

Tepetates del glacis de Buenavista, Morelos: interacción de procesos geomorfológicos y pedogenéticos

Guadalupe Escamilla Sarabia*
Elizabeth Solleiro Rebolledo**
Sergey Sedov**
Jorge Gama Castro**

Recibido: 6 de noviembre de 2001
Aceptado en versión final: 22 de marzo de 2002

Resumen. Se presenta un estudio de tepetates localizados en el glacis de Buenavista, Morelos. La sección estudiada en Ahuatenco cuenta con una secuencia de siete capas de horizontes endurecidos (tepetates), los cuales subyacen a un paleosuelo arcilloso poligenético muy bien desarrollado (similar a un luvisol). En este trabajo, los tepetates se consideran productos no sólo de procesos de erosión y sedimentación, sino también de pedogénesis, por lo que son paleosuelos con diferente grado de desarrollo.

Las evidencias micro y macromorfológicas muestran que los tepetates están constituidos por una mezcla de material volcánico fresco, fragmentos de horizontes de suelo redepositado y rasgos relacionados con la pedogénesis, los cuales incluyen: cutanes de arcilla, nodulos de hierro-manganeso, intemperismo de minerales primarios y acumulación de fitolitos en la matriz de las capas. Estas propiedades evidencian que los tepetates estuvieron expuestos en la superficie el tiempo suficiente para el desarrollo de la pedogénesis. El material parental de estos tepetates es material vulcanogénico, procedente de diferentes focos eruptivos, así como de materiales de horizontes Bt que fueron erosionados de las partes más altas y redepositados junto con el material volcánico. Debido a la presencia de estos fragmentos de horizontes Bt, el contenido de arcilla es alto (47%) en los horizontes endurecidos; sin embargo, su distribución es contrastante, lo que ayuda a reforzar la idea de discontinuidades mineralógicas y texturales, de modo que cada capa representa probablemente una etapa distinta de evolución del paisaje. El grado de alteración que revela cada capa es diferente, de tal manera que los periodos de estabilidad, bajo los cuales ocurrió la pedogénesis, fueron diferentes.

Palabras clave; Tepetates, paleosuelos, pedogénesis.

Tepetates from The Buenavista Glacis, Morelos: interaction between geomorphic and pedogenetic processes

Abstract. A study of tepetates found in the Glacis de Buenavista, Morelos is hereby presented. The section of study (Ahuatenco) includes a sequence of seven indurate horizons (tepetate layers), underlying a polygenetic and well-developed Luvisol. In this work tepetates are considered as products of erosion-sedimentation and pedogenetic processes. Therefore they are interpreted as paleosols with different degrees of development.

Macro and micromorphologic evidences indicate that the tepetate profile is constituted by a mixture of fresh coarse volcanic material, redeposited fragments of soil and pedogenetic features, which include: clay cutans, Fe-Mn nodules, weathered primary minerals and phytoliths accumulated within the layer matrix. These properties show that tepetates were exposed at the surface for a sufficient time to allow pedogénesis. The tepetates' parent material are volcanic ashes derived from volcanic events, and eroded Bt-horizon remains from the upper portions that were redeposited along with volcanic materials. Because of the presence of these Bt-horizon fragments the clay content in indurate materials is high (47%), but they display a contrasting distribution, showing lithological and textural discontinuities, so each layer is likely to represent a different stage of landscape evolution. The degree of alteration observed for the different layers vary, as well as the stability periods under which pedogénesis occurs.

Key words: Tepetates, paleosols, pedogénesis.

*Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología, UNAM, Ciudad Universitaria, 04510, México, D. F.
E-mail: mges @mail.jbiología.unam.mx

**Departamento de Edafología, Instituto de Geología, UNAM, Ciudad Universitaria, 04510, México, D. F.
E-mail: solleiro@geología.unam.mx

INTRODUCCIÓN

En México existe una gran cantidad de materiales a los que se les denomina tepetates, los cuales ocupan aproximadamente 30% de la superficie total (Flores *et al.*, 1991), ya sea aflorando sobre la superficie o dentro de los primeros 100 cm de profundidad efectiva del suelo (Guerrero *et al.*, 1992).

Los tepetates son depósitos volcánicos interestratificados, que incluyen paleosuelos de diferente naturaleza caracterizados por límites horizontales y bien definidos entre las capas. Los tepetates de la meseta central se han descrito como formaciones naturales, masivas, compactadas y duras; cementadas por diferentes agentes químicos, incluyendo arcillas y silicatos (Zebrowski, 1992). En el caso de los tepetates, su clasificación se basa en el tipo de agente cementante; cuando están cementados principalmente por sílice (SiO₂) se denominan duripanes; por carbonato de calcio (CaCO₃), petrocálcicos; y por yeso (CaSO₄), petrogípsicos; por sales, petrosálicos y por hierro, petroférricos; mientras que los fragipanes están compactados por arcilla. Los tepetates se originan básicamente de materiales volcánicos que han sido cementados o compactados, como consecuencia de tres procesos principales: (1) consolidación de las partículas minerales que provocan la compactación; (2) naturaleza de los materiales piroclásticos, los cuales se consolidan al momento en que se depositan y (3) endurecimiento por procesos pedológicos que producen cementantes en solución (Flores-Román *et al.*, 1996).

Se han hecho diversos trabajos sobre los tepetates de México, los cuales se basan principalmente en su caracterización física y química (Miehlich, 1992; Peña y Zebrowsky, 1992; Etchevers *et al.*, 1992); otros analizan a nivel micromorfológico sus características (Hessmann, 1992; Alfaro *et al.*, 1992). Algunos más se han enfocado en la identificación de los agentes cementantes, el uso de suelo

y su significado ecológico (Flores, *et al.*, 1996), mientras que otros hacen alusión al relieve, clima y origen pedológico de los tepetates (Geissert, 1992; Campos, 1992; Dubroeuq, 1992). Sin embargo, son escasas las investigaciones que los emplean como herramientas en reconstrucciones paleoambientales (Solleiro *et al.*, 2002).

