

00381 1  
24



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MORFOGENESIS DE SUELOS CON TEPETATE  
DE UNA AREA DEL ESTADO DE MEXICO Y SU  
INCORPORACION AL PROCESO PRODUCTIVO.

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE  
**DOCTOR EN CIENCIAS**  
**( B I O L O G I A )**  
**P R E S E N T A**  
**M. EN C. OTILIO ARTURO ACEVEDO SANDOVAL**

DIRECTOR DE TESIS: DR. DAVID FLORES ROMAN

MEXICO, D. F.

1998

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

265379



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

PAGINACIÓN

DISCONTINUA

# TEPETATES



## DEDICATORIAS

A mis padres a quienes amo profundamente por sus virtudes humanas, manifestadas en la comprensión, orientación, dedicación, apoyo y sobre todo en el amor tan entrañable que siempre me han brindado.

Gracias por sembrar la semilla del estudio, ya que constituye para mí la mejor herencia recibida.

A mis queridos hermanos:

Norma, Pepe y Claudia

como una prueba más de que sabemos esforzarnos y superarnos para lograr nuestras metas.

Bere, tu simbolizas una nueva y definitiva fase de mi vida en la cual tu has sembrado para mi, cariño, apoyo y comprensión, de quien he recibido un verdadero y limpio amor.

A todos mis sobrinos y amigos.

A todas aquellas personas que de alguna u otra forma han sido parte de mi vida profesional.

*Fe es creer en lo que no se ve; y la recompensa es ver lo que uno cree.*

## AGRADECIMIENTOS

Deseo hacer patente mi agradecimiento y reconocimiento a las siguientes personas e instituciones que hicieron posible la realización del presente estudio:

A la Universidad Nacional Autónoma de México y en especial a la Facultad de Ciencias por darme la oportunidad de obtener el doctorado.

Al Instituto de Geología, Departamento de Edafología, Laboratorio de Fertilidad de Suelos, por las amplias facilidades proporcionadas para el desarrollo del presente trabajo.

Al Dr. David Flores Román por su amistad, apoyo y excelente dirección en la realización del presente trabajo.

A los miembros del Honorable Jurado :

Dra. Norma Eugenia García Calderón  
Dr. David Flores Román  
Dr. Javier Cervantes Romo  
Dr. José Luis Oropeza Mota  
Dr. Jorge Etchevers Barra  
Dr. Jorge E. Gama Castro  
Dr. Víctor Manuel Malpica Cruz

Por sus valiosos comentarios y sobresalientes aportaciones.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico, DGAPA, por la BECA otorgada para la realización de esta tesis.

A la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán que dio las facilidades para llevar a cabo los estudios de Doctorado.

A la M en C. Margarita Reyes Salas por las determinaciones y fotografías en el microscopio electrónico de barrido; asimismo, al Dr. de Pablo por la interpretación correspondiente de estos análisis.

A la M en C. Patricia Altúzar Coello y al Dr. Octavio Cano Corona por la determinación mineralógica por difracción de rayos X.

Al Ing. Héctor Alfredo Legorreta Cuevas de la Facultad de Ingeniería de la UNAM por las pruebas de resistencia a compresión simple.

Al Dr. Dante Morán Zenteno por permitir realizar esta investigación dentro del Instituto de Geología

A la Dra. Norma E. García Calderón y M en C. Ernestina Vallejo Gómez por su sincera amistad, constante orientación, para ellas mi cariño y admiración.

Al Dr. Jorge E. Gama Castro, en el que encontré al amigo que siempre estuvo dispuesto a colaborar, gracias por tantas horas dedicadas al fascinante estudio de los tepetates.

A la M en C. Lourdes Flores Delgadillo por su valiosa asesoría y facilidades proporcionadas en el análisis de óxidos totales y libres en el equipo de absorción atómica, además de ser una gran amiga.

A la Dra. Claudia Oleschko Lutkova, por su orientación y sus valiosos comentarios

A los compañeros fértiles, M en C. Alma S. Velázquez, al Lic. Gabriel Marañón, la Ing. Agric. Lucy Mora, al M en C. Gilberto Vela, pasante de Biol. Silvia Martha Herrera Rodríguez y al Biol. Humberto Nuñez Cardona con los que emprendimos el camino sinuoso al estudio de los suelos volcánicos endurecidos.

A mis dos grandes amigos, que siempre estuvieron en las buenas como en las malas, Jorge René Alcalá Martínez y Fernando Vega.

Sin la colaboración y ayuda técnica del personal académico y administrativo del Departamento de Edafología del Instituto de Geología parte de este trabajo habría sido imposible, a cada uno de ellos gracias : M en C. Sergio Palacios Mayorga, M en C. Kumiko Shimada Miyasaka, M en C. Silvia Sánchez Beltran, M en C. Teodoro Méndez, Dra. Cristina Siebe, Dr. Gilberto Hernández Silva, Pedro Aviles Jaimes y Sra Matilde Juárez López

Al Ing. Rodolfo del Arenal Capetillo, Secretario Académico del Instituto de Geología por su apoyo, confianza, amistad y disposición a cualquier consulta.

Al M en C. Julio Alberto Carrasco, por sus sabios consejos que me forzaron a ser mejor cada día.

Al recuerdo del querido Maestro Nicolás Aguilera Herrera pionero de la Edafología en la Universidad quien me motivó a continuar con los estudios de suelos. Por su dedicación, profesionalismo e inquebrantable amor a la investigación.

Al Dr. Claude Zebrowski incansable promotor del estudio de los suelos volcánicos endurecidos.

A la Cofradía de los Óxisoles por todos aquellos momentos de felicidad.

A todas ellas, Gracias

# CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPITULO I.....	5
1. MARCO TEÓRICO.....	5
1.1 <i>Antecedentes</i> .....	5
CAPITULO II .....	13
2. PROPIEDADES DE LAS CAPAS CEMENTADAS.....	13
2a. <i>Morfológicas</i> .....	13
2b. <i>Físicas</i> .....	14
2c. <i>Químicas</i> .....	16
2d. <i>Mineralogía de capas endurecidas</i> .....	17
2e. <i>Micromorfología de capas cementadas</i> .....	19
CAPITULO III.....	21
3. LOCALIZACIÓN Y TOPOSECUENCIAS DE LAS CAPAS ENDURECIDAS.....	21
3a. <i>Distribución espacial de las capas cementadas</i> .....	21
3b. <i>Secuencias topoclimáticas y pedogénicas</i> .....	23
CAPITULO IV.....	25
4. GÉNESIS DE CAPAS ENDURECIDAS.....	25
4a. <i>Procesos volcanogénicos</i> .....	26
4b.- <i>Procesos pedogenéticos</i> .....	27
CAPITULO V.....	31
5. DINAMICA Y PROCESOS DE FORMACIÓN DE CAPAS ENDURECIDAS.....	31
5a. <i>Devitrificación y solubilidad de la sílice</i> .....	31
5b. <i>Teoría de la presión de solución</i> .....	36
5c. <i>Silicificación</i> .....	38
5d. <i>Biodegradación: Sílice biogénica</i> .....	41
CAPITULO VI.....	43
4. ROTURACIÓN E INCORPORACIÓN AL PROCESO PRODUCTIVO DE LOS TEPETATES.....	43
CAPITULO VII.....	45
7. ESTRUCTURA.....	45
7a.- <i>Agregación</i> .....	45
7b. <i>Estabilidad de agregados en húmedo</i> .....	48
7c. <i>Materia orgánica</i> .....	49
7d. <i>Organismos</i> .....	53
7e. <i>Ciclos de humedecimiento y secado</i> .....	58
7f. <i>Exudados</i> .....	60
CAPITULO VIII.....	63
8. FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	63
8a. <i>Objetivo general</i> .....	63
8b. <i>Objetivos específicos</i> .....	63
8c. <i>Hipótesis</i> .....	64
CAPITULO IX.....	65
9. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	65
9a. <i>Localización</i> .....	65
9b. <i>Geología</i> .....	67

9c. <i>Fisiografía</i> .....	70
9d. <i>Geomorfología</i> .....	70
9e. <i>Unidades morfoestructurales</i> .....	71
9f. <i>Clima</i> .....	71
9g. <i>Vegetación</i> .....	72
9h. <i>Suelos</i> .....	73
9i. <i>Uso actual</i> .....	74
<b>CAPITULO X</b> .....	<b>75</b>
10. <b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	75
10a. <i>Diseño metodológico</i> .....	75
10b. <i>Etapa I</i> .....	75
10c. <i>Fase de Campo</i> .....	76
10d. <i>Fase de laboratorio</i> .....	76
10e. <i>Estabilidad de los horizontes endurecidos</i> .....	78
10f. <i>Mineralógicas</i> .....	78
10g. <i>Morfológicas</i> .....	78
10h. <i>Clasificación taxonómica de los perfiles</i> .....	79
10i. <i>ETAPA II</i> .....	80
<b>CAPÍTULO XI</b> .....	<b>85</b>
11. <b>DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA, CARACTERIZACIÓN, TAXONOMÍA Y GÉNESIS DE LOS PERFILES</b> .....	85
11a. <i>PERFIL 1</i> .....	85
11b. <i>PERFIL 2</i> .....	101
11b. <i>PERFIL 3</i> .....	115
11b. <i>PERFIL 4</i> .....	128
11b. <i>PERFIL 5</i> .....	143
11b. <i>PERFIL 6</i> .....	156
11b. <i>PERFIL 7</i> .....	168
<b>CAPITULO XII</b> .....	<b>181</b>
12. <b>ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE LA GÉNESIS DE LOS SUELOS Y CAPAS ENDURECIDAS</b> .....	181
12.a. <i>Análisis general de la descripción morfogénica</i> .....	181
<b>CAPITULO XIII</b> .....	<b>197</b>
13. <b>EVALUACIÓN DEL EFECTO DE ESPECIES VEGETALES EN LA FRAGMENTACIÓN, AGREGACIÓN Y SU ESTABILIDAD EN HÚMEDO EN DOS TEPETATES FRACTURADOS</b> .....	197
13.a. <i>Determinación de fragmentos y agregados</i> .....	197
13.b. <i>Estabilidad de agregados en humedo</i> .....	222
<b>CAPITULO XIV</b> .....	<b>233</b>
14. <b>ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE LA AGREGACIÓN Y DISGREGACIÓN</b> .....	233
14.a. <i>Análisis general en agregados en seco y humedo</i> .....	233
14.b. <i>Conclusiones</i> .....	238
<b>CAPITULO XV</b> .....	<b>241</b>
15. <b>LITERATURA CITADA</b> .....	241
<b>A N E X O</b> .....	<b>257</b>
<b>ANEXO I</b> .....	<b>259</b>
ANÁLISIS DE VARIANZA DE AGREGADOS EN SECO Y HÚMEDO.....	259
<b>ANEXO II</b> .....	<b>267</b>
ESPECIES UTILIZADAS.....	267
a. <i>GUAYABA (Psidium guajava L.)</i> .....	267

<i>b. HUAJE ROJO (Leucaena esculenta M. et S. ex A. DC. Benth)</i> .....	269
<i>c. PASTO RHODES (Chloris gayana Kunth.)</i> .....	271
ANEXO III .....	273
CLIMOGRAMA .....	273
ANEXO IV .....	275
SOLUCIÓN DE HOAGLAND .....	275
ANEXO V.....	277
DIFRACTOGRAMA.....	277

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Nombres vernáculos que se asigna a las capas endurecidas en cada país.....	7
Tabla 2. Clasificación genética de los flujos piroclásticos.....	25
Tabla 3. Clasificación genética de depósitos piroclásticos.....	27
Tabla 4. Distribución de los tratamientos en el invernadero del Instituto de Geología, UNAM.	81
Tabla 5. Clasificación morfométrica y de producto de intemperismo.....	86
Tabla 6. - CARACTERISITICAS FISICAS PERFIL 1.....	87
Tabla 7.- DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE PARTICULAS (mm) PERFIL 1.....	87
Tabla 8.- CARACTERISTICAS QUIMICAS PERFIL 1.....	88
Tabla 9. Porcentaje de redondez en limos medios (0.02-0.005 mm) <sup>1</sup> . PERFIL 1.....	89
Tabla 10. Porcentaje de redondez en arenas muy finas (0.10-0.05 mm) <sup>1</sup> . PERFIL 1.....	89
Tabla 11.- Óxidos totales en suelo total y relaciones molares PERFIL 1.....	94
Tabla 12. Óxidos libres en suelo total del perfil 1.....	95
Tabla 13. Análisis selectivo de la fracción no cristalina del Perfil 1.....	96
Tabla 14. Microanálisis del cementante que une las partículas de la toba, Perfil 1.....	98
Tabla 15. Clasificación morfométrica y de producto de intemperismo PERFIL 2 (Birkeland <i>et al.</i> , 1990).....	102
Tabla 16.- CARACTERISITICAS FISICAS PERFIL 2.....	103
Tabla 17.- DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE PARTICULAS (mm) PERFIL 2.....	103
Tabla 18.- CARACTERISTICAS QUIMICAS PERFIL 2.....	104
Tabla 19. Porcentaje de redondez en limos medios (0.02-0.005 mm) <sup>1</sup> . PERFIL 2.....	105
Tabla 20. Porcentaje de redondez en arenas muy finas (0.10-0.05 mm) <sup>1</sup> .....	105
Tabla 21.- Óxidos totales en suelo total y relaciones molares PERFIL 2.....	109
Tabla 22. Óxidos libres en suelo total del Perfil 2.....	110
Tabla 23. Análisis selectivo de la fracción no cristalina del Perfil 2.....	111
Tabla 24. Microanálisis del cementante (%) que une las partículas de la toba, Perfil 2.....	112
Tabla 25. Clasificación morfométrica y de producto de intemperismo PERFIL 3.....	116
Tabla 26. Porcentaje de redondez en limos medios (0.02-0.005 mm) <sup>1</sup> . PERFIL 3.....	117
Tabla 27. Porcentaje de redondez en arenas muy finas (0.10-0.05 mm) <sup>1</sup> .....	117
Tabla 28.- CARACTERISITICAS FISICAS.....	118
Tabla 29.- DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE PARTICULAS (mm).....	119
Tabla 30.- CARACTERISTICAS QUIMICAS.....	119
Tabla 31.- Óxidos totales en suelo total y relaciones molares.....	121
Tabla 32. Óxidos libres en suelo total del Perfil 3.....	122
Tabla 33. Análisis selectivo de la fracción no cristalina del Perfil 3.....	124
Tabla 34. Microanálisis del cementante (%) que une las partículas de la toba, Perfil 3.....	124
Tabla 35. Clasificación morfométrica y de producto de intemperismo. PERFIL 4.....	129
Tabla 36.- CARACTERISITICAS FISICAS.....	131
Tabla 37.- DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE PARTICULAS (mm).....	132
Tabla 38.- CARACTERISTICAS QUIMICAS.....	132
Tabla 39_ Porcentaje de redondez en limos medios (0.02-0.005 mm) <sup>1</sup> .....	134
Tabla 40. Porcentaje de redondez en arenas muy finas (0.10-0.05 mm) <sup>1</sup> .....	134
Tabla 41.- Óxidos totales en suelo total y relaciones molares.....	136
Tabla 42. Óxidos libres en suelo total del perfil 4.....	137
Tabla 43. Análisis selectivo de la fracción no cristalina del Perfil 4.....	138
Tabla 44. Microanálisis del cementante (%) que une las partículas de la toba, Perfil 4.....	139
Tabla 45. Clasificación morfométrica y de producto de intemperismo PERFIL 5 (Birkeland <i>et al.</i> , 1990).....	144
Tabla 46.- CARACTERISITICAS FISICAS.....	145
Tabla 47.- DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE PARTICULAS (mm).....	146
Tabla 48.- CARACTERISTICAS QUIMICAS.....	146

