

00361 14
Ley



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**MORFOGENESIS DE SUELOS CON
TEPETATES DE ORIGEN VOLCANICO CON
CLIMA TEMPLADO SUBHUMEDO EN EL
NORESTE DEL ESTADO DE MORELOS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE

**MAESTRIA EN CIENCIAS
(BIOLOGIA)**

P R E S E N T A :

ARELIA GONZALEZ VELAZQUEZ

DIRECTOR: DR. DAVID FLORES ROMAN

MEXICO, D. F.

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIA

**Con todo mi amor, cariño, admiración y respeto,
a ellos, porque, forman parte de mi vida:**

A mis padres

A mi adorable Karla

A Juan S.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, en particular a la Facultad de Ciencias por haberme dado la oportunidad de realizar mis estudios de Maestría.

En especial quiero expresar mi agradecimiento a los miembros del Jurado:
M. en C. Nelly Diego Pérez, Dra. Norma Eugenia García Calderón, Dr. David Flores Román, Dra. Marfa Engracia Hernández Cerda, Dr. Jorge Enrique Gama Castro, M. en C. Ernestina Vallejo Gómez y Dr. José López García, por su valiosa colaboración en la revisión crítica del texto.

A las autoridades del Instituto de Geología:
al Dr. Dante Jaime Morán Zenteno, Director, al Ing. Rodolfo del Arenal Capetillo, Secretario Académico, Al Sr. Jorge René Alcalá Martínez, Secretario Técnico y al M. en C. Sergio Palacios Mayorga, Jefe del Departamento de Edafología, por todo el apoyo brindado durante el tiempo que se realizó la investigación, proporcionando todos los medios disponibles en el cumplimiento de los objetivos planteados.

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento al Dr. David Flores Román por su incansable y tenaz ayuda brindada durante el trayecto de mi formación académica y por su acertada dirección a lo largo de la realización de este trabajo.

Al laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería, en particular al Ing. Héctor Legorreta por las facilidades brindadas en las determinaciones de resistencia a compresión simple.

Del Departamento de Geoquímica de este Instituto:

Al Ing. Quím. Anastasio Lozano Cobo y a las Quím. Irma Aguilera Ortiz y Patricia Girón García por su colaboración en la determinación de los óxidos totales. Asimismo, a la Quím. Patricia Altuzar Coello por la determinación mineralógica.

A los estudiantes de Posgrado: Gabriel Marañón Guerrero, Otilio A. Acevedo Sandoval, Carlos Islas Vega, Alma S. Velázquez Rodríguez y Lucy N. Mora Palomino, por su colaboración en las determinaciones de infiltración en campo.

Al Biól. Humberto Núñez Cardona y al Sr. Pedro Avilés Jaimés por su apoyo en determinación de análisis de laboratorio.

Al Sr. Fernando A. Vega López por el trabajo de dibujo, a la Srita. Carmen Galindo Velasco por la realización del manuscrito y a las alumnas: Biól. Lucía Rodríguez Domínguez y a los Pas. de Biología Raúl López Bravo y Leticia Guevara Deloya.

Mi reconocimiento al M. en C. Teodoro Méndez García por su invaluable orientación a través de mi vida académica que se ha plasmado en la posibilidad de alcanzar esta meta.

Al Dr. Jorge E. Gama Castro y a la M. en C. Ernestina Vallejo Gómez, por su apoyo desinteresado en el trayecto de mi carrera académica.

A todos ellos muchas gracias.

INDICE

i. RESUMEN	1
I. INTRODUCCION	3
II. HIPOTESIS Y OBJETIVOS	5
III. REVISION BIBLIOGRAFICA	6
1. Unidad representativa de suelos Luvisoles	6
2. Tepetates	7
2.1 Origen	7
2.2 Tipos de tepetates	9
2.3 Distribución	9
2.4 Cronología en el conocimiento de los tepetates en México	10
2.5 Importancia	10
2.6 Características Físicas, Químicas y Mineralógicas	13
A. Físicas	13
B. Químicas	13
C. Mineralógicas	14
IV. CARACTERISTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO	15
1. Localización	15
2. Fisiografía	15
3. Geología	18
4. Clima	18
5. Hidrología	19
6. Suelos	19
7. Vegetación	19
8. Uso del Suelo	22
V. MATERIALES Y METODOS	23
1. Gabinete Fase 1	23
1.1 Compilación de la información básica	23

1.2	Cartografía y teledetección de los suelos	23
2.	Trabajo de campo	23
3.	Preparación de las muestras	25
4.	Clasificación morfológica de campo	25
5.	Análisis de laboratorio	25
5.1	Análisis físicos: color, densidad aparente y real, porosidad textura, distribución del tamaño de partículas, esfericidad y redondez, espacio poroso, infiltración.	26
5.2	Análisis mecánico: estabilidad y colapsamiento del material endurecido y resistencia a la compresión no confinada.	26
5.3	Análisis químicos: pH, bases intercambiables, capacidad de intercambio de cationes, materia orgánica, nitrógeno total, carbono, óxidos totales, óxidos libres, aluminio intercambiable. Pérdidas y ganancias de óxidos totales.	26
5.4	Análisis mineralógico: difracción de rayos X.	27
6.	Gabinete Fase II.	27
6.1	Ordenamiento y clasificación de los resultados.	27
6.2	Análisis y discusión.	27
6.3	Conclusiones y redacción de la memoria.	28
VI	RESULTADOS Y DISCUSION	29
1.	Clasificación, Morfológica de Campo.	29
1.1	Desarrollo relativo de horizontes.	29
1.2	Desarrollo relativo del perfil.	29
2.	Propiedades Físicas	35
2.1	Distribución del tamaño de las partículas.	35
2.2	Esfericidad y redondez de las partículas minerales	37

2.3	Densidad aparente, densidad real y porosidad total.	37
2.4	Caracterización del espacio poroso.	40
2.5	Infiltración e infiltración acumulada	40
3.	Análisis Mecánico.	44
3.1	Estabilidad de un fragmento de material endurecido en el H ₂ O y en una solución de KOH al 30%.	44
3.2	Resistencia a la compresión no confinada.	45
4.	Análisis Químicos.	45
4.1	Pérdidas y ganancias de óxidos totales.	45
4.2	Oxidos libres.	54
4.3	Relaciones molares.	54
4.4	Actividades de los iones hidrógeno.	54
4.5	Cationes intercambiables.	56
4.6	Capacidad de intercambio de cationes.	58
4.7	Aluminio intercambiable.	58
4.8	Materia orgánica.	58
4.9	Nitrógeno total, carbono y relación C/N.	60
5.	Análisis Mineralógico.	61
5.1	Caracterización mineralógica.	61
6.	Génesis de los suelos y materiales endurecidos.	61
7.	Caracterización Taxonómica.	63
7.1	FAO-UNESCO (1994).	63
7.2	Soil Taxonomy (1994).	63
VII.	CONCLUSIONES	64
VIII.	LITERATURA CITADA	66

i. RESUMEN

Los tepetates involucran materiales geológicos y/o edáficos que tienen en común diferentes grados de cementación. Los cementantes más comunes son la sílice, sesquióxidos y carbonatos. El más común en las áreas de origen volcánico es la sílice que deriva de materiales piroclásticos. El estudio se realizó en el municipio de Tetela del Volcán, Estado de Morelos. Los objetivos de este estudio fueron: (1) caracterizar y evaluar las propiedades morfológicas, físicas, químicas, mecánicas y mineralógicas de los suelos y tepetates y (2) plantear hipótesis sobre la génesis y modo de formación de los mismos.

En la clasificación morfológica de campo los valores fueron bajos por la homogeneidad de los horizontes, debido principalmente a color, textura, estructura, consistencia y separación de horizontes. La velocidad de infiltración, presentó valores más altos en los suelos que en los materiales endurecidos. Los contenidos de arcilla en los cuatro perfiles cubrieron un intervalo de 32 a 40% en los suelos y en los materiales endurecidos de 24 a 43%. La densidad aparente dominante en el *solum* fue de 1.1 g/cm³ y en los duripanes de 1.5 a 1.7 g/cm³. En la porosidad total se obtuvieron valores altos en los horizontes superficiales, 52-43%, y en los duripanes de 37 y 25%.

Con respecto a las pérdidas y ganancias de los óxidos totales, en el horizonte superficial AB de los perfiles 11 y 14 y en el BC del 13 se registraron ganancias de óxidos de silicio significativos en relación con el material parental. El orden y la abundancia de los óxidos libres fue de SiO₂ > Al₂O₃ > Fe₂O₃ el que corresponde a la etapa dos de la secuencia de movilidad de los óxidos que diagnostican la etapa temprana de meteorización y desarrollo de los suelos. Los porcentajes de sílice libre, relativamente altos, yacen sobre el material endurecido favoreciendo su incremento por la reducción del espacio poroso y acumulación del mismo.

La composición mineralógica de la fracción arcilla manifiesta el orden y la abundancia siguiente: Haloisita > Cristobalita > Mica > Montmorillonita, estos minerales indican que su intemperismo fue a partir de materiales volcánicos.

Las principales conclusiones señalan: la clasificación morfológica de campo caracterizó a los suelos con alto desarrollo. La densidad aparente se incrementa a mayor profundidad hasta alcanzar los valores más altos en el fragipán y los duripanes. Las pérdidas

y ganancias de óxidos totales de los horizontes intemperizados, en relación con la roca basal, manifestaron condiciones de alteración baja. El incremento limitado e incluso la reducción de la suma de óxidos libres en relación con los contenidos de arcilla señalan el nivel de evolución del suelo. Los minerales secundarios dominantes producto de la alteración de materiales volcánicos bajo condiciones de clima templado subhúmedo son holoisita y montmorillonita. Los suelos taxonómicamente se ubican con base en FAO-UNESCO (1994), dentro de la unidad Luvisol y de acuerdo a Soil Survey Staff (1994) en los Grandes Grupos Fragiudalfs, Durustalfs y Hapludalfs.

Los suelos se formaron a partir de tobas preexistentes, constituidos por eventos volcánicos del Pleistoceno. Una vez formados los suelos se sucedió un evento catastrófico, glaciación, la cual durante el deshielo causó alteración fuerte, con formación y desplazamiento de arcillas que constituyeron los horizontes argílicos. Al paso del tiempo, con el clima actual y nuevos aportes volcánicos estos suelos se han rejuvenecido, empardeciéndose homogéneamente como consecuencia de un proceso de alteración moderado. La condición geomorfológica, la topografía y el microrrelieve influyeron en la depositación-cementación de la sílice amorfa para la formación de duripanes, fragipanes o no formación de capas endurecidas.

INTRODUCCION

El uso irracional que el hombre realiza de los recursos naturales, en este caso al suelo, sin valorar la importancia que representa el manejarlos de modo sustentable, ha propiciado su agotamiento y deterioro a nivel mundial. Estos efectos negativos han sido provocados por el hombre, a través de acciones tales como: tala inmoderada, deforestación, cambios del uso del suelo, sobrepastoreo, uso de paquetes tecnológicos no apropiados, e incendios entre otros.

Las manifestaciones principales se observan a través de fenómenos como: erosión, arrastre de sedimentos, asolves de cauce, avenidas y desbordamientos, menor recarga de acuíferos y en general, la degradación de los ecosistemas (Llerena y Sánchez, 1992).

Actualmente los procesos de degradación, tales como: erosión, salinización, sodicidad, contaminación y cementación, continúan incrementándose en muchas regiones de nuestro país (Flores *et al.*, 1992).

Uno de los problemas más serios a los que se enfrentan nuestras áreas rurales, es la presencia de suelos de poco espesor y el afloramiento de capas y horizontes endurecidos (Rey, 1979 y Flores *et al.*, 1990).

Particularmente la compactación y cementación constituyen los procesos que intervienen en la formación de capas y horizontes endurecidos que reciben comúnmente el nombre de tepetates.

El tepetate es un horizonte endurecido que se presenta en el suelo, constituido por materiales que presentan ciertos grados de consolidación y/o cementación. Su origen puede ser diagenético o pedológico, o una combinación de ambos (Flores *et al.*, 1990).

Dependiendo del tipo de cementante que presente la matriz de estos materiales, reciben diferentes nombres, cuando la cementación es por sílice (SiO_2), reciben el nombre de duripanes, si es por carbonatos de calcio constituyen los petrocálcicos, o bien por el mismo calcio, pero en forma de sulfatos de calcio (CaSO_4) dan origen a los petrogípsicos. Los cementantes pueden ser también sesquióxidos (Fe_2O_3 y Al_2O_3) y estos forman petroplintitas, y cuando la cementación es escasa o nula y se presenta compactación, se llaman fragipanes.

El cementante más común para las áreas volcánicas del Pleistoceno es la sílice (SiO_2).

Tal compuesto deriva de la alteración de materiales de origen volcánico, principalmente vidrio volcánico (Flores *et al.*, 1991 y Marañón 1994).

En algunos casos sobre el tepetate descansaba suelo fértil, sin embargo, en muchas zonas esa capa se ha perdido a causa de la erosión o de técnicas inadecuadas del que han sido objeto.

El afloramiento del tepetate, además de que representa una forma grave de degradación del suelo, es un problema muy serio desde el punto de vista agrícola. Las capas cementadas, además, limitan el crecimiento radical de las plantas, reducen el paso del agua al subsuelo, provocan drenaje lateral interno que conlleva a la pérdida de numerosos minerales.

El estado de Morelos, presenta en su parte septentrional, particularmente en las estribaciones de la Sierra del Chichinautzin y en los flancos sur y sureste del volcán Popocatepetl, grandes áreas con tepetates. El área de estudio que comprende el trabajo, se ubica dentro de los municipios de Tetela del Volcán (90%) y Ocuituco (10%), entre los paralelos 18°51'32" y 18°54'42" de latitud norte y entre los meridianos 98°41'13" y 98°46'52" de longitud oeste.

La motivación para la realización de este estudio se basó en la diversidad genética y morfológica de los tepetates que existen en el estado de Morelos. En general, la génesis de los tepetates no es bien conocida, y en particular los procesos que intervienen en su formación.

La estructura del trabajo comprende la caracterización morfológica, morfogenética, de las principales propiedades físicas, químicas y taxonómicas de cuatro perfiles de suelos representativos de la zona de estudio, dos presentan duripanes, uno fragipán y otro carece de horizontes endurecidos. Con tales conocimientos fue posible interpretar y establecer algunos lineamientos e hipótesis sobre la génesis de los suelos y los horizontes endurecidos.

II. HIPOTESIS Y OBJETIVOS

Hipótesis

La morfogénesis de suelos con tepetates está condicionada particularmente por la naturaleza, grado de intemperismo y de evolución de los materiales parentales. Consecuentemente es necesario determinar las características morfológicas, físicas, químicas, mecánicas y mineralógicas que presenta el suelo y que han sido resultado de los procesos antes mencionados.

Objetivo General.

Con base en el método científico, se pretende contribuir al conocimiento sistemático y ordenado de los tepetates y suelos, así como de sus posibles aplicaciones o consecuencias prácticas a realidades concretas.

Objetivos Específicos

- Caracterizar y evaluar las propiedades morfológicas, físicas, químicas, mecánicas y mineralógicas de los suelos y tepetates que se formaron bajo condiciones de clima templado subhúmedo.
- A partir de los datos obtenidos, establecer una hipótesis objetiva sobre el origen, procesos y formación de materiales de origen diagénético y pedológico comúnmente denominados tepetates, en los que se incluyen duripanes y fragipanes, así como los suelos involucrados

III. REVISION BIBLIOGRAFICA

Las condiciones ambientales en el área de estudio, así como los materiales geológicos, relieve, organismos y tiempo han permitido la génesis de suelos saturados y materiales cementados entre los que destacan:

1. Unidad representativa de suelos Luvisoles

En esta unidad (FAO-UNESCO, 1991) se incluyen los suelos que poseen un horizonte argílico, que tiene una capacidad de cambio igual o superior a $24 \text{ cmol (+) Kg}^{-1}$ de arcilla, y un grado de saturación por $\text{NH}_4 \text{ OAc}$ del 50% o mayor en la totalidad del horizonte B_1 con un límite brusco, sobre un horizonte lentamente permeable. De acuerdo con la clasificación Francesa (Duchaufour, 1984), los Luvisoles corresponden a la Clase y Subclase VI Suelos empardecidos templados "lavados", con horizontes A y Bt, el grado de saturación es siempre superior al 50% en el horizonte Bt, y siempre forman un horizonte argílico, la clasificación americana, Soil Taxonomy 1994, los considera del Orden Alfisoles.

Los Luvisoles satisfacen dos requisitos: (a) una abundancia moderada de látices de arcilla cristalina y (b) su acumulación en el subsuelo en cantidades suficientes para producir un horizonte argílico. La traslocación de la arcilla se ha hecho en condiciones alcalinas sódicas, debido a la dispersión de las arcillas.

Generalmente los Luvisoles se encuentran en geoformas jóvenes, estables, de poca pendiente, planas o ligeramente onduladas, donde no han actuado de manera importante los procesos erosivos y las perturbaciones edáficas, por lo menos durante los últimos mil años (Buol *et al.*, 1989).

Sin embargo los suelos son suficientemente jóvenes para retener reservas notables de minerales primarios, capas de arcillas y nutrientes disponibles para las plantas.

Con respecto al material parental, los Luvisoles se originan a partir de rocas básicas, intermedias o materiales sedimentarios consolidados, con una permeabilidad moderada que permite el paso del agua y el consecuente proceso de lavado (Fanning, 1990).

En su génesis, son muy favorables los depósitos de tamaño del limo, arena fina y arcilla, no así los materiales arenosos, ya que su alta porosidad propicia un lavado demasiado rápido, impidiendo la acumulación de los materiales arcillosos existentes y dando lugar a lixiviación.

También son comunes los Luvisoles desarrollados sobre materiales volcánicos, sobre todo de naturaleza básica, los cuales son fácilmente alterables, debido a sus contenidos altos en hierro y magnesio y bajos en sílice, aportando una buena cantidad de minerales secundarios al suelo. Además su permeabilidad permite el paso del agua y la consecuente traslocación de arcilla.

Los factores esenciales involucrados en su formación son el clima, organismos, el tiempo y el material parental, el cual aporta suficientes bases al perfil, así como minerales primarios que permiten la formación de arcillas. El clima actúa predominantemente en los procesos de alteración de minerales y en los de argilización.

En la génesis de estos suelos es de importancia el tiempo, para que se den los procesos de formación del horizonte argílico. Estos procesos son muy lentos y en consecuencia sumamente dependientes de este factor. Así, puede decirse que los Luvisoles son suelos más antiguos que los Andosoles, con mayor desarrollo y evolución.

De hecho estos suelos son antiguos y han sido sepultados parcialmente por distintos eventos volcánicos, de tal manera que, en algunos casos, han sido rejuvenecidos, dando lugar a la formación de Feozems lúvicos.

2. Tepetates.

En el área de estudio, a altitudes de 1800 a 2130 m.s.n.m. se localizaron una serie de capas o estratos endurecidos que localmente se conocen como tepetates. Las principales características de estas capas se describen a continuación.

2.1 Origen

La palabra "tepetate" deriva del Náhuatl, vocablo compuesto por las raíces *tetl* que significa piedra y *pétlatl*, petate; por lo cual, el significado etimológico es petate de piedra (Rojas y Sánchez, 1985).

Pedológicamente el tepetate es definido como una capa o un horizonte cementado de color pardo a rojizo, de consistencia dura y textura de arcilla hasta grava fina (Williams, 1972).

Agronómicamente los tepetates son estratos endurecidos que en ocasiones afloran a la superficie y en algunos casos descansaba sobre ellos una capa de suelo, la cual fue

eliminada por el fenómeno erosivo, como una consecuencia del mal manejo de los suelos, tanto agrícolas como pecuarios y forestales.

Las costras sílico-cementadas probablemente son los tipos de endurecimiento más comunes en los suelos derivados de cenizas volcánicas, pero su génesis es menos conocida que la de otros tipos de costras y es más complicada. En algunos casos las costras sílico-cementadas son claramente pedogénicas, donde se produce eluviación de la sílice en un horizonte superior a iluviación en una inferior, donde cementa al horizonte.

Otra manera de formación de costras sílico cementadas es a través de flujos de cenizas que son erupciones que provocan fuertes emisiones de piroclastos que tienden a ser acompañadas por la expulsión de grandes cantidades de vapor de agua. Este vapor se condensa y ocasiona fuertes aguaceros, por lo que los depósitos cineríticos se saturan con agua y fluyen hacia partes bajas a veces recorriendo distancias considerables. Es evidente que en condiciones de saturación exista una liberación de la sílice que cementa la masa entera de cenizas, con la formación de un material endurecido muy semejante a las costras pedogénicas.

