24: 189-197.

Chang, K. J., Taboada, A. and Chan, Y. C. 2005. Geological and morphological study of the Jiufengershan landslide triggered by the Chi-Chi Taiwan earthquake. *Geomorphology* (en prensa).

Cuanalo, C. H. 1975. Manual para descripción de perfiles de suelos en el campo. Colegio de Postgraduados de Chapingo, Estado de México.

Dixon, J. B. 1989. Kaolin and serpentine Group minerals. Pages 467-525 *in* J. B. Dixon and S. B. Weed, eds. Minerals in soil environments. SSSA Book Series: 1. ASA, SSSA. Publ., Madison, WI.

Dixon, J. B. and White, G. N. 1999. Soil mineralogy. Laboratory manual. Agronomy 626. Soil and Crop Sciences Department, Texas A&M University, College Station, TX.

Drees, L. R., Wilding, L. P., Owens, P. R., Wu, B., Perotto, H. and Sierra, H. 2003. Steepland resources: characteristics, stability and micromorphology. *Catena*54: 619-636.

Dykes, A. P. 2002. Weathering-limited rainfall-triggered shallow mass movements in undisturbed steepland tropical rainforest. *Geomorphology* 46: 73-93.

FAO-ISRIC-ISSS. 1998. World reference base for soil resources. Soil Resources Report No. 84, Rome, Italy.

Feldman, S. B., Zelazny, L. W. and Baker, J. C. 1991. High-elevation forest soils of the southern Appalachians: I. Distribution of parent materials and soil-landscape relationships. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 1629-1637.

Fuentes Romero, E., García Calderón, N. E. and Krasilnikov, P. V. 2002. Estudio de los nutrientes y características edáficas en cafetales con diferentes grados de apertura del dosel en Pluma Hidalgo, Oaxaca. *Café Cacao*3: 61-63.

García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. UNAM, México, DF.

García Calderón, N. E., Ibañez, A., Fuentes, E., Platero, B., Galicia, M. S., Ramos, R., Mercado, I., Reyes, L., Hernández, A. and Trémols, J. 2000. Características de los suelos de un sector de Pluma Hidalgo, Sierra Sur de Oaxaca, México. Pages 61-67 in R. Quintero Lizaola et

al., eds. La edafología y sus perspectivas al Siglo XXI. Tomo 1. CP-UNAM-UACH, México, DF.

Ghabru, S. K., Mermut, A. R. and St. Arnaud, R. J. 1987. The nature of weathered biotite in sand-sized fractions of Gray Luvisols (Boralfs) in Saskatchewan, Canada. *Geoderma* 40: 65-82.

Graham, R. C. and Buol, S. W. 1990. Soil-geomorphic relations on the Blue Ridge Front: II. Soil characteristics and pedogenesis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1367-1377.

Graham, R. C., Daniels, R. B. and Buol, S. W. 1990. Soil-geomorphic relations on the Blue Ridge Front: I. Regolith types and slope processes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1362-1367.

Hernández, J. R., Ortiz, M. A. and Zamorano, J. J. 1996. Regionalización morfoestructural de la Sierra Madre del Sur, México. *Investigaciones Geográficas* 31: 45-67.

Homann, P. S., Solins, P., Chappell, H. N. and Strangenberg, A. G. 1995. Soil organic carbon in a mountainous, forested region: relation to site characteristics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1468-1475.

Huggett, R. J. 1998. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review. *Catena* 32: 155-172.

Hunckler, R. V. and Schaetzl, R. J. 1997. Spodosol development as affected by geomorphic aspect, Borada County, Michigan. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1105-1115.

Ibáñez, A., Fuentes, E., Alvarez, G. and García, N.E. 2001. Sustancias húmicas en suelos cafetaleros de la finca "El Sinaí", Oaxaca, México.

Programas y Resúmenes de XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Boletín de Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo 4: 30.

Kunze, G. W. and Dixon, J. B. 1986. Pretreatment for mineralogical analysis. Pages 91-100 *in* A. Klute, ed. Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. Agronomy 9. 2<sup>nd</sup> ed. ASA, SSSA. Publ., Madison, WI.

Krasilnikov, P. V. 2001. Mosaics of the soil cover and species diversity of aboveground vegetation in forest ecosystems of Eastern Fennoscandia. Eurasian Soil Sci. 34 (Suppl. 1): S90-S99.

Kretzschmar, R., Robarge, W. P., Amoozegar, A. and Vepraskas, M. J. 1997. Biotite alteration to halloysite and kaolinite in soil-saprolite profiles developed from mica schist and granite gneiss. Geoderma 75: 155-170.

McBratney, A. B. 1992. On variation, uncertainty and informatics in environmental soil management. Australian J. Soil Res. 30: 913-935.

McLean, E. O. 1982. Soil pH and lime requirement. Pages 199- 224 *in* A. L. Page, R. H. Miller, and D. R. Keeney, eds. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Agronomy 9, 2<sup>nd</sup> ed. ASA, SSSA. Publ., Madison, WI.

Morán, D. J., Corona, P. and Tolson, G. 1996. Uplift and subduction-erosion in southwestern México since Oligocene: pluton barometry constraints. Earth Planetary Sci. Lett. 141: 51-65.

Nelson, D. W. and Sommers L. E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. Pages 539-579 *in* A. L. Page, R. H. Miller, and D.

R. Keeney, eds. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Agronomy 9, 2nd ed. ASA, SSSA. Publ., Madison, WI.

Pai, C. W., Wang, M. K., King, H. B., Chiu, C. Y. and Hwong, J. L. 2004. Hydroxy-interlayered minerals of forest soils in A-Li Mountain, Taiwan. *Geoderma* 123: 245-255.

Rojas, T. R., Pérez, J. M. and Acosta, G. 1987. "Y volvió a temblar". Cronología de los sismos en México. Cuadernos de la Casachata 13J. Centro de Investigación y Estudios Superiores de Antropología Social: México, DF.

Rutherford, G. K. 1987. Pedogenesis of two Ultisols (Red Earth Soils) on granite in Belize, Central America. *Geoderma* 40: 225-236.

Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Limusa, México, DF.

Singer, A., Zarei, M., Lange, F. M. and Stahr, K. 2004. Halloysite characteristics and formation in the northern Golan Heights. *Geoderma* 123: 279-295.

Sparling, G., Ross, D., Trustrum, N., Arnold, G., West., A., Speir, T. and Schipper, L. 2003. Recovery of topsoil characteristics after landslip erosion in dry hill country of New Zealand, and a test of the space-for-time hypothesis. *Soil Biol. Biochem.* 35: 1575-1586.

Staver, C. 1998. Managing ground cover heterogeneity in coffee (*Coffea arabica* L.) under managed tree shade: from replicated plots to farmer practice. Pages 67-96 in E. L. Buck, P. J. Lassoie, and C. H. E. Fernandes, eds. Agroforestry in sustainable agricultural systems. CRC Press, Lewis Publ., Boca Raton, FL.

Tan, K. H. 1996. Soil sampling, preparation and analysis. Marcel Dekker, Inc., New York, NY. 264 pp.

Thomas, G. W. 1982. Exchangeable cations. Pages 159-165 *in* A. L. Page, R. H. Miller, and D. R. Keeney, eds. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Agronomy 9, 2nd ed. ASA, SSSA. Publ., Madison, WI.

Wilcke, W., Valladarez, H., Stoyan, R., Yasin, S., Valarezo, C. and Zech, W. 2003. Soil properties of landslides in mountain rain forest, Ecuador. *Catena* 53: 79-95.