Tabla 49. Porcentaje de redondez en limos medios (0.02-0.005 mm) <sup>1</sup> .....	147
Tabla 50. Porcentaje de redondez en arenas muy finas (0.10-0.05 mm) <sup>1</sup> .....	147
Tabla 51.- Óxidos totales en suelo total y relaciones molares .....	149
Tabla 52. Óxidos libres en suelo total del perfil 5. ....	151
Tabla 53. Análisis selectivo de la fracción no cristalina del Perfil 5. ....	152
Tabla 54. Microanálisis del cementante (%) que une las partículas de la toba, Perfil 5.....	152
Tabla 55. Porcentaje de redondez en limos medios (0.02-0.005 mm) <sup>1</sup> . PERFIL 6 .....	157
Tabla 56. Porcentaje de redondez en arenas muy finas (0.10-0.05 mm) <sup>1</sup> .....	157
Tabla 57. Clasificación morfométrica y de producto de intemperismo PERFIL 6 (Birkeland <i>et al.</i> , 1990).....	157
Tabla 58.- CARACTERISITICAS FISICAS .....	158
Tabla 59.- DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE PARTICULAS (mm) .....	159
Tabla 60.- CARACTERISTICAS QUIMICAS .....	159
Tabla 61.- Óxidos totales en suelo total y relaciones molares. ....	162
Tabla 62. Óxidos libres en suelo total del perfil 6. ....	163
Tabla 63. Análisis selectivo de la fracción no cristalina del Perfil 6. ....	163
Tabla 64. Microanálisis del cementante (%) que une las partículas de la toba, Perfil 6.....	164
Tabla 65. Clasificación morfométrica y de producto de intemperismo.....	169
Tabla 66. Porcentaje de redondez en limos medios (0.02-0.005 mm) <sup>1</sup> . PERFIL 7 .....	169
Tabla 67. Porcentaje de redondez en arenas muy finas (0.10-0.05 mm) <sup>1</sup> .....	169
Tabla 68.- CARACTERISITICAS FISICAS.....	170
Tabla 69.- DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE PARTICULAS (mm) .....	171
Tabla 70.- CARACTERISTICAS QUIMICAS .....	171
Tabla 71.- Óxidos totales en suelo total y relaciones molares. ....	174
Tabla 72. Análisis selectivo de la fracción no cristalina del Perfil 7. ....	176
Tabla 73. Óxidos libres en suelo total del perfil 6. ....	177
Tabla 74. Microanálisis del cementante que une las partículas de la toba, Perfil 7 .....	178
Tabla 75.- Distribución de macroagregados en seco y húmedo, comparación de medias del tepetate blanco cultivado con guayaba. ....	196
Tabla 76.- Distribución de macroagregados en seco y húmedo, comparación de medias del tepetate amarillo cultivado con guayaba.....	198
Tabla 77.- Distribución de macroagregados en seco y húmedo, comparación de medias del tepetate blanco cultivado con huaje rojo. ....	200
Tabla 78.- Distribución de macroagregados en seco y húmedo, comparación de medias del tepetate amarillo cultivado con huaje rojo.....	202
Tabla 79.- Distribución de macroagregados en seco y húmedo, comparación de medias del tepetate blanco cultivado con pasto Rhodes. ....	204
Tabla 80.- Distribución de macroagregados en seco y húmedo, comparación de medias del tepetate amarillo cultivado con pasto Rhodes. ....	206
Tabla 81.- Distribución de macroagregados en seco y húmedo, comparación de medias del tepetate blanco, testigo sin planta. ....	209
Tabla 82.- Distribución de macroagregados en seco y húmedo, comparación de medias del tepetate amarillo, testigo sin planta. ....	212

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Paisaje típico de las laderas que rodean a la Cuenca de México. Obsérvese el grado de alteración que presenta el ecosistema. ....	6
Figura 2. Glifos de suelos del Códice Vergara. Mediados del siglo XVI (Rojas y Sánchez, 1985 citado por Flores <i>et al.</i> , 1991). ....	9
Figura 3. Distribución de las capas endurecidas en la República Mexicana. (Fuente Flores <i>et al.</i> , 1992).....	22
Figura 4. Climo-topo-secuencia de suelos y tepetates de Río Frio, Estado de México (Fuente: Dubroeuq <i>et al.</i> , 1989). ....	23
Figura 5. Topoclimosecuencia de suelos propuesta por Peña y Zebrowski, (1992). ....	24
Figura 6. Agentes de unión en las partículas del suelo. ....	57
Figura 7. Localización general del área de estudio.....	65
Figura 8. Localización de las Sierras que rodean el área de estudio.....	66
Figura 9. Localización de los siete perfiles estudiados. ....	68
Figura 10. Fracturamiento del tepetate recolectado en campo en las instalaciones del invernadero del Instituto de Geología, UNAM.....	78
Figura 11. Intervalos de fracturamiento del tepetate blanco y amarillo antes de ser colocados en las macetas.....	79
Figura 12. Mantenimiento del experimento en el invernadero, Pasto Rhodes.....	80
Figura 13. Perfil 1, clasificado como Entisol vitrandic udorthent. ....	84
Figura 14. Prueba de compresión simple de la capa endurecida, Perfil 1. ....	91
Figura 15. Perfil 2, clasificado como Lithic ustorthent.....	100
Figura 16. Prueba de compresión simple de la capa endurecida, perfil 2. ....	106
Figura 17. Perfil 3, clasificado como Vitrandic udorthent. ....	114
Figura 18. Prueba de compresión simple de la capa endurecida, Perfil 3. ....	117
Figura 19. Perfil 4, clasificado como Typic fragiudalf.....	128
Figura 20. Prueba de compresión simple del densipan, Perfil 4.....	133
Figura 21. Perfil 5, clasificado como Typic dystrochrept.....	142
Figura 22. Prueba de compresión simple de la capa endurecida, Perfil 5. ....	147
Figura 23. Perfil 6, clasificado como Typic fragiudalf.....	155
Figura 24. Prueba de compresión simple del densipan, Perfil 6.....	160
Figura 25. Perfil 7, clasificado como Typic eutrocrepth. ....	167
Figura 26. Prueba de compresión simple de la capa endurecida, Perfil 7.....	173
Figura 27. Microfotografías (250X) de láminas delgadas de toba donde se muestra (Lámina A) iluviación de arcilla depositada en poros en forma microlaminar (poro y grano estriado)se observa además vidrio volcánico alterado, {vv}; (Lámina B) revestimiento de arcillas orientadas en forma paralela en fisuras y poros cámaras. Es claro el proceso de pedogénesis (iluviación-eluviación) que se presenta en las tobas de los perfiles, .....	182
Figura 28. <i>Propuesta de la diagénesis de las capas endurecidas a partir de la alteración del vidrio volcánico, agentes cementantes y formación de principales minerales arcillosos.</i>	184
Figura 29. Microfotografía tomada a partir del microscopio de barrido muestra fragmentos líticos volcánicos escasamente alterados de formas muy angulares, lo que indica materiales de depositación reciente. ....	187
Figura 30. Microfotografía tomada a partir del microscopio de barrido muestra la toba vítrea con fenocristales de plagioclasas, donde se presentan minerales con bordes subredondeados y alteración de vidrio volcánico. ....	188
Figura 31. Microfotografía tomada a partir del microscopio electrónico de barrido donde se muestra vidrio volcánico alterado y formación de ácido silícico, el cual esta cementando las partículas de la toba, se observa una incipiente cristalización de ópalo. ....	189

Figura 32. Microfotografía donde se muestra al ácido silícico, proceso de silicificación de la toba.....	190
Figura 33. Microfotografía donde se muestra el aspecto general de la solidificación de la toba. ....	191
Figura 34. Agregados > 12 mm en tepetate blanco.....	197
Figura 35. Agregados > 12 mm en tepetate amarillo.....	199
Figura 36. Agregados de 7 - 12 mm en tepetate blanco.....	205
Figura 37. Agregados de 7 - 12 mm en tepetate amarillo.....	207
Figura 38. Agregados de 2 - 7 mm en tepetate blanco.....	210
Figura 39. Agregados de 2 - 7 mm en tepetate amarillo.....	211
Figura 40. Agregados de 0.25 - 2 mm en tepetate blanco.....	214
Figura 41. Agregados de 0.25 - 2 mm en tepetate amarillo.....	215
Figura 42. Agregados < 0.25 mm en tepetate blanco.....	217
Figura 43. Agregados < 0.25 mm en tepetate amarillo.....	218
Figura 44. Efecto de agregación por empaquetamiento de raíces de guayaba. ....	219
Figura 45. Estabilidad de agregados > 5 mm en tepetate blanco.....	220
Figura 46. Estabilidad de agregados > 5 mm en tepetate amarillo.....	221
Figura 47. Estabilidad de agregados de 3 - 5 mm en tepetate blanco.....	222
Figura 48. Estabilidad de agregados de 3 - 5 mm en tepetate amarillo.....	223
Figura 49. Estabilidad de agregados de 2 - 3 mm en tepetate blanco.....	224
Figura 50. Estabilidad de agregados de 2 - 3 mm en tepetate amarillo.....	226
Figura 51. Estabilidad de agregados de 0.25 - 2 mm en tepetate blanco.....	227
Figura 52. Estabilidad de agregados de 0.25 - 2 mm en tepetate amarillo.....	228
Figura 53. Estabilidad de agregados < 0.25 mm en tepetate blanco.....	229
Figura 54. Estabilidad de agregados < 0.25 en tepetate amarillo.....	230
Figura 55. Plantas de guayaba preparadas para la plantación en invernadero.....	261

## RESUMEN

En la República Mexicana aproximadamente 600,000 km<sup>2</sup> de su superficie presentan capas endurecidas, dependiendo del agente cementante, estas reciben su nombre, duripan, fragipan, petrocálcicos, petrogypsico y plintita, por lo que se requiere llevar a cabo proyectos de investigación enfocados a determinar el origen de estas formaciones y su respectivo manejo para incorporarlos al proceso productivo, un inadecuado manejo de estas áreas ha propiciado en zonas que se llegue a perder hasta 13 t/ha de sedimentos.

La presente investigación se realizó en dos etapas, la primera comprende la descripción morfogenética de siete perfiles de suelo que presentaban capas endurecidas, los cuales se seleccionaron a partir de fotografías aéreas y recorridos de campo; de estos perfiles, 3 correspondían a tepetates blancos y los restantes a tepetates amarillos, el objetivo fue determinar el origen de estas formaciones ya sea por procesos volcanogénico o pedogenéticos, así mismo, se planteó un modelo para explicar estos endurecimientos.

A las muestras de suelo como a las capas endurecidas se les realizaron los correspondientes análisis físicos y químicos para ubicar a cada uno de los perfiles en su unidad taxonómica y el proceso de endurecimiento de sus horizontes. Al realizarse la interpretación tanto de campo como la de laboratorio se llegó a la conclusión que los perfiles correspondían al orden de los Entisoles clasificándose como Vitrandic udorthent y Lithic ustorthent, otros dentro del orden Alfisol clasificándose como Typic fragiudalf y los últimos dos dentro del orden Inceptisol caracterizado como Typic dystrochrept y Typic eutrocrepth, según la Soil Survey Staff (1994).

El origen de las capas endurecidas se ha dado por dos procesos, al inicio su formación es volcanogénica con presencia secundaria pedogenética como se observó en el estudio petrográfico de las láminas delgadas, quedando aquí ubicado 5 de los perfiles y los restantes se dio por formación pedogenética clasificándolos como claypan o densipan, además se estableció que el principal agente cementante de estas capas endurecidas es la sílice, proveniente de la hidrólisis del vidrio volcánico y de feldespatos.

La segunda etapa que comprendió el trabajo de investigación fue incorporar al proceso agrícola a los tepetate, problema que enfrentan un sin número de familias campesinas en sus terrenos agrícolas, se estima que el 30% de la superficie del Eje Neovolcánico presentan estas capas y en muchas ocasiones se encuentran aflorando caracterizándose por su baja fertilidad que trae como consecuencia una disminución en la producción y el abandono de estos terrenos.

Se llevo a cabo la recolecta en campo de dos tepetates, blanco y amarillo, y se trasladaron al invernadero del Instituto de Geología, UNAM, donde se fragmento manualmente el material y se colocó en macetas de plástico con capacidad de 5 kg. Los fragmentos empleados variaban en diámetros de 2 a 12 mm, el experimento se evaluó en dos etapas, 6 y 12 meses donde se emplearon 3 especies vegetales, pasto Rhodes, Guayaba y Huaje Rojo con el objeto de determinar el efecto de estas especies en la agregación y disgregación de este material además del empleo de fuentes nutrimentales como abono de bovino, gallinaza y fertilizantes químicos.

De los resultados obtenidos se llego a la conclusión que el estiércol de gallina favorece la agregación de las partículas, la planta de guayaba presenta la cualidad de agregar en menor tiempo las partículas en comparación con las otras dos, mientras que a mayor tiempo el pasto Rhodes mejoró la estructura del material. El tipo de tepetate no influyó en la agregación y disgregación; la presencia de materia orgánica en si misma no promueve la agregación ni mejora la estabilidad de los agregados, lo que se requiere son los productos intermedios de la descomposición de ésta. Las fuentes de fertilizante químico no son factores que incidan directamente en la formación de agregados.

# TEPETATE SOILS MORFOGENESIS IN A AREA OF THE MEXICO STATE AND THEIR INCORPORATION TO THE PRODUCTIVE PROCESS

Otilio Arturo Acevedo Sandoval

## ABSTRACT

Almost 600 000 Km<sup>2</sup> of the Mexican republic present indurated layers. These have their names in function of the cement agent, as duripan, fragipan, petrocalcic, petrogypsic and plintic. For this reason, it is necessary to realize investigation projects to determine the origin of these materials and their management for incorporate them to the productive process. A bad management of these soils has caused, in some areas, losses of sediments up to 13t/ha.

