

SUELOS CON FRAGIPÁN DE ORIGEN VOLCÁNICO EN CLIMA SEMICÁLIDO Y SUBHÚMEDO—EL CASO DEL NORESTE DEL ESTADO DE MORELOS, MÉXICO

David Flores-Román*,
Jorge René Alcalá-Martínez*,
Arelia González-Velázquez* y
Jorge Enrique Gama-Castro*

RESUMEN

El fragipán consiste en horizontes muy compactos, con densidad de masa alta y cierta fragilidad. Se le atribuye un origen ígneo o sedimentario; en México se le conoce como "tepetate", palabra náhuatl que involucra materiales muy diversos, que han sido compactados o cementados.

Tomando en consideración que no existe una metodología específica para investigar el fragipán, se plantea un diseño metodológico para su estudio. Se estableció una hipótesis sobre el origen ígneo y su constitución, a partir de piroclastos del Pleistoceno. La compactación se debió, principalmente, al peso ejercido por periglaciares y, en segundo término, al efecto de expansión y contracción de las arcillas. Los suelos actuales se formaron a partir del fragipán; su pedogénesis ha sido alterada por el aporte sucesivo de piroclastos recientes —policíclica.

Las principales propiedades determinadas en el fragipán son: a—textura predominantemente migajosa; b—esfericidad baja y redondez, de angular a subangular, de los limos y arenas muy finas, debido a su depósito *in situ*; c—porosidad y conductividad hidráulica menores que las del suelo; d—alteración escasa, indicada por la poca diferencia entre las cantidades de óxidos totales del suelo y de la roca basal; e—cementación débil y zonal, siendo el cementante un material esencialmente silíceo; f—composición mineralógica, determinada petrográficamente, similar a la de una toba; g—contenido alto de caolinita y montmorilonita en la fracción de arcilla.

Palabras clave: Fragipán de origen volcánico, tepetate-fragipán, Estado de Morelos, México.

ABSTRACT

The fragipan consists of very compact horizons with high-bulk density and some brittleness. Its supposed origin could be igneous or sedimentary. In Mexico, it is known as *tepetate*, a Náhuatl word that means different compact or cemented materials.

Taking into account that a specific methodology to investigate the fragipan does not exist, a methodological design for its study was carried out. A hypothesis about the soil origin and the age of the fragipan was established, as follows: the fragipan has an igneous origin and it was constituted by Pleistocene-age tephra. Compaction was caused mainly by the weight of glaciers and, in a complementary form, by the expansion and contraction effect of clays. The present soil was formed from the fragipan; its genesis has been altered by the successive accumulation of recent pyroclastic deposits (various cycles).

The main properties of fragipan that were detected are: a—predominant loamy texture; b—low sphericity and subangular to angular roundness of the silt and very fine sand caused by *in situ* deposit; c—lesser porous space (porosity) and more resistance to water movement (hydraulic conductivity) than those of the soil; d—total oxide content similar to that of the soil and the unaltered rock, implying weathering in a lesser extent; e—weak and zonal cementation, being the cementing agent a siliceous material; f—mineralogical composition, from petrographic analyses, is similar to that of a tuff; g—high content of kaolinite and montmorillonite in the clay fraction.

Key words: Fragipan of volcanic origin, fragipan *tepetate*, State of Morelos, Mexico.

INTRODUCCIÓN

Con base en el USDA (1988), se define un fragipán, de acuerdo con sus propiedades principales, como sigue: es un horizonte subsuperficial de textura de migajón. Tiene una densidad aparente alta en relación con los horizontes superficiales y un contenido de materia orgánica bajo. Parece cementado cuando está seco; cuando está húmedo, por otro lado, es frágil, y de ahí su nombre; un terrón tiende a la ruptura súbita cuando se aplica una presión, más que a sufrir una deformación lenta. Un fragmento seco sufre colapso o se fractura cuando se coloca en agua.

La importancia del fragipán radica en dos aspectos: el primero consiste en que, en el caso estudiado, se forma a partir de materiales de origen volcánico, que sufren procesos diagenéticos y pedogenéticos muy específicos; el segundo es que limita la penetración de las raíces, reduce el paso del agua al subsuelo y provoca el drenaje lateral, que conlleva la pérdida de componentes minerales del suelo y la erosión del mismo (USDA, 1988). En México, coloquialmente se le denomina con el término genérico "tepetate", el cual involucra materiales de origen ígneo, epiclástico o piroclástico, compactos o cementados. Aproximadamente del 20 al 30% de la superficie de la República Mexicana presenta capas que fueron compactadas o cementadas (S.P.P., 1981).

*Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 D.F.

En esta investigación, se planteó la hipótesis de que el fragipán estudiado se haya formado a partir de materiales de origen ígneo. Los materiales que le dieron origen han sido esencialmente las cenizas, producto del vulcanismo intensivo que se presentó en la zona. La compactación es una consecuencia de la consolidación mecánica de las partículas y de una cementación débil. Dicha consolidación probablemente se debió al peso y a la expansión por congelamiento causados por periglaciares y, en menor proporción, probablemente, al efecto de contracción y expansión provocado por las arcillas. La formación de los suelos se inició a partir de las tobas preexistentes; posteriormente vino la compactación—constituyéndose el fragipán—y nuevos aportes de piroclastos, además de eventos erosivos severos que provocaron la pérdida parcial o total del *solum*. En la actualidad, los suelos continúan su desarrollo a partir del fragipán.

Los objetivos de este estudio fueron: 1—determinar las principales propiedades morfométricas, físicas, hidrológicas, químicas, petrográficas y mineralógicas de los suelos y los horizontes compactados; 2—generar información sobre la génesis del fragipán y de los suelos; 3—contribuir al conocimiento del fragipán.

El aporte de esta investigación consiste en establecer, para México, la presencia de horizontes volcánicos compactados y alterados por procesos diagenéticos y pedogenéticos, que son diagnosticados, según el USDA (1988), como fragipán. Se incluye, además, sus principales propiedades diagnósticas y se plantea un diseño metodológico.

CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área fue seleccionada con base en la variedad de fragipán que existe en la parte septentrional del Estado de Morelos, detectada por técnicas indirectas de teledetección y verificada por técnicas directas de campo. La parte nororiental, que abarca esta investigación, comprende sólo un grupo de tal variedad.

Dicha área está ubicada en el flanco meridional del Eje Neovolcánico, en el noreste del Estado de Morelos. Está comprendida entre los 18°47'30"—18°52'30"N y los 98°45'00"—98°57'30"W, a una altitud de 1,400 a 1,700 m s.n.m.m. (Figura 1). Estratigráfica- y litológicamente, está representada por lahares de la Formación Tlayecac del Terciario, cubiertos por depósitos piroclásticos de material volcánico del Pleistoceno (Fries, 1966). El clima, con base en Köppen, modificado por García (1981), es (A)Ca(w1)(w)(i)gw", semicálido y subhúmedo, el más cálido de los templados, con 1,061 mm de precipitación total anual y 20°C de temperatura media anual, para los perfiles 1 y 2. Para el perfil 3, A(C)w1(w)igw", semicálido y subhúmedo, el más fresco de los cálidos, con 934 mm de precipitación total anual y 21°C de temperatura media anual.

Los suelos son producto de la alteración del fragipán en condiciones de clima con lluvias estacionales y un régimen de humedad ústico. El proceso pedogenético dominante es pardificación (mecanización). Su clasificación taxonómica, con base en la FAO (1988), corresponde a las unidades Cambisol Eútrico y Phaeozem Háplico; de acuerdo con el USDA (1988), al Gran Grupo Ustochrepts. El uso actual de los mismos corresponde a pastizal con pastoreo intensivo (perfiles 1 y 2) y agricultura de temporal (perfil 3).

METODOLOGÍA

Con el fin de ubicar los sitios de muestreo y con base en el análisis de la actividad volcánica, de las unidades terrestres, la geomorfología, las facetas, el clima, la vegetación, la actividad

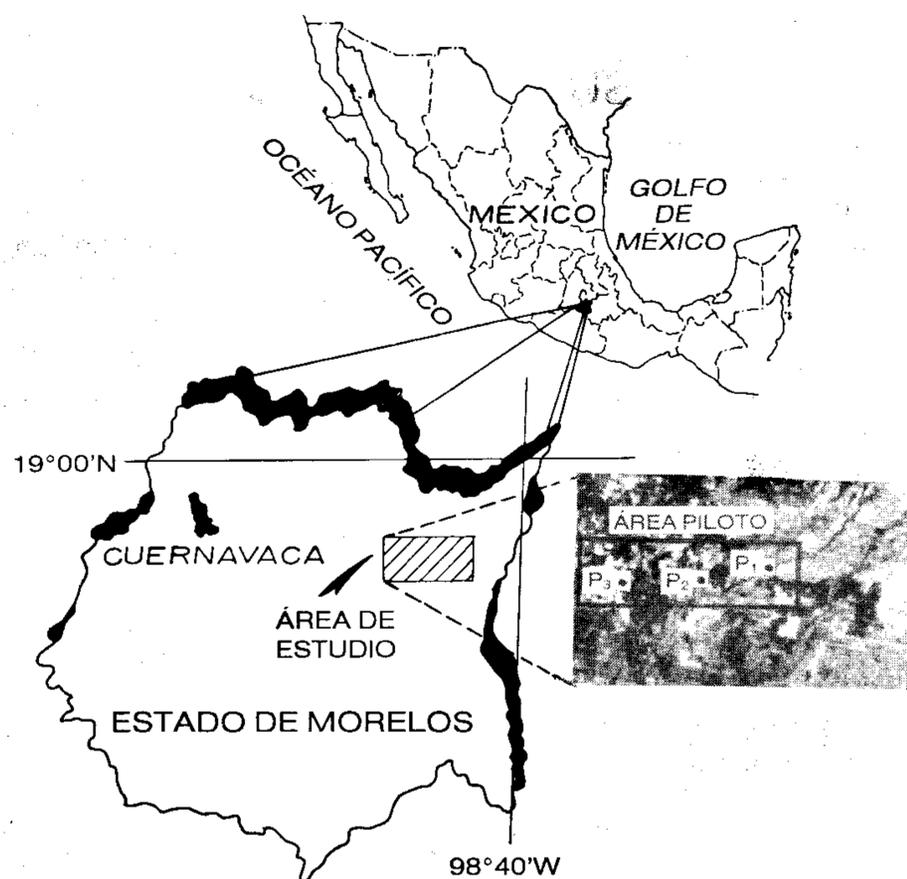


Figura 1.- Mapa de localización del área de estudio e imagen LANDSAT de la misma.

humana y la fotointerpretación, según la metodología propuesta por el ITC (Van Zuidam, 1979), se estudió una imagen LANDSAT infrarroja en falso color, de escala 1:250,000, y fotografías aéreas verticales en blanco y negro, de escala 1:30,000; además, se reunió el material cartográfico de apoyo y fueron efectuados reconocimientos sobre el terreno. Finalmente, se seleccionó un área piloto en la que fueron analizados varios perfiles de suelos, siendo elegidos los tres más representativos.