En el estado de Morelos se han encontrado y estudiado dos secuencias pedoestratigráficas con tepetates, dentro del glacis de Buenavista (Solleiro *et al.*, 2002). Esta estructura ha sido descrita por Ortiz (1978), como producto de la acumulación de sedimentos procedentes de la denudación de relieves montañosos (como la sierra de Zempoala y el campo volcánico Chichinautzin), expuestos a la erosión.

En este trabajo se analizan con detalle las propiedades morfológicas, físicas y químicas de una secuencia de paleosuelos (suelos formados en superficies del pasado) y tepetates que se encuentran en el glacis. El objetivo de la investigación es determinar los mecanismos de formación de la secuencia como producto de la interacción de procesos de erosión-sedimentación y pedogenéticos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y factores ambientales

El glacis de Buenavista se ubica en la Sierra Madre del Sur (Subprovincia sur de Puebla), en el centro de México, a 85 km al suroeste de la Ciudad de México entre los 18° 45'-19° 00' de latitud norte y 99° 25'-99° 05' longitud oeste (Figura 1). El glacis ocupa una superficie aproximada de 331 km² (Ortiz, 1978). Las altitudes varían de los 3 000 a los 1 100 msnm. El clima de la región es templado-húmedo, con una temperatura media anual de 20.7° C (García, 1988) y una precipitación anual de 1 147 mm, con régimen de lluvias de verano de 993 mm. La

vegetación corresponde a bosques de *Pinus* y *Quercus*, en las partes más altas (>1 900 m) y a especies de sucesión secundaria, como los *Juniperus* (Rzedowsky, 1978); aunque en la actualidad, esta vegetación se ha visto disminuida por la presencia de actividad agrícola, así como debido al pastoreo; y se observa una intensa erosión que ha dejado amplias zonas denudadas.

Los tepetates dentro del glacis se ubican en elevaciones comprendidas entre los 1 900 msnm y afloran en sitios en donde se presenta erosión intensa (Figura 2). Los

tepetates objeto de este trabajo, fueron estudiados en una sección denominada Ahuatenco, localizada a los 18° 56' 15" de latitud norte y 99° 19' 55" de longitud oeste, a 1 850 msnm. A pesar de que la mayoría de los tepetates se pueden observar en superficie, en esta sección, subyacen a un suelo poligenético (suelo formado en dos o más períodos de pedogénesis, en cada uno de los cuales se producen propiedades específicas lo suficientemente diferentes que, sin embargo, han tenido una posterior evolución conjunta) y que ha sido clasificado como luvisol (Solleiro *et al.*, 2002).

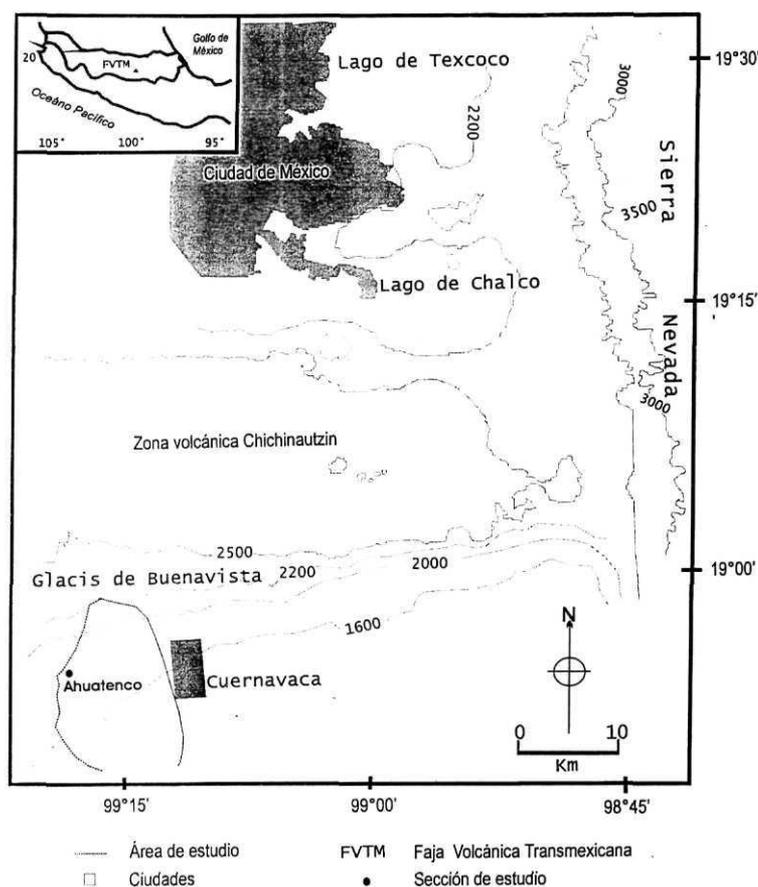


Figura 1. Localización del área en estudio, glacis de Buenavista, Morelos y perfil esquemático de Ahuatenco.

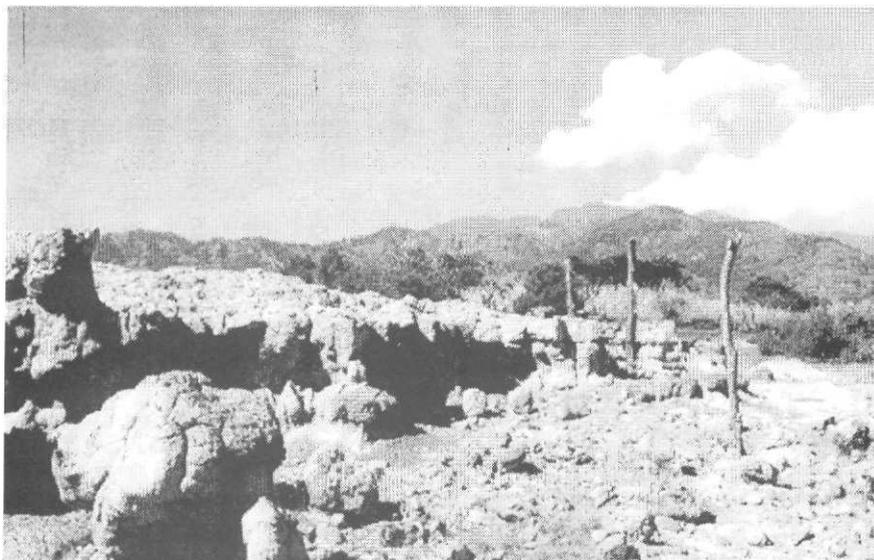


Figura 2. Tepetates aflorando debido a la intensa erosión.