This study was made in two stages, the first is the morfogenetic description of seven soil profiles with indurated layers. Three profiles were with white tepetate and the rest of them were yellow tepetate. The objective was to determine the origin of these formations, it means by volcanic or pedologic processes, likewise, a model to explain the hardness was planed.

Both, soil and indurated layers samples, were studied to ubicare taxonomiely all profiles. According Soil Survey Staff (1994) the profiles were clasificated as: Order Entisol, Vitrandic udorthent, Lithic ustorthent; Order Alfisol, Typic fragiudalf; Order Inceptisol, Typic dystrochrept, Typic eutrochrepth.

The origin of the indurated layers is caused by two processes, at the begining the formation is volcanogenic and after is pedogenetic. The principal cement agent of the indurated layers is the silica, which is originated from volcanic glass and feldespar hydrolysis.

The second stage of this investigation was to incorporate the tepetate to the agricultural process. It is estimated that the 30% of the Trans-Mexico Volcanic Belt has indurated layers, which have low fertility and low production. This condition has propitiated to leave the land.

It was recolected in the study area white and yellow tepetate and was transported it to the Institute of Geology greenhouse. In this place the tepetate was handly fragmented and put in a plastic pots of 5 kg capacity. The fragments of tepetate had 2 to 12 mm of diameter. The experiment was evaluated in two stages, 6 and 12 months, with three plant species: *Chloris gayana*, *Psidium guajava* and *Leucaena esculenta*. The objective was to determine the effect of the plant species, cow manure, chicken manure and chemical fertilizers, in the aggregation and disgregation of tepetate.

The main conclusions were: the chicken manure favors the aggregation; *Psidium guajava* aggregates the particeles in lesser time than the others; in a long time, *Chloris gayana* improved the material structure. The tepetate kind, white or yellow, did not influence aggregation or disgregation. The more important aspects of the organic matter are the intermediate products of its discompositon. The chemical fertilizers did not fall into directly in the aggregates formation.

## INTRODUCCIÓN.

La Cuenca de México, es una de las áreas mas pobladas del país, se estima que el crecimiento poblacional en esta zona es del 2.8 % anual, y semestralmente 10 ha agrícolas se pierdan por cambio de uso de suelo (urbano), lo que ha propiciado que las áreas agrícolas ocupen las laderas de las sierras que rodean a la cuenca, caracterizadas por suelos delgados y susceptibles de erosionarse, donde por su uso irracional, sistema de mono-cultivo (maíz), se pierda la capa fértil, lo cual trae como consecuencia el afloramiento de capas duras, denominadas coloquialmente tepetates.

Los tepetates son suelos volcánicos que presentan en su perfil horizontes endurecidos debido a diferentes agentes cementantes como la sílice, carbonato o sulfato de calcio, sesquióxidos, arcillas y materia orgánica, en función de los cuales reciben diferentes nombres. Actualmente, un grupo de investigadores han designado que únicamente se emplee el término de tepetate en materiales de origen piroclástico.

Estas capas limitan y en ocasiones impiden la producción agrícola, pecuaria y forestal, debido a la baja fertilidad (nitrógeno, fósforo y materia orgánica), condiciones de drenaje deficiente, baja disponibilidad de agua aprovechable para las plantas, alta erosionabilidad y dureza, además constituyen un grave problema que limita seriamente el desarrollo agrícola.

En el Eje Neovolcánico, los tepetates en su mayoría provienen de productos piroclásticos, este material se endureció bajo el efecto de procesos diagenéticos, mientras que otros por cementantes como la sílice o carbonatos, provenientes de una evolución pedológica del material inicial, que puede ser un suelo o un depósito téfrico.

La información con que se cuenta actualmente sobre el origen de las formaciones endurecidas es variada, algunos autores mencionan que son de origen geológico, es decir, su endurecimiento se da al momento de la depositación del material piroclástico y otros indican que se debió a proceso pedogenético, como es el caso de los petrocálcicos o petrogypsicos, y por último los que proponen la combinación de ambos procesos, incrementando la dureza de estos materiales.

Son escasas las investigaciones que se han enfocado a evaluar el comportamiento de los tepetates roturados en la formación de agregados del suelo por efecto de especies vegetales o abonos orgánicos, la mayoría de los trabajos se han enfocado a determinar el efecto de fertilizantes químicos u orgánicos en la producción de cultivos agrícolas y/o forestales, además se desconoce el efecto de estas roturaciones en otras propiedades.

No menos importante es el papel de la biota del suelo, y el sistema radical de las especies vegetales en la agregación de partículas del suelo, ya sea por mecanismos complejos como la adsorción, envoltura o enrollamiento físico y la cementación resultante de las secreciones mucilaginosas que favorecen la estructura del suelo, mayor capacidad de retención de humedad, porosidad, intercambio gaseoso, etc.

Por lo antes expresado, el presente trabajo se dividió en XIV capítulos donde se abordan diferentes tópicos sobre capas endurecidas, a continuación se presenta un resumen del contenido de cada uno de los capítulos que conforman el presente trabajo.

Capítulo I, trata el significado de la palabra tepetate, término empleado por los antiguos mexicanos para denominar a las capas endurecidas, asimismo definiciones de este material según la ciencia que los estudia. La terminología edáfica, designa nombres a estas capas endurecidas en función del agente cementante y en algunos casos del nivel de consolidación y/o compactación.

Capítulo II, trata sobre las propiedades morfológicas, físicas, químicas, biológicas, mineralógicas y micromorfológicas que caracterizan a las capas endurecidas tanto en México como en otros países, el Capítulo III habla de la distribución espacial de las capas cementadas en la República Mexicana, relaciona las secuencias topeclimáticas y pedogenéticas con el régimen térmico e hídrico, mientras que, en el Capítulo IV, describe el origen de estas capas, tanto por proceso volcanogénico y pedogenético.

Capítulo V, se refiere a la dinámica y a los procesos de formación de las capas cementadas, donde se involucran procesos de devitrificación y solubilidad de la sílice, presión de solución, silicificación y biodegradación; sílice biogénica, por otro lado, el Capítulo VI, presenta trabajos relacionados sobre manejo de tepetates para incorporarlos al proceso productivo a través de la roturación, fragmentación, uso de abonos orgánicos y químicos, así como el empleo de microorganismos como bacterias, hongos y otros organismos con la finalidad de mejorar la producción agrícola y ciertas propiedades físicas, químicas y biológicas de estos materiales.

Capítulo VII, habla de los factores que inciden en la agregación y estructuración de los suelos; los objetivos e hipótesis del presente trabajo de investigación se exponen en el Capítulo VIII, mientras que el Capítulo IX, se caracteriza la zona de estudio desde el punto de vista climático, geológico, uso del suelo, vegetación, topografía y suelos presentes con el fin de comprender los factores que inciden en la formación de estos, Capítulo X, incluye los materiales y métodos empleados para cumplir con los objetivos del proyecto.

Los resultados y discusiones del trabajo se tratan en el Capítulo XI, describe la morfogénesis, y las propiedades físicas y químicas de los suelos y capas endurecidas de cada uno de los perfiles y en el Capítulo XII, se realiza un análisis general de los

perfiles, donde se plantea además la génesis de las capas cementadas y las conclusiones.

Capítulo XIII, discute el efecto de las tres especies vegetales y los dos abonos orgánicos en la fragmentación, agregación y disgregación de los dos tipos de tepetate (blanco y amarillo) fracturados bajo condiciones de invernadero, mientras que el análisis general y las conclusiones se tratan en el Capítulo XIV.

## CAPITULO I

### 1. MARCO TEÓRICO.

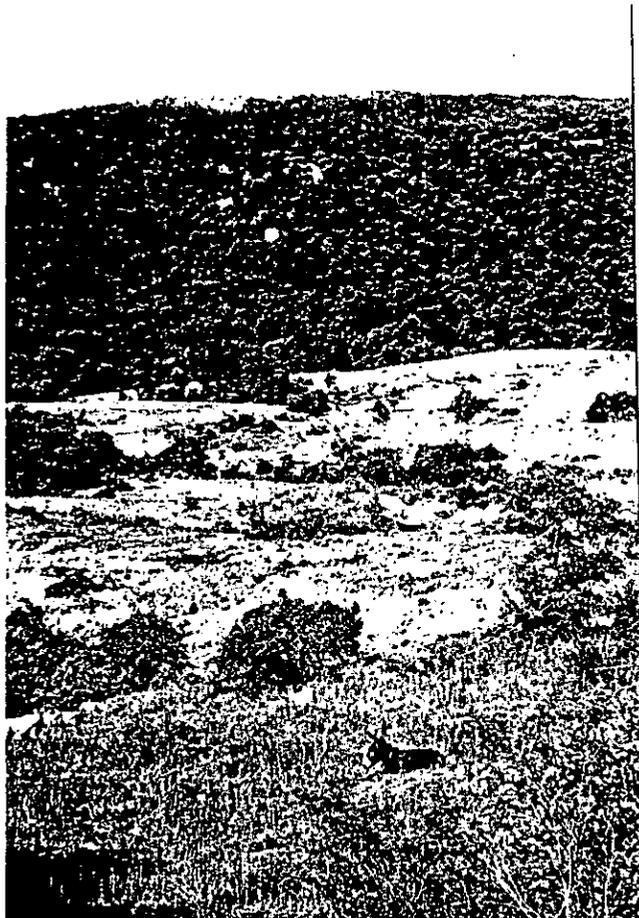
#### 1.1 Antecedentes

La erosión es un proceso físico que trata sobre el desprendimiento, arrastre y depositación de las partículas individuales del suelo por los agentes del intemperismo (Oropeza 1998, comunicación personal), su presencia en los suelos reduce el potencial biológico, debido a una explotación inadecuada y al uso impropio de la tecnología en zonas agrícolas de temporal y de riego (Figura 1), aunado a lo anterior, la presión urbana sobre suelos de vocación forestal, ha provocado la migración de los campesinos al uso de zonas de lomerios, caracterizados por suelos someros y susceptibles a la erosión, a la producción agrícola, degradándolos y erosionándolos (Flores, *et al.*, 1992, Acevedo y Flores, 1995, Arias, 1992).

Uno de los efectos que trae la erosión es la pérdida total o parcial de los recursos naturales, entre ellos el suelo. Las consecuencias de esta pérdida es el afloramiento de un horizonte endurecido llamado tepetate que limita la actividad agrícola; esta clases de suelos endurecidos han sido designados con nombres vernáculos propios a cada país (Tabla 1.)

En México, estos endurecimientos se presentan en varias regiones, especialmente en la meseta central, donde tuvieron lugar la mayoría de emisiones volcánicas piroclásticas (Dubroeuq *et al.*, 1989). Los campesinos llaman a cualquier endurecimiento de naturaleza geológico o pedológico tepetate, palabra que tiene su origen de dos vocablos de la lengua Náhuatl: *Tetl* que significa piedra y *Petatl* que significa petate o cama, por lo tanto el significado etimológico es “petate o cama de piedra”.

Los horizontes endurecidos son conocidos desde la época prehispánica, Williams (1972), encontró en el Códice Florentino que los Aztecas clasificaban a los materiales terrestres basándose principalmente en el color y dureza, misma que se dividió en tres clases: rocas, parecidas a rocas y las no rocas. Al tepetate lo clasificaban como un material intermedio en cuanto a dureza, que no tiene la dureza de roca pero tampoco es friable como un suelo.



**Figura 1.** Paisaje típico de las laderas que rodean a la Cuenca de México. Obsérvese el grado de perturbación que presenta el ecosistema.

Tabla 1. Nombres vernáculos que se asigna a las capas endurecidas en cada país.

PAÍS O ETNIA	TÉRMINO
Geólogos internacionalmente	Toba volcánica
Estados Unidos	Duripan, Fragipan
México	
Náhuatl	Tepetate
Otomí - Ñaňu	Xido
Tarascó - Purepecha	Sheri
Nicaragua	Talpetate
Colombia y Perú	Hardpan
Antillas	Pan
Ecuador	Cangahua
Chile	Moromoro, Tosca, Ñadis
Japón	Kora, Masa

Fuente: Nimlos, 1986.

Rojas y Sánchez (1985), citado por Flores *et al.*, (1991) exponen varios glifos o símbolos de suelos del Códice Vergara, mediados del siglo XVI, donde se identificó y caracterizó al tepetate desde la época prehispánica (Figura 2).

Sobresale en este Códice el glifo que corresponde al tepetate arenoso, donde primero está el símbolo del suelo, después el tepetate, y debajo de el material piroclástico, lo que significa que al tepetate se le relacionaba a un origen volcánico.

Desde el punto de vista geológico se considera que el tepetate se formó a partir de un material volcánico depositado por flujo (aluvión volcanogénico) o en forma de caída aérea (tefra) y deposición *in situ*, de la época del Plioceno tardío al Pleistoceno, consolidado, de ligero a moderadamente duro, presenta una matriz de

arcilla y sedimentos finos, en algunas ocasiones con bandas de carbonatos que se concentran a lo largo de las fisuras de este material (Williams, 1972; Miehlich, 1992).

Los edafólogos en ocasiones coinciden con el criterio geológico pero particularmente consideran al tepetate como resultado de un proceso pedológico, donde el cementante sílice que proviene de la alteración de feldespatos y vidrio volcánico, es eluviado de los horizontes superficiales y depositados en los profundos (iluviado). Es posible que un tepetate sea de origen geológico (toba volcánica) con aportes secundarios pedológicos. Según los geólogos, el tepetate de los edafólogos podría ser el equivalente a una toba formada por depósitos volcánicos aéreos (Bice, 1980).

Agronómicamente, los tepetates son estratos endurecidos que en un principio descansaba sobre ellos una capa de suelo fértil, afloran sobre la superficie terrestre por efecto de un mal manejo agrícola (Sánchez, 1981). Así mismo Shaw (1929) citado por Sánchez *et al.*, (1987) define a los tepetates, como una formación rocosa más o menos estratificada de distinta dureza y consolidación. De igual manera Salazar (1938), define al tepetate como rocas clásticas, constituidas por fragmentos de rocas preexistentes o cementadas por materiales arcillosos, ferruginosos o calcáreos; principalmente esta definición excluye al ácido silícico como principal cementante, debido a que en esa época se tenían escasos datos químicos y mineralógicos.

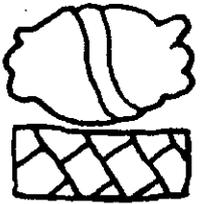
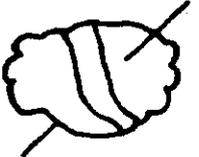
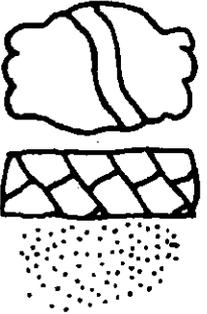
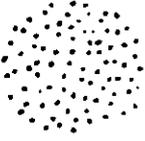
Glifo	Nombre en náhuatl	Traducción	Glifo	Nombre en náhuatl	Traducción
	Tepetlatl	Tepetate		Atoctli	Aluvión
	Tezoquiltl	Tierra Arcillosa		Teuhtloli	Tierra Limosa
	Tepetlatl, xalalli	Tepetate Arenoso		Xalalli	Tierra Arenosa

Figura 2. Glifos de suelos del Códice Vergara. Mediados del siglo XVI (Rojas y Sánchez, 1985 citado por Flores et al., 1991).