En nuestro país desde hace varios años se han hecho estudios sobre tepetates, sobre todo a lo que se refiere a la caracterización morfológica, cartográfica y mineralógica, (Brambila, 1940; Valdez, 1970; Williams, 1972; Pacheco, 1979; Cervantes, 1983; Flores *et al.*, 1992) o están en relación a la incorporación de estos materiales a la producción, también se les está estudiando en función de la erosión. En 1986 se realizó el Primer Simposio Nacional sobre uso y manejo de tepetates para el desarrollo rural en Tlaxcala, Tlax. y en 1991 se realizó el Primer Simposio Internacional sobre Suelos Volcánicos Endurecidos en Montecillo, Edo. de Mex.

Su génesis es aún muy difícil de establecer en la mayoría de ellos, ya que pueden originarse a través de procesos puramente diagenéticos como la litificación, o pedogénicos como la formación de horizontes endurecidos, o por acción de ambos procesos (Flores *et al.*, 1991). El USDA afirma que el tepetate involucra diversos materiales tanto de origen geológico como edafogénico, caracterizados por presentar diferentes grados de compactación o cementación secundaria. Estos materiales generalmente subyacen al *solum*; cuando llegan a aflorar siempre son índice de problemas severos de erosión (Llerena *et al.* 1992).

2.2 Tipos de tepetates

La determinación edáfica para designarlos varía en función de los cementantes y en algunos casos, del nivel de compactación; cuando la cementación es por sílice, SiO_2 , reciben el nombre de duripanes (Soil Survey Staff, 1960 y 1967); también se les ha llamado silcretas (Lamplugh, 1907) o bien duricostras (Woolnough, 1927); estos tepetates son de colores generalmente claros: blanco o grises muy claros, aunque llegan a presentar con menor frecuencia colores rojizos y amarillentos. En otras ocasiones los cementantes son carbonatos de calcio, CaCO_3 , y constituyen los petrocálcicos; o bien el mismo calcio, pero en forma de sulfato de calcio, CaSO_4 , da origen a los petrogípsicos (Soil Survey Staff, 1967); en ambos casos son de color predominantemente blanco. Los cementantes pueden ser también sesquióxidos, Fe_2O_3 y Al_2O_3 , y formar lateritas (Buchanan, 1807); más recientemente este nombre fue cambiado por plintitas (Soil Survey Staff, 1960 y 1967) y actualmente petroplintitas (Soil Taxonomy 1990); en estos materiales la coloración varía de amarillo muy claro hasta rojo intenso. Cuando existe compactación fuerte y cementación escasa o nula se llaman fragipanes (Grossman y Carlisle, 1969).

2.3. Distribución.

La distribución de los tepetates está en estrecha relación con el tipo de clima, los duripanes se encuentran en climas semiáridos y templados, aunque con suficiente precipitación para disolver los productos del intemperismo en el perfil, pero donde no ocurre mucha lixiviación, se les encuentra en suelos de origen volcánico. Típicamente subyacen en suelos con horizontes argílicos o nátricos. En ocasiones también se presentan en Vertisoles (Flach, *et al.*, 1969).

Los petrocálcicos y petrogípsicos se presentan en suelos de zonas áridas, semiáridas, subhúmedas y húmedas. Los de sesquióxidos ocurren en áreas húmedas (Flach *et al.*, 1969).

Los fragipanes se desarrollan en zonas de climas cálidos o templados, restringidos a áreas donde la precipitación es mayor a la evapotranspiración, en alguna época del año, suficiente para provocar un lavado de bases por drenaje interno. Se encuentran en Spodosoles, Inceptisoles, Alfisoles y Ultisoles (Grossman y Carlisle, 1969).

Respecto a la presencia de estos materiales en México, en la Figura 1, se presenta un mapa con la distribución de tepetates según Flores (1991), exceptuando las áreas de plintitas

en el territorio nacional. Se observa que la mayor parte de este material están ubicados dentro de las dos grandes sierras que conforman nuestra república, es decir en la altiplanicie; una parte pequeña al norte de la vertiente del golfo; otra al noroeste del estado de Sonora y finalmente, a lo largo de la península de Baja California.

De acuerdo a las características climáticas que prevalecen en la Altiplanicie Mexicana, de aridez y semiaridez, los tepetates predominantes son los petrocálcicos, petrogípsicos y en menor proporción los duripanes. Al hacer una evaluación de la superficie ocupada por estos materiales en el país de acuerdo a la Figura 1, se puede estimar que hay tepetates en el 30% de la República Mexicana (Flores *et al.*, 1991).

2.4 Cronología en el conocimiento de los tepetates en México.

Con base en el Códice Vergara (Rojas y Sánchez, 1985) se exponen varios glifos o símbolos de suelos, donde se observa que desde épocas prehispánicas los tepetates fueron identificados y caracterizados por los Náhuatl. Como se observa en la Figura 2, el glifo representa a la capa arable y al tepetate, como es el caso del "Tepatlatl", en el símbolo del tepetate arenoso "Tepetlatl, xalalli" nuevamente aparece en primer lugar el suelo, después el tepetate y abajo de este la arena, es decir piroclastos, lo que significa que ya desde entonces se relacionaban estos materiales a un origen volcánico.

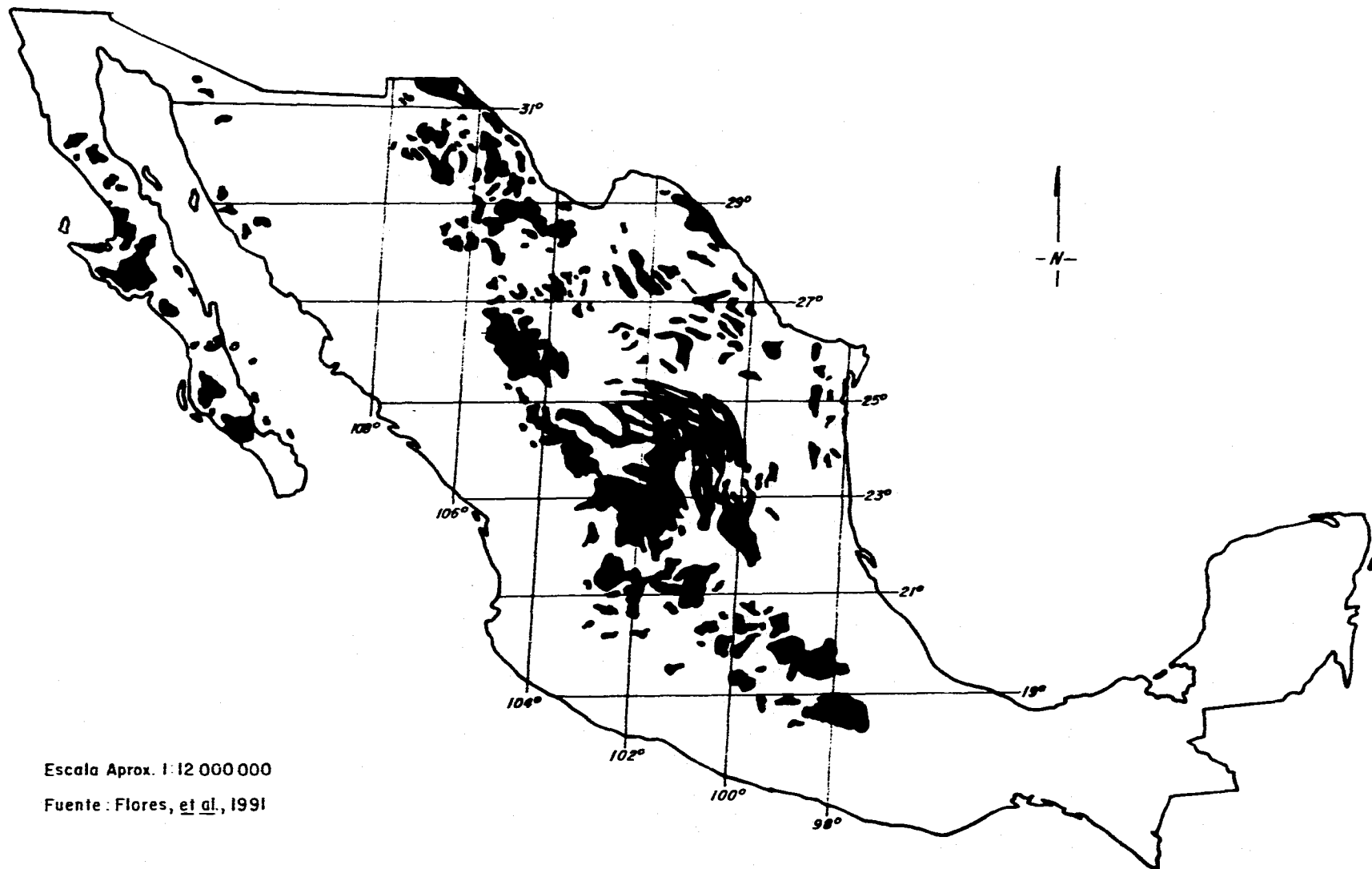
2.5 Importancia

La importancia del estudio de los tepetates cobra interés cuando las parcelas de los agricultores se encuentran enclavadas en este tipo de materiales de baja productividad, propiciando conflictos de tipo socio-económicos muy graves que los conducen al abandono de las actividades agropecuarias como principal fuente de ingresos y provocan la emigración a otras localidades.

Por ello es que surge la necesidad de conocer con mayor detalle el manejo racional de este tipo de material, por considerarse factible de recuperación mediante el estudio y el empleo de prácticas adecuadas de recuperación y conservación de las mismas, llegando a convertirse en productivas (Sánchez, *et al.* 1986).

La cementación de los horizontes del suelo constituye una forma grave de degradación del suelo que impide el desarrollo radical de las plantas. La presencia de capas cementadas

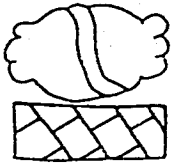
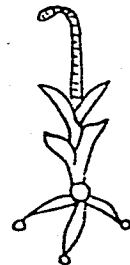
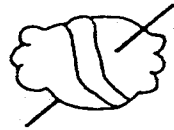
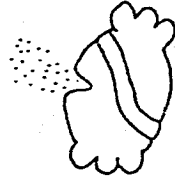
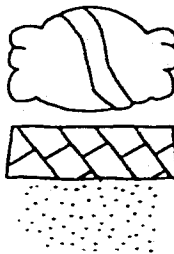
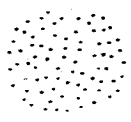
Figura 1:- DISTRIBUCION DE TEPETATES EN LA REPUBLICA MEXICANA



Escala Aprox. 1:12 000 000

Fuente: Flores, et al., 1991

Figura 2 GLIFOS DE SUELOS DEL CODICE VERGARA. MEDIADOS DEL SIGLO XVI
(Rojas y Sanchez, 1985)

<i>Glifa</i>	<i>Nombre en náhuatl</i>	<i>Traducción</i>	<i>Glifa</i>	<i>Nombre en náhuatl</i>	<i>Traducción</i>
	<i>Tepellall</i>	<i>Tepetate</i>		<i>Atactli</i>	<i>Aluvián</i>
	<i>Tezaquilt</i>	<i>Tierra Arcillosa</i>		<i>Teuhtlalli</i>	<i>Tierra Limasa</i>
	<i>Tepellatl, xatlalli</i>	<i>Tepetate Arenosa</i>		<i>Xatlalli</i>	<i>Tierra Arenosa</i>

favorece la erosión al impedir el paso del agua al subsuelo y propiciar el drenaje lateral interno y un mayor escurrimiento superficial con la consecuente desbasificación y transporte de partículas minerales (Flores *et al.*, 1991).

A los tepetates se les han dado diversos usos, ya sea con fines agropecuarios, forestales, ingeniería civil, artesanías y sobre todo en la construcción (Ruiz, 1986), en esta última, en forma de bloques que son altamente resistentes a la meteorización e intemperismo, tal como se les puede observar en algunas casas particulares e iglesias antiguas, e incluso en construcciones modernas donde se alternan los tepetates blancos con los tepetates amarillos.

2.6 Características Físicas, Químicas y Mineralógicas

A. Físicas

Con respecto a las características físicas de los tepetates varían entre los colores gris claro a amarillo claro o castaño, y en húmedo son tendientes a los colores gris oscuro a rojo amarillento.

Granulométricamente se estima que el mayor porcentaje del total de las partículas corresponde a la fracción arena variando aproximadamente de un 50 a 60%, con respecto al limo total cubren un intervalo que va de 30-40% y en la fracción arcilla total cubren un intervalo de aproximadamente de un 12 a 40% (Pacheco, 1986, Flores *et al.*, 1992 y Marañón, 1994).

Con respecto a su clasificación textural son generalmente franco arenosos, franco arcillosos, francos y en algunos casos franco arcillo-limosos (Sánchez *et al.*, 1986 y Flores *et al.*, 1992).

La densidad aparente varía entre los valores 1.1 a 1.9 g/cm³, la densidad real entre 2.0 y 2.8 g/cm³ (Etchevers *et al.*, 1991 y Flores *et al.*, 1992). La porosidad total varía entre 13 a 47% (Flores *et al.*, 1992).

B. Químicas

Las características químicas de los tepetates varían en términos estrechos de acuerdo a su composición (Sánchez *et al.*, 1986, Flores *et al.*, 1992). Los porcentajes de materia orgánica son muy bajos cubren un intervalo de 0.1 a 0.8.

En la reacción del suelo (pH) los valores que presentan son de moderadamente ácidos a ligeramente alcalinos (5.1 a 7.1).

El porcentaje de nitrógeno total es bajo y varía de 0.004 a 0.09 (Sánchez *et al.*, 1986 y Flores *et al.*, 1992).

Los cationes intercambiables son muy variables, el calcio cubre intervalos de 5.0 a 19.0 meq/100 g, el magnesio de 4.0 a 11.0 meq/100 g, el sodio de 0.30 a 1.70 y para potasio los valores fluctúan entre 0.20 a 1.80 meq/100 g (Flores *et al.*, 1992).

La capacidad de intercambio catiónico total generalmente es alta y cubre un intervalo de 17.5 a 35.0 meq/lt (Sánchez, *et al.* 1986 y Flores *et al.* 1992).

C. Mineralógicas

Los tepetates están constituidos por minerales primarios, en su mayoría de un mismo origen aunque existen algunos que presentan adiciones secundarias.

Los minerales más abundantes son: cuarzo, feldespatos, piroxenos, anfíboles, plagioclasa, cristobalita, hornblenda lo cual indica la presencia de silicatos, aluminio y sílice amorfa como agente cementante (Trueba, 1979 y Valdez, 1979).

En otros estudios mineralógicos realizados por Vallejo, (1969) y Rey (1979) se reportan contenidos de los siguientes minerales: cuarzo, feldespatos y ortoclasa alterada y como cementante está el CaCO_3 , clasificado como toba andesítica alterada. En análisis de rayos X se reportan la presencia de cuarzo, feldespatos, cristobalita, illita y material amorfo.

Los resultados obtenidos por Hidalgo *et al.*, (1992) señalan la abundancia de minerales primarios como: vidrios riolíticos, plagioclasa, hornblenda, magnetita, trazas de cuarzo y cristobalita.

IV CARACTERISTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

1. Localización

El estado de Morelos geográficamente se ubica hacia el sur y centro de la república Mexicana (Fig. 3), entre los paralelos 18°22'08" y 19°07'10" de latitud norte y entre los meridianos 98°37'08" y 99°30'09" de longitud oeste al meridiano de Greenwich (INEGI, 1981).

La zona de estudio se encuentra situada al noreste del estado de Morelos en el municipio de Tetela del Volcán entre los paralelos 18°51'32" y 18°54'42" de latitud norte y entre los meridianos 98°41'13" y 98°46'52" de longitud oeste, con una altitud entre los 1930 y 2130 m.s.n.m. Comprende una extensión de aproximadamente 60 km².

2. Fisiografía

Los límites del estado de Morelos comprenden áreas que corresponden a dos provincias fisiográficas del país: la provincia del Eje Neovolcánico y la provincia de la Sierra Madre del Sur (INEGI, 1981).

De acuerdo con López (1979) el Eje Neovolcánico, está constituido por una gran masa de rocas volcánicas acumuladas en innumerables episodios volcánicos que se iniciaron a mediados del Terciario.

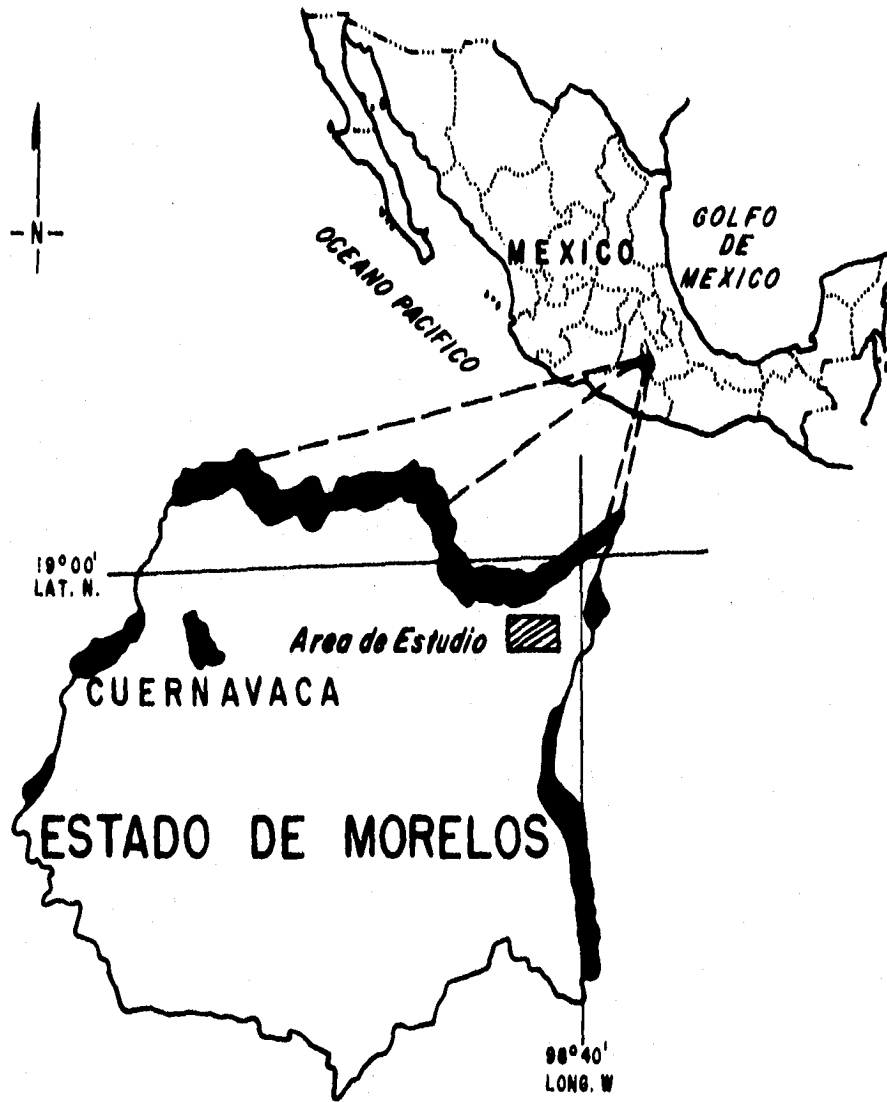
Está formado principalmente por grandes sierras volcánicas, conos dispersos, amplios estrato-volcanes de basalto y depósitos de arenas y cenizas, dispersos en extensas llanuras.

El Eje Neovolcánico comprende además áreas que corresponden a dos subprovincias: la de Lagos y Volcanes de Anáhuac y la del Sur de Puebla (Fig. 4).

Subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac.

Las áreas comprendidas en esta subprovincia son la parte norte y el este del estado. A esta subprovincia, la constituye la gran Sierra Volcánica del Ajusco (Axochio), que va del límite sur de la Sierra de las Cruces, hasta extenderse al oriente, a las proximidades del Popocatepetl, el volcán Chichinautzin y a la Sierra de Laderas Escarpadas del Tepozteco.

Figura 3- LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO



Escala Aprox. 1:1,000,000

Figura 4- PROVINCIAS Y SUBPROVINCIAS DEL ESTADO DE MORELOS



— Límite de Provincias

..... Límite de Subprovincias

Escala Aprox. 1:560 000

Fuente: S.P.P. 1981

3. Geología

En el estado de Morelos existen solamente afloramientos de rocas ígneas recientes como son basaltos y rocas sedimentarias, litológicamente clasificadas como calizas, areniscas, lutitas y conglomerados.

Las rocas sedimentarias son las más antiguas y pertenecen al Cretácico inferior, las rocas volcánicas son las más jóvenes y abundantes y pertenecen al Cuaternario.

Las estructuras geológicas más notables son las constituidas por los aparatos volcánicos y espesos derrames de lava. Los rellenos de los valles están formados por depósitos aluviales del Cuaternario, y además, existen un gran número de conos cineríticos y brechoides que sobresalen del grueso paquete de lava. (INEGI, 1981).

En la zona de estudio predominan las rocas ígneas extrusivas como el basalto, andesitas, riolitas, tobas y brechas volcánicas que datan del período Cuaternario. Además son notables las estructuras formadas por las rocas volcánicas, donde predominan los depósitos clásticos de material volcánico, derrames lávicos que constituyen el macizo del volcán Popocatepetl y lahares o derrames de lodo. (INEGI, 1981).