Muestreo

En campo se hizo la descripción de la sección de Ahuatenco de acuerdo con la metodología del *Soil Conservation Service* (1996) y de Retallack y Wright (1990), para lo cual se recolectaron muestras por horizonte, a fin de hacer los análisis físicos y químicos. Además, se tomaron muestras inalteradas de cada capa y horizonte de suelo, para los estudios micromorfológicos; se realizó el levantamiento geológico general para definir geomorfología, material parental y estratigrafía de la zona.

Análisis físicos

El color se determinó en seco y húmedo por comparación con las tablas de color Munsell (1990). El análisis granulométrico se realizó mediante el método de la pipeta, de acuerdo con Schlichting y Blume (1966), la separación del tamaño de partículas fue determinada después de destruir los agentes agregantes como carbonato de calcio, la materia orgánica con H_2O_2 y óxidos de hierro, con ditionito-citrato-bicarbonato (DCB).

Micromorfología

Para el análisis micromorfológico se colectaron muestras de suelo, orientadas y no alteradas, de los diferentes horizontes genéticos de paleosuelos y de tepetates. Las muestras fueron secadas al aire, deshidratadas con acetona, impregnadas con resina sintética (Vespatol y endurecedor, cristal MC40) y endurecidas de cuatro a seis semanas (FitzPatrick, 1984); y se analizaron con el microscopio petrográfico haciendo la descripción de acuerdo a la terminología de Bullockeía/. (1985).

Análisis químicos

Se determinó el contenido de carbono orgánico total de acuerdo con el método de oxidación húmeda por el dicromato de potasio; reacción pH en solución de KCl y H_2O , relación 1:2.5 (*Soil Conservation Service*, 1996) y el contenido de óxidos de elementos mayores por medio de fluorescencia de rayos X, en el laboratorio de Fluorescencia de rayos X del Instituto de Geología de la UNAM; con estos valores

se calcularon los siguientes índices de alteración:

- índice de intemperismo de Parker (Colman, 1982). Este valor disminuye a medida que se pierden las bases del perfil. Por lo mismo, los valores altos reflejan etapas iniciales de desarrollo, mientras que los valores bajos implican que la mayor parte de los cationes se han perdido y ha actuado un intemperismo intenso en los suelos.

$$IP = K_2O/PM/0.25 + Na_2O/PM/0.35 + CaO/PM/0.7 + MgO/PM/0.9$$

donde PM es el peso molecular del compuesto

- Relación sílice/aluminio (*Sa*), cuyo valor disminuye al progresar el intemperismo (VanWanbeke, 1991).

$$Sa = SiO_2/PM/Al_2O_3/PVI$$

- Relación sílice/sesquióxidos (*Ses*). Esta relación es alta en las etapas iniciales del intemperismo y muy baja cuando se llega a etapas finales de desarrollo, ya que el suelo ha perdido gran parte de sus cationes y posee valores de pH neutros o ácidos.

$$PM + TiO_2/PM$$

- Relación $Fe_2O_3/(Fe_2O_3 + SiO_2)$. Esta relación depende del contenido de minerales amorfos y marca la diferencia entre los amorfos silicatados y los amorfos de hierro. El valor es pequeño cuando se trata de suelos jóvenes poco desarrollados con grandes cantidades de alofano (cerca a cero), mientras que un valor de 0.4 implica que se tiene un 40% de amorfos de hierro (Yong *et al.*, 1992).

$$Fes = Fe_2O_3/(Fe_2O_3 + SiO_2)$$

- Relación hierro total + manganeso/aluminio, que refleja procesos de óxido-reducción.

$$FMnAl = (Fe_2O_3 + FeO + MnO)/Al_2O_3$$

- Relación bases/alúmina, una relación más grande que la unidad refleja un suelo alcalino o de desarrollo débil (Retallack, 1990).

$$Bases/alúmina = (CaO + MgO + K_2O + Na_2O)/Al_2O_3$$

RESULTADOS

La sección estratigráfica de Ahuatenco está dividida morfológicamente en dos partes (Figura 3), la primera corresponde con un luvisol muy bien desarrollado poligenético y con perfil complejo, con tres horizontes Bt, que alcanza un espesor de 2.50 m; y la segunda está conformada por siete capas de tepetates, las cuales afloran en sitios donde se presenta erosión hídrica intensa. La base de esta sección está formada por una capa de conglomerados de la formación Cuernavaca, cuya edad probable es del Plioceno Superior (Fries, 1960).

Morfología

El luvisol localizado en la parte superior de la sección de Ahuatenco posee una secuencia de horizontes Ah-Bt-CBt. El horizonte Bt muestra diferencias claras en su morfología, de tal manera que se reconocen tres horizontes (Bt, 2Bt, 3Bt). Las diferencias de color no son claras en este suelo, tanto en húmedo como en seco (Cuadro 1). El horizonte Ah es pardo amarillento oscuro (10YR3/4); en los horizontes Bt, los colores en seco van de pardos oscuros a pardos claros (7.5YR4/4, 5/6, 5/4, respectivamente) y el horizonte 4CBt es pardo muy pálido (10YR7/3). Sin embargo, 2Bt muestra moteados con coloraciones grisáceas (5YR 4/1; 10YR 4/1) que se acentúan entre los 90 y 120 cm de profun-