Flach *et al.*, (1969) mencionan que los horizontes endurecidos donde la sílice actúa como cementante primario se clasifican como duripanes; derivados del prolongado y lento intemperismo de los feldespatos y minerales ferromagnesianos o bien, del rápido intemperismo del vidrio volcánico y materiales amorfos.

Aeppli (1973) citado por Zebrowski (1992), establece que los duripanes son sedimentos de toba, endurecidos por óxidos de sílice, que por la erosión quedaron descubiertos y que después de secarse endurecieron irreversiblemente. La cementación de las tobas puede deberse a una fusión superficial de los vidrios al momento de depositarse, o a su alteración pelicular en sus productos amorfos isotrópicos de ópalo o de palagonita, incluso de los minerales arcillosos o de zeolitas, además en un medio lacustre o marino la diagénesis forma carbonatos.

Miehlich y Werner citados por Dubroeuq *et al.*, (1989) restringieron el término tepetate a los duripanes de origen pedológico que corresponden a la silificación y al endurecimiento de paleosuelos o de toba alterada.

Nimlos (1987), reconoce que la definición de tepetate es confusa. Propone restringir su uso sólo como un término local de México para una capa impermeable de suelo formada a partir de toba volcánica. Añade; “este endurecimiento pedogenético, que los pedólogos llaman cementación, por cementantes de sílice y carbonatos, esta sobrepuesto a una consolidación geológica; pero se dificulta diferenciar en los tepetates, la cementación pedológica de la geológica; sin embargo, el endurecimiento por sílice es parcialmente geológico y parcialmente pedológico, mientras que la cementación por carbonatos es claramente pedogénica”.

La terminología edáfica empleada para designar a las capas endurecidas varía en función del agente cementante y en algunos casos, del nivel de consolidación y/o compactación. Cuando la cementación es por sílice (SiO<sub>2</sub>), reciben el nombre de

duripanes, definidos por la Soil Survey Staff (1994), como horizontes subsuperficiales cementados por la sílice iluvial a tal grado que menos del 50% del volumen de fragmentos secados al aire se desmoronan en agua o en agitaciones prolongadas en HCl y KOH concentrado. Los duripanes varían en el grado de cementación por la sílice y, en adición, comúnmente contienen cementantes accesorios, principalmente óxidos de hierro y carbonato de calcio.

Cuando existe compactación fuerte y cementación escasa o nula se llaman fragipanes, Soil Survey Staff (1994), los define como un horizonte subsuperficial franco o rara vez arenoso, el cual puede subyacer a un horizonte álbico, argílico, cámbico o espódico. Presenta un contenido muy bajo de materia orgánica, densidad aparente más alta que los horizontes suprayacentes y de consistencia dura o muy dura cuando seco. Cuando húmedo, un fragipan es de moderado a débilmente quebradizo. Un fragmento seco se desmorona o fractura cuando se coloca en agua. El fragipan típico presenta características redoximórficas, permeabilidad lenta o muy lenta al agua y pocas o muchas decoloraciones de planos verticales rugosos, con caras poliédricas o prismas gruesos o muy gruesos.

El horizonte petrocálcico está cementado o endurecido a través de cada pedón por carbonato de calcio o, menos común, por carbonato de calcio y magnesio, con o sin sílice accesorio, a tal grado que los fragmentos secos no se desmoronan en agua y las raíces no pueden penetrar excepto por las grietas que tienen un espaciamiento horizontal de 10 cm o más. (Soil Survey Staff, 1994)

Por otro lado, si el agente cementante es  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , da origen a los petrogypsicos, definidos como horizontes iluviales de 10 cm o más de espesor en el cual el yeso secundario se ha acumulado a tal magnitud que el horizonte está cementado o endurecido (Soil Survey Staff, 1994).

Otros agentes cementantes son los sesquióxidos,  $Fe_2O_3$  y  $Al_2O_3$ , denominados plintitas o petroplintitas (anteriormente denominadas lateritas), es una mezcla de arcilla con sílice y otros diluyentes, ricos en hierro y aluminio, y pobre en humus. Las plintitas cambian irreversiblemente a un pan endurecido férrico o agregados irregulares al exponerlas repetidamente a humedecimiento y secado, especialmente si se expone también al calor del sol. La plintita en el suelo usualmente es firme o muy firme cuando el contenido de humedad esta cerca de la capacidad de campo y duro cuando el contenido de humedad se presenta por abajo del punto de marchitamiento (Soil Survey Staff 1994).

Flach *et al.*, (1992) mencionan que de acuerdo a referencias bibliográficas se indica que los tepetates de México, son demasiado variables y poco definidos para optar en la definición habitual que se tiene de duripanes. Ellos tratan de aclarar bajo cuales condiciones el tepetate empieza a endurecerse y proponen aumentar la definición de los duripanes, crear taxas distintos para las diferentes formas de lo que se llama hoy en día "tepetate".

## CAPITULO II

### 2. *Propiedades de las capas cementadas.*

#### 2a. *Morfológicas.*

Miehlich (1992), reporta que el color de los tepetates va de gris al amarillo y al pardo rojizo. Sánchez *et al.*, (1987) mencionan que existe una seria dificultad para poder definir con precisión las causas que marcan la diferencia en color entre los tepetates blancos y rojos, por tener ambos el mismo origen. Según Gaucher citado por Sánchez *et al.*, (1987) los materiales deben su color a elementos cromógenos de la roca madre, llamados litocromos, en el caso de la coloración roja. De forma general, se establece que la coloración de los tepetates va a depender de la composición mineralógica del material parental y al grado de alteración que presentan éstos.

En cuanto a estructura, predomina la masiva, débilmente fragmentada por grietas de retracción en forma de red prismática o poliédrica gruesa, presentando en algunas ocasiones estructura laminar, columnar y de bloques. Pierre y Campos (1987), mencionan que la estructura de las capas endurecidas son muy variables, algunas son de estructura poligonal, los prismas son separados por fisuras de algunos centímetros de ancho rellenos por cementos de óxidos de silicio y hierro, en otras zonas se observa estructura con bloques de más de 20 cm de ancho y 50 cm de largo.

Flores *et al.*, (1996), mencionan que la clasificación morfológica sirve de base para estimar el desarrollo relativo de horizontes (DRH) y del perfil (DRP), estudiando duripanes del norte del estado de Morelos determinaron que el color, la estructura, las películas de arcilla y la separación entre horizontes promueven el

mayor DRH en los horizontes B<sub>3</sub>/Cqm, mientras que, para el DRP influyó el color, la estructura, las películas de arcilla y los productos de intemperismo.

## 2b. Físicas.

La conductividad hidráulica del tepetate varía desde 0.44 mm/hora a 12.9 mm/hora, esto demuestra la baja porosidad y consecuentemente la lenta permeabilidad que presenta este material, motivo que ocasiona la erosión y frecuentes inundaciones de estas áreas (Nimlos y Hillery, 1990), mientras que Quantin *et al.*, (1993) estiman que la conductividad hidráulica en fragipanes, poco o no calcáreos es de 0.3-0.5 mm/hora, y que en el tepetate con costras calcáreas es más elevada, 2-10 mm/hora.

En relación a la densidad aparente (DA) Nimlos (1989), reporta valores que varían de 1.00 a 2.11 Mg/m<sup>3</sup> en capas endurecidas; mientras que Quantin *et al.*, (1993), obtuvieron 1.2-1.6 Mg/m<sup>3</sup> con un valor promedio de 1.45 Mg/m<sup>3</sup>, Norfleet y Karathanasis (1996), en suelos con fragipanes de Kentucky presentaron DA de 1.21-1.53 Mg/m<sup>3</sup> incrementándose en relación a la profundidad donde muchos fragipanes tienen densidades mayores a 1.40 Mg/m<sup>3</sup>, Norton (1981) citado por los anteriores autores reporta densidades en fragipanes de 1.4-1.6 Mg/m<sup>3</sup>.

Flores *et al.*, (1996) citan que algunos duripanes de Morelos la DA fluctúa de 1.80-1.92 Mg/m<sup>3</sup>, concluyen que estos valores están dentro de los intervalos reportados en otros trabajos para duripanes en México. Luzio y Saavedra (1992), al referirse a suelos endurecidos de Chile, señalan que la capa cementada y compactada de riolita-pumítica la DA aparente es más baja de lo que esperaban (1.0 Mg/m<sup>3</sup>).

La densidad real (DR) en tepetates comprende de 2.27 a 2.47 Mg/m<sup>3</sup> con un promedio de 2.35 Mg/m<sup>3</sup> (Peña y Zebrowski, 1992), Werner (1992), reporta DR de 2.5 a 2.7 Mg/m<sup>3</sup> y que el promedio es de 2.65 Mg/m<sup>3</sup>, Peña y Zebrowski (1992),

mencionan que las DR de los tepetates se encuentran entre 2.4 y 2.8 Mg/m<sup>3</sup>. Flores *et al.*, (1996) reportan valores de 2.20-2.47 Mg/m<sup>3</sup> donde la porosidad total fue de 19 a 24 %.

Los anteriores autores mencionan que la porosidad de algunos duripanes del estado de Morelos es baja con pocos poros de 1 a 50 por dm<sup>2</sup>, diámetro de microporo inferior a 0.075 mm, discontinuos y cerrados parcialmente debido a la cementación que presenta. Pierre y Campos (1987), citan que las capas superficiales del tepetate presentan una porosidad con cavidades, vacuolas, vesículas y algunos poros, se observan huellas de silicificación del material en forma de revestimientos espesos de color gris a gris-rojizo.

Torrent *et al.*, (1980), determinaron la DA de duripanes en un Typic Durixeralf fue de 1.58 a 1.93 Mg/cm<sup>3</sup> y la dureza de los bloques vario desde 3 a 160 kg/cm<sup>2</sup> y la media de 18 muestras fue de 24.7 kg/cm<sup>2</sup>. Quantin *et al.*, (1993), reportan que tepetates que tienen un comportamiento de fragipan presentan una resistencia a la compresión < 10 kg/cm<sup>2</sup>, aquellos que presentan comportamiento de duripan de 40-60 kg/cm<sup>2</sup>, y con un comportamiento intermedio de 15-25 kg/cm<sup>2</sup>. Terzaghi y Peck (1967), presentan un sistema de clasificación por consistencia basada sobre compresión no confinada, donde consideran que valores mayores de 4 kg/cm<sup>2</sup> son catalogados como duros.

Flores *et al.*, (1992 y 1996), al realizarle la prueba de resistencia a compresión inconfiada a fragipanes y duripanes del estado de Morelos, tuvieron valores de 4.5 a 8.8 y de 9 a 23 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente, por lo que consideran que estos valores son bajos con relación a otros trabajos reportados donde el contenido de humedad es un factor que influye en esta prueba.

En relación al análisis granulométrico en capas cementadas los resultados no son homogéneos, ya que éste va a depender del método utilizado (Bouyoucos o pipeta) da diferentes porcentajes de partículas, de forma general el porcentaje de arena va de 30 a 60%, los limos de 20-40% y las arcillas de 25- 54% (Quantin *et al.*, 1993). Valdez (1970), concluye que todos los tepetates estudiados por él son de textura arenosa.

Pacheco y Estrada (1987), en su estudio granulométrico observaron que el mayor porcentaje de arena corresponde al tepetate rojo (66%), le sigue el tepetate amarillo (64.08%) y finalmente el tepetate blanco (59.02). Norfleet y Karathanasis (1996), mencionan que la textura de fragipanes de suelos de Kentucky E.U. tienen igual o menos del 30% de arcilla y que suelos con horizonte frágico tienen rangos de 17 a 43% de arcilla, concluyen que la arcilla iluvial juega un papel importante en el desarrollo de las propiedades frágicas y que arcillas iluviadas, especialmente arcillas con capa silicatada expandible puede ser un factor que contribuye a la degradación de la formación de un fragipan.

### 2c. Químicas.

En general los tepetates de México presentan un pH alcalino a neutro (pH 8.5-6.8), las diferencias de pH pueden deberse a las cantidades de sales solubles que se disuelven al adicionarle agua destilada y tienden a elevar el valor de pH (Quantin *et al.*, 1993). Los niveles de materia orgánica y nitrógeno son bajos, cantidades medias a altas de potasio y niveles altos de calcio y magnesio intercambiable, bajo contenido de fósforo asimilable. Los micronutrientes como manganeso, hierro y zinc son bajos y se ha comprobado la existencia de deficiencias de hierro en tepetates. (Cruz *et al.*, 1990; Dubroeuq, *et al.*, 1989; Quantin *et al.*, 1992; Etchevers *et al.*, 1992)

En fragipanes de suelos de Kentucky al extraer por métodos secuenciales selectivos el aluminio, hierro y sílice, obtuvieron un decremento con relación a la

profundidad de hierro y aluminio, fueron extraídos por oxalato de amonio. Debido a que la mayor alteración se presenta en la superficie; mientras que, la sílice obtenida por oxalato de amonio la consideran como indicadora de propiedades frágicas, pero aquellos horizontes con algún desarrollo de características quebradizas generalmente tuvieron alto contenido de sílice, el cual lo asociaron a horizontes argílicos.

Estos autores explican que la firmeza de los fragipanes se presenta cuando las relaciones molares  $Si/Si+Al$  o  $Si/Si+Al+Fe$  tienden a ser altas, concluyen que la técnica de extracción alternada de oxalato de amonio y citrato-ditionito-carbonato de sodio en medio ácido y alcalino indicaron que los aluminosilicatos amorfos con relación mayor de 0.5 de Si puede ser la responsable de la resistencia del fragipan.

La capacidad de intercambio catiónico reportada para tepetates en México varía de 17.2 a 40.6 meq/100 g de suelo, Flores *et al.*, (1992, 1996) reportan para fragipanes y duripanes del estado de Morelos capacidades de 19-35 y de 22-39 meq/100 g de suelo, respectivamente. Esta variación de los valores de capacidad presentes en las capas endurecidas, puede estar dada por las arcillas no cristalinas (minerales amorfos), que se forman a partir de la alteración del vidrio volcánico o de feldespatos.

La relaciones molares  $SiO_2/Al_2O_3$  de óxidos libres en tepetate con haloisita presentan valores de 3.3 a 4.3 y de 6.1 para los que contienen esmectita.(Peña y Zebrowski, 1992). En duripanes del estado de Morelos, Flores *et al.*, (1996), reportan relaciones molares de 4.55-5.27.