4. Clima

En el estado de Morelos se presentan los climas: cálido, semicálido, templado y semifrío. El cálido rige sobre todo en las zonas bajas de los ríos Amacuzac y Nexapa; el semicálido predomina en una franja que va de este a oeste situada en la región norte y en la zona de transición entre la sierra y los valles; el templado se distribuye principalmente en la zona norte, y se localiza en las partes altas de los valles de Cuernavaca y de Cuautla y el semifrío se reduce a pequeñas áreas en el extremo norte, concentrándose en las partes más altas de la sierra, como son la cordillera Neovolcánica y la sierra Nevada Transversal.

En la zona de estudio la caracterización climática se realizó por medio del sistema de clasificación de Köppen, modificado por García (1988), determinándose el clima como templado, húmedo isotermal, marcha de la temperatura tipo ganges Cb(m)(w)ig con lluvias en verano y un porcentaje de lluvias invernales menor de cinco siendo un clima templado húmedo.

La precipitación media anual oscila entre los 1200-1800 mm y la temperatura media anual entre 12° y 20°C. La mayor incidencia pluvial se presenta en julio con un intervalo entre 330-380 mm y la menor se registra en febrero y diciembre con un valor menor de 10

mm (Tabla 1).

Los meses más cálidos son marzo, abril, mayo y junio con una temperatura mensual entre 15° y 19°C, diciembre es el mes más frío con una temperatura que varía de los 10-15°C (Fig. 5).

5. Hidrología

El estado de Morelos queda comprendido en su totalidad, en parte de la región hidrológica "Río Balsas" (No. 18), con una superficie de 4958.22 km². Los principales ríos del estado son el Río Grande de Amacuzac, Tetecala, Tembembe, Yautepec, Tetlama, Xochitepec, Cuautla, Jantelco y Nexapa (S.G.G.E.M. 1988).

Las lagunas principales son: Tequesquitengo, Coatetelco y El Rodeo. Además cuenta con numerosos manantiales de aguas termales, como agua Hedionda en Cuautla, y la Fundición en Tehuixtla.

Los municipios de Tetela del Volcán y Ocuituco, donde se ubica la zona de estudio, se encuentran en la vertiente meridional del Popocatepetl, por donde los escurrimientos que provienen de este volcán forman el río Tenango que lleva un caudal permanente todo el año y su cuenca hidrológica abarca todo el municipio de Tetela del Volcán, además de una serie de arroyos de caudal solamente en épocas de lluvia (S.G.G.E.M. 1988).

6. Suelos

Los suelos presentes en el estado de Morelos corresponden a suelos formados en climas semicálidos y templados, tienen un origen residual o aluvial. Dentro de la gran diversidad de suelos presentes en el estado los más abundantes son: Andosoles, Regosoles, Cambisoles, Acrisoles, Luvisoles, Vertisoles, Litosoles y Feozems (INEGI 1981).

Los suelos que predominan en el municipio de Tetela del Volcán corresponden a climas semicálidos y templados húmedos, presentan un origen predominante residual y volcánico. En la zona de estudio predominan los suelos Lúvicos (Marañon *et al.*, 1995).

7. Vegetación

Sobre el variado sustrato edáfico del estado de Morelos, la vegetación no es muy diversa, ya que gran parte del área está ocupada actualmente por la agricultura.

Entre la vegetación que predomina, está el bosque de encino, encino-pino, bosque de

TABLA 1

**TEMPERATURA Y PRECIPITACION MEDIA MENSUALES DE LA ESTACION
METEOROLOGICA DE TETELA DEL VOLCAN, ESTADO DE MORELOS**

Coordenadas: 18° 54' Latitud norte
98° 45' Longitud oeste
Altura sobre el nivel del mar: 2200 m

Datos de temperatura durante 7 años
Datos de precipitación durante 15 años.

MES	TEMPERATURA	PRECIPITACION
Enero	15.9°C	18.1 mm
Febrero	16.3	1.3
Marzo	18.0	9.3
Abril	19.4	70.5
Mayo	19.8	185.3
Junio	17.7	349.7
Julio	17.1	368.5
Agosto	17.3	367.6
Septiembre	17.1	322.3
Octubre	16.8	149.8
Noviembre	16.3	40.2
Diciembre	15.6	2.6
Anual	17.2	1885.2
P/T	10.9	% P. Inv. 1.5 Oscil. 4.5

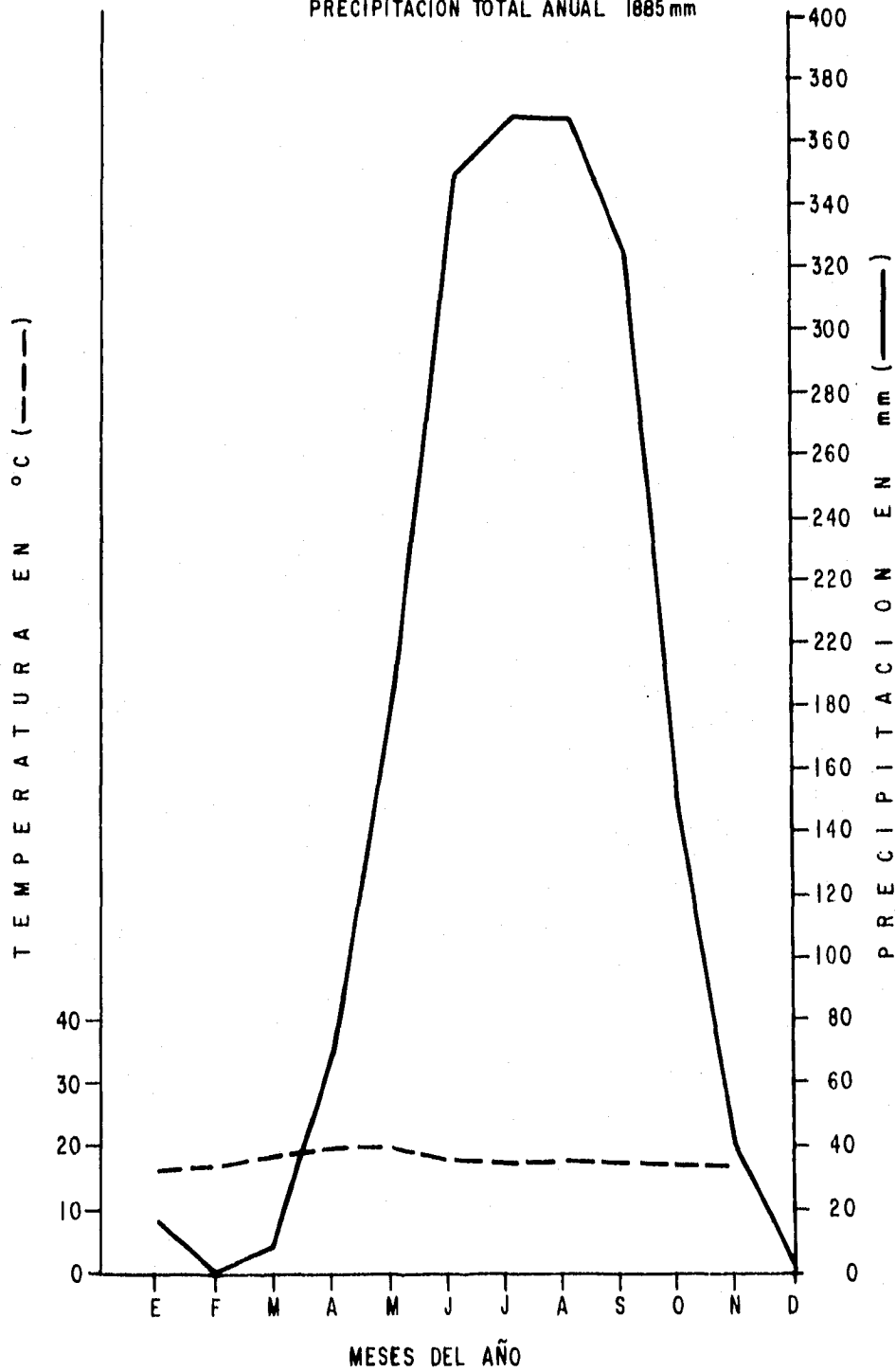
TIPO DE CLIMA Cb (m) (w) Ig

Figura 5-VARIACION MENSUAL DE TEMPERATURA Y PRECIPITACION DE LA ESTACION METEOROLOGICA DE TETELA DEL VOLCAN, MORELOS.

PERIODO DE OBSERVACION: T 7 AÑOS, P 15 AÑOS

TEMPERATURA MEDIA ANUAL 17.2 °C

PRECIPITACION TOTAL ANUAL 1885 mm



pino, pino-encino, bosque de oyamel, madroño, ocotillo, jara, pastizal inducido, agricultura de riego, agricultura de temporal y selva baja caducifolia (Rzedowski, 1978).

La vegetación nativa de la zona de estudio la conforman bosques de encino-pino y vegetación secundaria, también existen huertas de árboles frutales introducidos por el hombre, como son el aguacate, durazno, ciruela, higo, chabacano, pera y manzana, así como productos agrícolas de ciclo corto como el maíz, frijol y jitomate.

8. Uso del Suelo

El estado de Morelos cuenta con posibilidades de uso agrícola de la tierra en aproximadamente más de la mitad de su territorio, en forma mecanizada o con tracción animal y manual. El sistema de gran llano con lomeríos, de la Subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac, no presenta limitantes para llevar a cabo actividades agrícolas con elevados índices de producción.

La agricultura de riego se localiza en los sistemas de lomeríos suaves y pequeños llanos aislados, el agua para riego es suministrada por pozos, ríos, arroyos y manantiales. Los principales cultivos son: caña de azúcar, maíz, frijol, arroz y hortalizas.

La agricultura de temporal, se da bajo climas semicálidos subhúmedos con lluvias en verano, la fertilidad y profundidad de los suelos varían. Los cultivos son anuales, semiperennes y perennes, consisten principalmente en: maíz, frijol, tomate, jitomate y frutales, como el aguacate, higo, pera, manzana y otros (INEGI, 1981).

En la zona de estudio, el principal uso del suelo es agrícola, se considera un 85% de suelo dedicado a la agricultura de tracción animal continua y un 15% a la agricultura mecanizada continua (INEGI, 1981).

IV MATERIALES Y METODOS

1. Gabinete Fase I

1.1. Compilación de la información básica

En esta etapa cabe mencionar que la compilación de la información y de los documentos cartográficos tuvieron como elemento principal reunir, seleccionar y clasificar el material necesario sobre la morfogénesis de suelos con tepetates, evaluando en cada uno la calidad, el nivel del trabajo y la confiabilidad de los resultados obtenidos.

1.2. Cartografía y teledetección de los suelos

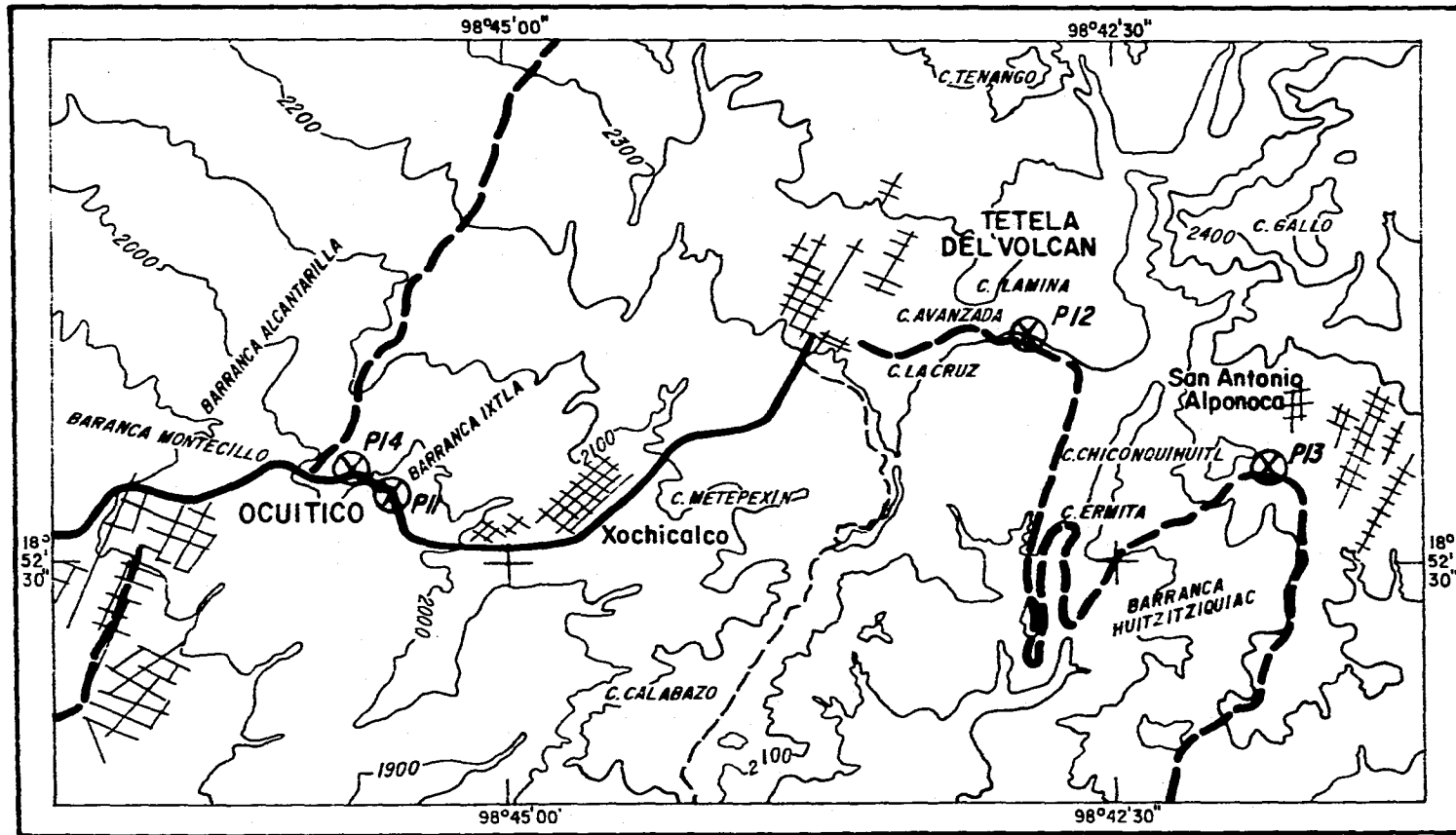
Con el fin de ubicar los sitios de muestreo y con base en el análisis de la actividad volcánica de las unidades terrestres, la geomorfología, las facetas, el clima, la vegetación, el uso del suelo y la degradación ambiental, fue preciso utilizar el método propuesto por el ITC (Van Zuidam, 1979), mediante el examen analógico de imágenes LANDSAT infrarrojo en falso color, de escala 1:250.000; esta información se complementó con la interpretación de fotografías aéreas verticales en blanco y negro, escala 1:30,000. Además, se reunió el material cartográfico de apoyo para el reconocimiento sobre el terreno. Finalmente, fue seleccionada un área piloto en la que fueron analizados varios perfiles de suelos, siendo elegidos los cuatro más representativos.

2. Trabajo de campo

El trabajo de campo consistió en las siguientes actividades:

- 2.1 Recorrido preliminar de la zona de estudio, para verificar los sitios de muestreo detectados en el análisis cartográfico.
- 2.2 Una vez seleccionados los sitios de muestreo de los suelos, se realizó éste de la siguiente forma: (a) fue descrito cada uno de los perfiles, con base en la determinación de horizontes y materiales endurecidos, según el Manual 18, USDA, 1993; (b) fueron recolectadas las muestras de los horizontes, subhorizontes y materiales endurecidos según el caso, obteniéndose un total de 15 muestras correspondientes a cuatro perfiles tipo (Fig. 6).

Figura 6- UBICACION DE LA ZONA DE ESTUDIO



Escala Aprox. 1:50 000

⊗ = PERFIL DE SUELOS

Fuente: S.P.P. 1983.

- 2.3 Se determinó la infiltración en el suelo y en los materiales endurecidos presentes en cada perfil.
- 2.4 Se establecieron diferentes observaciones sobre las características morfogenéticas de esos suelos.
- 2.5 Fueron tomados datos del medio físico como: topografía, pendiente, grado de alteración, actividad agrícola entre otros.
- 2.6 Se recolectaron especímenes de la vegetación nativa e inducida, así como de los principales cultivos de la zona de estudio.
- 2.7 Las muestras de suelo recolectadas fueron trasladadas para sus respectivos análisis al Departamento de Edafología del Instituto de Geología de la U.N.A.M.

3. Preparación de las muestras a temperatura ambiente.

Las muestras recolectadas de suelo y materiales endurecidos, se secaron sobre papel periódico en bancales de cemento en el invernadero a temperatura ambiente. Posteriormente se molieron en un mortero de madera y por último se tamizaron mediante una malla de 2 mm. Con el fin de realizar algunos análisis especiales de cada una de las muestras, se colectaron *pedia* inalterados de diferentes diámetros, los cuales se conservaron intactos para las respectivas pruebas de laboratorio (Soil Conservation Service U.S. Department of Agriculture, 1973).

4. Clasificación morfológica de campo

La clasificación morfológica de campo se realizó mediante el sistema de Bilzi y Ciolkosz (1977), se determinó: (1) el desarrollo relativo de los horizontes, por comparación de dos horizontes adyacentes y (2) el desarrollo relativo del perfil, por comparación de cada horizonte con el material parental o roca madre.

5. Análisis de laboratorio

Los análisis físicos y químicos determinados en las muestras de suelo y materiales endurecidos se basaron en la metodología de USDA-Soil Survey Staff (1988). Que consistió en los siguientes procedimientos.

5.1 Análisis físicos.

- A. Color en seco y en húmedo determinado a través de las tablas de Munsell (1990).
- B. Densidad aparente. Por el método de la parafina de acuerdo con Black, (1965).
- C. Densidad real. Por el método del picnómetro (Baver, 1980).
- D. La porosidad total del suelo, se determinó a través de la relación entre la densidad aparente y la densidad real del suelo.
- E. Clase textural. Determinada por el método de Bouyoucos (1963), Modificado por Villegas y colaboradores (1978).
- F. Distribución del tamaño de partículas, determinada por el método de Day (1965).
- G. Esfericidad y redondez de las partículas minerales. Fracción < 0.1 mm. Mediante la escala de Powers (1953).
- H. Espacio poroso. Determinado de acuerdo a Johnson y colaboradores (1960).
- I. Infiltración, determinada a través de los cilindros concéntricos.

5.2 Análisis mecánico

- A. Estabilidad y/o colapsamiento del material endurecido. Por el método del fragmento dentro del agua (USDA, 1988).
- B. Resistencia a la compresión no confinada. Se determinó en núcleos labrados sujetos a un esfuerzo creciente en una marco de carga (Head, 1984).

5.3 Análisis químicos

- A. Reacción (pH); dilución en agua 1:2.5; determinado en un potenciómetro (Corning modelo 10).
- B. Bases intercambiables; mediante la técnica de NH_4OAc pH7 (Jackson, 1970). Ca^{++} y Mg^{++} fueron determinados por titulación con EDTA. El Na^+ y K^+ por flamometría, en un flamómetro (Corning modelo 400).

- C. Capacidad de intercambio de cationes; por el método de NaOAc, pH 8.2 (USDA, 1994).
- D. Materia orgánica; determinada por el método de Walkley y Black (1947).
- E. Nitrógeno total; por el método de digestión de Kjeldahl (Jackson, 1970).
- F. Carbono-orgánico. Determinado a través de la relación % de materia orgánica del suelo $\times 0.58 = \% C$.
- G. Oxidos totales; por el método de Jackson (1970).
- H. Oxidos libres (SiO_2 , Al_2O y Fe_2O_3); según el método de Mehra y Jackson (1960).
- I. Aluminio intercambiable; mediante el método de Coleman y Colaboradores (1959) y Prat y Bair (1961).

5.4 Análisis mineralógico

- A. Segregación de arcilla (Hexametáfosfato de sodio y oxalato de sodio). Jackson (1970).
- B. Difracción de rayos X; se usó un generador Philips PW 1130/96, con radiación de cobre K, monocromador de grafito, filtro de vanadio y condiciones de excitación de 30kv y 20 mA.

6. Gabinete Fase II

6.1 Ordenamiento y clasificación de los resultados.

Durante esta etapa se procesaron y se integraron todos los resultados generados tanto en gabinete Fase I, como en campo y laboratorio, para obtener una ordenación, clasificación y tabulación de los datos.

6.2 Análisis y discusión.

La interpretación de los datos obtenidos, se basó principalmente en el análisis y discusión, considerando los principios básicos establecidos

por las diferentes escuelas de suelos, particularmente la Francesa, Soil Survey Staff (*op. cit*) y los principios generados por FAO-UNESCO.