Sección Ahuatenco

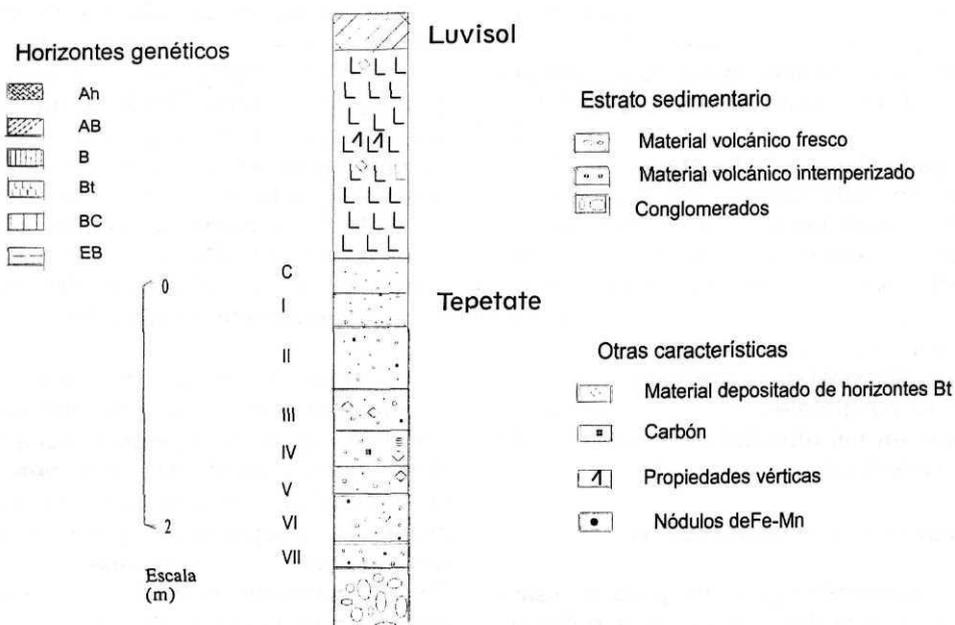


Figura 3. Perfil esquemático de la sección Ahuatenco, glacis de Buenavista, Morelos.

Cuadro 1. Sección Ahuatenco, análisis físicos

Horizonte	Prof. Cm	Color		Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clasificación textural	Estructura
		Seco	Húmedo					
Ah	0-25	10YR3/4	10YR2/2	10.56	15.99	<0.002 (mm)	Arcilla	Gr
Bt	25-70	7.5YR4/4	7.5YR3/4	6.97	16.06	73.45	Arcilla	Bsa
2Bt	70-145	7.5YR5/6	7.5YR4/2	2.94	11.33	76.97	Arcilla	Bsa
3Bt	145-205	7.5YR5/4	7.5YR3/4	6.36	33.32	85.73	Arcilla	Bsa
4CBt	205-259	10YR7/3	10YR4/6	24.73	40.89	60.43	Migajón arcilloso	—
I	0-25	10YR5/6	10YR3/6	4.98	25.96	34.38	Arcilla	M
II	25-73	10YR7/4	10YR4/6	49.18	22.96	73.69	Migajón arcillo arenoso	M
III	73-105	10YR6/4	10YR4/6	59.65	12.57	27.77	Migajón arcillo arenoso	M
IV	105-138	10YR6/4	10YR3/6	23.91	36.23	39.86	Migajón arcilloso	M
V	138-160	10YR7/3	10YR5/3	12.86	39.32	47.81	Arcilla	M
VI	160-200	10YR7/3	10YR5/4	15.53	29.51	54.96	Arcilla	M
VII	200-220	10YR7/3	10YR7/3	25.37	30.54	44.08	Migajón arcilloso	M

Gr-granular, Bsa-bloques subangulares, M- masiva

Didad. Tanto en 2Bt como en 3Bt se presentan concreciones de Fe. La estructura en el horizonte Ah es granular con muestras claras de bioturbación, mientras que Bt posee una estructura en bloques subangulares.

En la parte baja los tepetates han sido divididos en siete capas, de acuerdo con sus rasgos morfológicos. Los colores predominantes son pardo amarillento (10YR5/6), pardo muy pálido (10YR7/4) y pardo ligeramente amarillo (10YR6/4), con una estructura masiva (Figura 4). Al observar el plano horizontal, se constata que el rompimiento es en bloques poligonales, lo cual es fácilmente detectable en las terrazas de erosión desde la parte superficial.

Propiedades micromorfológicas

A nivel micromorfológico, es posible distinguir en el luvisol diferencias claras entre los tres horizontes Bt referidos. El primer Bt muestra una gran acumulación de arcilla,

pero cutanes delgados y zonales, mientras que en el horizonte 2Bt los cutanes son gruesos y están deformados, observándose *slickensides* (cutanes de deslizamiento) y grietas. Por su parte, 3Bt tiene cutanes gruesos y continuos; en el horizonte 4CBt subyacente se observa una matriz formada por material volcánico, con un alto contenido de biolitos; la matriz y canales presentan gruesos cutanes (Figura 5). A nivel micromorfológico los nodulos de Fe-Mn son comunes, principalmente en 2Bt y 3Bt.

Las observaciones micromorfológicas muestran también variaciones notables entre las siete capas de tepetates, aunque todas ellas están constituidas por una mezcla de material volcánico fresco, restos de horizontes Bt redepositados y rasgos pedogénicos, tales como: cutanes, nódulos de Fe-Mn, minerales primarios intemperizados, pequeños fragmentos de carbón y acumulación de fitolitos en la matriz.



Figura 4 Capas de tepetates subyaciendo a los luvisoles en el glacis de Buenavista, Morelos, México.

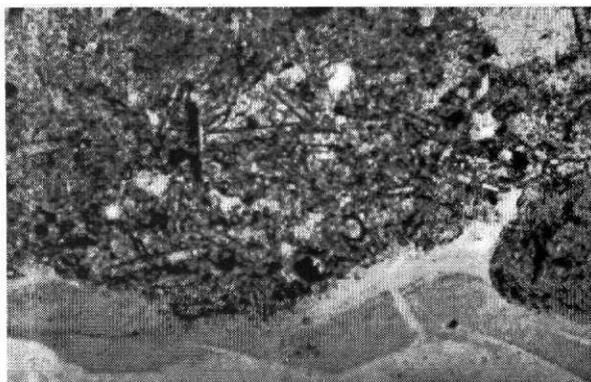


Figura 5. Horizonte C de luvisol que sobreyace a tepetates, en la microestructura muestra biolitos en una matriz de material volcánico, así como procesos contemporáneos de iluviación de arcilla.

En la capa II de los tepetates son comunes los nodulos de Fe (Figura 6), mientras que en las capas IV y V es posible apreciar numerosas partículas de carbón (Figuras 7

y 8) y una mezcla de material volcánico fresco, restos de horizontes Bt retrabajados y cutanes de arcilla formados *in situ* (Figura 9).