#### **2d. Mineralogía de capas endurecidas.**

Las capas endurecidas están constituidas principalmente por productos piroclásticos, de los cuales más de la mitad de los constituyentes son fenocristales y

vidrios inalterados (Quantin *et al.*, 1993). Los fenocristales residuales contienen plagioclasas sódicas (albita-andesina), feldespatos potásicos y sódicos, cuarzo, hornblenda, hiperstena, titano-magnetita, augita.

Pacheco y Estrada (1987), al determinar la mineralogía de capas endurecidas al oriente del Valle de México, en tepetate blanco, se presentó hematita, andesina, albita y cuarzo; en tepetate amarillo, además de los minerales anteriores magnetita; en tepetate rojo, hornblenda, hematita, andesina y cuarzo. Estos autores concluyen que en los tres tepetates predomina la plagioclase sódica (andesina).

Camargo *et al.*, (1987), mencionan que en la composición mineralógica del tepetate rojo del Valle del Mezquital predomina el cuarzo y la hornblenda, además de andesinas, feldespatos, alumino-silicio, anhídrido de potasio, calcio y hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), este último mineral da la coloración rojiza. En el tepetate blanco predominan la hornblenda y los feldespatos. Miehlich (1992); Cervantes *et al.*, (1992); Pena y Zebrowski, 1992; Hidalgo *et al.*, (1991); Pacheco (1979) y Valdez (1970), resumen que los minerales más frecuentes en los tepetates de México son el ópalo A, cuarzo, piroxenos de augita e hiperstena, micas de biotita, plagioclasas cálcicas (anortita), hornblenda, magnetita, feldespatos de sodio y potasio (sanidina), óxidos de aluminio, hierro y manganeso y vidrio devitrificado. En cuanto a los minerales de arcilla, la esmectita, alofano, imogolita, illita, haloisita, gibsita y gohetita; así como minerales ricos en sílice, cristobalita.

Besoain *et al.*, (1992), estudiando suelos con capas cementadas de Nadis en Chile indica la presencia de gibsita, cuarzo, plagioclase, cristobalita, alofano e imogolita, mientras que Vera y López (1992), mencionan que en el Cangahua del Ecuador se presentó plagioclase (esta en el rango de andesina-albita), hornblenda, augita, biotita y cuarzo, además de feldespatos de potasio y magnetita, presencia de cristobalita y vidrio devitrificado, minerales amorfos y trazas de montmorillonita.

## 2e. Micromorfología de capas cementadas.

Los estudios micromorfológicos de capas endurecidas son de gran importancia, ya que permiten detectar en muestras inalteradas los rasgos específicos relacionados directamente con el origen y la distribución de los cementantes. Flach *et al.*, (1992) indican que la micromorfología es una invaluable herramienta en la planeación y ejecución en programas de investigación.

Los estudios micromorfológicos de la fabrica del suelo ayudan identificar el horizonte del suelo, desde el cual es formado el endurecimiento. El mecanismo de cementación, esta definido por el equilibrio que existe entre las fuerzas de cohesión y adhesión del cementante químico y la matriz del horizonte endurecido.

Chadwick y Netleton (1990), deducen que las uniones covalentes de sílice, hierro, aluminio y materia orgánica presentan modelos de distribución relacionada porfírica cerrada, donde los cutanes isotrópicos revisten los granos y rellenan los poros y ranuras.

Alfaro *et al.*, (1992) y otros investigadores proponen un complejo de rasgos micromorfológicos indicadores de capas endurecidas, dentro de los cuales se distinguen las siguientes: (1) distribución relacionada de las unidades de la fabrica: porfírica; (2) fabrica textural: argílica, frágica o nítica; (3) B- fabrica: poro y grano estriado o moteada en mosaico; (4) porosidad total efectiva: de 30%; (5) predominio de poros aislados de tipo cámara; (6) alto contenido de hierro y de manganeso; (7) diferentes formas morfológicas de carbonatos; (8) microestructura masiva o de bloques subangulares. Esta última característica es indicadora de una reorganización completa de la masa basal de capas endurecidas, lo que a su vez, provoca cambios considerables en la magnitud y morfología de su espacio poroso. Los rasgos pedológicos más comunes que se presentaron son nódulos típicos y pseudomórficos

de hierro y manganeso con un grado de intemperismo e impregnación de moderado a fuerte.

Flach *et al.*, (1992) indican que la micromorfología en suelos de andisoles muestra que los revestimientos de sílice están asociados con una película de arcilla. La sílice, se encuentra como pequeños precipitados de ópalo A en la matriz de los durargids o como sílanes de ópalo CT que son interestratificados con argílanes.

La sílice al precipitarse en la matriz, forma pequeños revestimientos con diámetros que no exceden a 1 micra, comenzando con la aparición de la sílice opalina íntimamente asociada con otros componentes del suelo (Chadwick *et al.*, 1987).

La sílice al observarse en secciones delgadas es completamente isotrópica, como glóbulos difusos en la matriz de los agregados o como revestimientos en el exterior de los agregados. En agregados cementados, la sílice es extremadamente delgada, débilmente birrifigente por toda la matriz. Si el agregado esta fuertemente cementado, la formación de la calcedonia se hace patente, altamente birrifigente y el índice de refracción es de 1.49 (Flach *et al.*, 1969).

La sílice opalina se identifica por su forma e isotropismo en luz cruzada y por su color amarillo en luz plana (Chadwick *et al.*, 1987). La sílice y la arcilla en suelos arcillosos se localizan revistiendo granos de cuarzo y espacios vacíos, mientras que en suelos con textura arenosa, presenta una apariencia laminar indicando la acumulación gradual a través de numerosos eventos iluviales.

Dubroeucq (1992), menciona que la movilización de la sílice existe en el suelo, la cual se manifiesta de modo estable en los revestimientos laminares que son una combinación de ópalo cristobalita y de haloisita no diferenciables ópticamente en el microscopio petrográfico, sin embargo, en los diagramas de rayos X se evidencia la presencia de haloisita y cristobalita con un poco de cuarzo.

## CAPITULO III

### 3. Localización y toposecuencias de las capas endurecidas.

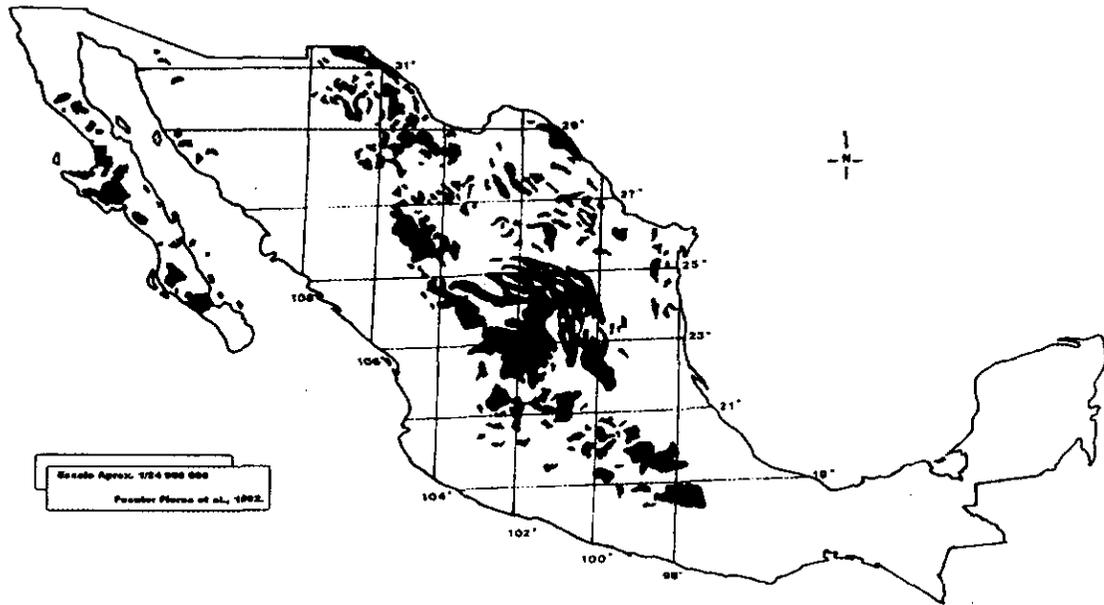
#### 3a. Distribución espacial de las capas cementadas.

Los horizontes o capas endurecidas ocupan actualmente una superficie importante en varios países de América Latina. En México, su localización es principalmente en el Altiplano, entre los 1,800 y 2,900 msnm, en climas de tipo subhúmedo (Cw) y semiárido (Bw), caracterizados por una estación invernal seca, bien definida y un régimen de humedad en el suelo ústico-údic (Dubroeuq, citado por Navarro *et al.*, 1992) y en ocasiones xérico-ústico (Gama, 1997 comunicación personal)

La planimetría de estas formaciones indican que los tepetates cubren una superficie de 30,700 km<sup>2</sup> o sea el 27% de la superficie del Eje Neovolcánico Mexicano (Zebrowski, 1991). Al confrontar mapas climatológicos con la localización de los suelos volcánicos endurecidos, muestra que en su mayoría están situados en regiones de clima relativamente seco.

Varios autores (Miehlich, 1984; Dubroeuq *et al.*, 1989, Nimlos, 1990), destacan la estrecha relación entre zonas climáticas y la distribución de los tepetates en México, estos se presentan bajo una pluviometría total anual inferior a 800-900 mm; los tepetates ricos en carbonato de calcio se localizan en zonas con precipitación inferior a 650-700 mm, Flores, 1997 (comunicación personal) ha observado petrocálcico al sur del estado de Morelos formados con precipitaciones de 1,000 mm anuales. Miehlich (1992), menciona que el tepetate se forma bajo un clima ústico-isomésico donde la sílice se concentra {> 60 mg/l de Si(OH)<sub>4</sub>}.

Flores *et al.*, (1991), mencionan que por las características climáticas que prevalecen en la Altiplanicie Mexicana, de aridez y semiaridez, los tepetates dominantes son petrocálcicos, petrogypsicos y en menor proporción duripanes, estimando que 660,000 km<sup>2</sup> de la República Mexicana presentan una capa u horizonte endurecido. En la figura 3 se representa cartográficamente esta distribución.



**Figura 3.** Distribución de las capas endurecidas en la República Mexicana. (Fuente Flores *et al.*, 1992)

Los petrocálcicos, se ubican en las provincias fisiográficas de la Mesa del Centro, Sierra y Llanuras del Norte, Sierra Madre Oriental y la Llanura Costera del Golfo Norte (Figura 3), mientras que los petrogypsicos se distribuyen en los estados de Coahuila, Nuevo León y San Luis Potosí, y los duripanes se localizan en el Eje Neovolcánico Transmexicano (Guerrero *et al.*, 1992; Dubroeuq *et al.*, 1992; Peña *et al.*, 1992)).

3b. Secuencias topoclimáticas y pedogénicas.

La distribución de los suelos y precisamente de los diferentes tipos de tepetates, muestra claramente una relación estrecha entre ellos y varias secuencias topoclimáticas, es decir, en el régimen hídrico y térmico. En la Cuenca de México, la cementación por acumulación de la sílice aparece al inicio de la zona climática subárida, abajo de la zona húmeda con andosoles (sin tepetates), mientras que, más abajo predominan las acumulaciones de caliza en la zona seca (Figura 4). A lo largo de la toposecuencia se evidencia que los diferentes tipos de tepetates iniciaron su formación a partir de depósitos volcánicos específicos. Asimismo, se puede establecer una cronosecuencia estratigráfica de los tepetates.

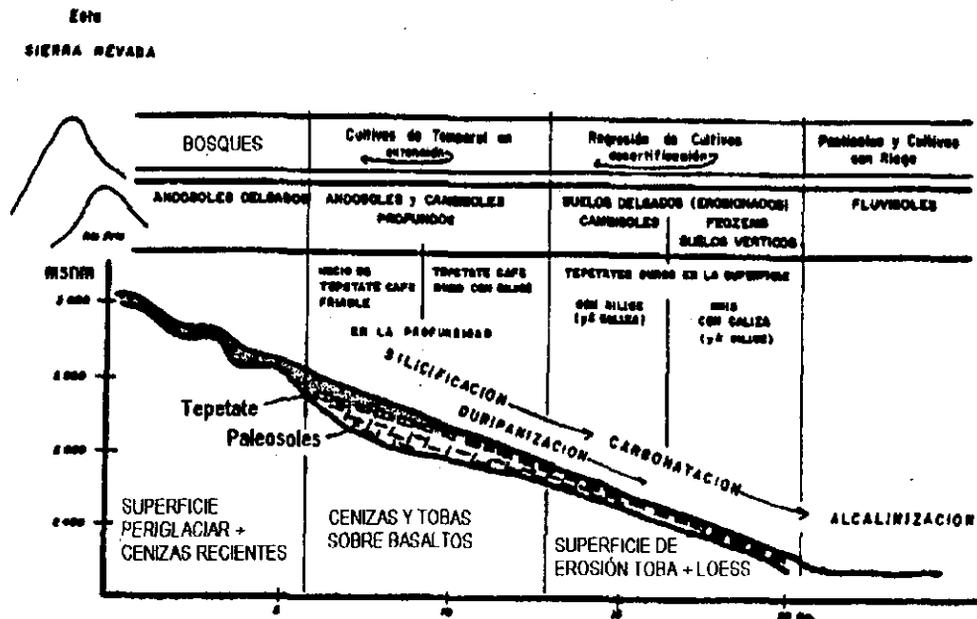
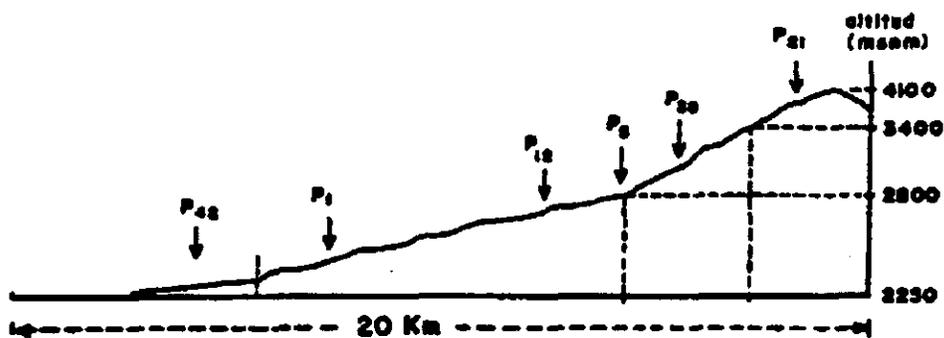


Figura 4. Climo-topo-secuencia de suelos y tepetates de Río Frío, Estado de México (Fuente: Dubroeuq et al., 1989).

Peña y Zebrowski (1992), mencionan que las características de los suelos dependen de los materiales originales y del clima. La variación de este último en función del relieve, hace que los suelos estén distribuidos en topoclimosecuencias (Figura 5).