Considerando que no existe una metodología totalmente definida y que no hay un procedimiento de laboratorio conocido para identificar a un fragipán (USDA, 1988), se recurrió a una selección de métodos y técnicas específicas para la caracterización de materiales volcánicos afines. Las determinaciones de color, textura, estructura, consistencia, película de arcilla y separación de horizontes, utilizadas para la clasificación morfológica de campo, fueron hechas con base en el Soil Survey Staff (1984).

Mediante el sistema de clasificación morfológica de campo (Bilzi y Ciolkosz, 1977), se determinó: 1—el desarrollo relativo de horizontes, por comparación de dos horizontes adyacentes; y 2—el desarrollo relativo del perfil, por comparación de cada horizonte con el fragipán de cada perfil. Los pretratamientos para eliminar agregantes y estudiar los granos minerales, tal como fueron sedimentados, estuvieron basados en Kunse (1965). La distribución del tamaño de partículas, que permitió conocer las proporciones granulométricas, se realizó por el método de Day (1965). Para poder explicar el modo y el medio de transporte de las partículas, se estudió la esfericidad y redondez de las mismas, con la escala de Powers (1953). Con base en Johnson y colaboradores (1960), se caracterizó el espacio poroso, considerando la abundancia, el diámetro de poro, la continuidad, la distribución y la morfología; el estudio se hizo en varios *peds* representativos de cada horizonte, examinados en un microscopio binocular a x45 y x80.

Las densidades aparente y real, así como el porcentaje del espacio poroso total, determinaciones diagnósticas importantes para el fragipán, fueron realizadas con base en el Soil Survey Staff (1984). La resistencia a la compresión no confinada, que permitió medir la resistencia al corte de estos materiales, se determinó en

núcleos labrados, sujetos a un esfuerzo creciente en un marco de carga; las pruebas de límite líquido, de límite plástico y de consistencia relativa fueron hechas de acuerdo con Head (1984).

Para determinar la estabilidad del fragipán dentro del agua, se utilizó fragmentos del tamaño de un puño (USDA, 1988), mismos que fueron depositados independientemente en un litro de agua destilada de pH=7 y a 21 °C. Con base en Buol (comunicación escrita, 25-VI-1992), las muestras, además, fueron sometidas a tratamientos alternos con HCl 1N y KOH concentrado, para evaluar su estabilidad. Con el fin de conocer las respuestas del suelo y del fragipán a otras pruebas hidráulicas, se determinó en el campo la infiltración y la conductividad hidráulica. Los valores de la primera fueron obtenidos por la técnica de los cilindros concéntricos y calculados con la ecuación de Kostyakow (1932). Los de la segunda fueron obtenidos con base en la técnica de la barrena (Boersma, 1965).

La meteorización de los suelos con fragipán fue estudiada mediante el análisis químico total expresado en óxidos (Jackson, 1970). Para establecer las pérdidas o ganancias de óxidos totales entre la roca basal y los horizontes meteorizados, se aplicó la constante de aluminio (Krauskopf, 1979). La determinación de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ libres, que indica el nivel de alteración de un suelo y su participación en la cementación, se basó en Hashimoto y Jackson (1960). Para efectuar el análisis del cementante, las muestras fueron observadas en un microscopio electrónico de barrido JEOL, JSM-35C, y los análisis químicos fueron efectuados con un equipo de energía dispersiva de rayos X, marca Tracor, adaptado al microscopio electrónico; la preparación de las muestras consistió en hacer láminas delgadas pulidas, posteriormente cubiertas con una capa de oro ionizado.

Los cationes intercambiables, la materia orgánica, el pH y la capacidad de intercambio catiónico total fueron determinados con base en el Soil Survey Staff (1984). El aluminio intercambiable se cuantificó por el método de Coleman y colaboradores (1959) y Pratt y Bair (1961). El valor delta, que es usado para la determinación cuantitativa del contenido de alófono en suelos, se determinó con base en Aomine y Jackson (1959).

El estudio petrográfico se realizó en láminas delgadas examinadas en el microscopio petrográfico con aumentos hasta de x125. Para los análisis mineralógicos por difracción de rayos X, se usó un generador Philips PW 1130/96, con radiación de cobre K α , monocromador de grafito, filtro de vanadio y condiciones de excitación de 30 kV y 20 mA. No se aplicó pretratamientos, para eliminar agregantes, a las muestras de arena y limo totales del fragipán y de la arcilla, de todos los horizontes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

TELEDETECCIÓN

El análisis y la interpretación de las imágenes LANDSAT 3 y de fotografías aéreas permitieron establecer patrones espectrales muy diagnósticos para las capas cementadas (duripán) o compactas (fragipán) que afloran en el área. Los límites de la distribución espacial de ambos materiales resultaron evidentes, tanto en la imagen en falso color como en las bandas MSS6 y MSS7. La confrontación entre la verdad de campo y su imagen espectral mostró que puede deducirse, en esta zona, la presencia del fragipán a través de esta técnica, con una confianza porcentual mayor que 85.

CLASIFICACIÓN MORFOLÓGICA DE CAMPO

En la Tabla 1, se expone las propiedades morfológicas de los suelos estudiados y en la Tabla 2 la clasificación morfológica para estimar el desarrollo relativo de horizontes (DRH) y el

desarrollo relativo del perfil (DRP). Tales desarrollos fueron usados como una medida cualitativa para estimar los cambios morfológicos que han tenido lugar entre los horizontes, y entre éstos y el material parental.

En el DRH del perfil 1, el valor que resulta de la comparación de los horizontes A/AC fue debido al color, a la estructura y a la consistencia; en el límite AC/Cx, se debió a diferencias en la separación de horizontes, en el color y en la estructura.

En el perfil 2, el valor del límite A/BC se debió al color, a la textura, a la consistencia y a las películas de arcilla; entre los horizontes BC/C, fue por el color, la consistencia y las películas de arcilla; en C/Cx, se debió al color y a la estructura.

En el perfil 3, el color, la estructura y la consistencia fueron las características diagnósticas que más influyeron en la evaluación de los horizontes A/C y C/Cx.

En el DRP, los valores altos fueron alcanzados en los horizontes A, ya que los suelos tienen procesos de pardificación y contrastan los horizontes superficiales con los están debajo.

Según Meixner y Singer (1981), los suelos jóvenes, no diferenciados, alcanzan valores de DRH menores que 10; y los viejos, bien diferenciados, mayores que 10. En este estudio, dominaron los valores de 13, tres abajo de éste y sólo uno de más valor, lo que indica que son suelos con muy poco desarrollo.

PROPIEDADES DIAGNÓSTICAS PRINCIPALES

Propiedades físicas

Distribución del tamaño de las partículas. En la Tabla 3, se presenta los resultados del análisis granulométrico en los perfiles estudiados. Los contenidos de arcilla en el perfil 1 aumentaron en el fragipán; en el perfil 3, en el horizonte C; y en el perfil 2, en los cuatro horizontes presentaron muy poca variación. En los perfiles 1 y 3, se manifiesta una migración de arcilla ligera. El perfil 2, con homogeneidad en el contenido de arcilla, sugiere un origen ígneo y no por procesos edáficos. El contenido de arcilla del fragipán de los tres perfiles, de bajo a medio, está en el intervalo reconocido para fragipán (USDA, 1988). El limo total fue diferente en todos los perfiles, pero no mayor que 38%. La suma del limo total y la arena muy fina dio porcentajes de 41 a 52, 18 a 30 y 35 a 39 en los perfiles 1, 2 y 3, respectivamente. La arena total representó porcentualmente más de 50 en los perfiles 2 y 3. Las fracciones de arena muy fina y arena fina constituyeron la mayor parte de la arena total en los tres perfiles.

Esfericidad y redondez de las partículas minerales. Se determinó en limo y arena muy fina, ya que son las fracciones que se originan directamente de los minerales primarios que constituyen el material parental. Todas las partículas manifestaron esfericidad baja. En relación con la redondez, en la Tabla 3 se presenta los valores y porcentajes obtenidos en los horizontes de los perfiles estudiados. Los valores que dominaron fueron, para el perfil 1, subangular, y en los perfiles restantes, angular. La variación mayor en la redondez se presentó en el perfil 2, con cinco valores; y la menor, en el perfil 3, con tres valores. Cuando se analizó las partículas en el microscopio, tal como fueron recolectadas en el campo, éstas mostraron valores altos de esfericidad y redondez, lo cual implica precipitación y agregación más que abrasión. Una vez aplicados los pretratamientos y eliminados los agregantes, fueron observados muy cercanamente a la forma en que se depositaron, con poca o ninguna abrasión. Considerando que la esfericidad y la redondez de los granos dependen del medio y del modo de transporte, para este estudio, y con base en la evidencia que representa la mayor proporción de partículas con esfericidad baja y redondez angular y subangu-

Tabla 1.- Propiedades morfológicas.

Perfil	Horizonte	Color ^a	Textura ^b	Estructura	Consistencia ^a	Películas de arcilla	Separación
P-1	A	7.5YR4/2	C	ba, f, mo	bl	—	clara
		10YR3/4			fr		
	AC	10YR6/1	C	p, f, fu	d	—	abrupta
		10YR4/2			fm		
	Cx	10YR7/1	Ma	m	md	—	
		10YR5/2			fm		
P-2	A	10YR7/4	Am	bsa, f, fu	ld	—	gradual
		10YR5/8			fr		
	BC	10YR6/4	C	ba, f, fu	d	l, mg, h	gradual
		10YR4/4			fr		
	Cr	10YR4/3	C	ba, f, fu	md	—	gradual
		10YR3/2			fm		
	Cx	10YR4/4	Ma	m	md	—	
		10YR3/3			d		
P-3	A	7.5YR4/2	C	bsa, f, mo	bl	—	clara
		7.5YR3/2			fr		
	Cr	10YR5/4	C	ba, f, fu	ld	—	gradual
		7.5YR3/2			fr		
	Cx	10YR6/4	Ma	m	md	—	
		10YR4/3			fm		

^a En primer término aparece la determinación en seco, en segundo en húmedo.

^b Se determinó sin eliminar agregantes.