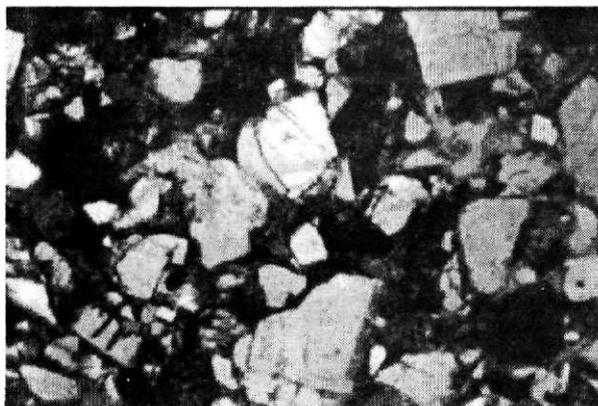


Figura 6. Capa II. Material volcánico grueso con nodulos de hierro y manganeso que evidencian condiciones de óxido-reducción.

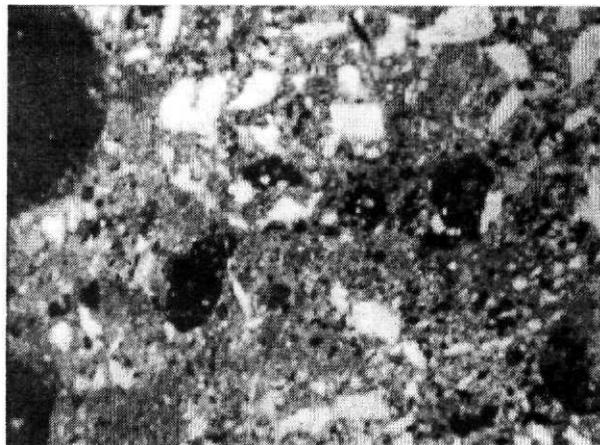


Figura 7. Capa IV. Mezcla de material volcánico fresco, con partículas de carbón, nódulos de Fe y cutanes de arcilla formadas *in situ*, así como retrabajados

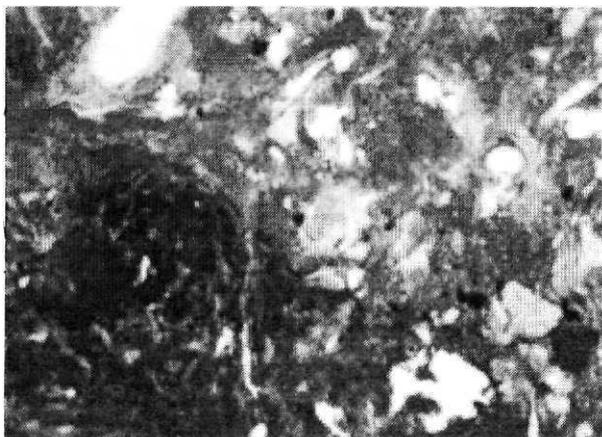


Figura 8. Capa V. Mezcla de material volcánico con partículas de carbón, restos de horizontes Bt redepositados y cutanes de arcilla formados *in situ*.

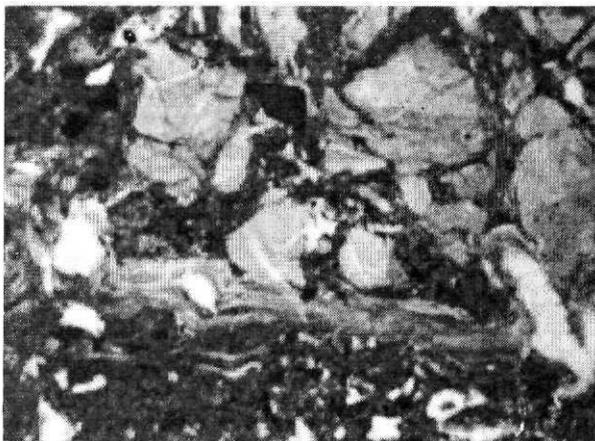


Figura 9. Capa VI. Fragmentos de horizontes Bt de luvisoles formados en partes más altas que fueron redepositados e incorporados a la matriz del suelo.

Propiedades físicas

La determinación de la distribución y clase de partículas por tamaño permitió evaluar la uniformidad litológica (o discontinuidades texturales y mineralógicas) en la sección estudiada. Como se observa en el cuadro 1, el luvisol muestra proporciones muy altas de arcilla (>60%). De acuerdo con estos resultados existe una discontinuidad textural clara entre 2Bt y 3Bt, ya que la diferencia de los contenidos de limo y arcilla supera el 20% (Cuadro 1); además, hay un fuerte contraste con el horizonte 4CBt, variando la textura de arcilla a migajón arcilloso.

Por su parte, en las capas de tepetates, las discontinuidades texturales son también muy

obvias. La capa I muestra los valores más altos de arcilla (73.69%), mientras que las capas II y III subyacentes presentan las proporciones más bajas (Cuadro 1).

Propiedades químicas

El contenido de carbono orgánico en el horizonte Ah es moderado, disminuye en los horizontes subyacentes. Las capas de los tepetates dan valores de 0%. El valor del pH medido en agua (Cuadro 2) es moderadamente ácido en el luvisol (6.0 a 6.8) y en las dos primeras capas de tepetates (6.2 a 6.7), en tanto que en las capas inferiores los valores se incrementan hasta valores neutros (7.2 a 7.5) .