Fisiografía	Planicie aluvial	Glacis	Piedemonte			Sierra	
						baja	alta
P (mm)	600		900				1100
Régimen hídrico	ústico					édico	
Materiales originales	aluviones	coluvion/Ti	T2/T3		T3 ó T1	Cenizas volcánicas	
						gran espesor	poco espesor/roca
<b>Características</b>							
MO% (epig.)		2.7	1.2	1.7	?	9.4	16
pH		8.2	6.9->7.7	6.5->7.7	6.4->7.4	6.8->7.9	6->6.4
S.B.%		Sat.	Sat.	Sat.	45-60	58-76	30-45
CaCO <sub>3</sub>		++	+				
Dureza del tepetate		++++	++	+			
Mineralogía			T2: Esm. T3: Hal.	Esm.+Hal. Hal.	Hal.	Alófono + Hal.	Alófono
Suelos	aluviales	Calcaric Phaeoz.	Vertic Cambisol	Butric y Luvic Cambisol	Luvic Cambisol	Mollic Andosol	Umbric Andosol

Figura 5. Topoclimosecuencia de suelos propuesta por Peña y Zebrowski, (1992).

La secuencia de silicificación y carbonatación de los suelos en la Cuenca de México sigue precisamente el modelo normal de precipitación y acumulación, primero de la sílice y luego de la caliza, en relación con una secuencia climática desde lo húmedo hasta lo árido (Dubroeuq *et al.*, 1989).

## CAPITULO IV

## 4. Génesis de capas endurecidas.

Las capas endurecidas es un tema de gran discusión entre los investigadores que las estudian, ya que estas se pueden originar por vía geológica, pedológica o de ambos, caracterizándose cada una de ellas por llevarse a cabo procesos físico-químicos que involucran mecanismos de alteración y transformación de minerales. A continuación se describirá cada uno de los procesos.

**Tabla 2.** Clasificación genética de los flujos piroclásticos.

Mecanismo de erupción	Flujo piroclástico	Deposito	Fragmentos esenciales
		depósito de flujos	
♦ Erupción columnar (origen) colapso	flujo pumítico	de ignimbrita y pómez	pómez
	flujo de cenizas	pómez	
	flujo de escoria	flujo de cenizas tobas	escoria
		depósitos de flujo de escoria	
♦ Lava, colapso de domos (explosivo y gravitacional)	bloques y flujos de cenizas (nubes ardientes)	bloques y depósitos de flujos de cenizas	lava densa
♦ Explosiva	caliente, seco	volcanoclástico	accesorios líticos
• criptodomo	volcanoclástico	flujo de detrito	(+/- fragmentos jóvenes)
• liberación	flujo de detrito		

Fuente: Cas y Wright citados por Prat, 1991

#### 4a. Procesos volcanogénicos.

El proceso de endurecimiento volcanogénico puede darse por tres formas: a) flujo piroclástico de tipo nube ardiente, b) hidromagmático y c) lahares (coladas de lodo), {Fisher y Schmincke, 1984}. Los flujos piroclásticos forman ignimbrita a partir de gases ardientes a temperaturas de 700 - 900 °C debido a una fusión superficial de los vidrios y soldadura de los piroclastos (lapilli y pómez), con estructura fluidal, sin presentar cementantes de neoformación, ni alteración de los vidrios.

En el caso de formaciones hidromagmáticas, piroclastos de tipo cinerita, toba, brecha, nódulos de acreción de cenizas, son consolidadas por alteración hidrotermal a temperaturas de 200 a 500 °C, que trae como consecuencia la disolución de los vidrios, debido a la presencia de gases y fluidos ácidos ( $H_2O_2$  + HF, HCl,  $CO_2$  y otros) y cementados por productos de alteración que en su mayoría son sílice, arcilla y óxidos metálicos. Los endurecimientos de este tipo, tienen una permeabilidad leve o nula, de dureza variable. En la tabla 2, se clasifican genéticamente los flujos piroclásticos de acuerdo a Cas y Wright citados por Prat, 1991.

En relación a los lahares, se presentan dos tipos: lahares fríos, que son el resultado de la fusión de un glaciar después de una erupción volcánica y lahares calientes, se producen por la ruptura de un lago de aguas calientes (menor de 100 °C) y ácidas de un cráter volcánico. Ambas formaciones presentan poca cementación. La clasificación genética se resume en la tabla 3.

Nimlos (1989), menciona que la consolidación geológica es a grandes rasgos una función de la temperatura de los fluidos, donde la temperatura es particularmente alta, hay una considerable compactación, se lleva a cabo una fusión de los minerales que contienen la sílice formando una densa roca denominada "toba soldada". Si la temperatura del flujo fue moderada y la compactación mínima, podría presentarse una pequeña consolidación.

Tabla 3. Clasificación genética de depósitos piroclásticos

Mecanismo de erupción	Piroclástico	Dispersión	Fragmentación	Fragmentos esenciales	
Magmática	abierta	hawaiana	pequeña	baja	escoria
		estromboliano			escoria
		subpliniano			pómez (escoria)
		pliniano	amplia	alta	pómez
	cerrada	ultrapliniano volcánica	amplia a moderada	alta a moderada	(escoria) pómez
Freatomagmática		surtseyan	moderada	alta	básica
		freatopliniano	amplia	alta	cenizas silíceas

Fuente: Cas y Wright citados por Prat, 1991.

#### 4b.- Procesos pedogenéticos.

Diferentes autores han propuesto hipótesis donde se plantea el origen pedológico de los horizontes endurecidos a partir de rasgos edáficos, acumulación de arcilla, óxidos de hierro y sílice relacionándolos al clima y al material parental como los principales factores que intervienen en su formación.

Valdez (1970), menciona que la formación del tepetate, es producto del arrastre aluvial de un fanglomerado por la deglaciación en distintos períodos comprendidos a finales del terciario y parte del cuaternario. Los cambios climáticos

que ocurrieron en esa época en la Cuenca de México propició la formación de los suelos *in situ*, las arcillas y los óxidos de hierro, así como los carbonatos y principalmente el silicio soluble, proveniente del vidrio volcánico, que van consolidando y cementando los horizontes.

Dubroeuck *et al.*, (1989), plantean que el endurecimiento se puede dar por compactación y desecación de suelos muy arcillosos, a consecuencia de la expansión y contracción de las arcillas, por un proceso de iluviación o de neosíntesis de arcillas en los horizontes inferiores del perfil.

Otro planteamiento que dan, es por cementación reversible (fragipan) o irreversible (duripan) éste último por sílice, calcio, magnesio, etc. la cual se lleva a cabo por procesos periódicos de concentración en la parte superior del suelo, aunado a una evapotranspiración durante la estación seca, después de precipitarse los óxidos ( $\text{SiO}_2$ ) y los carbonatos ( $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgCO}_3$ ) se cristalizan, los que provocan la cementación del material subyacente.

Por último, los endurecimientos por cementación irreversible, debido a la acumulación de óxidos e hidróxidos de aluminio, hierro y manganeso, es resultado de un proceso complejo de: (a) movilización (complexolisis o reducción), (b) redistribución, (c) precipitación (por concentración u oxidación), (d) cristalización y (e) el endurecimiento (acreciones, concreciones y encostramientos) de los óxidos e hidróxidos.

Quantin *et al.*, (1993), se hacen la pregunta si la consolidación del material original es anterior o es consecuencia de la pedogénesis. En los tepetates típicos T2a y T3 (tepetates con o sin carbonatos) en México, la abundancia de rasgos edáficos de acumulación de arcilla, de óxidos de hierro y de sílice, correlacionada con un régimen climático ústico, favorece la idea de la pedogénesis; sin embargo, la consolidación probablemente no es una consecuencia de la pedogénesis. Por el

contrario, lo compacto de la toba original reduce la velocidad de alteración y provoca la acumulación de arcilla, sílice y óxidos de hierro y en ocasiones carbonatos, ya que se trata de series de la parte baja de la climotoposecuencia (Figuras 4 y 5). La pedogénesis en un régimen climático ústico favorece la acumulación de material y refuerza así la consolidación de la toba original, la sílice y los óxidos de hierro que recubren las arcillas, contribuyen después de una deshidratación, al endurecimiento de estos materiales.

Nimlos y Ortiz (1987), mencionan que la cementación por sílice es en parte pedogénica y en parte geológica, pero la cementación por carbonatos es claramente pedogénica. Sin embargo, Nimlos (1989), considera que la cementación pedogénica de la sílice en el tepetate es difícil de diferenciarse de una consolidación geológica, donde la capa de sílice iluviada no ha sido bien definida.

Para Miehlich (1992), la formación del tepetate se divide en cuatro fases: (a) sedimentación de tobas sedimentarias; (b) la formación de un Ustropept eútricos, el cual es rico en ópalo A y arcilla; (c) erosión del horizonte superior del suelo y, (d) compactación y endurecimiento del subsuelo. Para él, el tepetate se origina de antiguos depósitos de cenizas volcánicas, que al intemperizarse y liberarse la sílice, en condiciones de clima ústico-isomésico, ésta se concentra formando arcillas ricas en ópalo-A coincidiendo con lo reportado por Flach *et al.*, (1992) donde las películas de ópalo provocan el endurecimiento.

Oleschko (1992), menciona cuatro factores que son requisitos en la formación del tepetate: (a) depósito periódico de materiales volcánicos; (b) circulación de soluciones enriquecidas con Ca, Fe, Si o arcilla dentro del sistema; (c) presencia de pantallas texturales dentro de los perfiles y, (d) tasas altas de erosión hídrica. Todos estos procesos originan los rasgos micromorfológicos en los tepetates, lo que permite revelar su origen.

Vera y López (1992), en su trabajo de tipología del Cangahua en Ecuador, mencionan que en áreas de suelos alóctonos o sin evolución pedogenética se presentan otras formas de cementación en el proceso diagenético de las cenizas y materiales piroclásticos finos para formar el Cangahua: (a) infiltración, (b) inyección, (c) el proceso selectivo de hidratación del vidrio por retención de humedad en los microporos en forma de núcleos y (d) por capilaridad a partir de los depósitos de grano grueso infrayacentes con saturación parcial o total del agua.

Alvarez y Sparks (1985) y otros autores citados por Chartres *et al.*, (1990), concluyen que la complejidad de polimerización de la sílice y compuestos de hidroxialuminio, son los agentes precursores cementantes de las capas endurecidas.

## CAPITULO V

### *5. Dinámica y procesos de formación de capas endurecidas.*

#### **5a. Devitrificación y solubilidad de la sílice.**

Flach *et al.*, (1979), mencionan que la sílice no está restringida a los duripanes, puede identificarse como cementante en algunos suelos agregados que resisten la dispersión de partículas y como cementante responsable del endurecimiento de algunos fragipanes, contribuyendo además a la cementación de horizontes petrocálcicos.

Aepli, citado por Zebrowski (1992), es el primero que probablemente trata de demostrar que existe un enriquecimiento de sílice en ciertos horizontes cementados, como resultado de un lavado de éste elemento de los horizontes superiores.

Quiñones (1987), afirma que la fuente inmediata para la formación de una costra silícea en condiciones edáficas es la sílice que se presenta en las soluciones del suelo en forma de ácido ortosilícico monomérico ( $H_4SiO_4$ ), en concentraciones que van de 7 a 80 mg g<sup>-1</sup> siempre por debajo del valor de saturación de 120 mg g<sup>-1</sup>.

A continuación se discute uno de los procesos más importantes en el endurecimiento de los horizontes de suelos de origen volcánico. La solubilidad de las distintas formas de sílice depende principalmente de la temperatura, el pH y el tamaño de la partícula.

Williams *et al.*, (1985); y Kittrick, (1969), mencionan que la sílice amorfa presenta una mayor solubilidad que la cristobalita y el cuarzo. A temperatura de 25°C, la solubilidad del cuarzo es aproximadamente de 6-10 ppm, cristobalita ≈ 20-30 ppm y de la sílice amorfa ≈ 60-130 ppm.

Por deducciones termoquímicas, se calculó que la solubilidad del cuarzo varía entre 7 y 14 ppm a temperatura ambiente, en cambio la solubilidad de la sílice amorfa, es diez veces superior. La solubilidad de la sílice coloidal, en diversos tamaños de partículas, puede ser deducida a partir de la solubilidad de la sílice amorfa  $S=0.01\%$  en agua a 25-30 °C (Besoain, 1985).

Las temperaturas altas y pH mayores de 9 influyen fuertemente en la disolución de la sílice, no obstante existen algunas confusiones, al considerarse que la solubilidad de la sílice se incrementa a medida que el pH pasa de 3 a 8. Trabajos recientes (Shoji *et al.*, 1993), indican que la solubilidad de la sílice (cristalina o amorfa), es independiente del pH abajo de 9, pero se incrementa fuertemente sobre este. Parece ser que la rápida solubilidad sobre pH 9 se debe a la ionización del ácido monosilícico:



La sílice puede entrar en solución en forma monomérica,  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  o en forma de polímero de tamaño variable. Iler citado por Besoain (1985), comprobó la existencia de formas monoméricas de ácido ortosilícico en solución. El grado de polimerización de la sílice soluble aumenta rápidamente en el ámbito de pH de 3 a 10. El autor supone, que esta reacción es catalizada por iones hidroxilo. Examinando la curva de solubilidad de la sílice en función del pH parece que la sílice se presenta como ácido silícico monomérico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ), con disociación en  $\text{H}_2\text{SiO}_3^-$  a pH alcalino; de ahí la argumentación de la fuerte solubilidad de la sílice a pH mayor que 9.

La cantidad de sustancia disuelta a partir de cuarzo, como función del tiempo, en condiciones de pH 11 y a 25 °C se obtuvo una velocidad de disolución de 5 a 6 mg l<sup>-1</sup> en 20 días de tratamiento en partículas de 5-25 μm de diámetro. La solubilidad de la sílice amorfa está fuertemente influenciada por la temperatura y se duplica entre 0 a 90 °C.

La disolución de la sílice en agua implica hidratación y despolimerización simultánea :



Cuando la sílice pasa a la solución debe presentarse una reacción química entre la superficie de la fase sólida y el agua, lo que determina que la superficie de la fase sólida de las partículas de la sílice se hidrate, a medida que cada átomo de silicio se rodea de átomos de oxígeno, estos se separan de la superficie en forma de ácido monosilícico soluble, mediante una reacción posterior con agua.

Respecto a la superficie de los polimorfos del cuarzo, cristobalita y tridimita hay poca información aunque su estructura cristalina es más abierta debe estimular una meteorización más acelerada. La disolución de la sílice en los suelos esta afectada no solo por la solubilidad sino por componentes orgánicos e inorgánicos, formación de películas superficiales y otros. Se sabe que algunas moléculas orgánicas, como el ácido algínico, algunos aminoácidos, el ATP aumentan la disolución de la sílice (Shoji *et al.*, 1983).

La mayor disolución del cuarzo observada en la zona radical, en algunos suelos parece deberse a la acción de componentes orgánicos capaces de acomplejar la sílice. Algunos componentes inorgánicos como óxidos de hierro, carbonatos y

sulfatos de calcio, incrementan la solubilidad de la sílice. Por el contrario sustancias como la alúmina disminuye la solubilidad.