C—Textura franca; Ma—migajón arenoso; Am—arena migajosa; ba—bloques angulares; f—fina; mo—moderada; p—prismática; fu—fuerte; m—masiva; bsa—bloques subangulares; bl—blanda; ld—ligeramente dura; d—dura; md—muy dura; fr—friable; fm—firme; l—zonales; dg—delgadas; h—horizontal; mg—moderadamente gruesa; v—vertical.

lar, estos materiales deben su forma a su depósito *in situ* (tefra), a cierto transporte eólico, aluvial o coluvial, y a procesos de alteración moderados.

Caracterización del espacio poroso. El estudio de los poros permitió conocer los niveles de iluviación y el grado de obstruc-

Tabla 2.- Clasificación morfológica.

Perfil	Horizonte	DRH	Horizonte	DRP
P-1	A/AC	13	A/Cx	22
	AC/Cx	13	AC/Cx	13
P-2	A/BC	13	A/Cx	25
	BC/Cr	10	BC/Cx	17
	Cr/Cx	12	Cr/Cx	12
P-3	A/Cr	9	A/Cx	22
	Cr/Cx	16	Cr/Cx	16

DRH = desarrollo relativo de horizontes.

ción de los mismos en el suelo y en el fragipán. En todos los horizontes que yacen sobre el fragipán, dicho espacio poroso manifestó las mismas características: muchos poros, más de 200 por dm^2 ; diámetro dominante muy fino, de 0.075 a 1 mm; distribución imped; morfología intersticial; continuos y abiertos. Las características comunes en el fragipán fueron: pocos poros, de 1 a 50 por dm^2 ; diámetro de microporo, inferior a 0.075 mm; discontinuos y cerrados parcialmente. Lo anterior se explica por el grado de compactación que presenta, situación que conlleva a una reducción del espacio poroso. Por otra parte, cuando se estudió el espacio poroso, se constató la ausencia de raíces en el fragipán.

Densidad aparente, densidad real y porosidad total. Para la densidad aparente, se observa (Tabla 3) en los tres perfiles un incremento a medida que se profundiza, siendo los valores más altos alcanzados en el fragipán. En la densidad real no existe una tendencia definida en los resultados. En el perfil 1, se incrementa en el horizonte intermedio en relación con el superficial y decrece en el fragipán. En el perfil 2, se manifiesta una clara disminución a medida que se profundiza. En el perfil 3, el valor del horizonte intermedio decrece en relación con el superficial y se incrementa

Tabla 3.- Propiedades físicas principales.

P.	H.	Prof. [cm.]	Distribución del tamaño de partícula* [mm]									Valores de redondez en limo y arena muy fina [%]					Densidades y Porosidad total			
			Arena						Limo		Arcilla	MA	A	SA	SR	R	DA	DR	PT	
			2-1	1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.1	0.1-0.05	Tot.	0.05-0.02	0.02-0.002	<0.002									
1	A	0-20	2	5	5	16	14	42	11	27	38	20	10	60	30			1.17	2.02	43
	AC	20-30	1	7	5	19	14	46	8	19	27	27			80	20		1.56	2.20	30
	Cx	30-50	1	5	5	15	11	37	10	23	33	30	10	55	35			1.70	2.13	21
2	A	0-12	1	5	9	21	16	52	4	10	14	34	5	50	45			1.21	2.48	52
	BC	12-30	2	13	11	16	10	52	4	10	14	34			10	70	20	1.56	2.47	37
	Cr	30-43	4	13	11	18	14	60	2	2	4	36	10	65	25			1.87	2.22	16
3	Cx	43-60	8	15	10	19	14	66	1	3	4	30	10	55	35			1.90	2.22	15
	A	0-10	3	17	12	19	12	63	5	18	23	14	5	65	30			1.16	2.29	50
	Cr	10-19	1	5	10	23	18	57	6	15	21	22	10	60	30			1.51	2.00	25
	Cx	19-50	4	19	10	16	11	60	8	20	28	12	10	50	40			1.96	2.24	13

* Esta determinación se hizo después de aplicar los pretratamientos para eliminar agregantes.

P—Perfil; H—Horizontes; MA—Muy angular; A—Angular; SA—Subangular; SR—Subredondeado; R—Redondeado; DA—Densidad Aparente; DR—Densidad Real.

en el fragipán. En general, la porosidad total disminuye con la profundidad. Los valores más bajos de porosidad fueron obtenidos en el fragipán, lo cual coincide con los valores más altos de densidad aparente en éste.

Resistencia a la compresión no confinada. La resistencia del fragipán al corte fue diferente en los tres perfiles (Figura 2), aunque aquéllas de los perfiles 1 y 2 fueron muy semejantes: 4.5

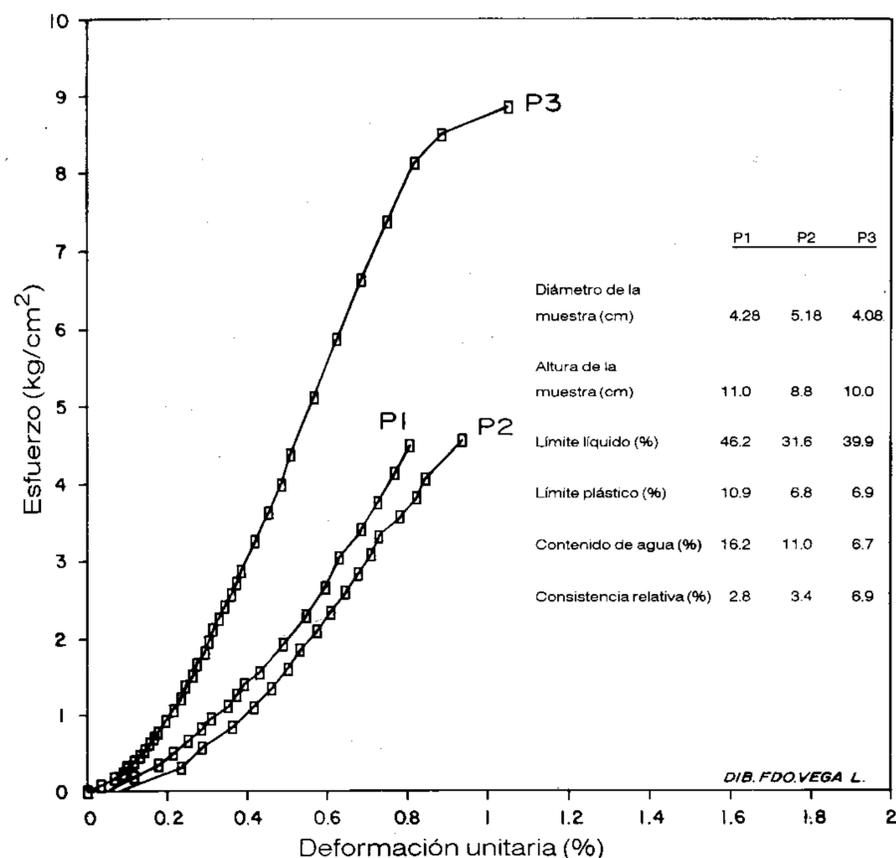


Figura 2.- Resistencia a compresión inconfiada y otras determinaciones físicas en el fragipán de los perfiles estudiados.

kg/cm². La fractura en el fragipán del perfil 3 ocurrió con un esfuerzo de 8.8 kg/cm². Tal intervalo de valores de resistencia coincide con el consignado por Grossman y Cline (1957) quienes, con base en 34 terrones de fragipán, encontraron un intervalo de 4 a 25 kg/cm². Nimlos (1989) determinó la resistencia de bloques individuales de duripán, encontrando una variación de 3 a 160 kg/cm². Es probable que los valores bajos correspondieran a fragipán. El contenido de agua fue un factor que pudo haber influido en la prueba de resistencia, ya que el fragipán que necesitó un esfuerzo mayor, P3, tenía el contenido de humedad más bajo. Los valores de límite líquido, límite plástico y consistencia relativa señalan el dominio de las fracciones de arena y limo sobre la de arcilla.

Propiedades hidrológicas

Estabilidad de un fragmento de fragipán con tratamiento por inmersión en agua. Esta prueba dio los resultados siguientes: el fragipán del perfil 1 se fracturó a las 20 horas de sumersión. El correspondiente al perfil 2 no sufrió colapso ni se fracturó en dicho tiempo; sin embargo, fue factible desprender fragmentos pequeños con la presión simple de los dedos. El fragipán del perfil 3 no experimentó colapso ni se fracturó y no fue posible, en el mismo tiempo, desprender fracciones con la presión de los dedos. Lo anterior coincide con la prueba de resistencia al corte, donde este fragipán requirió de mayor esfuerzo para la fractura.

Estabilidad de un fragmento de fragipán con tratamiento alterno en HCl 1N y KOH concentrado. Debido a la presencia escasa de cementantes carbonatados en el fragipán, la respuesta de las muestras al tratamiento con HCl 1N fue similar a la obtenida cuando estos fragmentos fueron sumergidos en agua.

Por otra parte, la estabilidad de los fragmentos decreció notablemente en el tratamiento con KOH concentrado. A las dos horas, se observó fracturamiento, disgregación y colapso total. Esto,

probablemente, se debió a que la mayoría de los agentes cementantes silicatados sufrió una hidrólisis y una disolución muy intensas.

Esta prueba y la anterior confirman que los materiales estudiados no muestran las características diagnósticas del duripán o de productos petrocálcicos.

Infiltración y conductividad hidráulica. En las Figuras 3, 4 y 5 se presenta los valores de velocidad de infiltración, en cm/hr, y de infiltración acumulada, en cm, en el suelo y en el fragipán de los perfiles estudiados. En velocidad de infiltración, los valores observados en el suelo fueron más altos que aquéllos del fragipán. La infiltración inicial fue semejante para ambos en el perfil 1, manifestó cierta diferencia en el perfil 2 y presentó una variación fuerte en el perfil 3.