Cuadro 2. Sección Ahuatenco, análisis químicos

Horizonte	PH (1:2) H ₂ O	C %	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	Na ₂ O %	K ₂ O %	CaO %	MgO %	MnO %	Al _o %	Fe _o %	Si _o %
Sección Ahuatenco														
Ah	6.1	2.0 2	42.14	2.08	26.50	11.70	0.26	0.39	0.65	0.28	0.22	0.33	1.20	0.12
Bt	6.8	0.1 8	39.98	2.18	29.82	13.16	0.14	0.22	0.24	0.23	0.16	0.37	1.29	0.27
2Bt	6.2	0.0 0	41.88	2.00	31.44	12.40	0.12	0.15	0.12	0.22	0.02	0.24	0.86	0.20
3Bt	6.0	0.0 0	50.13	2.50	23.67	13.42	0.40	0.69	0.16	0.42	0.26	0.14	0.61	0.12
4CBt	6.1	0.0 0	59.53	1.33	22.83	8.26	0.84	0.74	0.44	0.43	0.03	0.08	0.23	0.06
I	6.7	0.0 0	47.48	1.47	29.96	9.81	0.26	0.45	0.17	0.37	0.14	0.20	0.52	0.11
II	6.2	0.0 0	53.36	0.93	24.13	6.90	2.21	0.83	2.04	0.52	0.06	0.07	0.10	0.06
III	7.3	0.0 0	48.78	0.80	24.93	6.90	2.93	0.56	3.31	0.76	0.07	0.08	0.25	0.08
IV	7.2	0.0 0	59.23	2.33	19.74	13.37	0.39	0.24	0.43	0.32	0.12	0.11	0.21	0.09
V	7.5	0.0 0	70.45	2.29	18.06	9.65	0.24	0.17	0.21	0.24	0.02	0.07	0.10	0.11
VI	7.3	0.0 0	62.21	1.41	22.81	9.87	0.27	0.13	0.24	0.30	0.02	0.08	0.02	0.05
VII	n.d.	0.0 0	62.95	1.09	23.74	7.65	0.41	0.13	0.41	0.27	0.01	0.10	0.07	0.08

Índices de alteración

A partir de los resultados de la composición química total, expresada en óxidos (Cuadro 2), se calcularon los índices de alteración.

El luvisol, en sus horizontes Ah, Bt y 2Bt, muestra los valores más bajos en la relación sílice/alúmina (*Sa*), y sílice/sesquióxidos (*Ses*), los cuales aumentan en los horizontes 3Bt y 4CBt (Cuadro 3), evidenciándose nuevamente la presencia de discontinuidades litológicas entre 2Bt-3Bt y 3Bt-4CBt.

El índice de intemperismo de Parker (*IP*) muestra valores bajos en el luvisol, similares a los obtenidos para la relación bases/alúmina (Cuadro 3). La relación *Fes* muestra valores altos que indican la presencia de amorfos de hierro en cantidades elevadas; mientras que el horizonte 4CBt muestra un patrón diferente, ya que los resultados de *IP* y las bases/alúmina son mayores, mientras que la proporción de amorfos de hierro es menor. La relación $Fe_2O_3+MnO_2/Al_2O_3$ es

marcadamente elevada, sobre todo en 3Bt, evidenciándose condiciones reductoras en el horizonte. En los tepetates los valores de *IP* son bajos en la capa I, y altos en la IV y V, notándose una acumulación de SiO_2 en ellas. Los resultados de *Ses* en los tepetates es más heterogénea; el valor de *Sa* que coincide con la capa I, es bajo, mientras que en II, III IV, VI y VII es más alto.

Con respecto a los índices de Parker y bases /alúmina, se observa que las capas I, IV, V, VI y VII muestran valores bajos, aunque ligeramente más elevados a los encontrados en los horizontes Bt del luvisol, en tanto que las capas II y III poseen valores de cuatro-cinco veces más altos.

La relación *Fes* muestra resultados similares en todas las capas. El índice de oxidación es mayor en las capas IV y V (0.44 y 0.34, respectivamente), mientras que en el resto de la secuencia estos valores van de 0.18 a 0.28.

Cuadro 3. Sección Ahuatenco, índices de alteración

Horizonte	Sa	Ses	IP	Fes	FMnAl	bases/alúmina	Sio/Alo
Sección Ahuatenco							
Ah	2.70	1.95	0.05	0.22	0.29	0.10	0.37
Bt1	2.27	1.65	0.03	0.25	0.29	0.03	0.73
Bt2	2.26	1.70	0.02	0.23	0.25	0.04	0.81
Bt3	3.59	2.40	0.01	0.21	0.38	0.11	0.91
C	4.42	3.40	0.06	0.12	0.23	0.17	0.68
I	2.70	2.12	0.05	0.17	0.22	0.08	0.56
II	3.75	3.05	0.33	0.11	0.19	0.39	0.74
III	3.32	2.73	0.26	0.12	0.18	0.56	0.97
IV	5.09	3.22	0.05	0.18	0.44	0.14	0.86
V	6.62	4.41	0.03	0.12	0.34	0.10	1.46
VI	4.63	3.42	0.03	0.14	0.28	0.09	0.62
VII	4.50	3.56	0.04	0.11	0.21	0.11	0.81

DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados señalados, se confirma el carácter poligenético del luvisol, ya que muestra diferencias morfológicas, físicas y químicas claras entre los horizontes Bt que lo componen.

Este suelo muestra un alto grado de desarrollo y fuerte alteración, como lo evidencian la acumulación de arcilla, la buena estructuración que posee y la destrucción de minerales primarios. El fuerte intemperismo ha originado una pérdida de bases y acumulación de óxidos amorfos de hierro, producto de la alteración de los minerales primarios.

En láminas delgadas se observa que el primer horizonte posee un alto contenido de arcilla, pero poca ha sido acumulada por iluviación. Sin embargo los índices de alteración evidencian un fuerte intemperismo y desbasificación. A pesar de que ningún dato analítico revela discontinuidad entre Bt y 2Bt, las evidencias macro y micromorfológicas indican que este último sí posee un fuerte carácter iluvial y una combinación de rasgos producidos por períodos de sequía intensa (*slikensides* y cutanes de tensión), y por condiciones reductomórficas (moteados, gley, concreciones). La discontinuidad con respecto a 3Bt es más evidente dado el menor contenido de arcilla, los valores más altos en los índices de alteración (*Sa*, *Ses*, bases/alumina) y los rasgos micromorfológicos. Sin embargo, en este horizonte también son claras las condiciones reductomórficas, reflejadas inclusive en un valor alto en el índice Fe+Mn/Al.

Este suelo fue formado en tres períodos diferentes, a partir de tres depósitos volcánico-sedimentarios. Dada la suma de propiedades observadas en él, se puede afirmar que durante su génesis hubo cambios marcados en las condiciones climáticas, de tal manera que constituye un paleosuelo relictos, es decir, un suelo que no fue sepultado y, en

consecuencia, reúne en su perfil rasgos que reflejan los climas pasados y presentes (Nettleton *et al.*, 2000).