6.3 Conclusiones y redacción de la memoria.

Durante esta etapa, se realizaron las conclusiones y redacción de la memoria con base en los datos obtenidos y la información generada en las fases anteriores. Estos razonamientos tienen como premisas los fundamentos de la demostración de las proposiciones que han sido admitidas y probadas para suelos con tepetates en un clima templado subhúmedo.

V. RESULTADOS Y DISCUSION

1. Clasificación Morfológica de Campo.

1.1 Desarrollo relativo de horizontes.

De acuerdo con las propiedades morfológicas de los suelos estudiados, (Tabla 2); se pudo estimar el desarrollo relativo de horizontes (DRH) y del perfil (DRP) utilizándose en forma cualitativa para estimar los cambios morfológicos que se han desarrollado entre los horizontes y el material parental.

En el desarrollo relativo de horizontes (DRH) del perfil 11, el valor que resulta de la comparación de los horizontes AB/B1 fue debido al color y a la presencia de películas de arcilla en el límite B1/B2t, hubo diferencias en la textura, consistencia y en la presencia de películas de arcilla; entre los subhorizontes B2t/Bx se debió al color, estructura, consistencia, y a la separación de subhorizontes; y el valor que resulta de la comparación de los últimos horizontes Bx/BC se debió al color, textura, estructura, consistencia y a la separación de horizontes.

En el perfil 12, el valor obtenido de la comparación de los horizontes AB/B21t fue debido al color y a la consistencia; entre los subhorizontes B21t/B22t hubo diferencias en color, estructura, consistencia y en la separación de subhorizontes; en el límite de B22t/Cqm se obtuvieron diferencias en la estructura, consistencia y también en la separación de horizontes.

El valor obtenido en la estimación del desarrollo relativo de los horizontes BC/Cqm del perfil No. 13 se debió a la textura, estructura y a la separación de los horizontes.

Con respecto al perfil No. 14 el valor que resulta de la comparación de los horizontes AB/B21 fue debido al color y consistencia; entre los subhorizontes B21/B22t se obtuvieron diferencias en la textura, estructura, consistencia y en la presencia de películas de arcilla; en los límites del B22t/BC el valor que resulta de la comparación de estos horizontes se debió al color, textura, estructura y consistencia.

1.2. Desarrollo relativo del perfil.

En el desarrollo relativo del perfil (DRP), los valores altos fueron alcanzados en los

TABLA 2. PROPIEDADES MORFOLOGICAS

PERFIL	HOR.	COLOR ^a	TEXTURA	ESTRUCTURA	CONSISTENCIA	PELICULAS DE ARCILLAS	SEPARACION
11	AB	10YR6/4 10YR5/4	Cr	mi,mf,de	bl fr	--	GRADUAL
	BI	10YR6/6 10YR4/4	Cr	mi,mf,de	bl fr	l,mg,h	GRADUAL
	B2t	10YR6/6 10YR4/3	R	mi,mf,de	du fr	c,g,h	GRADUAL
	Bx	10YR6/4 10YR4/4	Cr	m.	ldu fr	--	ABRUPTO
	BC	10YR6/6 10YR4/3	CrI	mi,f,mo	du fr	--	--
	12	AB	10YR6/6 10YR4/4	Cr	mi,f,de	bl mfr	--
12	B21t	10YR5/4 10YR4/3	Cr	mi,f,de	ldu fr	--	DIFUSA
	B22t	10YR6/6 10YR4/3	Cr	Bsa,mc,mo	du fm	l,dg,h	ABRUPTO
	Cqm	10YR6/6 10YR4/3	Cr	m.	mdu mfm	--	--
13	BC	10YR5/4 10YR4/3	Cr	mi,f,de	du mfm	l,dg,h	ABRUPTO
	Cqm	10YR5/4 10YR4/3	C	m.	du mfm	--	--
14	AB	10YR5/3 10YR4/2	Cr	mi,f,mo	du fr	--	DIFUSA
	B21	10YR6/6 10YR4/3	Cr	mi,f,mo	du fm	l,mg,h	DIFUSA
	B22t	10YR6/6 10YR4/3	CrI	bsa,mc,mo	du mfm	c,g,h	DIFUSA
	BC	10YR6/6 10YR4/4	Cr	bsa,f,mo	mdu mfm	--	--

- a. En primer término aparece la determinación en seco, en segundo en húmedo.
 C, textura franca; Cr, franco arcillosa; R, arcilla; CrI, franco arcillo-limosa; mi, migajosa; m, masiva; bsa, bloques subangulares; mf, muy fina; f, fina; g, gruesa; de, débil; mo, moderada; bl, blanda; fr, friable; mfr, muy friable; ldu, ligeramente dura; du, dura; mdu, muy dura; fm, firme; mfm, muy firme; l, zonales; c, continuas; dg, delgadas; mg, moderadamente gruesa; h, horizontal.

horizontes superficiales (Tabla 3); en el perfil 11 en el horizonte AB/BC las diferencias obtenidas se debieron al color, textura, estructura, consistencia y a la separación de horizontes; con respecto al horizonte B1/BC el valor estimado se debió a la textura, estructura y separación de los horizontes, y en los horizontes B2t/BC a textura y estructura; en los límites de Bx/BC la diferencia fue debido al color, textura, estructura, consistencia y separación de horizontes.

Con respecto al perfil 12, los valores obtenidos en la comparación de los horizontes AB/Cqm se debieron a las diferencias de la estructura y la consistencia; en los horizontes B21t/Cqm se registraron diferencias en color, estructura y consistencia y en los horizontes B22t/Cqm los valores obtenidos fueron el resultado de las diferencias de la estructura, consistencia y la separación de los horizontes.

En el perfil 13, el valor obtenido del desarrollo relativo del perfil se debió a la comparación de los horizontes BC/Cqm obteniéndose diferencias en textura, estructura y separación de los horizontes.

En el perfil 14, se obtuvieron diferencias tanto en color, como en estructura y en la consistencia en los horizontes AB/BC; con respecto a los B21/BC el resultado de la comparación fue debido al color, estructura, y consistencia; en los límites de B22t/BC las diferencias fueron debidas a color, textura, estructura y consistencia.

Según Meixner y Singer (1981), los suelos jóvenes, no diferenciados, alcanzan valores de DRH menores que 10; y las evolucionadas mayores que 10, en este estudio dominaron los valores menores que 10, excepto uno mayor que este, lo que indica que son suelos con procesos de rejuvenecimiento en donde su diferenciación morfológica no es muy marcada.

La haploidización de las características morfológicas, de estos suelos a través del tiempo, propician un aparente valor bajo que incorrectamente los ubica como suelos poco evolucionados. Pero en realidad se trata de perfiles fuertemente argilizados sin características contrastantes bien delimitadas, que manifiestan un nivel de evolución (Figuras 7 y 8). Así se trata de suelos policíclicos, suelos truncados o suelos degradados por la erosión o sepultamiento (de edad pleistocénico, Solleiro 1992), y que han sido sometidos a nuevos procesos edafogénicos, como es el caso de los suelos estudiados, estos valores (Bilzi y Ciolkosz, 1977) tienden a hacer menores que los que realmente poseen. Los suelos argílicos son altamente evolucionados, sin embargo los procesos caóticos como la periglaciación, el

TABLA 3 **CLASIFICACION MORFOLOGICA**

PERFIL	HORIZONTE	DRH	HORIZONTE	DRP
11	AB/B1	4	AB/BC	10
	B1/B2t	8	B1/BC	7
	B2t/Bx	10	B2t/BC	4
	Bx/BC	9	Bx/BC	9
12	AB/B1	6	AB/Cqm	8
	B21/B22t	12	B21t/Cqm	8
	B22t/Cqm	8	B22t/Cqm	8
13	BC/Cqm	5	BC/Cqm	5
14	AB/B21	6	AB/B	11
	B21/B22t	8	B21/BC	6
	B22t/BC	4	B22t/BC	4

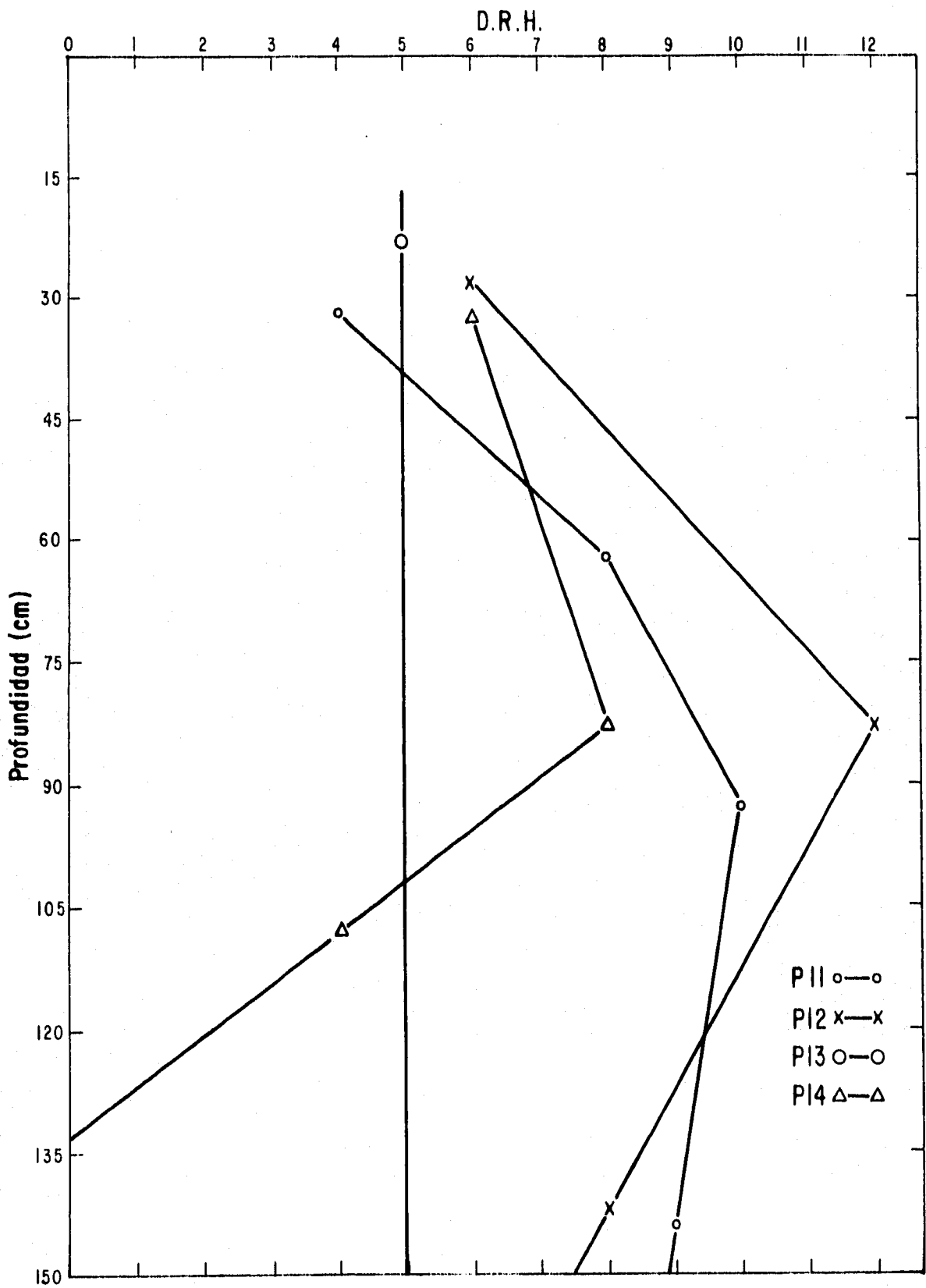


Figura 7-CLASIFICACION DEL DESARROLLO RELATIVO DE LOS HORIZONTES

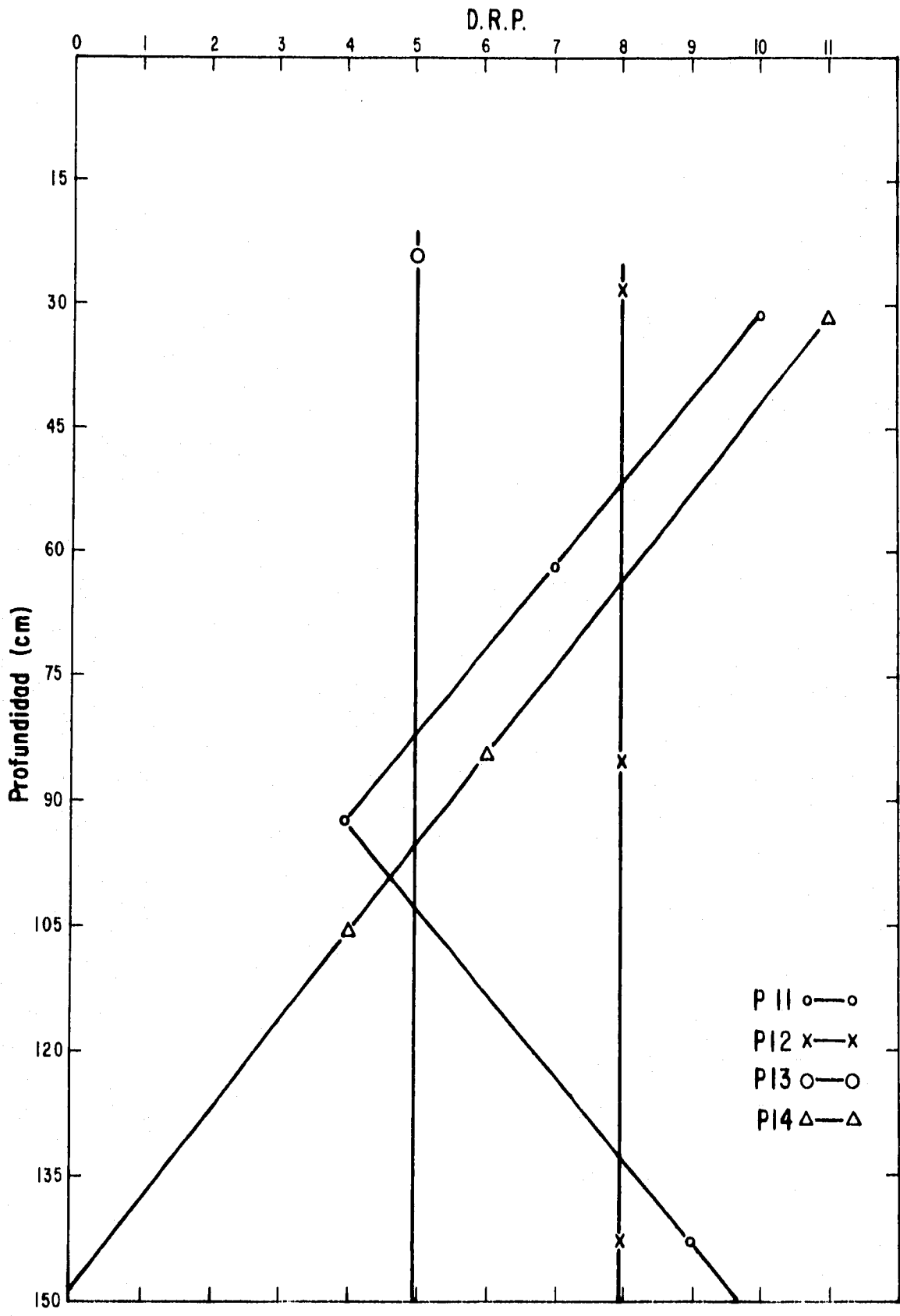


Figura 8.- CLASIFICACION DEL DESARROLLO RELATIVO DE LOS PERFILES

vulcanismo, tectonismo o erosión tienden a la haploidización en el perfil de estos suelos. Consecuentemente en un suelo háplico los valores de Bilzi y Ciolkosz tienden a minimizarse.

2. Propiedades Físicas

2.1. Distribución del tamaño de las partículas

Arcilla

En la Tabla 4, se presentan los resultados del análisis granulométrico en los perfiles estudiados. Por lo que los contenidos de arcilla en el perfil 11 muestran homogeneidad, con porcentajes de 36 en los horizontes superficiales AB y B1, y en el horizonte más profundo BC con 39.4 de arcilla, en el subhorizonte B2t se marca considerablemente una acumulación de arcilla, debido a la migración de esta, formando un horizonte de iluviación o argílico. Dentro de éste, a la profundidad de 93-144, se observa una disminución en el contenido de arcilla (30.0%), encontrándose un subhorizonte Bx, es decir un horizonte B con fragipán; éste se considera como un fragipán típico, con cierto nivel de dureza y fragilidad a la vez, (Soil Survey Staff, 1990).

Con respecto al perfil 12 (Tabla 4), se observa que el contenido de arcilla en el horizonte superficial AB es de 31.9 %. Además se hace notar que existe una migración de arcilla hacia los subhorizontes B21t con un porcentaje de 35.7 y un contenido más alto de arcilla, el B22t (36.8%) propiciando la formación de un horizonte argílico.

Subyace al subhorizonte B2t el Cqm, un horizonte cementado por sílice conocido como duripán (Soil Survey Staff, 1990). Este duripán se constituyó a partir de tobas andesíticas que preexisten a materiales que se consolidaron y cementaron desde su depósito, pero que posteriormente han recibido aportes silíceos de piroclastos más recientes (Fries, 1965; Flores *et al.*, 1992).

Como se observa en la Tabla 4, el perfil 13 presenta dos horizontes el BC y Cqm con contenidos de arcilla de 29.9 y 24.4% respectivamente. Esto manifiesta un alto grado de perturbación humana, a tal grado que el horizonte BC ha quedado reducido a 24 cm de espesor, subyaciendo a este el horizonte Cqm que es un duripán. Es indudable que aquí se presentan consecuencias de una erosión severa, es muy probable que este perfil antes de ser erosionado presentara características muy similares a las de los perfiles antes discutidos.

A diferencia de los otros perfiles, el horizonte Cqm es el que menor porcentaje de arcilla presenta, esto probablemente se debe a que parte de la arcilla original se perdió por lavado.

El perfil 14 muestra un incremento en el porcentaje de arcilla de 82-108 cm próximo al 20% que lo sitúa dentro de las características de un horizonte argílico. A medida que se incrementa la profundidad los porcentajes de arcilla decrecen.

Limo

En el perfil 11 en la fracción limo grueso (0.050-0.020 mm), se registraron valores muy heterogéneos (Tabla 4), observándose en el horizonte B2t y BC una acumulación de limo grueso, además de ser nula la presencia de este en el fragipán. La fracción limo medio sólo se presenta en los subhorizontes B2t, Bx y horizonte BC, se hace notar que en el fragipán hay acumulación de esta fracción. La fracción de limo fino, se presenta en todos los horizontes, los valores más altos se registraron en los horizontes AB y B1 y los más bajos en los inferiores. En todo el perfil se presentaron porcentajes totales de limo de 37.5-43.0.

Los resultados de limo obtenidos en el perfil 12 en los horizontes AB, B21t, B22t y Cqm, en la fracción gruesa cubrieron un intervalo de 7.7-18.63% observándose un incremento en el horizonte AB y Cqm en la fracción media y en la fracción fina los resultados obtenidos fueron los más bajos, siendo la fracción de limo grueso y medio las que más contribuyeron al porcentaje total de limo en el perfil.

En el perfil 13 se muestra una homogeneidad en los resultados obtenidos contribuyendo proporcionalmente las tres fracciones de limo (grueso, medio y fino) al porcentaje total de limo en los horizontes BC y Cqm.

Los valores de limo grueso obtenidos en el perfil 14 fluctuaron de 2 a 14.5%; en la fracción media cubrieron un intervalo de 10 a 16.5 y en la fracción fina de 4.5 a 13.6%; en este perfil cabe destacar que los valores menores en las tres fracciones se registraron en el horizonte AB, también se observó un incremento de las tres fracciones de limo en los subhorizontes B21t y B22t. En relación a los contenidos de limo total no fueron mayores al 44%, ni menores al 20%, lo cual coincide con algunos autores que han reportado hasta el 50% de estas partículas del suelo (Rutledge y Horm, 1965) y menores al 30% (McCrackern y Weed, 1963).

2.2 Esfericidad y redondez de las partículas minerales

La esfericidad y redondez solamente se determinó en las partículas de limo, y arena muy fina, debido a que estas se derivan directamente de los minerales primarios los cuales constituyen el material parental.

En relación con la redondez, determinada en las partículas de los perfiles en estudio, los valores obtenidos se presentan en la Tabla 4.

En el perfil 11 dominaron los valores correspondientes a la clase subangular y la siguieron en orden de importancia los porcentajes de partículas subredondeadas, todas las partículas presentaron baja esfericidad, posiblemente debido al medio y el modo de transporte.

En los perfiles 12 y 14 se obtuvieron valores altos en la clase subangular y los porcentajes obtenidos en la clase subredondeada fueron más bajos que los anteriores y todas las partículas presentaron baja esfericidad.

El perfil 13 pese a ser un perfil truncado presenta características muy similares a los perfiles anteriores.