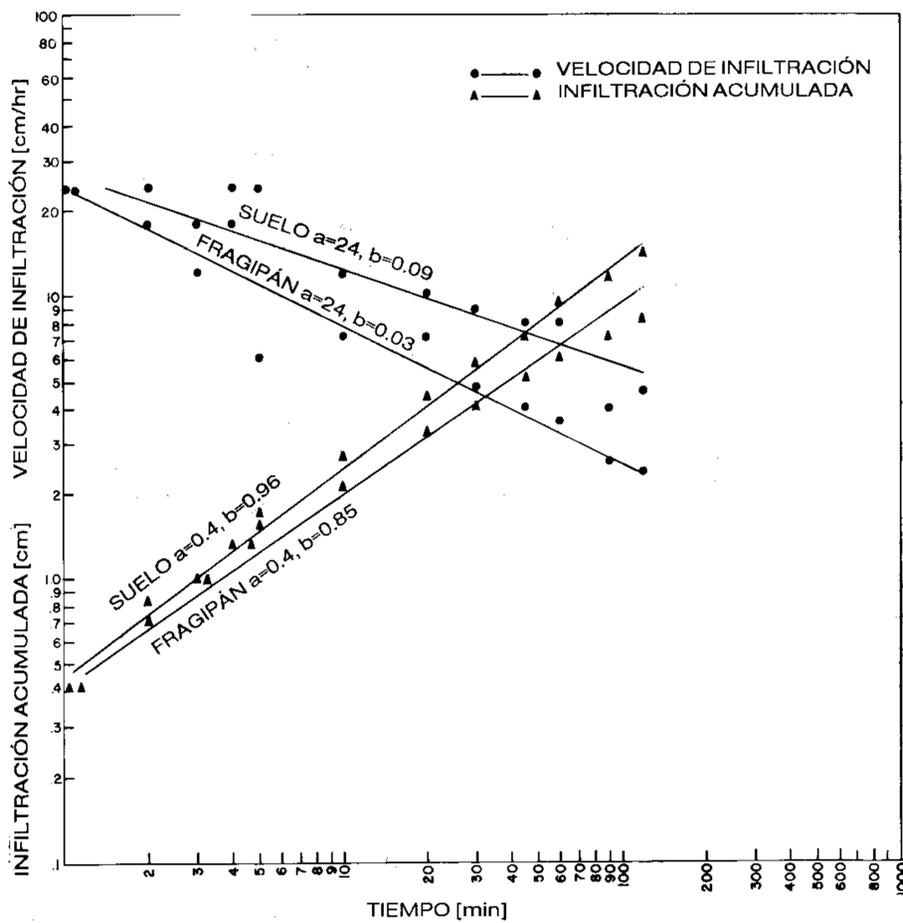


Figura 3.- Componentes de infiltración en suelo y fragipán del perfil 1.

La infiltración a través del tiempo se hizo lenta y se alcanzó los valores más bajos en el fragipán en los tres perfiles. La infiltración acumulada manifestó un comportamiento muy similar en los perfiles 1 y 2, observándose cierto paralelismo de los datos del suelo con los del fragipán, aun cuando siempre los del suelo fueron más altos. En el perfil 3, también se manifestó este paralelismo, aunque los valores mostraron una variación mayor.

La conductividad hidráulica, determinada en el campo, manifestó los siguientes valores: en el perfil 1 fue de 3.2 cm/hr en el suelo y 0.8 cm/hr en el fragipán; en el perfil 2 fue de 3.6 cm/hr y 1.7 cm/hr, respectivamente; en el perfil 3 fue de 2.3 cm/hr y 1.9 cm/hr, respectivamente. Como se observa, los datos altos fueron registrados en el suelo y los bajos en el fragipán. Con base en el U.S. Bureau of Plant Industry and Agricultural Engineering (1962), la conductividad hidráulica se clasifica como moderada en el suelo y moderadamente lenta en el fragipán.

Análisis químico

Pérdidas y ganancias de óxidos totales. En el perfil 1 (Tabla 4), puede observarse que, con excepción del Na₂O y H₂O-

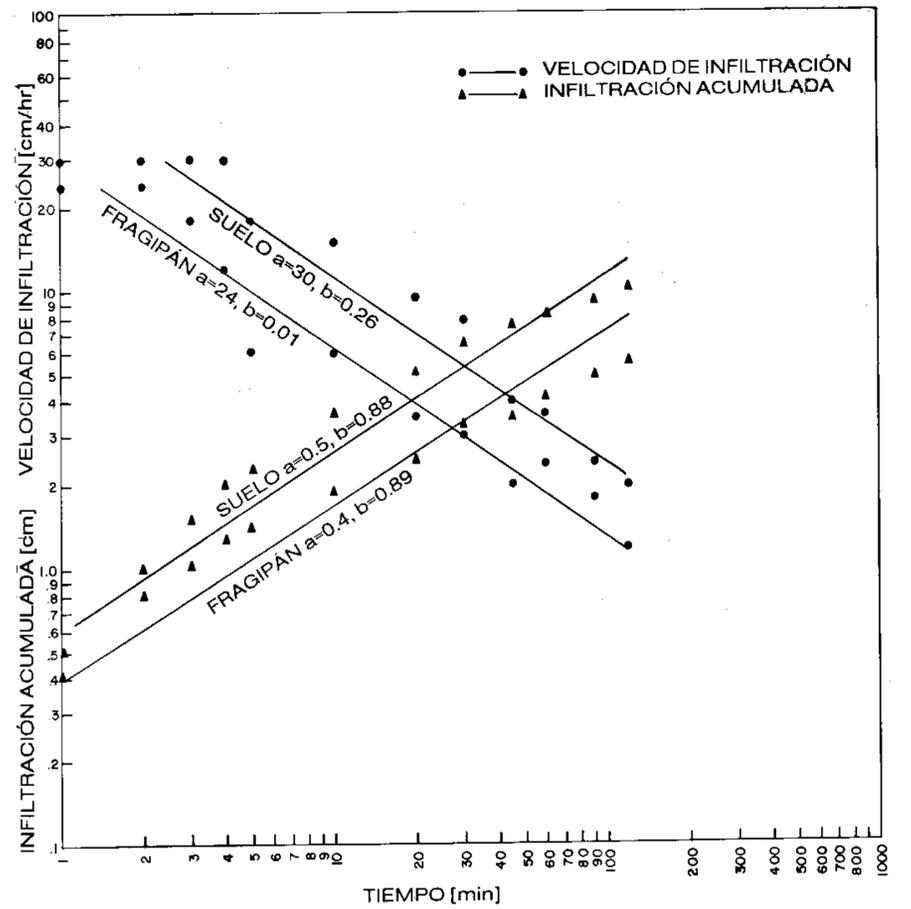


Figura 4.- Componentes de infiltración en suelo y fragipán del perfil 2.

todos los óxidos totales muestran pérdidas, tanto en los horizontes del C1 al Cx, como de aquél al A. La acumulación del Na₂O en los horizontes superficiales (ganancia) se explica por la abundancia de oligoclasa-andesina, minerales detectados en el estudio petrográfico (Tabla 5). Pacheco-López y Estrada-Berg (1987) afirman que el mineral predominante en los tepetates de la cuenca de México es la andesina. La ganancia de H₂O- en los mismos

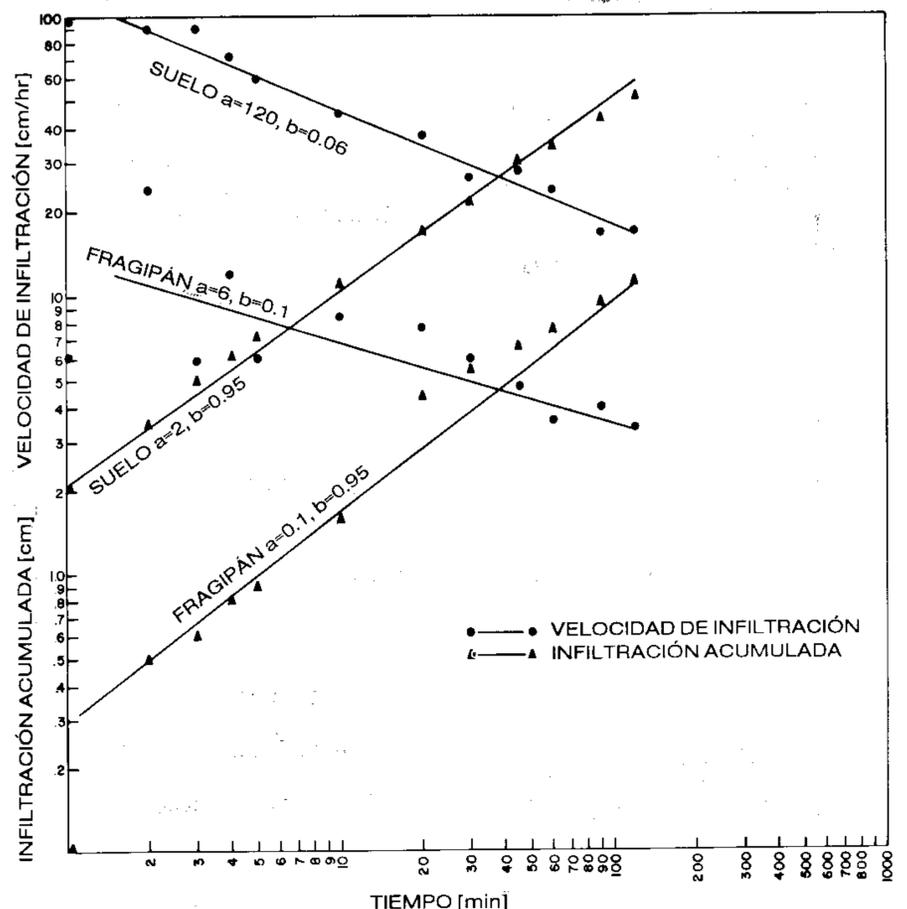


Figura 5.- Componentes de infiltración en suelo y fragipán del perfil 3.

Tabla 4.- Pérdidas o ganancias de los horizontes meteorizados en relación con la roca basal del perfil 1.

Óxidos totales	Horizontes			Cx • K* de Al ₂ O ₃	A • K de Al ₂ O ₃	Pérdidas o ganancias	
	C1	Cx	A			Cx	A
SiO ₂	58.22	55.39	56.16	40.09	46.01	-18.13	-12.21
TiO ₂	0.86	0.57	0.89	0.41	0.72	- 0.45	- 0.14
Al ₂ O ₃	10.93	15.10	13.34	10.93	10.93	0	0
Fe ₂ O ₃	8.25	10.30	8.37	7.45	6.85	- 0.8	- 1.4
Na ₂ O	1.45	3.24	4.11	2.34	3.36	+ 0.89	+ 1.91
K ₂ O	1.50	1.38	1.49	0.99	1.22	- 0.51	- 0.28
CaO	8.20	3.34	3.81	2.41	3.12	- 5.79	- 5.08
MgO	1.41	1.09	1.02	0.78	0.83	- 0.63	- 0.58
P ₂ O ₅	0.10	0.10	0.05	0.07	0.04	- 0.03	- 0.06
SO ₃	-	Tz	Tz				
H ₂ O+	5.92	4.81	5.08				
H ₂ O-	3.16	4.68	5.68	3.38	4.65	+ 0.22	+ 1.49
Total	100.00	100.00	100.00	68.85	77.73		

* La constante (K) de aluminio se obtiene de dividir el porcentaje de aluminio de la roca inalterada (C1) entre el porcentaje de aluminio de la roca alterada (Cx o A). Esta constante se multiplica por cada uno de los óxidos de los horizontes alterados.