El control de la precipitación de los minerales por la actividad de  $H_4SiO_4$  sugiere que niveles altos de este es un factor importante en la formación de minerales secundarios en el suelo y sedimentos (Kittrick, 1969) por ejemplo, altos niveles de  $H_4SiO_4$  se requieren para la formación de motmorillonita (dicha arcilla esta asociada a vidrios volcánicos).

La motmorillonita en condiciones de impedimento de drenaje por un largo tiempo, da como resultado una alta actividad de  $H_4SiO_4$ , requerida para la estabilidad de la arcilla, sirviendo ésta como un mineral indicador geológico de niveles de sílice cerca de la saturación con respecto a la sílice amorfa (Velde, 1995).

Flach *et al.*, (1992) mencionan que la formación de ópalo A u ópalo CT, depende de la cinética de precipitación, el cual es controlado por atributos del clima y del material parental. La formación de ópalo A se favorece si la concentración de  $Si(OH)_4$  en la solución es mayor de  $60 \text{ mg l}^{-1}$ , el ópalo CT se forma si la concentración en la solución se encuentra entre  $20$  y  $60 \text{ mg l}^{-1}$  a través de la alteración del ópalo A, y el cuarzo microcristalino es formado si éste es menor de  $20 \text{ mg l}^{-1}$ . Este factor puede ser reconsiderado con la observación que el ópalo A se encuentra principalmente en duripanes influenciados por la intemperización temprana del vidrio volcánico, mientras que el ópalo CT se encuentra predominantemente en duripanes muy viejos, formados de rocas ígneas básicas.

Chartres *et al.*, (1990), determinaron que la sílice amorfa es probablemente el mayor agente cementante de un horizonte E de un Aeric Albaqualf. Sus resultados indican que, aluminosilicatos semejantes a la imogolita, minerales de feldespatos y posiblemente complejos de Si-Fe forman parte de la cementación.

Wada (1980), citado por White y Zelazny (1990), en sus resultados de análisis químicos en alofano, determinó que la relación  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  varía de 1.40 a 2.00, mientras que, la imogolita es de 1.05 a 1.15. La formación de imogolita y alofano se presenta durante la alteración del vidrio volcánico, en condiciones climáticas húmedas templadas o tropicales. La gran proporción de vidrio volcánico, favorece la formación de minerales de rango corto, los cuales son de fase metastable, característicos de suelos recientes. La actividad alta de los vidrios en todas las variedades de cenizas volcánicas (basálticas, andesíticas, dacíticas) produce alofano-imogolita, como producto de alteración. Con el tiempo el alofano-imogolita se transforma a gibsita o haloisita, dependiendo de las condiciones ambientales que favorezcan la desilicicación o no. Sin embargo, alofano-imogolita, pueden persistir en los suelos por largos períodos de tiempo si las condiciones son favorables.

Esta gran estabilidad ocurre bajo un clima de constante humedad, en temporadas secas se induce la desecación del suelo e incrementa la concentración de la sílice en la solución del suelo. Esto resulta en la formación de haloisita y cristobalita con la pérdida de minerales (Lowe 1986, citado por Velde, 1995).

Otros factores como la edad y la desecación periódica contribuyen a la persistencia de alofano-imogolita o a la transformación de haloisita. Los materiales riolíticos presentan una relación baja de Al/Si, lo cual favorece la formación a haloisita; mientras que, materiales andesíticos con relación Al/Si alta promueven la estabilidad del alofano e imogolita. La acumulación de humus en andisoles, está generalmente adscrita a esta reacción con alofano, formando complejos humus-alofano. Sin embargo, cuando la acumulación de humus es muy activa, la formación de complejos Al-humus inhibe la formación de alofano e imogolita, a través de la competencia por aluminios liberados de la alteración de cenizas volcánicas (Velde, 1995).

Las altas precipitaciones, bien distribuidas todo el año inducen la baja concentración de sílice y cationes básicos en la solución del suelo y se favorece la formación de arcillas caoliníticas; mientras que, con poca precipitación, seguido de un período seco, con una intensa evaporación, inducen a la concentración de la sílice y cationes básicos en la solución del suelo, condiciones favorables para la formación de arcillas esmectíticas (Velde, 1995).

Nakai *et al.*, (1990) estudiaron la mineralogía de arcillas de andosoles con diferente drenaje, concluyeron que en un andosol húmico (Typic dystrandept), en su fracción arcillosa predominan amorfos en todos los horizontes, mientras que, en el andosol Aquic dystrochrept predomina haloisita 10 Å en el horizonte profundo y que estas diferencias se deben principalmente al régimen de humedad del suelo. Donde se presente un buen drenaje la concentración y precipitación de la sílice y aluminio puede superar la cristalización de sílice y aluminio en capas silicatadas, la cual trae como consecuencia la formación de arcillas amorfas, mientras que, cuando el agua se estanca en el suelo (andosol aquic), puede sufrir cristalización a haloisita, sin embargo en un régimen de humedad ácuico se retarda la oxidación de la materia orgánica.

### 5b. Teoría de la presión de solución.

Black y Fosberg (1991), plantearon con una base teórica dos mecanismos de alteración que dan como resultado la formación de un Duripan a partir de un loess. El primer mecanismo, consiste en la solubilidad de granos causada por la presión entre ellos dada por un incremento en la superficie de energía libre de Gibbs; el segundo mecanismo que presentan, se trata de un sistema cerrado de  $\text{CaCO}_3\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  donde se da diferentes grados de endurecimiento, incremento del pH, esto trae como consecuencia un incremento en la solubilidad de los aluminosilicatos. Al incrementarse el pH y la mayor energía libre de Gibbs en un microambiente, la

calcita se precipita en los poros, la cual es reemplazada por los aluminosilicatos, precipitándose como un silicato amorfo que se distribuye en el plasma. Las propiedades cristalóquímicas de cada una, no se sobreponen en forma laminar, formándose así el Duripan.

Weyl (1950), menciona que este proceso de presión de solución presenta una correlación entre el tiempo, profundidad y el grado de presión de solución. Millot (1964), indica que para que se presente este proceso de cementación debe existir una semejanza química entre el compuesto y la superficie de la fase dispersa.

Monger y Daugherty (1991), establecen que la presión de solución, en el horizonte petrocálcico no es selectiva con respecto al tipo de mineral (cuarzo, feldespatos y fragmentos líticos), todos presentan características similares de disolución, ésta se da en los contactos de los granos de calcita-silicatos. Mencionan además que las causas de la disolución de los granos en el horizonte petrocálcico, se atribuye a la presión de solución causada por la cristalización de la calcita. Ellos observaron en los granos de silicatos huecos de disolución, similares a las formas de los cristales de calcita que los impactan, la presión de solución se presenta en un mayor grado en el horizonte petrocálcico que en la superficie de éste; no obstante, el hecho que los silicatos están en contacto con los cristales de calcita dentro y sobre la superficie del horizonte. Los huecos que se presentan en los silicatos por el efecto de la presión de los cristales se observan en la superficie formas de tipo aserradas, mientras que, en los poros formas lisas. En la figura 6, se muestra esquemáticamente parte de la teoría de la presión de solución.

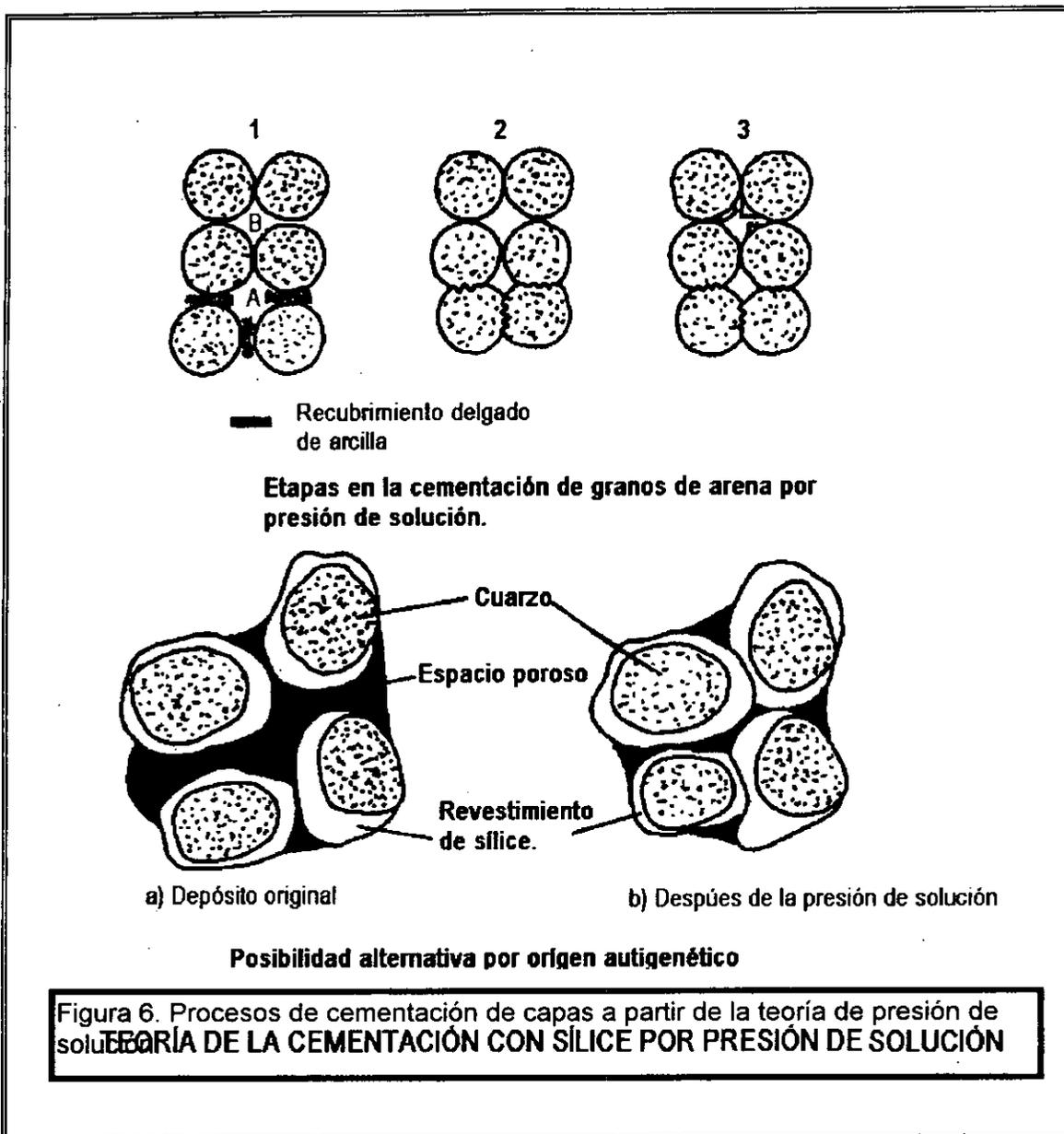


Figura 6. Fuente: GUTIERREZ, 1988.

**5c. Silicificación.**

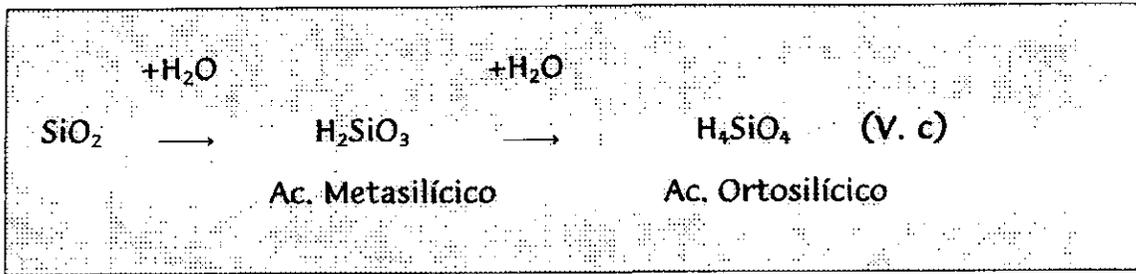
Leo, citado por Stein (1982), concluye que la silicificación en madera inicialmente se presenta por la unión del hidrógeno del ácido silícico monomérico  $Si(OH)_4$  con grupos funcionales (particularmente OH) sobre las moléculas que producen los componentes del tejido vascular, principalmente lignina y celulosa (la silicificación de la madera es determinada por la afinidad de la sílice en solución, por la composición de las moléculas orgánicas).

Además de la silicificación se presenta la polimerización, el ácido silícico monomérico, a través de formaciones de uniones de siloxane y una menor cantidad de agua, estos se depositan en forma de capas de sílice sobre y dentro de las paredes celulares, el cual, parece un gel y al polimerizarse y deshidratarse conduce a un ordenamiento de ópalo y después a cuarzo. La recristalización del sílice puede ser acompañada por una formación de arcilla autigénica.

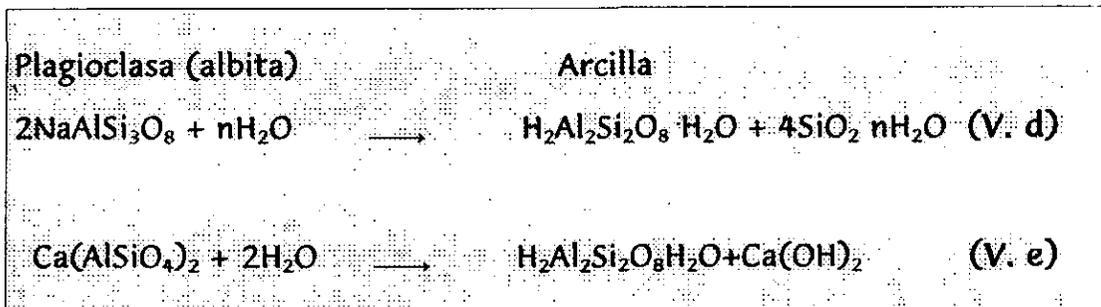
Thiry (1992), menciona que los procesos de disolución y reprecipitación crean una secuencia específica de la fase sílica, al principio en la base con ópalo, luego cuarzo microcristalino y finalmente cuarzo en la superficie. En los horizontes inferiores los esqueletos de grano de cuarzo son preservados y los minerales arcillosos son reemplazados por ópalo, y en ocasiones por cuarzo microcristalino. Esta relación indica recristalización de ópalo a cuarzo durante la evolución del perfil.