Considerando que la esfericidad y la redondez de los granos dependen del medio y del modo de transporte (Reineck y Singh, 1980), para este estudio y con base en las evidencias que representa la mayor proporción de partículas con esfericidad baja y redondez subangular, estos materiales deben su forma a su depósito *in situ*, es decir que estuvieron poco afectados por el transporte desde el lugar de la eyección hasta su localización actual; sin embargo no son totalmente angulares, lo que implica que ya en su lugar sufrieron ciertos procesos de desgaste y alteración que propiciaron la forma actual. Lo anterior pudo haber sido causado por efectos de compresión y lavado excesivo por el peso de la nieve y posteriormente deshielo, lo que conlleva a efectos glaciación (Lugo, 1984 y Flores *et al.*, 1992).

2.3 Densidad aparente, densidad real y porosidad total

En la Tabla 4, se presentan estas propiedades físicas determinadas en los perfiles estudiados.

La densidad aparente en el perfil 11, fluctuó de 0.9 a 1.1 g/cm³, a pesar, de que no

hay una diferencia significativa, entre los horizontes del perfil, es posible observar que se tiende a presentar una densidad más alta en el horizonte más profundo (BC), que en el fragipán (Bx) que sobreyace a éste, posiblemente se deba, a la estratificación original de los materiales.

En relación con la densidad aparente de los perfiles 12 y 13 presentaron valores de 1.3 a 1.5 y 1.1 a 1.7 g/cm³ respectivamente, siendo el valor dominante 1.4 g/cm³ en el perfil 12, lo cual significa que, dado que son horizontes arcillosos, la acumulación de las partículas no ha permitido que haya mucha porosidad, como se refleja en los valores obtenidos. Con respecto a los duripanes (Cqm) de ambos perfiles, presentan densidades de 1.5 a 1.7 g/cm³, debido posiblemente a la cementación principalmente de sílice (Nimlos 1989, Flores *et al.*, 1992). Los valores reportados para el perfil 14, fueron muy similares en los cuatro horizontes, fluctuando de 1.1 a 1.3 g/cm³, siendo el valor dominante el 1.1 g/cm³.

En la densidad real no existe una tendencia definida en los resultados. En el perfil 11 los valores obtenidos fluctúan de 1.9 a 2.3; en el subhorizonte intermedio (B2t) la densidad real se incrementa, en relación con el superficial (AB) y decrece en el fragipán (Bx). En el perfil 12 los valores obtenidos cubrieron un intervalo de 2.1 a 2.5, siendo el 2.4 el valor predominante; las densidades registradas en el perfil 13 fueron muy homogéneas 2.2 a 2.3 g/cm³. Con respecto al perfil 14 sus densidades cubrieron un intervalo de 2.0 a 2.5, decreciendo sus valores a partir del horizonte superficial (AB) hasta el más profundo (BC). Los resultados obtenidos en estos cuatro perfiles tipo, son típicos de minerales volcánicos principalmente ferromagnesianos. Debe recordarse que aunque estos suelos no son Andicos, han estado sujetos a aportes recientes de piroclastos (Alvarez, 1982 y Aguilera 1989).

En general los porcentajes de porosidad total disminuyen con la profundidad (Tabla 4), en el perfil 11 el valor más bajo se registró en el fragipán (Bx). Los duripanes correspondientes a los perfiles 12 y 13, muestran una reducción en la porosidad total, lo cual es debido a la obstrucción de compuestos amorfos (Flores *et al.*, 1992).

En el perfil 14 se registraron valores, que cubren un intervalo de 56-39%, disminuyendo con la profundidad. Los porcentajes obtenidos de porosidad total coinciden con los porcentajes reportados en suelos de origen volcánico por Alvarez (1982) y Aguilera (1989).

TABLA 4

PRINCIPALES PROPIEDADES FISICAS

PERFIL	HOR.	PROF.	DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE LAS PARTICULAS (mm)										VALORES DE REDONDEZ EN LIMO Y ARENA MUY FINA %			DENSIDADES Y POROSIDAD TOTAL %			
			ARENA %						Limo %				Arcilla %	A*	SA	SR	DA	DR	PT
			2-1	1.0-0.5	0.5-0.25	0.25-0.1	0.1-0.05	Tot.	0.05-0.02	0.020-0.005	0.005-0.002	Tot.	<0.002						
11	AB	0-32	0.33	1.89	3.47	9.00	11.31	26.00	1.63	0.00	37.87	37.50	36.5	11	58	31	0.9	2.0	52
	B1	32-62	0.59	1.07	3.00	10.13	11.21	26.00	3.00	0.00	35.00	38.00	36.0	10	59	31	1.0	2.0	50
	B2t	62-93	0.04	1.08	1.84	6.80	8.84	18.60	15.60	14.40	7.90	37.90	43.5	10	56	34	0.9	2.3	60
	Bx	93-144	0.25	2.25	4.20	11.40	14.90	33.00	0.00	25.00	12.00	37.00	30.0	13	62	25	1.0	1.9	47
	BC	144-210	0.09	0.92	1.55	6.70	8.34	17.60	13.50	18.10	11.50	43.00	39.4	10	51	39	1.1	2.0	48
12	AB	0-28	2.65	5.11	5.32	12.56	12.94	38.58	18.00	9.88	1.64	29.52	31.9	15	75	10	1.4	2.4	41
	B21t	28-84	1.84	3.50	4.10	12.51	13.12	35.07	6.30	18.72	4.21	29.23	35.7	25	51	24	1.3	2.5	48
	B22t	84-142	4.11	3.94	3.33	9.71	11.29	32.36	7.73	13.59	9.52	30.84	36.8	20	61	19	1.4	2.1	37
13	Cqm	142-160	2.00	4.60	4.00	12.00	11.00	33.60	10.70	11.36	1.10	34.10	32.3	20	59	21	1.5	2.4	33
	BC	0-24	1.20	5.00	5.70	9.10	12.10	33.10	6.90	16.00	14.10	37.00	29.9	29	64	7	1.1	2.2	49
14	Cqm	24 +	1.43	11.53	9.77	11.31	9.56	43.60	11.64	18.41	1.95	32.00	24.4	13	66	21	1.7	2.3	25
	AB	0-35	2.80	3.00	4.70	15.20	19.00	44.70	2.00	10.00	9.00	21.00	34.2	13	70	17	1.1	2.5	56
	B21	35-82	0.80	2.50	3.00	9.94	13.75	30.00	12.70	10.10	9.20	32.00	38.0	15	55	30	1.1	2.2	49
	B22t	82-108	0.60	1.00	1.48	6.67	9.15	18.90	12.40	14.70	13.60	40.70	40.4	13	63	24	1.3	2.1	45
	BC	108-240	1.80	3.50	3.30	11.30	8.20	28.10	14.50	16.50	4.50	35.50	36.4	11	55	34	1.1	2.0	39

A* = Angular; SA = subangular; SR = subredondeado; DA = densidad aparente; DR = densidad real.

2.4 Caracterización del espacio poroso

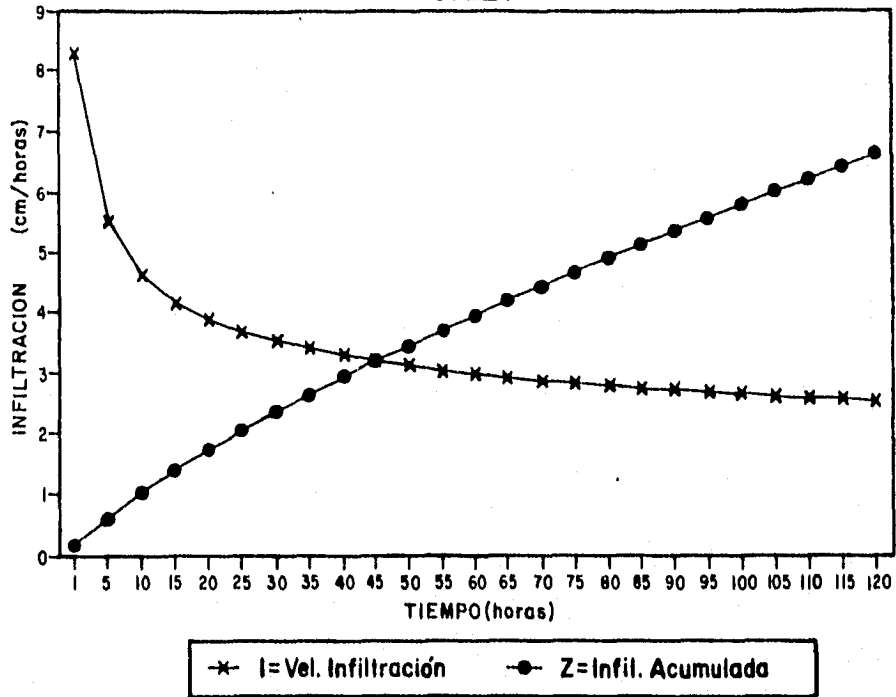
El estudio de los poros permitió conocer los niveles de iluviación y el grado de obstrucción de los mismos en el suelo y los materiales endurecidos. En los horizontes que sobreyacen al fragipán, del perfil 11 el espacio poroso manifestó características muy similares: poros abundantes, más de 200 por dm^2 , diámetro dominante microporos, inferior a 0.075 mm con porcentajes de 67, 70 y 74% en el horizonte AB y subhorizontes B1 y B2t respectivamente, distribución imped, morfología intersticial, continuos y abiertos. En el fragipán y el horizonte que lo sobreyace presentaron las mismas características: poros abundantes, más de 200 por dm^2 , diámetro dominante microporos, inferior a 0.075 con porcentajes más altos que los horizontes superficiales (87%), distribución imped, morfología intersticial, continuos y abiertos. Se obtuvieron características muy semejantes entre los perfiles 12 y 13, el espacio poroso se registró como: poros abundantes, más de 200 por dm^2 , diámetro dominante, microporos, inferior a 0.075 mm, observándose disminución del diámetro 0.07 a 1 mm y aumentando ligeramente el diámetro menor en los duripanes de ambos perfiles, su distribución fue imped, morfología intersticial, continuos y abiertos. El espacio poroso del perfil 14 mostró similitud con las características que presentó el perfil 11.

Las características comunes en el fragipán del perfil 11 y los duripanes de los perfiles 12 y 13 fueron disminución de poros en los diámetros 0.075 a 1 mm y aumento a nivel microporo, lo cual se explica porque se presenta compactación, situación que produce una reducción de espacio poroso (Yassoglau y Whiteside, 1960). Por otra parte, dado que son materiales volcánicos, el intemperismo del vidrio volcánico ha provocado la migración de la sílice, la cual se acumuló principalmente en las partes más profundas, con la consecuente reducción y obstrucción del espacio poroso (Flach *et al.*, 1969).

2.5 Infiltración e infiltración acumulada

En relación con la infiltración, los valores obtenidos tanto de velocidad, como de infiltración acumulada de este estudio se presentan en las Figuras 9, 10 y 11. En la velocidad de infiltración, los valores observados en el suelo del perfil 11 fueron más altos que aquellos del fragipán, lográndose observar que en el fragipán fue disminuyendo considerablemente la velocidad de infiltración de acuerdo a la disminución del volumen de agua utilizada para la prueba con relación al tiempo, lo cual explica la saturación y la escasa porosidad del fragipán.

Figura 9- INFILTRACION EN EL PERFIL II SUELO



INFILTRACION EN EL PERFIL II FRAGIPAN

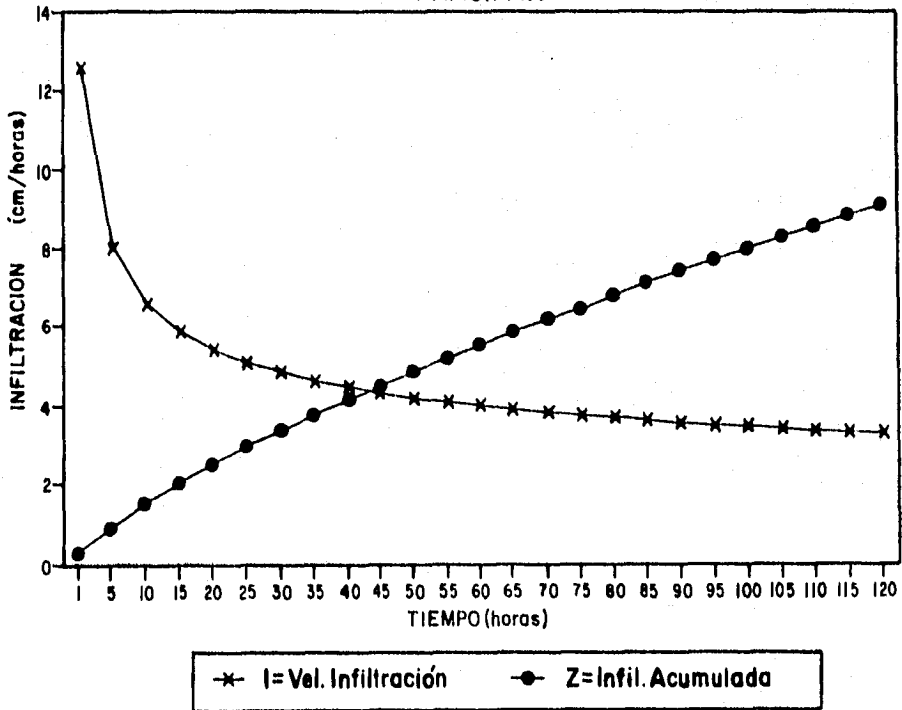
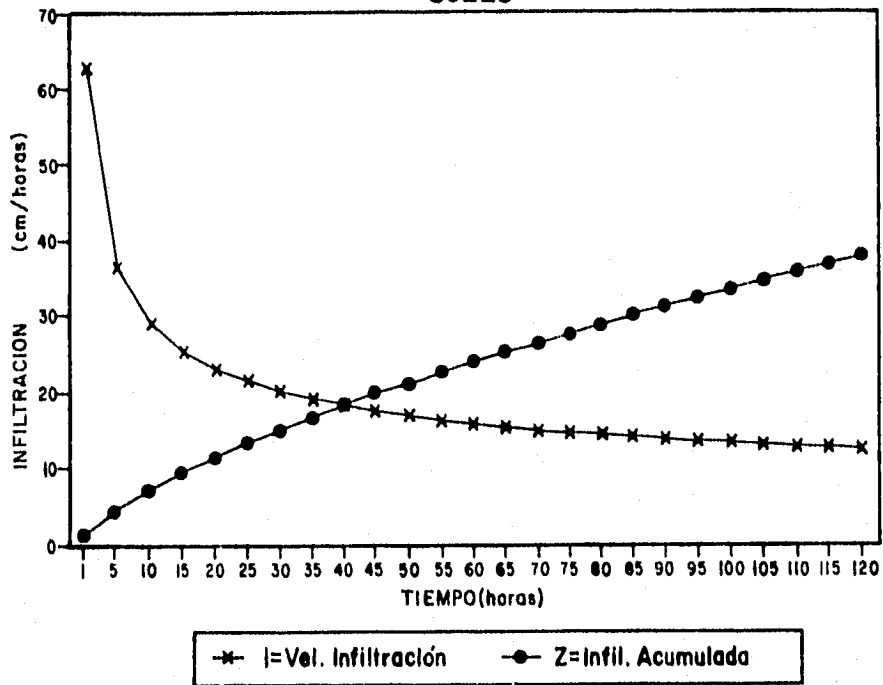


Figura 10- INFILTRACION EN EL PERFIL 12
SUELO



INFILTRACION EN EL PERFIL 12
TEPETATE

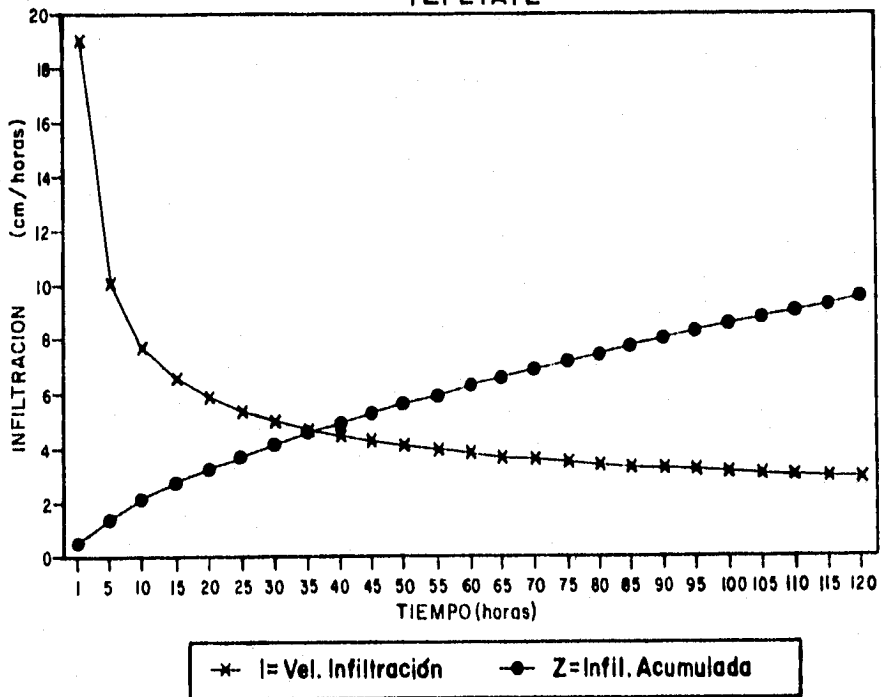
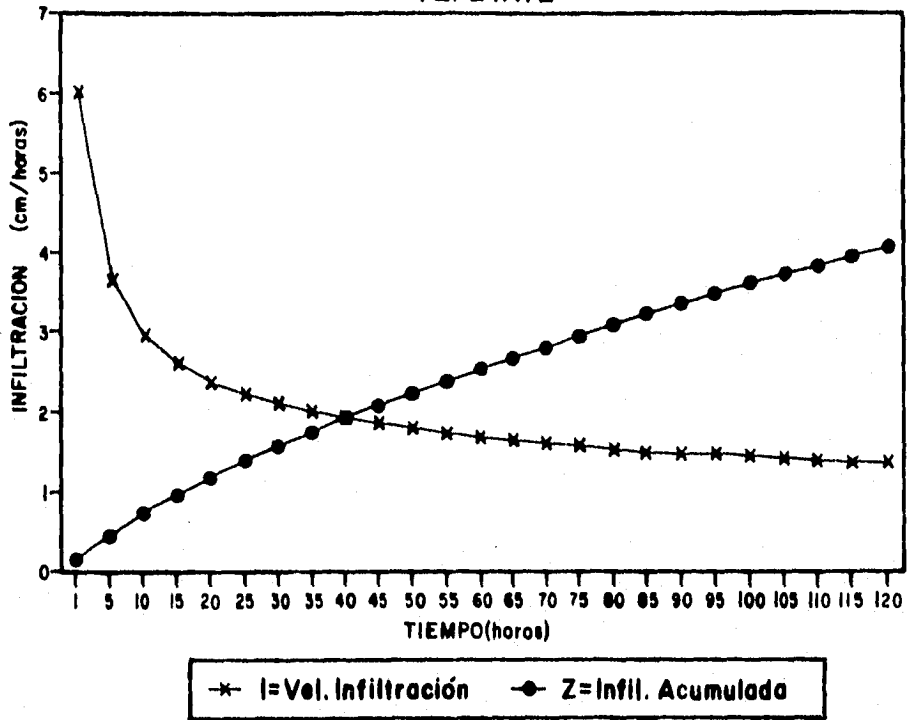
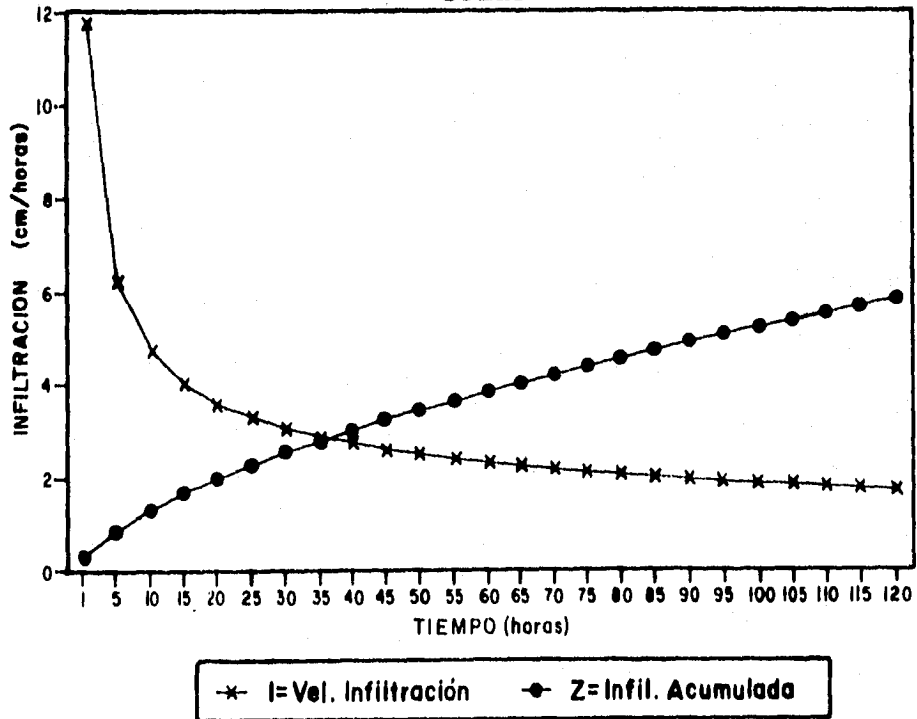


Figura II-

INFILTRACION EN EL PERFIL 13
TEPETATE



INFILTRACION EN EL PERFIL 14
SUELO



El perfil 12 presentó variación en la velocidad de infiltración, sobre todo en el suelo, en donde se utilizó mayor volumen de agua, debido a la presencia del duripán y a su inclinación, lo cual provocó drenaje lateral interno. En relación al duripán la velocidad manifestó una diferencia muy pronunciada con respecto al desplazamiento del agua, disminuyendo considerablemente el volumen con relación al tiempo.