Los resultados se comparan con la roca inalterada y por diferencia o adición se obtienen las pérdidas o ganancias.

horizontes es resultado de un incremento en arcillas microcristalinas (Tabla 3). Asimismo, esta ganancia también fue debida a la presencia de sílice opalina producto de la alteración del vidrio volcánico.

La pérdida de los óxidos restantes, en los horizontes Cx y A del perfil 1, es congruente con las condiciones de alteración moderada que limita la liberación de cationes y óxidos libres (Duchaufour, 1984), situación que conlleva, en el caso de la sílice, a su precipitación como cementante en el Cx y, en general, a su pérdida por drenaje.

Para el perfil 2 (Tabla 6), las pérdidas o ganancias fueron estimadas en los horizontes Cx, BC y A, en relación con la roca basal. En los tres horizontes hubo ganancias en SiO₂, Na₂O y H₂O-; en el A, además, en K₂O; mientras que en los óxidos restantes hubo pérdidas.

El incremento en SiO₂ y K₂O se debe a su liberación por la alteración de feldespatos a arcillas de neoformación, o bien, en el caso del SiO₂, a la alteración de fitolitos, observados en el estudio petrográfico (Tabla 5). La ganancia del Na₂O tiene la misma explicación que en el perfil 1, es decir, la presencia abundante de plagioclasas con diferentes feldespatos sódicos. Asimismo, la ganancia de H₂O- se explica, de la misma manera, por la presencia de las arcillas y la sílice opalina. Las pérdidas de los óxidos restantes son debidas, de modo similar, a lo argumentado para el perfil 1.

En el perfil 3 (Tabla 7), las pérdidas o ganancias fueron calculadas en función de los horizontes Cx y A en relación con la roca basal. En ambos horizontes, sólo hubo ganancia en Na₂O, como en los perfiles anteriores, aspecto que conlleva a un mismo origen ígneo extrusivo.

Relaciones moleculares. Como se muestra en la Tabla 8, las relaciones moleculares son altas, típicas de suelos o materiales poco alterados. El índice de Reiche confirma claramente los niveles moderados de alteración y, en general, de poca evolución de estos suelos.

Los porcentajes de SiO₂ total observados en las muestras de fragipán estudiadas varían de 46.51 a 52.63, lo cual contrasta significativamente con aquéllos reportados por Goudie (1973), quien señala para duripanes de Sudáfrica y Australia promedios

Tabla 5.- Análisis mineralógico.

	H	PROF. [cm]	ANÁLISIS PETROGRÁFICO	DIFRACCIÓN POR RAYOS X	
			Fraciones arena y limo [%]	Fración arena y limo	Fración arcilla
1	A	0-20	BS30, OA20, Mi20, Px10, Ep5, Op5, Qz5, RE3		Kk, Mt, Mi, Am, Fd
	AC	20-30	Fe20, OA20, Op20, Mi10, RE10, GS10, Ep5		Kk, Mt, Mi, Am, Fd
	Cx	30-50	OA30, GS20, MA15, Px15, Op5, Mi5, BS5, Qz3	Fd, Mt, Kk, Mi, Am	Kk, Mt, Fd
2	A	0-12	Fe25, BS20, GS15, Px10, Ol10, RE10, Qz7		Kk, Mt, Mi, Am, Fd
	BC	12-30	Fe30, Px20, Ol15, OA15, BS10, Qz5, RE3		Mt, Kk, Mi, Am, Fd
	Cr	30-43	BS30, Fe20, Px15, Ol15, OA10, GS5, Qz4		Mt, Kk, Fd
	Cx	43-60	OA30, MA20, Px10, Ol10, BS10, Fe10, Qz9	Am, Fd, Kk, Mi, Mt	Mt, Kk, Fd
3	A	0-10	Fe20, BS25, OA20, Mi15, RE10, Qz7		Kk, Mt, Mi, Am, Fd
	Cr	10-19	OA30, Fe20, Ol20, Px10, Ol10, GS5, Qz3		Kk, Mt, Mi, Am, Fd
	Cx	19-50	OA30, Fe20, BS10, Ol10, MA10, Px10, Qz8	Fd, Kk, Mi, Mt	Kk, Mt, Mi, Am, Fd

BS—clastos de basalto; OA—plagioclasa: oligoclasa-andesina; Mi—mica; Ep—epidota; Op—minerales opacos; Fe—óxidos de hierro; RE—fitolitos, ópalo; GS—clastos de vidrio; MA—agregados microcristalinos; Px—píroxenos; Ol—olivino; Qz—cuarzo; Kk—caolinita; Mt—montmorillonita; Am—anfíbol; FD—feldespato.

Tabla 6.- Pérdidas o ganancias de los horizontes meteorizados en relación con la roca basal del perfil 2.

Óxidos totales	Horizontes				Cx • K* de Al ₂ O ₃	BC • K de Al ₂ O ₃	A • K de Al ₂ O ₃	Pérdidas o ganancias		
	C1	Cx	BC	A				Cx	BC	A
SiO ₂	48.12	51.55	49.72	49.73	51.45	50.96	58.46	+3.33	+2.84	+10.34
TiO ₂	1.44	0.42	0.49	0.58	0.41	0.50	0.68	-1.03	-0.94	- 0.76
Al ₂ O ₃	16.80	16.83	16.39	14.29	16.80	16.80	16.80	0	0	0
Fe ₂ O ₃	13.16	8.41	7.46	8.30	8.39	7.64	9.75	-4.77	-5.52	- 3.41
Na ₂ O	2.72	4.49	4.17	3.81	4.48	4.27	4.47	+1.76	+1.55	+ 1.75
K ₂ O	1.21	1.17	1.18	1.35	1.16	1.20	1.58	-0.05	-0.01	+ 0.37
CaO	8.04	3.67	1.32	3.18	3.66	1.35	3.73	-4.38	-6.69	- 4.31
MgO	2.29	1.33	0.82	1.62	1.32	0.84	1.90	-0.97	-1.45	- 0.39
P ₂ O ₅	0.58	0.44	-	-	0.43	-	-	-0.15		
SO ₃	-	-	Tz	Tz						
H ₂ O+	2.20	5.04	5.64	6.00						
H ₂ O-	3.44	6.65	12.81	11.14	6.63	13.13	13.09	+3.19	+0.32	+ 9.65
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	94.73	96.69	110.46			

de 93.75 y 95.63%, respectivamente; hace notar, además, que un contenido alto de SiO₂ total es típico de estos materiales.

Óxidos libres. Se ha sugerido que los óxidos libres (SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃) son agentes cementantes que constituyen la matriz del fragipán (Steinhardt *et al.*, 1982).

Asimismo, Steinhardt y colaboradores (*op. cit.*) han comprobado que el SiO₂ libre se incrementa en los horizontes de fragipán. Estos autores señalan que los contenidos de óxidos libres son directamente proporcionales a los contenidos de arcilla, y que ésta lleva adsorbidos a los sesquióxidos. Lo anterior es válido para el perfil 2, pero en el perfil 1 los contenidos de arcilla

Tabla 7.- Pérdidas o ganancias de los horizontes intemperizados en relación con la roca basal del perfil 3.

Óxidos totales	Horizontes			Cx • K de Al ₂ O ₃	A • K de Al ₂ O ₃	Pérdidas o ganancias	
	C1	Cx	A			Cx	A
SiO ₂	53.72	58.62	57.65	48.23	46.53	-5.49	-7.19
TiO ₂	1.35	0.37	0.49	0.30	0.39	-1.05	-0.96
Al ₂ O ₃	10.68	12.98	13.23	10.68	10.68	0	0
Fe ₂ O ₃	11.44	8.01	7.91	6.59	6.38	-4.85	-5.06
Na ₂ O	2.11	4.09	4.87	3.36	3.93	+1.25	+1.82
K ₂ O	1.40	1.28	1.30	1.05	1.04	-0.35	-0.36
CaO	7.57	4.59	4.43	3.77	3.57	-3.80	-4.00
MgO	1.53	1.66	1.41	1.36	1.13	-0.17	-0.40
P ₂ O ₅	0.30	0.28	-				
SO ₃	-	-	-				
H ₂ O+	4.58	3.23	3.00				
H ₂ O-	5.32	4.89	5.71	4.02	4.60	-1.3	-0.72
Total	100.00	100.00	100.00	79.36	78.25		

se incrementan en el fragipán (Tabla 3), el SiO₂ libre también se incrementa, aunque el aluminio y el hierro decrecen, debido a la moderada alteración que presenta (Tabla 8). En el perfil 3, los contenidos de arcilla aumentan en el horizonte intermedio y disminuyen en el fragipán, pero los óxidos libres se mantienen constantes en los tres horizontes (Tabla 8).

La suma de los porcentajes de óxidos libres y los contenidos de arcilla reflejan el grado de alteración (Duchaufour, 1984). Se observa que en el perfil 1, con la excepción del horizonte A, donde la proporción suma de óxidos:arcilla es de 35:20; en los horizontes restantes, el incremento de esta proporción es mínimo. En el perfil 2, la suma de materiales amorfos en el horizonte A es menor que el contenido de arcilla, pasa a ser mayor que éste en los horizontes intermedios y nuevamente es menor en el fragipán. La situación para el perfil 3 es diferente: el contenido de los óxidos es mayor que el de la arcilla en los horizontes A y Cx y disminuye por debajo de ésta en el horizonte intermedio. Esta condición de incremento limitado e incluso reducción de la suma de los óxidos libres, en relación con el contenido de arcilla, señala un nivel de evolución incipiente del suelo (Souchier, 1971). Por otra parte, los miliequivalentes bajos del valor delta (Tabla 9) descartan la presencia de alófono.

El orden de abundancia de los óxidos libres observado es el siguiente: SiO₂ > Al₂O₃ > Fe₂O₃, el que, según Chesworth (1977), corresponde a la etapa 2 de la secuencia de movilidad de los óxidos, que diagnostica la etapa temprana de meteorización y desarrollo de los suelos. Los valores en el fragipán fueron de 31.0, 6.0 y 0.14; 15, 10, 1.8 y 10.7; 7.2 y 1.1, en los perfiles 1, 2 y 3, respectivamente. El predominio de sílice amorfa es típico del proceso de sialitización. En su estudio sobre duripanes, en una parte de la cuenca de México, Cruz-Díaz y colaboradores (1990) encontraron también esta secuencia y reportaron relaciones moleculares de 17 a 47, lo cual consideran como una evolución escasa de estos materiales. Para este estudio, la relación SiO₂/Al₂O₃ libre varió de 5 a 10 en el perfil 1, de 2.8 a 4 en el perfil 2 y fue constante, 2.6, en el perfil 3, valores que ponen de manifiesto el desarrollo escaso de estos suelos. Asimismo, Cruz-Díaz y colaboradores (*op. cit.*) encontraron fluctuaciones en los contenidos de SiO₂, de 6.3 a 8.6%, y de Al₂O₃, de 0.19 a 0.83%.