De acuerdo con las observaciones hechas por Solleiro *et al.* (2002) este suelo fue formado durante el Holoceno.

Por su parte, el horizonte 4CBt, subyacente, muestra una discontinuidad litológica y textural, que los separa claramente de la pedogénesis del perfil del luvisol y de las capas de tepetates que se encuentran debajo. Este horizonte C muestra evidencias de haber sido afectado por procesos pedogenéticos (intemperismo, cutanes, acumulación de fitolitos), representando la parte inferior de un perfil de un suelo, que fue afectado por erosión y posteriormente sepultado por sedimentos que dieron origen al luvisol suprayacente.

El material parental de los tepetates es mixto, dado que es ceniza volcánica procedente de diferentes focos eruptivos, así como de materiales coluviales, constituidos en gran parte por restos de horizontes Bt que fueron erosionados de las zonas más altas y redepositados junto con el material volcánico.

La capa I muestra una fuerte acumulación de arcilla no asociada a iluviación, sino a la alteración marcada que se presenta, tal como lo señalan los valores bajos de los diferentes índices calculados (Cuadro 3). Las capas II y III poseen características similares, ambas tienen proporciones más bajas de arcilla, valores más altos en los índices de alteración *Sa*, *Ses*, *IP* y bases, revelando una menor afectación pedogenética. Esto es evidente micromorfológicamente, ya que los minerales primarios se notan limpios (Figura 6).

Por su parte, las capas IV y V muestran rasgos asociados a la pedogénesis, como son restos de material orgánico carbonizado,

cutanes de arcilla, nódulo de Fe-Mn. El índice de intemperismo de Parker y bases son bajos, lo que indicaría una fuerte desbasificación, aunque esta consideración no es aceptable dados los valores de $\text{pH} > 7.0$ (Cuadro 2). Los valores de las relaciones Sa y Ses son muy altos, indicando que las capas quizá recibieron aportes secundarios de sílice, dando valores altos de hasta 70% (Cuadro 2). No obstante, no se encontraron evidencias ni en campo ni en láminas delgadas con sílice secundario (ópalo), rasgo común en los tepetates del centro de México, formados en clima subhúmedo (régimen de humedad ústico; Miehllich, 1992; Hessman, 1992). Además, los valores de sílice extraídos por oxalato de amonio (*Sio*) son bajos (0.9-0.11%; Solleiro *et al.*, 2002), si bien la relación *Sio/Alo* es la mayor (1.46) de toda la secuencia (Cuadro 2). Esto permite pensar que el sílice procede del material parental de estas capas, que es de tipo volcánico ácido (riodacítico). Es importante señalar la influencia pronunciada de procesos de oxidación-reducción, evidenciados por valores altos de la relación *Fma* (0.44-0.34).

Las capas inferiores tienen un patrón de comportamiento similar al descrito para las capas anteriores (IV y V), si bien en las primeras, los contenidos de SiO_2 son menores, revelando la naturaleza del material volcánico de composición intermedia.

El alto contenido de arcilla encontrado en los tepetates puede explicarse por la presencia de un material que originalmente era rico en arcilla, como ceniza volcánica de tal tamaño y restos de horizonte Bt procedentes de otros suelos que fueron erosionados y redepósitos junto con el sedimento volcánico.

La secuencia estudiada se ha correlacionado con una similar a altitudes mayores (2 000 m) en la parte norte del glacis. En tal secuencia, sin embargo, no se reconocieron las capas de tepetates y cada horizonte de Bt de Ahuatenco corresponde con tres

luvisoles (unidades 2, 3 y 4), formados en diferentes períodos (Solleiro *et al.*, 2002). Dichos autores fecharon un luvisol subyacente a la unidad 4, dando una edad de 12 140 años; en consecuencia, el luvisol poligenético aquí analizado fue formado durante el Holoceno, mientras que los tepetates corresponden con fases más antiguas, formadas en el Pleistoceno Superior. En este período, los procesos de erosión y sedimentación, sumados a un mayor volcanismo en la zona, inciden fuertemente en la región. En las partes más altas, estos procesos fueron de menor intensidad, dando lugar a la formación de luvisoles, mientras que en las partes bajas del glacis fueron dominantes, de tal forma que dio lugar a la acumulación de un material volcanogénico, retrabajado, mezclado con restos de horizontes Bt derivados de partes altas. Este material, que sufrió procesos de pedogénesis (iluvación de arcilla, acumulación de óxidos de Fe-Mn, intemperismo), fue afectado por procesos de compactación y consolidación. Estos procesos, de acuerdo con la teoría de Bryant, se relacionan básicamente con la hidroconsolidación, que permite el colapso estructural del material cuando es sometido a carga y humedad. El fenómeno es favorecido cuando los materiales poseen cantidades regulares de arcilla (alrededor del 30%) y contenidos de humedad altos (Assallay *et al.*, 1998).

Los sedimentos que más favorecen este colapsamiento es el loess (Franzmeier *et al.*, 1989), pero no es el único posible. La presencia de "puentes de arcilla" combinada con un adecuado arreglo interno de las partículas (empacamiento meta-estable abierto) favorece la consolidación (Assallay *et al.*, 1998), así como su compactación.

Los tepetates del centro de México no sólo son materiales volcánicos compactados, endurecidos, sino que la mayor parte de ellos ha sido afectado por pedogénesis, presentando altos contenidos de arcilla y presencia

de arcilla iluviada (Hessman, 1992; Peña y Zebrowski, 1992; Oleschko *et al.*, 1992).

CONCLUSIONES

Dadas las evidencias encontradas en la sección estudiada, se concluye que tanto el luvisol como los tepetates son paleosuelos. El luvisol poligenético representa un suelo relicto, en el cual los procesos del ambiente del pasado se han mezclado con los actuales; sin embargo, los rasgos pedogenéticos son indicativos de un ambiente húmedo, similar al que se tiene en el presente. No obstante, la formación de 2Bt y 3Bt revela condiciones un tanto diferentes; 3Bt fue formado bajo condiciones de intensa humedad que permitieron la formación de nódulos de Fe-Mn, mientras que 2Bt marca períodos de sequía tal como lo evidencian los cutanes de tensión y propiedades vérticas. Por su parte, las capas de tepetates, iniciando por la capa 4CBt, marcan diferentes superficies de estabilidad en el paisaje, en donde los procesos de erosión-sedimentación fueron atenuados, permitiéndose la pedogénesis.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se hizo bajo el financiamiento de los proyectos CONACyT (32337-T) y DGAPA (INI04600). Se agradece la colaboración de David Flores Román por el apoyo en trabajo de campo; a Arelia González, Humberto Núñez, Rufino Lozano y Patricia Girón por los análisis de laboratorio.