La velocidad de infiltración registrada en el perfil 13 se llevó a cabo solamente en el duripán. El comportamiento del agua fue típico de estos materiales, ya que la velocidad de infiltración fue muy lenta y en el suelo fue imposible realizar la prueba debido a lo somero del mismo y la inclinación del duripán que provocó drenaje lateral e imposibilidad de saturación del *solum*.

En el perfil 14, la velocidad de infiltración se llevó a cabo solamente en el suelo, este perfil no presentó material endurecido. La velocidad de infiltración en este perfil tuvo un comportamiento inicial alto, decreciendo el desplazamiento del agua en relación al tiempo. La infiltración acumulada manifestó un comportamiento muy similar al perfil 11.

3. Análisis Mecánicos

3.1 Estabilidad de un fragmento de material endurecido en el H₂O y en una solución de KOH (30%).

Esta prueba dio los resultados siguientes: el pan del perfil 11 se fracturó inmediatamente al ser sumergido al agua, desprendiéndose fragmentos pequeños hasta colapsarse totalmente, esto indica la presencia de un fragipán en el perfil 11 muy débilmente cementado. El fragmento del pan del perfil 12, no sufrió ningún cambio al sumergirse en el agua y el material endurecido del perfil 13, no registró ningún cambio.

El tratamiento con KOH al 30%, se aplicó solamente al material endurecido correspondiente al perfil 12, éste se fracturó y posteriormente se colapso en aproximadamente 20 minutos. Con respecto al pan del perfil 13, se observó que el fragmento se colapso inmediatamente al ser sumergido en KOH al 30%, lo cual indica que son duripanes cementados por sílice, ya que el álcali fuerte ataca a los materiales silíceos.

3.2 Resistencia a la compresión no confinada

En el material endurecido del perfil 11, el núcleo labrado fracturó con 1.2 kg/cm^2 , con una deformación de 1%. Este resultado confirma la condición de un fragipán muy débilmente cementado (Figura 12).

El pan del perfil 12, aunque cementado no necesitó mucho esfuerzo para fracturarse ya que con 8 kg/cm^2 terminó su resistencia a la compresión. Sin embargo su deformación axial unitaria fue muy reducida, 0.09% (Figura 13).

El pan del perfil 13 resultó ser el material más duro, ya que se necesitó un esfuerzo de 24 kg/cm^2 para romperlo, con una deformación axial unitaria mínima de 0.07% (Figura 14).

Es indudable que esta prueba permitió confirmar las definiciones de fragipán y duripán, ya que el primero necesitó de muy poco esfuerzo para romperse y los últimos de un esfuerzo mayor para colapsarse lo cual esta en relación a la menor y mayor concentración de cementante silícico presente respectivamente.

4. Análisis Químicos

4.1 Pérdidas y ganancias de óxidos totales.

En el perfil 11, puede observarse que el intemperismo que han venido sufriendo los horizontes, en relación a la roca madre, sobresale lo siguiente: en el subhorizonte Bx se registró una ganancia de 5.40% en los óxidos de silicio (SiO_2), debido posiblemente a una desilificación de los horizontes superiores, así como a la disolución de materiales piroclásticos recientes como el vidrio volcánico (Tabla 5).

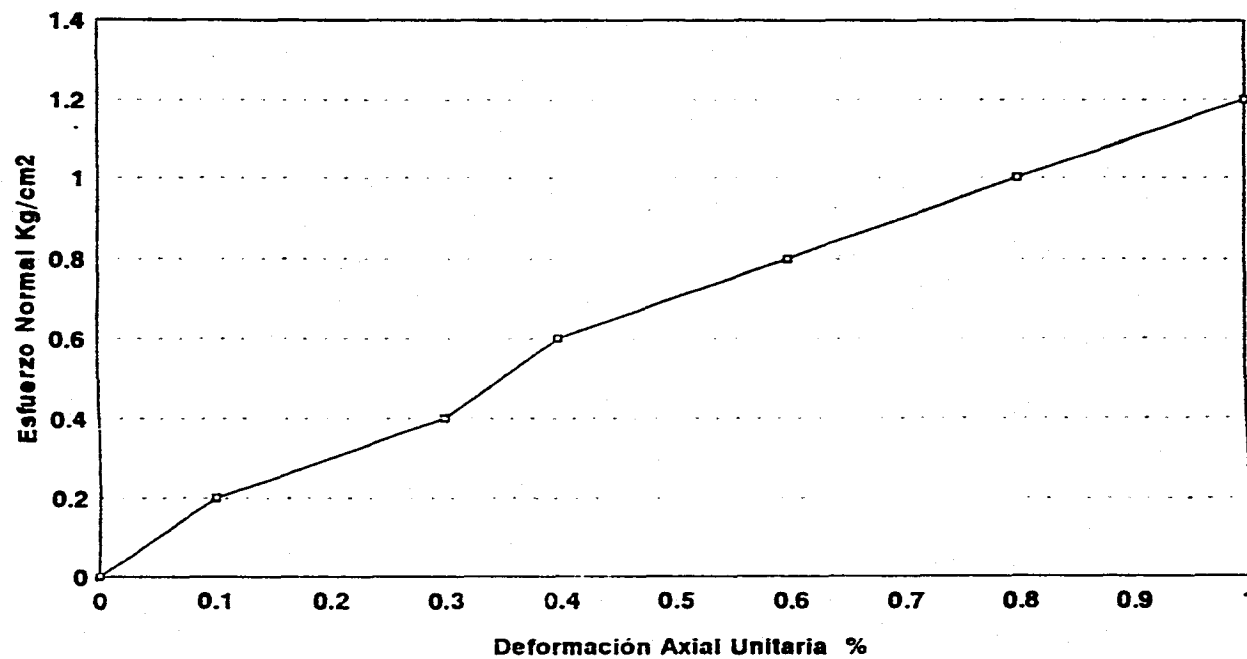
En el subhorizonte B2t se obtuvo una ganancia de SiO_2 de 4.64%, lo cual indica un proceso de lixiviación y un depósito de la sílice en forma inestable en este subhorizonte.

En el horizonte superficial (AB) la sílice registró los valores más altos con una ganancia de 8.09%, debido principalmente al aporte externo de materiales volcánicos recientes.

En este mismo perfil en relación a los óxidos de hierro, su presencia esta relacionada a materiales ferromagnesianos sujetos a procesos de disolución e hidrólisis, lo cual repercute en las pérdidas o ganancias manifiestas.

FIGURA NO12

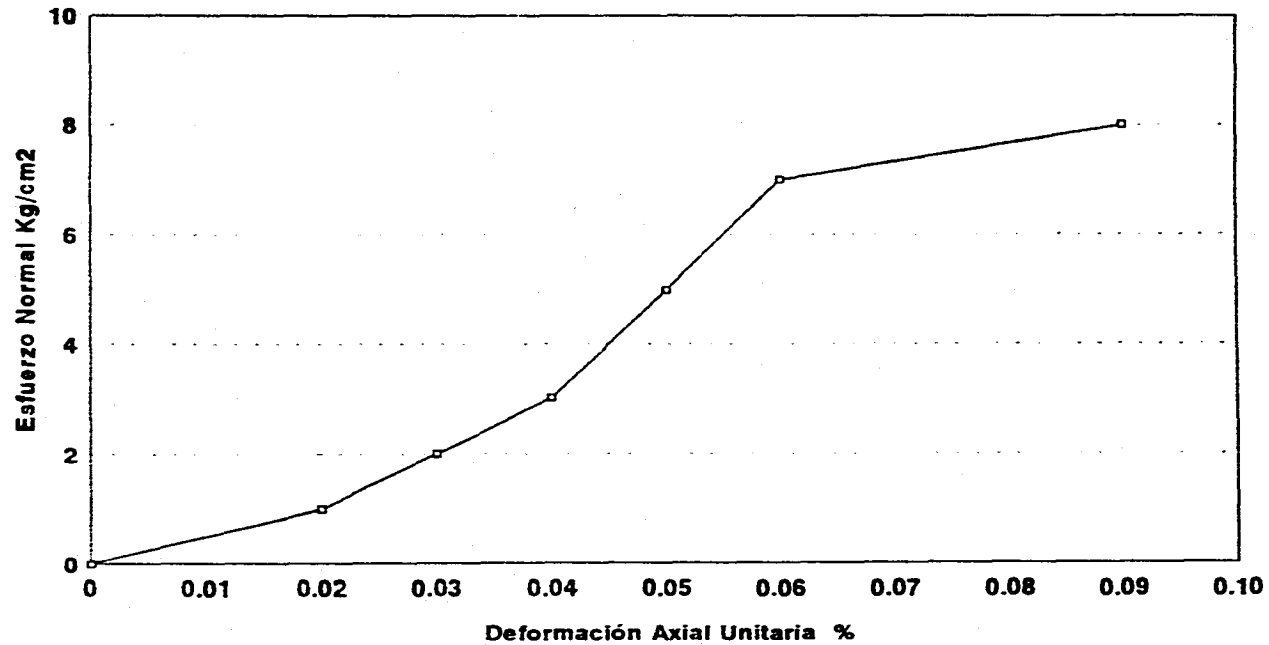
RESISTENCIA A LA COMPRESION NO CONFINADA MUESTRA P-11



Características de la Muestra:
Diámetro Medio 3.5 cm., Altura Promedio 9.2 cm.
Contenido de Agua 15%

FIGURA NO 13

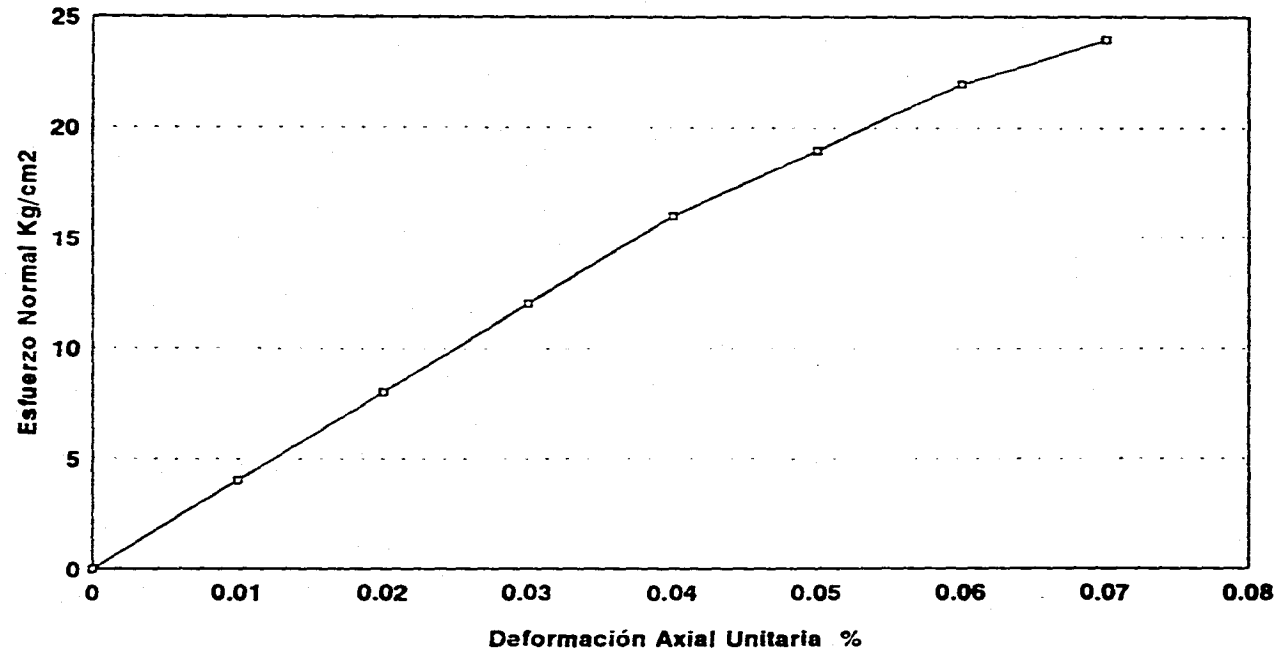
RESISTENCIA A LA COMPRESION NO CONFINADA MUESTRA P-12



Características de la Muestra:
Diámetro Medio 3.8 cm., Altura Promedio 8.5 cm.
Contenido de Agua 14%

FIGURA NO. 14

**RESISTENCIA A LA COMPRESION NO CONFINADA
MUESTRA P-13**



Características de la Muestra:
Diámetro Medio 3.6 cm., Altura Promedio 9.4 cm.
Contenido de Agua 8%

**TABLA 5. PERDIDAS O GANANCIAS DE LOS HORIZONTES
INTEMPERIZADOS EN RELACION CON LA ROCA BASAL
PERFIL 11**

OXIDOS TOTALES	HORIZONTES				Bx·K de Al ₂ O ₃	B2t·K de Al ₂ O ₃	AB·K de Al ₂ O ₃	PERDIDAS Y GANANCIAS		
	144-210 BC	93-144 Bx	62-93 B2t	0-32 AB				Bx	B2t	AB
SiO ₂	41.12	45.00	44.80	46.04	47.52	46.76	50.21	+5.40	+4.64	+8.09
TiO ₂	0.07	0.07	0.07	0.08	0.07	0.07	0.08	0.0	0.0	+0.01
Al ₂ O ₃	24.30	23.00	22.86	22.28	24.30	24.30	24.30	0.0	0.0	0.0
Fe ₂ O ₃	6.40	5.63	6.02	5.82	5.94	6.34	6.56	-0.46	-0.22	-0.46
FeO	1.57	2.09	1.83	2.09	2.20	1.94	2.27	+0.63	+0.37	+0.70
MnO	0.09	0.10	0.10	0.11	0.10	0.10	0.11	+0.01	+0.01	+0.02
MgO	0.48	1.36	0.64	0.52	1.43	0.67	0.56	+0.95	+0.19	+0.08
CaO	2.09	2.65	2.90	2.85	2.79	3.08	3.10	+0.70	+0.99	+0.76
Na ₂ O	1.60	1.90	1.96	1.94	2.00	2.11	2.12	+0.40	+0.48	+0.52
K ₂ O	0.30	0.35	0.35	0.40	0.36	0.37	0.43	+0.06	+0.07	+0.13
P ₂ O ₅	0.18	0.18	0.18	0.13	0.19	0.19	0.14	+0.01	+0.01	-0.04
SO ₃	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
CO ₂	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
H ₂ O'	9.04	7.99	7.64	7.58	8.43	8.12	8.26	0.61	-0.92	0.78
H ₂ O	11.76	9.68	11.45	10.16	10.22	12.17	11.08	1.54	+0.41	-0.67
TOTAL	100.00	100.00	100.00	100.00	105.53	106.21	109.21			

La constante (K) de aluminio se obtiene de dividir el porcentaje de aluminio de la roca inalterada (BC) entre el porcentaje de aluminio de la roca alterada (Bx, B2t y AB). 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.

Para el manganeso, magnesio, calcio, sodio, potasio y fósforo se presentan ganancias en los dos subhorizontes Bx, B2t y en el horizonte AB, observándose desde bajas cantidades, hasta trazas, y se atribuyen a la misma alteración de los materiales volcánicos tanto ferromagnesianos como de feldespatos (Duchaufour, 1984).

Las pérdidas o ganancias de óxidos totales registradas en el perfil 12, en los horizontes B22t y AB con relación al horizonte Cqm, se manifestaron principalmente como pérdidas en todos los óxidos totales, a excepción de los óxidos de titanio en el B22t y los óxidos de manganeso y de potasio en el horizonte AB, lo cual puede deberse a una pérdida por acarreo debido, particularmente a la topografía abrupta de la zona donde se ubica este perfil (Tabla 6).

Con respecto al perfil 13 las ganancias más importantes de óxidos de silicio se observan en el horizonte BC debido posiblemente a depósitos correspondientes a eyecciones de piroclastos recientes que han aportado la sílice en forma lábil sin alcanzar al duripán (Tabla 7).

En el resto de los óxidos se manifiestan principalmente ganancias, pero las cantidades son muy bajas de tal manera que el intemperismo de estos materiales volcánicos, considerando lo perturbado de estos suelos, se ha manifestado en forma irregular sin definir alguna tendencia.

En la Tabla 8, puede observarse el intemperismo que han venido sufriendo los horizontes del perfil 14 con los valores obtenidos de pérdidas y ganancias de los óxidos totales.

En el subhorizonte B22t pese a ser un horizonte de acumulación, las ganancias son muy bajas, principalmente las de óxidos de sílice, hierro, magnesio, sodio, potasio y fósforo, lo cual se debe hipotéticamente hablando a que, tales óxidos son drenados debido al micro-relieve del sitio (Flores *et al.*, 1992; Flores *et al.*, 1995).

En el horizonte AB se presenta como importante la ganancia de sílice debido a la alteración de los piroclastos más recientes, en los demás óxidos dominan las ganancias pero a semejanza de los perfiles anteriores, su proporción es muy baja y quizá influya el drenaje que se presenta en el sitio.

**TABLA 6. PERDIDAS Y GANANCIAS DE LOS HORIZONTES
INTEMPERIZADOS EN RELACION CON LA ROCA BASAL
PERFIL 12**

OXIDOS TOTALES	HORIZONTES			B22t-K de Al ₂ O ₃	AB-K de Al ₂ O ₃	PERDIDAS O GANANCIAS	
	142-160 Cqm	84-132 B22t	0-28 AB			B22t	AB
SiO ₂	53.00	50.73	50.44	48.51	46.40	-4.49	-6.60
TiO ₂	0.09	0.90	0.09	0.86	0.08	+0.77	-0.01
Al ₂ O ₃	21.05	22.01	22.88	21.05	21.05	0.0	0.0
Fe ₂ O ₃	5.73	5.78	5.23	5.52	4.81	-0.21	-0.92
FeO	1.57	1.57	2.62	1.50	2.41	-0.07	-0.21
MnO	0.14	0.14	0.09	0.13	0.08	-0.01	-0.06
MgO	0.12	0.12	0.45	0.11	0.41	-0.01	+0.29
CaO	4.00	4.11	3.16	3.93	2.90	-0.07	-0.84
Na ₂ O	2.60	2.66	2.70	2.54	2.48	-0.06	-0.12
K ₂ O	0.53	0.54	0.70	0.51	0.64	-0.02	+0.11
P ₂ O ₅	0.57	0.57	0.10	0.54	0.09	-0.03	-0.47
SO ₃	---	---	---	---	---	---	---
CO ₃	---	---	---	---	---	---	---
H ₂ O ⁺	5.89	5.56	6.64	5.31	6.10	-0.58	+0.21
H ₂ O ⁻	4.71	5.31	4.90	5.07	4.50	+0.36	-0.21
TOTAL	100.00	100.00	100.00	95.57	91.94		

La constante (K) de aluminio se obtiene de dividir el porcentaje de aluminio de la roca inalterada (Cqm) entre el porcentaje de aluminio de la roca alterada (B22t o AB). 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.