Tabla 8.- Óxidos totales, óxidos libres y relaciones moleculares.

Perfil	1					2						3				
	A	AC	Cx	C1	C2	A	BC	Cr	Cx	C1	C2	A	Cr	Cx	C1	C2
Horiz.	0-20	20-30	30-50	80	150	0-12	12-30	30-43	43-60	90	160	0-10	10-19	19-50	80	150
Prof. [cm]																
SiO ₂	56.36	57.43	55.43	58.36	51.98	50.00	49.74	49.73	51.51	48.12	48.22	57.77	58.01	58.63	53.36	47.90
TiO ₂	0.89	0.37	0.57	0.86	1.39	0.58	0.49	0.40	0.42	1.44	1.41	0.49	0.70	0.37	1.35	1.41
Al ₂ O ₃	13.34	13.74	15.10	10.93	15.77	14.29	16.39	14.95	16.83	16.80	16.20	13.23	13.71	12.98	10.68	17.21
Fe ₂ O ₃	8.37	7.18	10.30	8.25	11.74	8.30	7.46	7.59	8.41	13.16	12.36	7.91	7.41	8.01	11.44	11.97
Na ₂ O	4.11	4.92	3.24	1.45	1.52	3.81	4.17	3.66	4.49	2.72	3.04	4.87	4.16	4.09	2.11	2.24
K ₂ O	1.49	1.32	1.38	1.50	1.24	1.35	1.18	1.12	1.17	1.21	1.64	1.30	1.43	1.28	1.40	1.17
CaO	3.81	5.24	3.34	8.20	5.68	3.18	1.32	3.20	3.67	8.04	7.55	4.43	2.94	4.59	7.57	7.90
MgO	1.02	0.79	1.09	1.41	1.06	1.62	0.82	0.91	1.33	2.29	4.25	1.41	1.00	1.66	1.53	4.33
P ₂ O ₅	0.05	0.25	0.10	0.10	Tz	-	-	0.05	0.44	0.58	0.68	-	-	0.28	0.30	0.33
SO ₃	Tz	-	Tz	-	-	Tz	Tz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ O+	5.08	4.66	4.81	5.92	4.04	6.00	5.64	6.58	5.04	2.20	2.00	3.00	3.08	3.23	4.58	3.59
H ₂ O-	5.68	4.38	4.68	3.16	5.78	11.14	12.81	12.05	6.65	3.44	1.97	5.71	7.79	4.89	5.32	1.94
Total	100.20	100.28	100.04	100.14	100.20	100.27	100.02	100.24	99.96	100.00	99.32	100.12	100.23	100.01	99.64	99.99
SiO ₂ libre	25.7	21.4	31.0			17.1	28.9	28.9	15.0			10.7	10.7	10.7		
Al ₂ O ₃ libre	8.4	7.2	6.0			11.1	13.9	12.7	10.0			7.2	7.0	7.2		
Fe ₂ O ₃ libre	0.93	0.21	0.14			2.86	3.36	3.22	1.79			1.14	1.72	1.14		
S/a	7.18	7.10	6.24	9.08	5.60	5.95	5.16	5.65	5.20	4.86	5.06	7.42	7.19	7.68	8.49	4.73
S/f	17.95	21.36	14.36	18.88	11.81	16.08	17.78	17.48	16.35	9.75	10.40	19.48	20.88	19.54	12.43	10.67
S/R ₂ O ₃	4.83	5.19	4.21	5.74	3.53	4.18	3.88	4.16	3.85	3.02	3.16	5.19	5.10	5.37	4.60	3.05
R.P.I.*	82.87	83.86	80.80	85.17	77.92	80.72	79.53	80.64	79.40	75.17	81.41	83.86	83.61	84.31	82.16	75.35

* Índice del Producto de Reiche

Tabla 9.- Propiedades químicas principales.

P	H	Prof. [cm]	Cationes intercambiables [meq/100g]				Saturación de bases	Al ³⁺ Inter. [meq/100g]	Materia orgánica [%]	pH H ₂ O 1:2.5	C.I.C.T. [meq/100g]	Valor delta [meq/100g]
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺						
1	A	0-20	15	9	0.70	0.30	100	0.06	3.40	6.50	23	10.80
	AC	20-30	16	11	0.30	0.30	100	Tz	1.20	6.80	20	12.30
	Cx	30-50	19	11	0.90	0.30	100	0.06	0.10	6.40	27	11.80
2	A	0-12	10	8	1.70	0.30	82	Tz	3.70	6.80	25	13.90
	BC	12-30	10	9	1.40	0.60	71	0.06	3.30	6.90	30	5.20
	Cr	30-43	10	7	0.80	0.50	57	0.06	0.70	6.80	32	12.30
	Cx	43-60	11	10	0.30	0.70	64	0.06	0.10	6.90	35	10.30
3	A	0-10	16	7	1.00	0.30	81	Tz	2.60	6.50	30	13.30
	Cr	10-19	15	8	0.80	0.20	100	Tz	1.30	6.90	23	2.00
	Cx	19-50	10	8	1.10	0.20	100	0.03	0.80	7.10	19	9.20

En un estudio sobre tepetates de la Sierra Nevada de México, Miehllich y colaboradores (1980) también encontraron la secuencia $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3$, observada en el estudio presente, consignaron fluctuaciones de SiO_2 , desde 3.1 hasta 77%, y Al_2O_3 , de 1.4 a 40.2%, y consideraron que el material amorfo está en forma de gel cuando predomina la sílice. En esta investigación, el SiO_2 fluctuó de 10.7 a 31% y el Al_2O_3 de 6 a 13.9%.

Se considera que, con base en Duchaufour (1984), los porcentajes de sílice libre, relativamente altos, observados en los horizontes que yacen sobre el fragipán, sean formas de sílice lábiles o inestables, producto principalmente de la alteración de los materiales volcánicos. Las características de tales horizontes superficiales, como textura ligera, porosidad abundante, contenidos de materia orgánica altos y pH adecuado, de 6.4 a 7.1, que permiten su solubilidad (Duchaufour, *op. cit.*), favorecen su inestabilidad y movimiento; por el contrario, en el fragipán, con la reducción del espacio poroso, la conductividad hidráulica moderadamente lenta y otros factores desfavorables, además de la posición subyacente, la sílice proveniente de la parte superior, así como aquella derivada de la propia alteración de los minerales del fragipán, se ha acumulado a través del tiempo en algunos intersticios de dicho horizonte en forma de un gel amorfo con cierto nivel de consolidación, en el cual quedan incluidas las arcillas con los sesquióxidos adsorbidos (Figuras 6, 7 y 8).

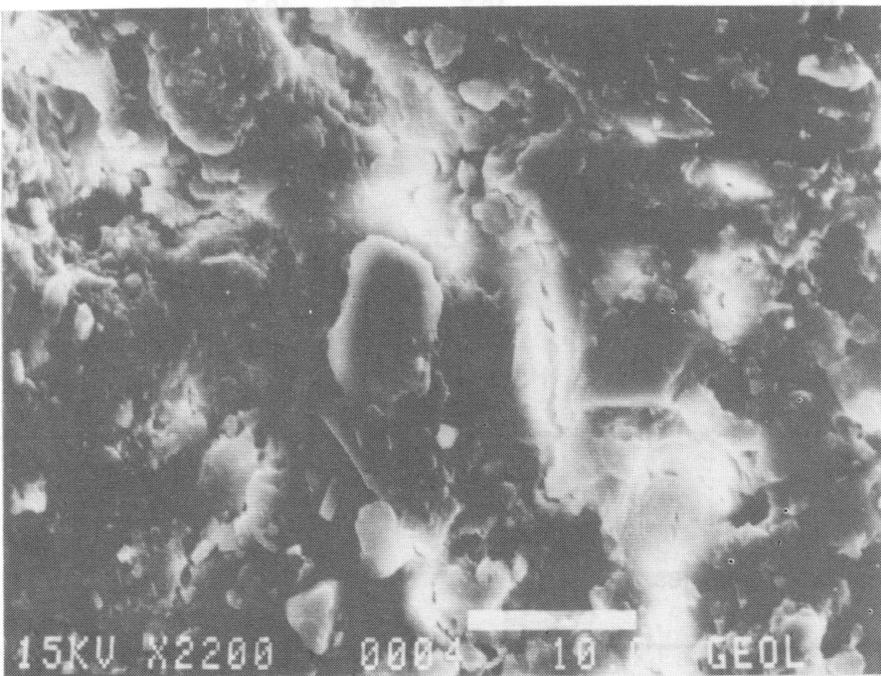


Figura 6.- Fotomicrografía del cementante del fragipán en el perfil 1.

Estas arcillas, al quedar cementadas, no se dispersan bien cuando se realiza el análisis granulométrico, por lo que se detecta porcentajes menores de la misma; sin embargo, la determinación de la capacidad de intercambio catiónico total da una información más cercana a la realidad (Klaus W. Flach, comunicación escrita, 24/VI/1990). Tal caso se presenta en el perfil 2, donde en el horizonte Cr, que tiene 36% de arcilla, se detectó 32 meq/100 g de C.I.C.T. y en el Cx, horizonte que yace bajo el anterior y que presenta cierto nivel de cementación, se determinó 30% de arcilla y 35 meq/100 g de C.I.C.T. (Tablas 3 y 9).

Microanálisis del cementante. En la Tabla 10, se presenta los componentes químicos de los cementantes en el fragipán de los perfiles estudiados. Asimismo, en las Figuras 6, 7 y 8, se ilustra las fotomicrografías de los cementantes en estas muestras de fragipán. En la tabla referida, se observa que los porcentajes de los óxidos totales de los cementantes de las tres muestras de fragipán son muy semejantes y que destaca el contenido alto de sílice y, en cierta forma, el de aluminio.