REFERENCIAS

- Alfaro, G., K. Oleschko y M. Meza (1992), "Rasgos micromorfológicos de los tepetates de Hueyoptla (Estado de México)", *Terra* 10 (núm. especial), pp. 253-257.
- Assallay, A. M., I. Jefferson, C. D. F. Rogers e I. J. Smalley (1998), "Fragipan formation in loess soils: development of the Bryant hydroconsolidation hypothesis", *Geoderma* 83, pp. 1-16.
- Bullock, P., N. Fedoroff, A. Jongerius, G. Stoops, T. Tursina y V. Babel (1985), *Handbook for soil thin section description*, Waine Research Publications, Wolverhampton, U. K.
- Colman, S. M. (1982), "Chemical weathering of basalts and andesites: evidence from weathering rinds", *US Geol. Surv. Prof. Pap.* 1246.
- Campos, A. (1992), "Los tepetates de la región de Xalapa, Veracruz (México): estructura de la cubierta pedológica", *Terra* 10 (núm. especial), pp. 226-232.
- Dubroeuq, D. (1992), "Los tepetates de la región de Xalapa, Veracruz (México): un endurecimiento de origen pedológico", *Terra* 10 (núm. especial), pp. 233-240.
- Etchevers, B., R. M. López, C. Zebrowsky y D. Peña (1992), "Características químicas de tepetates de referencia de los estados de México y de Tlaxcala, México", *Terra* 10 (núm. especial), pp. 171-177.
- FitzPatrick, E. A. (1984), *Suelos, su formación, clasificación y distribución*, CECSA (1a. ed. en español), México.
- Flores Román D., J. R. Alcalá, A. González y J. E. Gama (1991), "Los tepetates", *Revista de Geografía*, vol III, núm. 4, pp. 37-42.
- Flores Román, D., R. Alcalá Martínez, A. González Velázquez y J. E. Gama Castro (1996), "Duripans in the subtropical and temperate subhumid climate of the Trans-Mexico Volcanic Belt", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13(2), pp. 228-239.
- Franzmier, D. P., L. D. Norton y G. C. Steinhardt (1989), "Fragipan formation in loess of the Midwestern United States", en Smeck N. E., E. J. Ciolkosz (eds.), *Fragipan. Their occurrence, classification and génesis*. Soil Sci. Soc. Am. Spec. Publ. 24, Madison, WI:SSSA, pp. 69-98.
- Fries, C. (1960), "Bosquejo geológico del estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, Región Central Meridional de México", *Boletín del Instituto de Geología*, núm. 60, Instituto de Geología, UNAM, México, pp. 1-256.

- 📖 García, E. (1988), *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*, ed. especial.
- 📖 Geissert, D. (1992), "Los tepetates de Xalapa, Veracruz (México): relación con el relieve modelado actual y esquema cronológico", *Terra* 10 (núm. especial), pp. 221-225.
- 📖 Guerrero, E. G, J. L. Luna y E. Caballero (1992), "Distribución de los tepetates de la República Mexicana escala 1:4 000 000", *Terra* 10 (núm. especial), pp. 131-136.
- 📖 Hessman, R. (1992), "Micromorphological investigations on "tepetate" formation in the "toba" sediments of the State of Tlaxcala (México)", *Terra* 10 (núm. especial), pp. 145-150.
- 📖 Miehlich, G. (1992), "Formation and properties of tepetate in the Central highlands of México", *Terra* 10 (núm. especial), pp. 137-144.
- 📖 Munsell (1990), *Soil Color Charts*, edition Munsell Color Company, Inc. Baltimore, Maryland, 21218, USA.
- 📖 Nettleton, W. D., C. G. Olson y D. A. Wysocki (2000), "Paleosol classification: problems and solutions", *Carena* 41, pp. 61-92.
- 📖 Oleschko, K., P. Quantin y C. Zebrowski (1992), "Patrones morfológicos de organización de arcilla en tepetates (México)", *Terra* 10 (núm. especial), pp. 183-191.
- 📖 Ortiz Pérez, M. A. (1978), "Estudio geomorfológico del glacis de Buenavista, Estado de Morelos", *Boletín*, núm. 8, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp 25-40.
- 📖 Peña, D. y C. Zebrowski (1992) "Los suelos y tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada", *Terra* 10 (núm. especial), pp. 151-155.
- 📖 Rzedowsky, J. (1978), *Vegetación de México*, Limusa. México.
- 📖 Retallack, G. J. (1990), *Soils of the past*, Unwin-Hyman, London.
- 📖 Retallack, G. J. y V. P. Wrigth (1990), "Micromorphology of Lithified Paleosols", *Soil Micromorphology: a basic and Applied Science*, 19, Elsevier.
- 📖 Schilchting, E. y H. P. Blume (1966), *Bodenkundliches Praktikum*, Paul Parey, Hamburg, Berlín.
- 📖 SCS-USDA (1986), *Soil Survey Laboratory methods and procedures for collecting soil samples*, Washington, D. C, U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service.
- 📖 Soil Conservation Service (1996), *Procedures for collecting soil samples and methods of analysis for soil survey. Soil Survey Investigations Rep. 1* (revised edition). SCS-USDA, US. Government Printing Office, Washington, D.C.
- 📖 Van Wanbeke, A. (1991), *Soils of the tropics: properties and appraisal*, McGraw Hill, Inc.
- 📖 Yong, R. N., A. M. O Mohamed y B. W. Wang (1992), "Influence of amorphous silica and iron hydroxide on interparticle action and soil surface properties", *Can. Geotech. J.* 29, pp. 803-818.
- 📖 Zebrowski, C. (1992), "Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina", *Terra* 10 (num. especial), pp. 15-23.