**TABLA 7. PERDIDAS O GANANCIAS DE LOS HORIZONTES
INTEMPERIZADOS EN RELACION CON LA ROCA BASAL
PERFIL 13**

OXIDOS TOTALES	HORIZONTES		BC·K de Al ₂ O ₃	PERDIDAS O GANANCIAS
	24- + Cqm	0-24 BC		BC
SiO ₂	53.10	53.85	59.50	+6.40
TiO ₂	1.02	0.93	1.02	0.0
Al ₂ O ₃	21.71	19.64	21.71	-0.0
Fe ₂ O ₃	5.31	3.43	3.79	-1.52
FeO	1.90	2.88	3.18	+1.28
MnO	0.28	0.16	0.17	-0.11
MgO	0.14	0.22	0.24	+0.10
CaO	4.06	3.95	4.36	+0.30
Na ₂ O	2.75	2.45	2.48	-0.27
K ₂ O	0.55	0.52	0.57	+0.02
P ₂ O ₅	0.10	0.20	0.22	+0.12
SO ₃	--	--	--	--
CO ₂	--	--	--	--
H ₂ O	3.80	4.78	5.28	+1.48
H ₂ O-	5.28	6.99	7.72	+2.44
TOTAL	100.00	100.00	110.23	

**TABLA 8 PERDIDAS Y GANANCIAS DE LOS HORIZONTES
INTEMPERIZADOS EN RELACION CON LA ROCA BASAL
PERFIL 14**

OXIDOS TOTALES	HORIZONTES			B22t·K de Al ₂ O ₃	AB·K de Al ₂ O ₃	PERDIDAS Y GANANCIAS	
	108-240 BC	82-108 B22T	0-35 AB			B22t	AB
SiO ₂	44.0	43.70	51.99	44.41	58.33	+0.41	+14.33
TiO ₂	1.00	1.01	0.78	1.02	0.87	-0.02	-0.13
Al ₂ O ₃	24.86	24.46	22.15	24.86	24.86	0.0	0.0
Fe ₂ O ₃	6.18	6.56	2.85	6.66	3.19	+0.48	-2.99
FeO	1.84	1.57	3.54	1.59	3.97	-0.25	+2.13
MnO	0.28	0.24	0.19	0.24	0.21	-0.04	-0.07
MgO	0.14	0.12	0.27	0.12	0.30	+0.02	+0.16
CaO	3.02	2.60	4.07	2.64	4.56	-0.38	+1.54
Na ₂ O	1.10	1.70	2.40	1.71	2.69	+0.61	+1.59
K ₂ O	0.50	0.44	0.80	0.44	0.89	+0.06	+0.39
P ₂ O ₅	0.00	0.10	0.13	0.10	0.14	+0.10	+0.14
SO ₃	--	--	--	---	---	---	---
CO ₂	--	--	--	---	---	---	---
H ₂ O ⁺	9.03	9.56	3.68	9.71	4.12	+0.68	-4.82
H ₂ O ⁻	8.05	7.94	7.15	8.06	8.02	+0.01	-0.02
	100.00	100.00	100.00	101.55	112.14		

4.2 Óxidos libres

El orden y la abundancia de los óxidos libres fue $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3$, el que según Chesworth (1977), corresponde a la etapa dos de la secuencia de movilidad de los óxidos que diagnostica la etapa temprana de meteorización y desarrollo de los suelos. La suma de los porcentajes de óxidos libres y los porcentajes de arcilla reflejan el grado de alteración (Duchaufour, 1984).

En la Tabla 9, observamos que los valores de SiO_2 libre en los horizontes de los cuatro perfiles se incrementa de acuerdo al contenido de arcilla, lo cual coincide con Steinhard *et al.*, (1982), cabe destacar que en el caso del fragipán del perfil 11, se registra un contenido moderado de SiO_2 libre (7.25%) debido posiblemente a su bajo nivel de cementación.

Sin embargo en los duripanes los valores se incrementan o se reducen dependiendo de los factores intempéricos. Se considera que, con base a Duchaufour (1984), los porcentajes de sílice libre relativamente altos yacen sobre el material endurecido favoreciendo su incremento por la reducción del espacio poroso, posición subyacente de la capa y acumulación de la sílice en los intersticios del horizonte en forma de gel amorfa que posteriormente consolida quedando incluidas muchas veces las arcillas.

4.3 Relaciones molares.

Como se muestra en la Tabla 9, las relaciones molares en los suelos estudiados son altos, lo cual indica que domina la sílice, es decir que los suelos en estudio presentan de baja a moderada alteración (Duchaufour, 1984). Para este estudio la relación de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ libre, varió de 2.5-3.9 en todos los perfiles. Valores que ponen de manifiesto un intemperismo no muy acentuado. Los valores altos de la relación sílice/hierro confirman lo anteriormente expuesto, dado los altos valores de sílice y los bajos de hierro.

También en la relación sílice/sesquióxidos se manifiesta la misma tendencia. La relación bases/aluminio manifiesta valores bajos inferiores a la unidad, lo que acusa la deficiencia de bases tal como se observa en la Tabla 10.

4.4 Actividades de los iones hidrógeno

Como se observa en la Tabla 10, los valores, de los horizontes del perfil 11, fueron

TABLA 9. OXIDOS TOTALES, OXIDOS LIBRES Y RELACIONES MOLARES

Perfil	11					12				13		14			
Horiz.	AB	B1	B2t	Bx	BC	AB	B21t	B22t	Cqm	BC	Cqm	AB	B21	B22t	BC
Prof. (cm)	0-32	32-62	62-93	93-144	144-210	0-28	28-84	84-142	142-160	0-24	24-+	0-35	35-82	82-108	108-240
SiO ₂	46.04	45.38	44.00	45.00	42.12	50.44	54.51	50.73	52.80	53.80	53.10	51.90	40.50	43.70	44.00
TiO ₂	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.09	1.02	0.90	0.09	0.93	1.02	0.78	1.00	1.01	1.00
Al ₂ O ₃	22.28	21.92	22.85	23.00	24.30	22.78	21.12	22.01	21.05	19.60	21.71	22.15	27.62	24.46	24.86
Fe ₂ O ₃	5.82	5.73	6.02	5.63	6.40	5.13	4.35	5.78	5.70	3.43	5.31	2.80	5.61	6.56	6.18
FeO	2.09	2.09	1.83	2.09	1.57	2.62	1.97	1.57	1.57	2.83	1.90	3.54	2.17	1.57	1.84
MnO	0.11	0.09	0.10	0.10	0.09	0.08	0.14	0.14	0.14	0.16	0.28	0.19	0.28	0.24	0.28
MgO	0.52	1.44	0.63	1.36	0.48	0.40	0.15	0.12	0.12	0.22	0.14	0.27	0.16	0.12	0.14
CaO	2.85	2.75	2.90	2.65	2.09	3.16	4.11	4.11	4.00	3.95	4.06	4.02	3.38	2.60	3.02
Na ₂ O	1.94	2.00	1.94	1.90	1.60	2.70	2.66	2.66	2.60	2.45	2.75	2.40	1.70	1.70	1.10
K ₂ O	0.40	0.35	0.35	0.35	0.30	0.70	0.67	0.54	0.53	0.52	0.55	0.80	0.40	0.44	0.50
P ₂ O ₅	0.13	0.15	0.18	0.18	0.18	0.10	0.10	0.57	0.57	0.20	0.10	0.13	0.10	0.10	0.00
SO ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CO ₂	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
H ₂ O*	7.58	7.56	7.64	7.99	9.04	6.59	4.45	5.56	5.89	4.78	3.28	3.60	9.05	9.56	9.03
H ₂ O	9.68	10.14	11.45	9.68	11.76	4.82	4.73	5.33	4.71	6.99	5.28	7.15	8.09	7.94	8.05
TOTAL	99.52	100.00	99.96	99.90	98.22	99.61	99.98	100.05	99.74	99.86	100.00	99.73	100.06	100.00	
SiO ₂ libre	9.75	7.25	9.00	7.25	7.25	4.00	4.25	6.25	7.75	5.00	4.50	4.50	5.00	9.00	8.50
Al ₂ O ₃ libre	5.50	4.00	4.50	4.25	4.25	2.25	1.75	2.25	2.50	2.00	1.50	2.00	4.50	6.00	5.00
Fe ₂ O ₃ libre	0.98	1.09	0.74	1.05	1.09	0.49	0.82	0.96	0.87	1.13	1.53	0.87	2.70	2.84	2.31
S/a	3.51	3.53	3.27	3.33	2.94	3.76	4.38	3.93	4.28	4.67	4.17	3.99	2.50	3.04	3.01
S/f	22.00	22.42	21.61	22.52	20.41	25.16	33.32	26.67	28.05	33.03	28.45	31.44	20.11	20.76	21.19
S/R ₂ O ₃	3.03	3.03	2.80	2.88	2.52	3.29	1.14	3.36	4.14	0.90	3.60	3.70	2.24	2.60	2.60
b/a	0.44	0.56	0.45	0.39	0.32	0.52	0.60	0.57	0.58	0.62	0.58	0.57	0.35	0.33	0.32

muy semejantes entre sí y fluctuaron de 6.4-7.1 y de 6.6-7.1 para el perfil 12, cabe destacar que en el perfil 13 se observa un decremento del pH en sus horizontes que va de 6.6 - 6.5, debido posiblemente a que éste es un duripán que pudo haber sufrido una reoxidación, proceso que de acuerdo con Cajuste (1977) ocurre con frecuencia después de ciertas inundaciones en lluvias con altas precipitaciones. En este sentido, esto puede estar ocurriendo en Tetela del Volcán, donde la precipitación total anual es de 1800 mm (García, 1988).

Para el perfil 14 los valores registrados cubrieron un intervalo de 6.5 - 7.1, por lo que de acuerdo a la clasificación de pH de Tavera (1985), para suelos volcánicos, las fluctuaciones detectadas en los cuatro perfiles, corresponden a suelos neutros derivados de materiales ígneos.

4.5 Cationes intercambiables

Los valores obtenidos para los cationes intercambiables Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+} y K^{+} de los perfiles en estudio, en el perfil 11, fluctuaron de 9.0-17.0; 5.0-15.0; 0.7-2.03 y de 0.16-2.43 meq/100 g, respectivamente, (Tabla 10). El calcio en el perfil fue muy heterogéneo, sin embargo, las concentraciones aumentan con la profundidad a excepción de los últimos dos horizontes donde, como se observa en la Tabla 10, existe una lixiviación de este catión en los horizontes superficiales hasta el B2t, donde el Ca^{+2} se ha venido acumulando.

Respecto al Mg^{+2} la dinámica de la lixiviación ha sido semejante al Ca^{+2} , solo que este elemento aumenta con la profundidad como se observa en los horizontes AB, B1, B2t, Bx y BC.

Los cationes intercambiables más importantes en el suelo son el Ca^{+2} y el Mg^{+2} y más aún tratándose de suelos con problemas de baja permeabilidad y formación de materiales de acuerdo a Etchevers *et al.*, (1971) tanto el Ca^{+2} como el Mg^{+2} se consideran altos, ya que rebasan los 10 y 3 meq/100g de Ca^{+2} y Mg^{+2} , respectivamente, (Tabla 10).

El potasio en el perfil 11 fluctúa de 0.16-2.43 meq/100 g, disminuyendo con la profundidad a excepción del horizonte BC donde este elemento se está acumulando, si consideramos las concentraciones de K^{+} de acuerdo con Etchevers (1971), fluctúan de muy altas a bajas dependiendo de la profundidad (Tabla 10). Respecto al Na^{+} los valores detectados fluctuaron de 0.7-2.03 meq/100 g.

En el perfil 12 el Ca^{+2} fluctuó de 5.0-7.5 meq/100 g, estas concentraciones son

ligeramente superiores a 5 meq/100g, por lo que de acuerdo con Etchevers (1971) los valores son medios.

El Mg^{+2} contrariamente al Ca^{+2} se detectó en concentraciones altas (Etchevers, 1971), ya que superan a los 3 meq/100 g, las cantidades encontradas fueron de 3.5-7.0 y de 4.0-5.5 meq/100 g, observándose que el catión se ha lixiviado hacia el subhorizonte B21t.

El Na^{+} y el K^{+} fluctuaron de 0.45-0.92 y de 0.65-1.20 meq/100 g, respectivamente, tanto el Na^{+} como el K^{+} tienden a lixivarse a las capas inferiores hasta llegar al duripán. El Na^{+} se detectó en concentraciones mucho más bajas que en el perfil 11, sus concentraciones son normales a excepción del subhorizonte B22t y en el horizonte Cqm donde hay una acumulación considerable llegando hasta 0.92 meq/100 g.

En el perfil 13 la cantidad de las bases intercambiables fue muy semejante a la del perfil 12, fluctuando para Ca^{+2} y Mg^{+2} de 6.0-6.5 y de 4.0-5.5 meq/100 g, en donde de acuerdo a Etchevers (1971) son valores medios ya que superan a los 3 meq/100 g.

El Na^{+} y el K^{+} fluctuaron sus valores de 0.43-0.54 y de 0.17-0.42 meq/100 g, respectivamente, de acuerdo con Etchevers (1971) estos valores son bajos.

En el perfil 14 las concentraciones de Ca^{+} y Mg^{+} fluctuaron de 7.0-12.0 y de 3.5-7.0 meq/100 g, respectivamente, en este perfil cabe señalar que es muy semejante al perfil 11 donde la lixiviación es semejante hacia la profundidad del perfil sobre todo en los de en medio, donde se tienen hasta 12 y 7 meq/100 g para Ca^{+} y Mg^{+} respectivamente. Respecto a las concentraciones de Na^{+} y K^{+} se encontraron de 0.71-1.19 y de 0.41-1.90 meq/100g respectivamente, estos elementos al igual que en el perfil 11, como resultado del intemperismo, altas precipitaciones y las condiciones físicas del suelo favorecen su lixiviación de la misma manera que para el Ca^{+2} y el Mg^{+2} , sólo que estos últimos como menciona Duchaufour (1984) son más difíciles de lixivarse, ya que la fuerza de atracción molecular es mucho mayor que la del Na^{+} y K^{+} , sin embargo el Ca^{+2} y el Mg^{+2} , también se detectaron en bajas concentraciones sobre todo en el perfil 12 y 13 que han sido fuertemente intemperizados.

La relación Ca^{+2}/Mg^{+2} nos indica que cuando ésta es mayor que uno, como sucede en la mayor parte de los horizontes de los cuatro perfiles, indica cantidades satisfactorias proporcionales de calcio y en aquellos casos cuando es menor que uno, como sucede en el horizonte BC del perfil 11 y en el subhorizonte B21t del 12, manifiestan niveles bajos de

calcio, debido tanto a fuertes procesos de lixiviación del catión como al dominio de minerales magnésicos.

4.6 Capacidad de intercambio de cationes.

La capacidad de intercambio catiónico total en los cuatro perfiles (Tabla 10), fluctuó de 19.1 -29.1 para el perfil 11; 17.3-23.9 para el 12; de 18.2 para el perfil 13 y de 16.0-19.9 Cmol(+)/kg suelo para el 14, estas capacidades de intercambio catiónico total, de acuerdo con Ortega (1987), Cajuste (1977) y Fassbender (1984) se clasifican de medias a altas. En este sentido resaltan las capacidades de intercambio que se presentan en el perfil 13 que son las más bajas de los suelos estudiados, por tratarse de un suelo erosionado donde las arcillas que los constituyen son del tipo 1:1 como haloisita que presentan capacidades de intercambio inferiores a 25 Cmol(+)/kg suelo. Por último, al relacionarse la suma de bases intercambiables con la capacidad de intercambio, de acuerdo con Fassbender y Bornemiza (1984), estos dos parámetros muestran una relación característica de suelos derivados de materiales volcánicos en climas templados subhúmedos con altas precipitaciones, donde con frecuencia la suma de las bases intercambiables es inferior a la capacidad de intercambio.

4.7 Aluminio intercambiable

El aluminio intercambiable en el perfil 11 fue muy heterogénea, con concentraciones que fluctuaron 0.74-1.0 Cmol(+)/kg suelo (Tabla 10) estas cantidades para suelos de origen volcánico de acuerdo a Fassbender (1984) son bajas.

En el perfil 14 el aluminio intercambiable fluctúa de 1.8-2.20 Cmol(+)/kg suelo, siendo las concentraciones muy homogéneas en este perfil. Los valores bajos coinciden con los reportados por Fassbender (1985), y a su vez se confirman con el intervalo de valor del pH observado.

4.9 Materia orgánica

Los porcentajes obtenidos de materia orgánica fueron bajos en todos los perfiles tipo (Tabla 10); al respecto en el perfil 11, los porcentajes de materia orgánica fluctuaron de 0.13- 0.68, el contenido más alto se encontró en el horizonte AB que de acuerdo a Moreno (1978), se clasificó como pobre en este constituyente, mientras que los horizontes B1, B2t,

TABLA 10

PRINCIPALES PROPIEDADES QUIMICAS

PERFIL	HOR.	PROF. (cm)	pH 1:2.5 H ₂ O	CATIONES INTERCAMBIABLES				SATURACION DE BASES (%)	C.I.C.T. Cmol(+)/kg de suelo	Al ³⁺ INTERCAM- BIABLE Cmol(+)/kg de suelo	MATERIA ORGANICA %	N %	C %	C/N
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺							
				(meq/100 g)										
11	AB	0-32	7.1	9.0	5.0	1.34	2.43	80.8	19.1	0.92	0.68	0.04	0.39	9.7
	B1	32-62	7.0	10.0	5.5	1.35	1.02	62.7	26.0	1.00	0.34			
	B2t	62-93	6.9	17.0	9.0	2.03	0.25	54.9	26.9	0.74	0.13			
	Bx	93-144	6.4	15.0	7.0	1.34	0.16	46.3	29.1	0.92	0.34			
	BC	144-210	6.5	11.5	15.0	0.70	0.89	26.0	26.9	1.00				
12	AB	0-28	7.0	5.0	3.5	0.45	1.08	82.2	19.5	1.80	1.28	0.07	0.74	10.0
	B21t	28-84	7.1	5.5	7.0	0.54	0.65	60.5	17.3	2.20	0.60			
	B22t	84-142	7.0	7.5	5.5	0.72	1.02	69.2	23.9	2.50	0.40			
	Cqm	142-160	6.6	7.0	4.5	0.92	1.20	88.5	21.7	2.90	0.13			
13	BC	0-24	6.6	6.5	4.0	0.43	0.17	58.2	18.2	1.50	1.75	0.09	1.01	11.2
	Cqm	24- +	6.5	6.0	5.5	0.54	0.42	59.8	18.2	1.85	0.40			
14	AB	0-35	7.1	7.0	3.5	0.64	0.41	75.1	16.0	1.85	1.99	0.10	1.15	11.5
	B21	35-82	6.5	12.0	6.0	0.86	1.02	75.1	26.9	2.20	0.82			
	B22t	82-108	6.8	11.0	7.0	1.19	1.90	77.4	26.0	1.80	0.34			
	BC	108-240	6.7	11.0	5.5	0.94	1.80	79.7	23.9	2.00	0.34			

Bx y BC se consideran como extremadamente pobres, ya que presentan porcentajes inferiores a 0.60.

El aumento considerable de materia orgánica de 0.13 en el subhorizonte Bx del perfil 11 al horizonte BC con un 0.34% se deba quizá a la presencia de un horizonte sepultado y la incipiente formación de un horizonte endurecido. En el perfil 12, en el horizonte AB se detectó 1.28% que de acuerdo al mismo autor corresponde a un suelo medianamente pobre y en los subhorizontes B21t, B22t y el horizonte Cqm con las cantidades 0.68, 0.40 y 0.13% respectivamente, se clasifican como extremadamente pobres en contenido de materia orgánica.

El perfil 13 corresponde a un suelo muy delgado de escasos 24 cm, donde se detectó 1.75% de materia orgánica, inmediatamente después se localiza un duripán, con contenidos de 0.40% de materia orgánica, tal porcentaje, posiblemente se debe a la acumulación o depósito de restos orgánicos cuya degradación ha sido lenta.

El perfil 14 presenta porcentajes de materia orgánica más altos que en el perfil 11, las cantidades fluctuaron de 1.94-0.38%, por lo que de acuerdo con Moreno (1978) el horizonte AB corresponde a suelos medios en este constituyente, mientras que los horizontes inferiores corresponden a extremadamente pobres. Cabe aclarar que la clasificación de dicho autor es para suelos incorporados a la agricultura.

Los niveles bajos de materia orgánica observados en los horizontes superficiales señalan los fuertes estados de alteración de la vegetación que aun existe, lo que conlleva a la falta de un aporte natural de materia orgánica.

4.9 Nitrógeno total, carbono y relación C/N.

Los valores observados de nitrógeno total y carbono (Tabla 10) en el perfil 11 son considerados bajos de acuerdo con Moreno (1978), y la relación carbono/nitrógeno manifiesta la pérdida de nitrógeno.

En los perfiles 12, 13 y 14 dichos contenidos de nitrógeno total y carbono también son bajos a muy bajos de acuerdo a Moreno (1978), para ser los horizontes superficiales; sin embargo las relaciones carbono/nitrógeno indican cierta estabilidad del nitrógeno.

5. Análisis Mineralógico

5.1 Caracterización mineralógica.

En la Tabla 11, se presentan los resultados del análisis mineralógico por difracción de rayos X, en la fracción arcilla de los perfiles estudiados.

Los minerales dominantes en la zona de estudio fueron la haloisita y en menor incidencia la cristobalita, detectándose también por señales muy asimétricas, la presencia de montmorillonita solamente en el subhorizonte B22t de los perfiles 14 y 12, y en este último, también se detectó mica en baja proporción.

Considerando los factores climáticos de la zona de estudio como esenciales en la presencia de la haloisita, cabe señalar que es derivada de procesos de transformación y herencia, principalmente de vidrios volcánicos y feldespatos, en un ambiente húmedo.