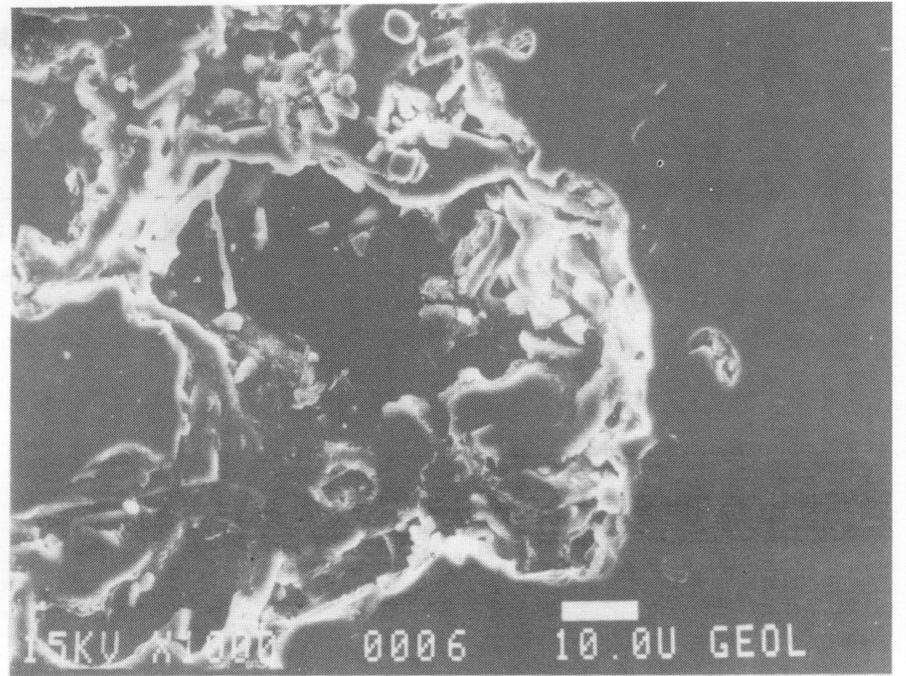


Figura 7.- Fotomicrografía del cementante del fragipán en el perfil 2.

Estos porcentajes de óxidos totales llevan a considerar que se trata de un material silíceo que pudiera llamarse semiópalo o protoópalo, en función de su porcentaje de SiO_2 . Asimismo, la relación molecular $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ muestra valores altos que indican poco desarrollo. Por otra parte, el contenido relativamente alto de aluminio en el cementante es debido a la presencia de arcillas y Al_2O_3 adsorbido en éstas.

En la Figura 6, se observa que el cementante cubre, en parte, las partículas minerales para constituir un solo cuerpo, el fragipán del perfil 1; en las Figuras 7 y 8, se observa que el cementante forma puentes que limitan a los poros intersticiales en el fragipán de los perfiles 2 y 3. Es necesario aclarar que esta condición es zonal, a diferencia del duripán, en el que la cementación tiende a ser homogénea.

Análisis petrográfico

Se realizó en los horizontes del *solum* y en el fragipán de cada perfil. En general, las fracciones de arena y limo de todos los horizontes de los perfiles estudiados están dominadas por materiales ligeros, como plagioclasa, vidrio volcánico, clastos de basalto, micas y fitolitos. Los minerales pesados están representados por epidota, piroxeno, olivino y minerales opacos (Ta-



Figura 8.- Fotomicrografía del cementante del fragipán en el perfil 3.

Tabla 10.- Microanálisis del material cementante en el fragipán de los perfiles estudiados.

Óxidos totales	Cx P1 [%]	Rel. Si/Al	Cx P2 [%]	Rel. Si/Al	Cx P3 [%]	Rel. Si/Al
SiO ₂	75.41	10.02	79.06	10.26	76.11	9.87
Al ₂ O ₃	12.72		13.02		13.02	
FeO*	7.91		5.99		5.58	
MgO	0.74		—		—	
CaO	1.64		0.70		3.87	
TiO ₂	1.59		1.14		0.84	
K ₂ O	—		0.09		0.58	

* Óxido de hierro total calculado como Fe₂O₃.

bla 8). La matriz arcillosa presenta un contenido $\leq 20\%$ de óxido de hierro.

La asociación de minerales anterior resulta característica para suelos derivados de material volcánico basáltico, alterado bajo condiciones de clima semicálido y subhúmedo. El olivino, el piroxeno y los minerales opacos presentes confirman su origen.

Petrográficamente, las muestras de fragipán estudiadas son similares en su naturaleza y composición a una toba.

Análisis mineralógico

En la Tabla 8, se presenta el resultado del análisis mineralógico por difracción de rayos X, tanto en las fracciones de limo y arena totales del fragipán como en la fracción de arcilla de todos los horizontes de los perfiles estudiados. Se observa en limo y arena totales del fragipán, al igual que en el análisis petrográfico, que los minerales dominantes son los feldespatos. En la fracción de arcilla dominan la caolinita y la montmorilonita.

Génesis de los minerales secundarios. En los minerales determinados en la fracción inferior a 0.002 mm, la caolinita es considerada como arcilla de neoformación. En los climas templados y subtropicales húmedos, como los presentes en el área de estudio, los feldespatos y las micas se alteran liberando rápidamente sus componentes en forma soluble o amorfa. Estos compuestos, sílice y alúmina, pueden reorganizarse, en ciertos casos, dando lugar a una arcilla como la caolinita (Souchier, 1971).

Por lo que toca a la montmorilonita, su origen puede estar en las arenas profundas, donde los feldespatos y las micas pueden sufrir, de forma precoz, una reorganización de su estructura en el interior de sus cristales, dentro de los cuales resulta la formación de filosilicatos del tipo de la sericita o la montmorilonita (Tardy, 1969; Hetier, 1975; Seddoh y Pedro, 1975). También, puede tener su origen en las arcillas micáceas que evolucionan en un medio lixivante —período lluvioso de seis meses en el área de estudio— por apertura de las capas que constituyen los minerales hacia vermiculita más o menos aluminica y, finalmente, hacia montmorilonita de degradación (Duchaufour, 1984).

La mica, el anfíbol y los feldespatos, determinados en la fracción fina, son productos de disgregación física de la roca basal, pero con dimensiones semejantes a las de la arcilla.

GÉNESIS DE LOS SUELOS Y EL FRAGIPÁN

La superficie del área de estudio está cubierta por tobas y depósitos clásticos de material volcánico del Pleistoceno (Fries, 1966). Estos últimos, con el paso del tiempo, han sufrido un proceso de consolidación y cementación ligera, debida a la pre-

sencia de la sílice, derivada tanto de la meteorización lenta y prolongada de feldespatos y minerales ferromagnesianos, como de la meteorización más rápida del vidrio volcánico y materiales amorfos (Flach *et al.*, 1969), hasta constituir una toba que yace bajo estos suelos. A partir de estas tobas, se inició la formación de los suelos, pedogénesis que ha sido interrumpida reiteradamente por el aporte sucesivo de piroclastos. Son varios los volcanes que influyeron con sus emisiones, pero el más importante ha sido el Popocatepetl, ya que en su flanco sudoccidental se localiza el área de estudio. Con base en Lugo-Hubp (1984), se estima que la edad de dicho volcán sea pliocénica y su actividad reconocida data desde 1347 hasta 1927, con 15 erupciones entre estos años.

Una vez formados los suelos, resulta factible plantear, hipotéticamente, la formación del fragipán como un resultado de la compactación producida por el peso de la nieve. Esto implica la presencia de un evento catastrófico como glaciación, lo que resulta factible para el área, ya que en el último período glacial, etapa tardía de la glaciación Wisconsiniana, estimada entre 11,000 y 25,000 años, fueron cubiertas de nieve las altas montañas de México, entre ellas el Ajusco, la Sierra Nevada y el volcán de La Malinche (Lugo-Hubp, *op. cit.*). Es la Sierra Nevada la que reviste interés, ya que parte de la misma la constituye el volcán Popocatepetl, que se infiere quedó cubierto por nieve en una extensión que comprendió al área de estudio.

No se descarta que, en algunos casos, la compactación sea afectada por los procesos de expansión y contracción de las arcillas, principalmente la montmorilonita, detectada en el análisis mineralógico. Estos procesos han sido considerados, según el USDA (1988), como una forma probable de compactación del fragipán.

Posteriormente a la compactación y una vez retirada la nieve, hubo efectos severos de erosión, tanto por la quema y destrucción de la vegetación debidas a nuevas eyecciones de piroclastos, como al exceso de agua provocado por los deshielos, así como la propia del régimen de lluvias que prevalecía en la zona. Los efectos de esta erosión severa se manifestaron en la pérdida de horizontes completos e incluso de todo el *solum* que motivó la exposición del fragipán (perfiles 1 y 2). Estos eventos erosivos pueden apreciarse en la actualidad. No obstante, los procesos de disgregación y alteración continúan, tanto a partir del fragipán con el *solum* que le cubre, como del fragipán expuesto.

Con base en las condiciones ambientales que prevalecen, la ausencia de un horizonte de iluviación, saturación de bases, pH, capacidad de intercambio catiónico total, Fe₂O₃ total, contenido de materia orgánica y tipos de arcilla que están presentes, estos suelos muestran un proceso de pardificación típico (Duchaufour, 1984). Se trata de suelos pardos débilmente lavados que carecen de un horizonte argílico.

Las muestras de fragipán estudiadas no resultan totalmente típicas, de acuerdo con lo establecido por el USDA (1988), debido a que no presentan blanqueado ni planos gruesos verticales (caras de poliedros o prismas gruesos). Por otra parte, el fragipán del perfil 3 no sufrió colapso ni se fracturó dentro del agua. Estos materiales fueron considerados como fragipán por las siguientes razones: (1) posición en relación con el suelo; (2) textura; (3) densidad aparente; (4) contenido de materia orgánica; (5) consistencia cuando seco; (6) fragilidad cuando húmedo (perfiles 1 y 2); (7) velocidad de infiltración; (8) conductividad hidráulica; y (9) ausencia de raíces.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos, se concluye lo siguiente:

· La teledetección permitió inferir la presencia de fragipán con una certidumbre alta.

- La clasificación morfológica de campo caracterizó a los suelos con poco desarrollo.

- Los contenidos de arcilla del fragipán están en el intervalo reconocido para estos horizontes. La mayor parte del limo total y la arena muy fina tienen esfericidad baja y redondez angular y subangular. Los grupos de arena muy fina y arena fina constituyeron la mayor parte de la arena total.

- Como una consecuencia de la compactación y cementación débil que presenta el fragipán, el espacio poroso se redujo y causó mayor resistencia al movimiento del agua.

- La densidad aparente se incrementa a mayor profundidad, hasta alcanzar los valores más altos en el fragipán. La porosidad total es inversamente proporcional a la densidad aparente.

- Solamente el fragipán del perfil 3 no sufrió colapso dentro del agua, aspecto que coincidió con la resistencia a compresión no confinada, donde este fragipán requirió un esfuerzo mayor para la fractura.