Por lo que respecta a la montmorillonita su origen puede ser de la alteración que sufren los feldespatos y las micas de forma precoz, originándose una reorganización en su estructura en el interior de los cristales, de los cuales resulta la formación de filosilicatos como la montmorillonita, (Flores *et al.*, 1992). También puede tener su origen en las arcillas micaceas que evolucionan en un medio lixivante (Duchafour, 1984).

6. Génesis de los suelos y materiales endurecidos.

En el área de estudio se encuentran tobas y depósitos clásticos de materiales volcánicos del Pleistoceno (Fries, 1966). Estos materiales volcánicos a través del tiempo han estado sufriendo procesos de consolidación y cementación, debido a la presencia de la sílice, derivada tanto de la meteorización lenta y prolongada de feldespatos y minerales ferromagnesianos, así como la rápida alteración del vidrio volcánico y materiales amorfos. A partir de estas tobas se inició la formación de los suelos y se presentó un evento catastrófico que fue el último período glacial, mediante el cual fueron cubiertos de nieve las altas montañas de México, entre ellas el Ajusco, la Sierra Nevada y el volcán de la Malinche (Lugo-Hubp, 1984).

Posteriormente, y además de la compactación resultante por el peso de la nieve, vinieron los deshielos, los cuales produjeron efectos severos de erosión y contribuyeron a producir una alteración fuerte que provocó por un lado, procesos de eluviación, iluviación,

TABLA 11

ANALISIS MINERALOGICO

PERFIL	HOR.	PROF. (cm)	DIFRACCION POR RAYOS X	
			Fracción arcilla %	
11	AB	0-32	haloisita	crystalita
	B1	32-62	haloisita	crystalita
	B2t	62-93	haloisita	crystalita
	Bx	93-144	haloisita	crystalita
	BC	144-210	haloisita	crystalita
12	AB	0-28	haloisita	crystalita
	B21t	28-84	haloisita	crystalita
	B22t	84-42	haloisita	crystalita
	Cqm	142-160	mica haloisita	montmorillonita crystalita
13	BC	0-24	haloisita	crystalita
	Cqm	24- +	haloisita	crystalita
14	AB	0-35	haloisita	crystalita
	B21	35-82	haloisita	crystalita
	B22t	82-108	haloisita	crystalita
	IIC	108-240	haloisita	montmorillonita crystalita

decarbonatación, transferencia de arcilla y argilización, con la consecuente formación de horizontes argílicos, típicos de estos suelos; por otro lado, la liberación de la sílice incrementó los procesos de cementación, aumentando el espesor de los duripanes; o bien, en aquellos casos de cementación ligera la formación de fragipanes.

Al paso del tiempo, con el aporte de nuevas eyecciones volcánicas, y bajo las condiciones del clima actual, estos suelos han sufrido un rejuvenecimiento que se manifiesta en un empardecimiento muy homogéneo causado por procesos de alteración moderados.

En relación a los materiales endurecidos, se comprobó en el trabajo de campo que la condición geomorfológica influyó marcadamente en la presencia de uno u otro o la ausencia de los mismos. Tal es el caso del perfil 13 donde en una zona plana, con poca pendiente, donde la topografía y el microrrelieve casi horizontal permitieron la deposición de la sílice amorfa que incrementó el proceso de cementación y el espesor del duripán. El perfil 11 se ubicó en una zona de lomeríos de pendiente variable, donde se considera que la inclinación existente impidió la acumulación total del cementante, quedando estas capas con una cementación débil, dando origen al fragipán. Por último, el perfil 14 sin capas endurecidas se realizó en la parte alta de una zona de lomeríos con pendiente fuerte, de 15 a 20%, donde tal condición topográfica no permitió la acumulación de la sílice opalina, tanto por dicha inclinación como por la solubilidad y carácter lábil de dicho compuesto (Flores *et al.*, 1992; Flores *et al.*, 1995).

7. Caracterización Taxonómica

7.1 Con base en FAO-UNESCO (1994), los suelos estudiados se clasifican taxonómicamente como Luvisoles háplicos.

7.2 En relación a Soil Taxonomy (1994) el perfil 11 corresponde al Gran Grupo Fragiudalf. Los perfiles 12 y 13 corresponden al Gran Grupo Durustalfs. A su vez el perfil 14 se incluye en el Gran Grupo Hapludalf.

VII. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos, se concluye lo siguiente para el área de estudio.

1. Se realizó la caracterización morfológica de cuatro perfiles tipo. Dichos perfiles son representativos de la zona de estudio. Dos de ellos presentan duripán, uno tiene fragipán y el último no presenta horizonte endurecido.
2. La clasificación morfológica de campo con base en color, textura, estructura, consistencia, películas de arcilla y separación de horizontes y subhorizontes caracterizó, inadecuadamente, a los suelos como poco desarrollados.
3. Los contenidos de arcilla de estos suelos están en el intervalo reconocido para los subhorizontes B2t desde el punto de vista taxonómico.
4. La esfericidad y redondez de las partículas de limo y la arena muy fina son baja y subangular respectivamente lo que fue debido a su depósito *in situ* y a procesos de compactación y alteración que pudieron ser causados por glaciación.
5. Como una consecuencia de la compactación y cementación el espacio poroso se redujo y causó mayor resistencia al movimiento del agua en el proceso de infiltración.
6. La densidad aparente se incrementa a mayor profundidad, hasta alcanzar los valores más altos en el fragipán y duripán. La porosidad total es inversamente proporcional a la densidad aparente.
7. Las pérdidas y ganancias de óxidos totales de los horizontes intemperizados, en relación con la roca basal, manifestaron condiciones actuales de alteración baja; lo cual se confirma con las relaciones molares obtenidas y la presencia

de trazas de aluminio intercambiable.

8. 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 que son suelos muy evolucionados, pero que a su vez han sido rejuvenecidos por procesos, principalmente volcánicos y tectónicos.
9. Los minerales secundarios dominantes, producto de la alteración de materiales volcánicos bajo condiciones de clima templado subhúmedo son haloisita y montmorillonita.
10. Con el conocimiento de las propiedades físicas y químicas se clasificaron los suelos como Luvisoles háplicos (FAO-UNESCO, 1994) y Grandes Grupos Fragiudalf, Durustalf y Hapludalf (Soil Taxonomy, 1994).

LITERATURA CITADA

- Aguilera, H. N. 1964. Geographic distribution and characteristics of volcanic ash soils in Mexico. Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. Centro de Enseñanza e Investigación. Inst. Interamericano de Ciencias y Agricultura de la O.E.A. Turrialba, Costa Rica. p. 12.
- Aguilera, H. N. 1989. Tratado de Edafología de México. Tomo I. Ed. por la Fac. de Ciencias, Univ. Nal. Autón. de México, México, D. F. 222 p.
- Alexander, M. 1980. Introducción a la Microbiología del Suelo. Ed. AGT. Editor, S. A. México, 491 p.
- Alvarez, V. H. 1982. Efecto de los factores calidad, intensidad y calidad amortiguadora de fosfato en la evolución de fósforo disponible de suelos derivados de cenizas volcánicas de la Meseta Tarasca, Edo. de Michoacán. Tesis Doctoral. Colegio de Posgraduados. Chapingo, México.
- Baver, L. D., Gardner, H. W. y Gardner, R. W. 1980. Física de Suelos. Ed. UTEA. México. 529 p.
- Besoain, E. 1969. Mineralogía de las Arcillas de los Suelos de Cenizas Volcánicas de América Latina. Centro de Enseñanza e Investigación, Ins. Interam. de Cienc. Agr. de la O.E.A. Turrialba, Costa Rica. 1205 p.
- Bilzi, A. F., y Ciolkosz, E. J., 1977. A field morphology rating scale for evaluating pedological development. Soil Science, v. 124, p. 45-49.
- Black, C. A. 1965. Methods of soil analysis. American Society of Agronomy, Inc., Publisher Madison, Wisconsin, USA, p. 899-900.
- Bouyoucos, G. J. 1963. Directions for making mechanical analysis of soil by hydrometer method. Soil Sci. 42:25-30.
- Brambila, M. 1940. The tepetate soils of Mexico. Proc. of The Sixth Pacific Science Congress. Univ. of California Press. Berkeley, Cal. 4:869.
- Buchanan, F. 1807. A journey from Madras Throught the countries of Mysore, Canara and Malabar. Vol. 2:436-460. East India Col, London.
- Buol, S. W., Hole, F. D. y McCrackern, R. J., 1989. Génesis y clasificación de suelos. Ed. Trillas. 417 p.
- Cajuste, L. J., 1977. Química de Suelos con enfoque agrícola. Ed. C. P. Chapingo. México. 278 p.

- Cajuste, L.J. y Cruz, D. J. 1986. Presencia de materiales amorfos en algunos tepetates de la zona de influencia, Chapingo. Primer Simposio Nacional sobre el uso y manejo de tepetates para el desarrollo rural. UACH. Depto. de Suelos. Chapingo, México. pp. 70-77.
- Cervantes, B. J. F. 1983. Génesis, morfología y clasificación de los suelos de la cuenca de México. Tesis Doctoral. Fac. de Ciencias, U.N.A.M. 441 p.
- 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, D. J., Cajuste, L. J. y Estrada, B. W. J., 1990. Evaluación de materiales amorfos y su importancia como cementantes en algunos cementantes 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, S. A. 493 p.
- Etchevers, B. J. D., López, R. R. M., Zebrowski, C. y Peña, H. D. 1991. Características químicas de tepetates de referencia de los estados de México y Tlaxcala. Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos endurecidos. Terra. Vol. 10 número especial (1992). p. 171-177, Montecillo, Estado de México.
- Fanning, O. S. y Fanning, B. M. C. 1990. Soil Morphology, genesis and classification. John Wiley and Sons. 395 p.
- 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.
- FAO-UNESCO, 1991. Mapa Mundial de Suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma.

- FAO-UNESCO, 1994. Soil Map of the World. Revised Legend: World Soil Resources Report 60, FAO, Roma. 190 p.
- Fassbender, H. W. y Bornemisza, E., 1984. Química de Suelos Ed. IICA, Costa Rica. 420 p.
- Fassbender, H. W. 1975. Química de Suelos. Ed. IICA, Costa Rica, 397 p.
- Figueroa, S. B. 1975. Pérdida de suelo y nutrimentos y su relación con el uso del suelo en la cuenca del río Texcoco. Tesis Maestría en Ciencias. Colegio de Posgraduados. Chapingo, México. 112 p.
- Fitzpatrick, E. A. 1984. Suelos, su formación, clasificación y distribución. CECSA. México. 430 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, Vol. 107 No. 6:442-453.
- Flores, R. D., Alcalá, M. J. R., González, V. A. y Gama, C. J. E. 1991. Los tepetates, Revista de Geografía. Vol. III. No. 4:37-42. México, D. F.
- Flores, R. D., Alcalá, M. J. R., González, V. A. y Gama, C. J. E. 1992. Suelos con fragipán de origen volcánico en clima semicálido y subhúmedo. El caso del noreste del estado de Morelos, México. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Rev. volumen 10, número 2, p. 151-163.
- Fries, Carl Jr. 1965. Hoja Cuernavaca 14 Q-h (8), con Resumen de la Geología de la hoja Cuernavaca, estado 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, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlas a las condiciones de la República Mexicana), Inst. de Geografía, U.N.A.M. México, D. F. 246 p.
- Green, C., Eden M., 1971. Geoderma, 6, 316-317.
- Grossman, R. B., y Carlisle, F. J. 1969. Fragipan soils of the eastern United States. Advance of Agron. 21:237-279.
- 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, I. 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.
- Hernández, X. E. 1987. Etnobotánica de Tlaxcala. Primer Simposio Nacional sobre el uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. UACH. Depto. de Suelos. Chapingo, México. p. 1-8.
- Hidalgo, M. C., Quintin, P. y Zebrowski, 1992. La cementación de los tepetates: estudio de la silicificación. Primer Simposio Internacional sobre suelos volcánicos endurecidos. UACH. Depto. de Suelos. Chapingo, México. Número especial (Vol. 10): 192-201.
- Jackson, M. L. 1970. Análisis químico de suelos. Ed. Omega. Barcelona, España. 662 p.
- Johnson, W. M. McClelland, J. E., McCaleb, S. B.; Ulrich, R., Harper, W. G.; y Hutchings, T. B., 1960. Classification and description of soil pores: Soil Science, V. 89, p. 319-321.
- Keller, W. D. y Reesman, A. L. 1963. Dissolved products of artificially pulverized silicate minerals and rocks. Part. II J. Sed. Petrol. 33: 426-437.
- 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.
- Lamplug, G. W. 1907. The geology of the Zambezi Basin around the Batoks George (Rhodesia). Geol. Soc. London Quart.
- López, R. E. 1979, Geología de México. Ed. Escolar, México. 341 p.
- Lugo, H. J. 1984. Geomorfología del sur de la cuenca de México: México, D. F. Universidad Nacional Autónoma de México. Inst. de Geografía, Serie Varia. Tomo 1, núm. 8, 95 p.
- Llerena, V. A. F. y Sánchez, B. B. 1992. Recuperación de tepetates en la vertiente oriental del Valle de México. Terra. Vol. 10, p. 302-308, número especial, Montecillo, Edo. de México.
- Marañón, G. G. 1994. Caracterización de suelos con tepetates y su relación con la vegetación en el municipio de Tetela del Volcán, estado de Morelos. Tesis de Licenciatura. Fac. Filosofía y Letras, U.N.A.M. 90 p.
- McCracken, R. J. y Weed, S. B. 1963. Pan horizons in south eastern soil: Micromorphology and associated chemical, mineralogical and physical properties. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 27:330-334.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

- Mehra, O. P. and Jackson, M. L. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a difhionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In clays and clay Minerals, Proc. 7th Conf., p. 317-327, Nafl. Acad. Sci-Batk, Res. Council Publ.
- Meixner, R. E. y Singer, M. J. 1981, Use of a field morphology rating system to evaluate soil formation and discontinuities. Soil Science. Vol. 131, p. 114-123.
- Moreno, D. R. 1978. Cuadro de clasificaciones tentativas, Ins. Nac. de Invest. Agrics. Depto. de suelos. 5 p.
- Munsell. Soil color Charts, 1990. Edition. Munsell Color Company, Inc. Baltimore Maryland, 21218. U.S.A.
- Nimlos, T. J. 1986. La nomenclatura de horizontes endurecidos en suelos de cenizas volcánicas. Primer Simposio Nacional sobre el uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. UACH. Depto. de Suelos. Chapingo, México. p. 10-16.
- Nimlos, T. J. 1989, The density and stengh of Mexican tepetate (duric materials): Soil Science, v. 147, p. 23-27.
- Ortega, T. E., 1987. Química de Suelos. Ed. Univ. Autón. Chapingo. Depto. de Suelos, Chapingo, México. 152 p.
- Pacheco, L. M. C. 1979. Cartografía y caracterización mineralógica de los tepetates del oriente del Valle de México. Tesis de Licenciatura. UACH. Chapingo, México. 58 p.
- Pacheco-López, M. C. y Estrada-Berg, W. J. 1986, Cartografía y caracterización mineralógica de los tepetates del oriente del Valle de México, *in* Rufz-Figueroa, J. F. ed. Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural: Texcoco, Universidad Autónoma de Chapingo, p. 31-37.
- Peña, H. D. y Zebrowski, C. 1991. Los suelos y tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. Primer Simposio Internacional de suelos volcánicos endurecidos. Terra. Vol. 10 número especial (1992). p. 151-155. Montecillo, Edo. de México.
- Powers, M. C., 1953, A new roundness scale for sedimentary particles: Journal of Sedimentary Petrology, v. 23, p. 117-119.
- Prat, 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.
- Prat, Ch. y Quantin, P. 1991. Origen y génesis del talpetate. Horizonte endurecido de suelos volcánicos de la región Centro-Pacífico de Nicaragua. Primer Simposio Internacional de suelos volcánicos endurecidos. Terra. Vol. 10 número especial (1992). p. 267-282.

- Rey, C. J. A. 1979. Estimación de la erodabilidad de los tepetates en la cuenca del río Texcoco en base al factor K. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Posgraduados, Chapingo, México. 145 p.
- Reineck, H. E. y Singh, I.B. 1980. *Depositional sedimentary environments*. Springer-Verlag Berlin Hedelberg New York. Second. Ed. 549 p.
- Rojas, R. T. y Sánchez, W. T. 1985. Historia de la Agricultura en época prehispánica. Siglo XVI. Colección Biblioteca del INAH, Inst. Nac. de Antrop. e Hist. México, D. F.
- Ruíz, F.J.F. 1986. Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. UACH. Depto. de suelos. Chapingo, México. 222 p.
- Rutledge, E. M. y Hom, M. E. 1965. The dikson and zanesvilla soils of Washington Country, Arkansas: 1. their properties and genesis. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 29:437-443.
- Rzedowski, J. 1978. *La vegetación de México*. Ed. Limusa, México, D. F. 432 p.
- Sánchez, J. M., Ruíz, F. J. F., Cuautle, F. E. 1986. Comportamiento de dos tipos de tepetates bajo la adición de abonos orgánicos y abonos verdes en condiciones de invernadero. Primer Simposio Nacional sobre el uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. UACH, Chapingo, México. p. 50-67.
- SCS-USDA, 1986. *Soil Survey Laboratory Methods and Procedures for Collecting Soil Samples: Washington, D. C., U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service*, 90 p.
- SCS-USDA, 1993, *Soil Survey Manual 18: Washington, D. C., U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service*. 520 p.
- Secretaría de Gobernación y Gobierno del estado de Morelos. 1988. *Los municipios de Morelos. Colección Enciclopédica de los municipios de México*. Ed.
- Secretaría de Programación y Presupuesto. 1981. *Síntesis Geográfica del estado de Morelos. Inst. Nac. de Geof. e Inform. México, D. F.*
- Secretaría de Programación y Presupuesto. 1983. *Carta Edafológica Cuautla E14 B51. Inst. Nac. de Geof. e Inform. México, D. F.*
- Soil Survey Staff. 1960. *Soil Clasification. A Comprehensive Sistema, 7th Aproximation, U.S. Govt. Print. Office. Washington, D. C.*
- Soil Survey Staff. 1967. *Suplement to Soil Clasification System. Soil Conservation Service. U.S.D.A.*

- Soil Survey Staff. 1990. Keys to soil Taxonomy, S.M.S.S.: Technical Monograph No. 19 fourth Ed. p. 422.
- Soil Survey Staff, 1994. Keys to Soil Taxonomy, S.M.S.S.: Technical Monograph 19, 5th ed. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg; 650 p.
- Solleiro, R. E. 1992. Estudio sobre alteración, desarrollo y evolución de suelos derivados de rocas basálticas. Tesis de Maestría. Fac. de Ciencias. U.N.A.M. 108 p.
- 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.
- Sys, C. 1967. The concept of ferralitic and fersiallitic soils in Central Africa. *Pedologie* 17:284:325.
- Trueba, C. A. 1979. Reincorporación de terrenos degradados a la producción. S.A.R.H. Dir. Gral. de Conserv. del suelo y agua. México, D. F.
- USDA, 1988, Soil Taxonomy: Washington, D. C., U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Handbook 436, U. S. Government Printing Office, 754 p.
- Valdéz, M. L. A. 1970. Características morfológicas y mineralógicas de los suelos de tepetate de la cuenca de México. Tesis Maestría en Ciencias. Colegio de Posgraduados. Chapingo, México. 190 p.
- Vallejo, G. E. y Aguilera, H. N. 1969. "Génesis de suelos del volcán Popocatepetl" IV Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Monterrey, Nuevo León. Memorias. p. 92-106.
- Van Zuidam, R. A., 1979, Terrain analysis and classification using aerial photographs-a geomorphological approach: Enschede, Holanda, International Training Centre, 186 p.
- Vázquez, A. A. y Bautista, A. N. 1993. Guía para interpretar el análisis químico de suelo y agua. Univ. Autón. de Chapingo. Depto. de Suelos. 29 p.
- Villegas, S. M., Aguilera, H. N. y Flores D. F. 1978. Método simplificado de análisis para la clasificación granulométrica de los minerales del suelo. Univ. Nat. Autón. México, Inst. Geología, Revista, vol. 2. núm. 2. p. 188-193.
- Walkley, A. L. y Black, A. 1947. Rapid determination of soils organic matter. *Jour. Agric. Sci.*, 25:598-63-68.
- Williams, B. J. 1972. Tepetate in Valley of Mexico. *Annals of the assn. of Am. Geog.* 62 (3):618-623.

Woolnough, W. G. 1927. The duricrust of Australia. Royal Soc. New South Wales J. and proc. 61:24-53.

Yassoglou, N. J. y Whiteside, E. P. 1960. Morphology and genesis of some soils containing fragipans in northern Michigan. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 24: 396-407.

Zebrowski, C. 1991. Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina. Primer simposio Internacional de suelos volcánicos endurecidos. Terra. Vol. 10 número especial (1992). p. 1-3. Montecillo, Edo. de México.