- Las pérdidas y ganancias de óxidos totales de los horizontes meteorizados, en relación con la roca basal, manifestaron condiciones de alteración moderada; lo cual se confirma con las relaciones moleculares resultantes y la presencia de trazas de Al^{3+} intercambiable.

- El incremento limitado e incluso reducción de la suma de óxidos libres en relación con los contenidos de arcilla, señalan el bajo nivel de evolución del suelo.

- Las muestras de fragipán estudiadas presentan una cementación débil, zonal; el cementante es un material silíceo.

- Petrográficamente, las muestras de fragipán estudiadas son similares en su naturaleza y composición a una toba.

- Los minerales secundarios dominantes, producto de la alteración de materiales volcánicos bajo condiciones de clima semicálido y subhúmedo, son caolinita y montmorilonita.

- Los suelos se originaron a partir de tobas. La compactación del suelo, hipotéticamente, fue causada por el peso de la nieve en un período de glaciación.

- Cuando se retiró la nieve, eventos erosivos severos causaron la pérdida de horizontes completos e incluso de todo el *solum*. Desde esa época hasta la actualidad, los procesos de disgregación y alteración continúan a partir del fragipán.

- El diseño metodológico empleado permitió alcanzar satisfactoriamente los objetivos planteados.

AGRADECIMIENTOS

Del Departamento de Geoquímica del Instituto de Geología de la U.N.A.M., se agradece al Quím. Rufino Lozano-Santa Cruz las facilidades otorgadas en la elaboración de las láminas delgadas y el asesoramiento brindado; al M. en C. Raúl Rubínovich-Kogan, el estudio petrográfico; a la Quím. Patricia E. Altuzar-Coello, la determinación mineralógica por difracción de rayos X; y a la M. en C. Margarita Reyes-Salas, el microanálisis del cementante.

Del Departamento de Geología Regional del mismo instituto, se agradece al M. en C. Víctor Manuel Dávila-Alcocer sus atinadas orientaciones.

Se agradece también al personal del Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M., en particular al Dr. Rigoberto Rivera-Constantino, las pruebas de resistencia a compresión no confinada.

Asimismo, por la revisión crítica del manuscrito y sus atinadas sugerencias a través de comunicaciones escritas y verbales, los autores hacen patente su agradecimiento a las siguientes

personas: Dr. S.W. Buol, de la Universidad Estatal de Carolina del Norte, E.U.A.; Dr. Klaus W. Flach, de la Universidad Estatal de Colorado, E.U.A.; Dr. G.M. Higgins, Director de la División de Desarrollo de Tierra y Agua de la FAO; Dr. Antonio Guerra-Delgado, de la Universidad Autónoma de Madrid, España; y Dr. Liberto De Pablo-Galán y Dr. Víctor Manuel Malpica-Cruz, del Instituto de Geología de la U.N.A.M.

De la misma manera, se agradece al Ing. Arturo Gómez-Caballero, del Instituto de Geología de la U.N.A.M., la corrección de estilo al manuscrito.

Del Departamento de Edafología del Instituto de Geología de la U.N.A.M., se agradece al Sr. Pedro Avilés-Jaimes, al Biól. Daniel Hernández-Santiago y a la Srta. Carmen Galindo-Velasco, su colaboración en diferentes aspectos del trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aomine, S., y Jackson, M.L., 1959, Allophane determination in ando soils by cation-exchange capacity delta value: Soil Science Society of America Proceedings, v. 23, p. 210-214.
- Bilzi, A.F., y Ciolkosz, E.J., 1977, A field morphology rating scale for evaluating pedological development: Soil Science, v. 124, p. 45-49.
- Boersma, L., 1965, Field measurement of hydraulic conductivity above a water table, in Black, C.A., ed., Methods of soil analysis; part 1, Physical and mineralogical, including statistics of measurement and sampling: Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, p. 234-252.
- Coleman, N.T.; Weed, S.B.; y McCracken, R.J., 1959, Cation-exchange capacity and exchangeable cations in piedmont soils of North Carolina: Soil Science Society of America Proceedings, v. 23, p. 146-149.
- Chesworth, Ward, 1977, Weathering stages of the common igneous rocks, index minerals and mineral assemblages at the surface of the Earth: The Journal of Soil Science, v. 28, p. 490-497.
- Cruz-Díaz, Jaime; Cajuste, L.J.; y Estrada-Berg, W.J., 1990, Evaluación de materiales amorfos y su importancia como cementantes en algunos tepetates de San Dieguito Xochimancan, Texcoco: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Simposio Nacional sobre Degradación del Suelo, 1, México, D.F., Memoria, p. 60-61 (resumen).
- Day, P.R., 1965, Particle fractionation and particle-size analysis, in Black, C.A., ed., Methods of soil analysis; part 1, Physical and mineralogical, including statistics of measurement and sampling: Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, p. 545-567.
- Duchaufour, Philippe, 1984, Edafología; parte 1, Edafogénesis y clasificación: Barcelona, Masson, 443 p.
- Flach, K.W.; Nettleton, W.D.; Gile, L.H.; y Cady, J.G., 1969, Pedocementation-induration by silica, carbonates and sesquioxides in the Quaternary: Soil Science, v. 107, p. 442-453.
- FAO, 1988, Soil map of the world, revised legend: Roma, Food and Agriculture Organization of the United Nations, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, International Soil Reference and Information Centre, World Soil Resources Report 60, escala 1:5'000,000, mapa y texto de 119 p.
- Fries, Carl, Jr., 1966, Hoja Cuernavaca 14Q-h(8), con Resumen de la geología de la hoja Cuernavaca, estados de Morelos, México, Guerrero y Puebla: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Carta geológica de México, Serie de 1:100,000, mapa con texto explicativo en el reverso.
- García, Enriqueta, 1981, Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarla a las condiciones de la República Mexicana): México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, 246 p.
- Goudie, Andrew, 1973, Duricrusts in tropical and subtropical landscapes: Oxford, Clarendon Press, 174 p.
- Grossman, R.B., y Cline, M.G., 1957, Fragipan horizons in New York; part 2, Relationships between rigidity and particle size distribution: Soil Science Society of America Proceedings, v. 21, p. 322-325.

- Hashimoto, Isao, y Jackson, M.L., 1960, Rapid dissolution of allophane and kaolinite-halloysite after dehydration: Nueva York, Pergamon Press, p. 102-113.
- Head, K.H., 1984, Manual of soil laboratory testing; tome 1, Soil classification and compaction tests: Londres, Plymouth Pentech Press, 267 p.
- Hetier, J.M., 1975, Formation et évolution des andosols en climat tempéré: Nancy I Université, disertación doctoral, 194 p. (inédita).
- Jackson, M.L., 1970, Análisis químico de suelos, 2ª ed.: Barcelona, Editorial Omega, 662 p.
- Johnson, W.M.; McClelland, J.E.; McCaleb, S.B.; Ulrich, Rudolph; Harper, W.G.; y Hutchings, T.B., 1960, Classification and description of soil pores: Soil Science, v. 89, p. 319-321.
- Kostyakov, A.N., 1932, On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purpose of amelioration (en ruso): Gramingen, Holanda, International Society of Soil Science, 6th Commission, Transactions, p. 17-21.
- Krauskopf, K.B., 1979, Introduction to geochemistry: Tokio, McGraw-Hill Kogakusha, 617 p.
- Kunse, G.W., 1965, Pretreatment for mineralogical analysis, in Black, C.A., ed., Methods of soil analysis; part 1, Physical and mineralogical, including statistics of measurement and sampling: Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, p. 568-577.
- Lugo-Hubp, José, 1984, Geomorfología del sur de la cuenca de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Serie Varia, tomo 1, núm. 8, 95 p.
- Meixner, R.E., y Singer, M.J., 1981, Use of a field morphology rating system to evaluate soil formation and discontinuities: Soil Science, v. 131, p. 114-123.
- Miehlich, Gunter; Heide-Weise, M.; y Kneide, W., 1980, Los suelos de la Sierra Nevada de México: México, D.F., Fundación Alemana para la Investigación Científica, Proyecto Puebla-Tlaxcala, Suplemento Comunicaciones, p. 17-60.
- Nimlos, T.J., 1989, The density and strength of Mexican tepetate (duric materials): Soil Science, v. 147, p. 23-27.
- Pacheco-López, M.C., y Estrada-Berg, W.J., 1987, Cartografía y caracterización mineralógica de los tepetates del oriente del Valle de México, in Ruiz-Figueroa, J.F., ed., Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural: Texcoco, Universidad Autónoma de Chapingo, p. 31-37.
- Powers, M.C., 1953, A new roundness scale for sedimentary particles: Journal of Sedimentary Petrology, v. 23, p. 117-119.
- Pratt, P.F., y Bair, F.L., 1961, A comparison of three reagents for the extraction of aluminum from soils: Soil Science, v. 91, p. 357-359.
- Secretaría de Programación y Presupuesto (S.P.P.), 1981, Atlas nacional del medio físico, escala 1:1'000,000: México, D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Dirección de Estudios del Territorio Nacional, 224 p.
- Seddoh, K., y Pedro, G., 1975, Pédologie: Grignon, Francia, Éditions de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM), serie Pédologie, v. 12, p. 7-25.
- Soil Survey Staff, 1984, Procedures for collecting soil samples and methods of analysis for soil survey: Washington, D.C., U.S. Department of Agriculture, Soil Survey Investigations Report 1, U.S. Government Printing Office, p. 80-150.
- Souchier, B., 1971, Évolution des sols sur roches cristallines à l'étage montagnard (Vosges): Nancy I Université, disertación doctoral, 134 p. (inédita).
- Steinhardt, G.C.; Franzmeier, D.P.; y Norton, L.D., 1982, Silica associated with fragipan and non-fragipan horizons: Soil Science Society of America Journal, v. 46, p. 656-657.
- Tardy, Yatoon, 1969, Géochimie des altérations—Étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique: Estrasburgo, Université Strasbourg, disertación doctoral, 199 p. (inédita).
- United States Bureau of Plant Industry and Agricultural Engineering, 1962, Soil Survey Manual: Washington, D.C., U.S. Government Printing Office, 503 p.
- USDA, 1988, Soil Taxonomy: Washington, D.C., U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Handbook 436, U.S. Government Printing Office, 754 p.
- Van Zuidam, R.A., 1979, Terrain analysis and classification using aerial photographs—a geomorphological approach: Enschede, Holanda, International Training Centre, 186 p.
- Manuscrito presentado: 27 de agosto de 1991.
 Manuscrito corregido devuelto por el autor: 15 de diciembre de 1992.
 Manuscrito aceptado: 17 de diciembre de 1992.