La precipitación de la sílice, como consecuencia de la concentración de iones en solución, debido a la evaporación del agua, se produce siempre antes que la precipitación de los carbonatos de calcio. Este modelo concuerda con la secuencia de silicificación y de carbonatación de los suelos de la Cuenca de México (Dubroeuq et al., 1989) en relación con una secuencia climática, desde lo húmedo hasta lo árido (Figura 5). El ácido monosilícico se mueve por evaporación en el interior de los poros pequeños sin que necesariamente los llene y en contacto con grandes superficies de adsorción, la sílice es adsorbida por las arcillas, sesquióxidos y superficies de minerales primarios intemperizados, por lo que se precipita y cementa las partículas (Chadwick et al., 1987)

A continuación se presentan algunos ejemplos que forman un horizonte o capa endurecida. Químicamente el  $\text{SiO}_2$  cristalino o amorfo es un anhidro de los ácidos meta y ortosilícico.

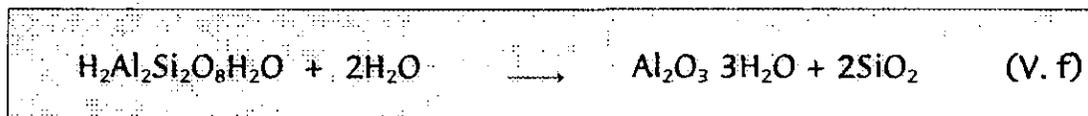


Acidificación es un proceso de intemperización de los feldespatos plagioclásicos



La plagioclasa por acción hidrolítica ha sufrido una transformación total, con producción de un aluminosilicato ( $\text{H}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) que corresponde a una arcilla de tipo caolinítico y de otros compuestos.

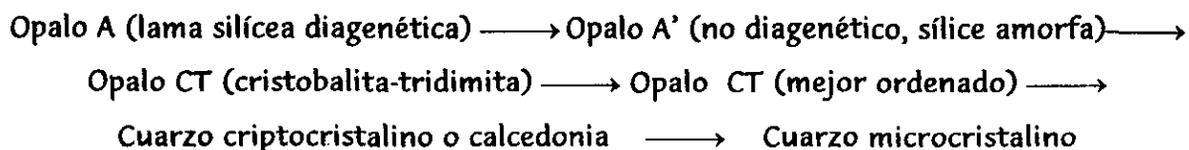
El proceso pedogenético continúa con la degradación de la arcilla con pérdida de agua y sílice y una separación del aluminio como hidróxido denominado gibsita o hidrargilita que responde a la forma  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ó  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  dándose la siguiente reacción:



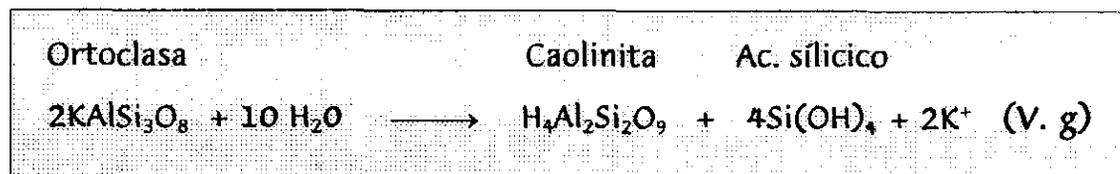
El principal causante de esta reacción es el agua, la cual además de favorecer la alteración, lava los compuestos más solubles y ayuda a concentrar los menos

solubles o casi insolubles en los niveles superiores, como sucede con los óxidos de aluminio y de hierro.

Williams *et al.*, (1985) generalizan la secuencia diagenética de la sílice por reacciones de disolución y reprecipitación:



Para la formación de una capa sílico-cementada, se presenta a continuación la hidrólisis de un aluminosilicato:



Werner (1986), menciona que las investigaciones químicas de solubilidad de los minerales y los estudios de micromorfología realizados en el estado de Tlaxcala, dan evidencia que las sustancias de unión de las partículas, consisten de una mezcla no separable de ácido silícico ( en forma de gel de silicio), y de haloisita (producto de la cristalización de los alofanos).

#### 5d. Biodegradación: Sílice biogénica.

Los organismos juegan un papel muy importante en la intemperización de los minerales, en la actualidad se ha destacado su influencia en diferentes procesos; se ha demostrado que todo un espectro de organismos, desde bacterias hasta raíces de plantas superiores, pasando por hongos y líquenes, liberan ácidos orgánicos, agentes

quelatantes, etc., que atacan los minerales primarios y solubilizan los componentes de los minerales silicatados, algunos otros son capaces de solubilizar partículas de cuarzo como *Bacillus siliceus*, que han tenido aplicación práctica desde el punto de vista agronómico. Dichos organismos absorben el ácido silícico, algunos para retenerlo algún tiempo en sus tejidos y después liberarlo nuevamente en la forma monomérica en que fue absorbida.

Los fitolitos (formación opalina en los tejidos de las plantas que se quedan en el suelo después de que han descompuesto los tejidos vegetales) se concentran en el horizonte A llegando a constituir del 1 a 2% de la masa del suelo. En el horizonte B el contenido de estos se abate en un 0.5% y en el C esta casi ausente. Quiñones (1987), menciona que en la URSS, los bosques de abetos han aportado al suelo de 50-60 t/ha de sílice en forma de fitolitos en 1,000 años.

## CAPITULO VI

### *6. Roturación e incorporación al proceso productivo de los tepetates.*

El fracturado o roturación de los tepetates se ha realizado desde la época prehispánica, llevada a cabo con técnicas rudimentarias por la necesidad de utilizarlos para fines agrícolas (Williams, 1972; Hernández, 1987). En algunas zonas con tepetate los campesinos emplean el pico para fracturarlo, el cual ha sido poco a poco reemplazado por técnicas modernas, empleando roturación profunda, nivelación con equipo pesado y en ocasiones el uso de explosivos.

Werner (1992), señala que el propósito fundamental de la roturación es habilitar terrenos con tepetate a la producción agrícola; proporcionándole al campesino un área con potencialidad de producción similar a terrenos fértiles en condiciones de temporal. El mismo autor reporta que en tepetates rehabilitados no garantiza su inversión, debido a los bajos rendimientos que se obtienen, no alcanza ni siquiera para pagar los primeros cinco años, los gastos de insumos y su propio trabajo.

Sin embargo, otros investigadores (Navarro, 1992; Arias, 1992; Camargo y Guido, 1987; Navarro y Zebrowski, 1992) han demostrado que la roturación y la incorporación de estiércol mejoró la producción de los cultivos, favoreció el mejor sostén mecánico para las plantas, incrementó la capacidad de retención de humedad, mayor comunidad microbiana y la producción puede llegar a ser similar a la obtenida en suelo fértil después de cinco años o más de utilizarlo.

## CAPITULO VII

### 7. Estructura.

#### 7a.- Agregación.

La agregación del suelo es un fenómeno dinámico que afecta las propiedades físicas, mecánicas y biológicas del suelo, se define como un grupo de dos ó más partículas que se adhieren entre sí, las cuales presentan una cohesión mucho más fuerte entre ellas que con las partículas que las rodean (Black *et al.*, 1965; Allison, citado por Diné *et al.*, 1991), generalmente todas las partículas adyacentes presentan mayor grado de cohesión que las fuerzas de separación. Pimavesi (1980), define al agregado como un agrupamiento de partículas del suelo entre 0.5 y 5.0 mm de tamaño, independientemente de su densidad, porosidad, presencia de materia orgánica o de la microbiota.

Para la formación de un agregado, las partículas del suelo deben coagularse, flocularse y mantenerse unidas o ligadas en racimos mediante algún material aglutinante. Los materiales de aglutinamiento pueden ser: las raíces de las plantas, cal, óxidos de Fe y Al, o materia orgánica coloidal. Los polisacáridos sintetizados por microorganismos y secretados por ejemplo por las lombrices, son materiales de aglutinamiento muy eficaces. Muchos electrolitos son los causantes de la floculación de los coloides (Thamhane *et al.*, 1986).

Al considerar dos partículas individuales de suelo de igual masa, una podría ser un agregado primario, el cual se refiere a un cuerpo coherente, constituido por la cementación de las partículas de arena, limo y arcilla, mientras que la otra podría ser una partícula primaria. La primera cuenta con espacios porosos entre sus componentes individuales mientras que la segunda no presenta, por ser una entidad

unitaria (Dinel *et al.*, 1991, 1992; Bartoli *et al.*, 1988; Ellsworth *et al.*, 1991; Colombo y Torrent, 1991; Narro, 1994), Narro (1994), señala que la menor estabilidad de los agregados se debe principalmente al tipo de arcilla y a la naturaleza de la floculación microbiana.

Los agregados primarios, son las unidades estructurales más estables, estos representan a su vez las unidades en las cuales los agregados secundarios pueden descomponerse tanto por las fuerzas del clima como por la acción abrasiva de las partículas que transporta el viento. Los agregados primarios están constituidos por las partículas de arena, limo y arcilla que permanecen unidas por cementos insolubles de arcillas coloidales, coloides inorgánicos ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y por coloides orgánicos, que generan la organización y la retención de estas partículas en unidades estructurales de tamaño y forma definida (Primavesi, 1980).

La génesis de los agregados depende de la naturaleza de los minerales arcillosos, contenido de humedad, naturaleza de los cationes adsorbidos; población microbiana y su actividad, y en menor grado de los factores abióticos. El tamaño de los agregados influyen en el desarrollo y producción de los cultivos agrícolas, en el intercambio de gases del suelo con la atmósfera, conductividad hidráulica, almacenamiento de agua, grado de erosión, actividad física de las raíces y organismos del suelo, así mismo, en el laboreo del suelo y los efectos modificadores de los cationes adsorbidos (Hillel 1982; Mathur *et al.*, citado por Dinel *et al.*, 1991; Lynch y Tisdall citados por Tisdall, 1994; Narro, 1994).

Las prácticas agrícolas que ayudan a la agregación del suelo son: la labranza de conservación, rotación de cultivos, fertilización química y orgánica, incorporación de residuos de cosechas y abonos verdes, la calidad de la materia orgánica, la actividad de los micro-organismos y la estructura del suelo (Ellsworth *et al.*, 1991; Nadler *et al.*, 1993 ; Tisdall, 1994 ).

Varios estudios muestran un incremento en la estabilidad de macro-agregados después de tres o más años, al reducir la labranza del terreno (Angers *et al.*, 1992; Beare *et al.*, 1994), aunque, Elliot (1986), reporta que la labranza provoca una pérdida de la materia orgánica lábil, la cual une micro-agregados dentro de los macroagregados. Oleschko (1985), considera que los elementos microestructurales (0.05-0.25 y 0.01-0.5 mm), en caso de ser estables al humedecimiento, transmitirán sus propiedades positivas a los macroagregados. Carter citado por Angers *et al.*, (1992) determinó que la labranza cero tiene gran valor en los primeros cinco centímetros de la superficie.

Emerson (1960), citados por Fonseca y Gandoy (1985), encontró que los óxidos de hierro y aluminio son un factor de gran importancia en la estabilidad de los agregados, ya sea ligado al complejo húmico-arcilloso o en forma coloidal libre. En su forma ligada húmico-arcilla, los iones pesados de hierro férrico y aluminio neutralizan las cargas negativas de los coloides electronegativos, arcilla y humus, favoreciendo su floculación; cuando el aluminio y el hierro son abundantes en el complejo húmico-arcilloso se forman agregados estables, incluso en medio ácido y pobres en bases.

Churchman y Tate (1987), encontraron que suelos de cenizas volcánicas que presentan minerales de rango corto (ferrihidrita y alofano), que al combinarse con materia orgánica estabilizan a los agregados frente a la fractura física y esto probablemente contribuye a la estabilidad de los agregados, altos contenidos de Fe no parece tener un efecto positivo en la estabilidad de los agregados de cualquier tamaño cuando los contenidos de carbono son bajos.

### 7b. Estabilidad de agregados en húmedo.

Se refiere a la naturaleza de las fuerzas que mantienen unidas a las partículas primarias y secundarias en un agregado del suelo, la estabilidad de los agregados se define como la resistencia de los agregados a las fuerzas desintegradoras del agua y la acción física. Primavesi (1980), reporta que la estabilidad de un agregado es pasajera y depende de la saturación del complejo de cambio de los cationes bi y trivalentes, de la presencia de materiales celulósicos en descomposición y de la actividad microbiana del suelo, por lo que el recomienda la reposición periódica de materia orgánica a través de la incorporación de los residuos de cosecha y estiércoles.

Es importante aclarar, que la materia orgánica por sí misma no promueve la agregación del suelo, ni mejora la estabilidad de los agregados en húmedo, lo más importante en la agregación del suelo, son los productos intermedios de la descomposición. La estabilidad del agregado es un índice de la estabilidad estructural y varía con los cambios en los sistemas de labranza (Rasiah y Kay, 1994). Helmut (1968) y Tisdall (1994), señalan que la mayor agregación se presentan en capas superficiales del suelo, y un prerequisite de ésta es el contenido de arcilla y su floculación; además, de la unión órgano-mineral, del engomado microbiano y la presencia de minerales cementantes, ya que es un primer estado en la construcción de un macroagregado estable. Sin embargo, ésta floculación es una condición necesaria pero no suficiente para la agregación (Hillel, 1982).

Primavesi (1980), señala que si un suelo es pobre en óxidos de Al y Fe o en sus bases, especialmente de Ca y Mg, contribuye a la decadencia de la estructura, porque priva a los ácidos orgánicos de la posibilidad de unir las partículas de arcilla. Las arcillas pobres en cationes polivalentes no pueden ser floculadas por ácidos húmicos, al contrario sufren una dispersión como ocurre por la acción del sodio y también del potasio, en general, el Ca y K tienen efecto floculante en las arcillas.

Los catiónes asociados con el humus son de gran importancia en la estructura del suelo, únicamente el humus-Ca es floculado, Mg, K, H y Na-humus son peptizados, los factores más importantes en la agregación de partículas del suelo son la formación de complejos orgánicos en unión con iones metálicos (quelatación).

### 7c. Materia orgánica.

Varias investigaciones han determinado que la materia orgánica desempeña un papel importante en la agregación al parecer incrementa la estabilidad de los macroagregados al aumentar su hidrofobicidad, lo que haría disminuir su capacidad de disgregación en agua. Bartoli *et al.*, (1988), mencionan que la disgregación del suelo esta en función del carácter hidrofóbico de la materia orgánica, el cual depende de la naturaleza de los materiales orgánicos, del medio ambiente catiónico y del efecto agregante de los hidróxidos de aluminio y hierro (Emerson, 1983; Tisdall y Oades 1986, Dinel *et al.*, 1991, Hayes y Hazel, 1994). Edwards y Bremner (1967) citados por Coleman *et al.*, (1989), sugieren que la mayor proporción de partículas de arcilla y materia orgánica humificada están retenidos en microagregados (< 250  $\mu\text{m}$ ) unidos por catiónes polivalentes.

Baver (1973), menciona que los mecanismos por los cuales los coloides orgánicos estabilizan la estructura del suelo pueden deberse a la unión de polímeros orgánicos a la superficie de las arcillas. Los coloides orgánicos compiten con las moléculas de agua para ganar espacio en la superficie, con esto se reduce el humedecimiento y la expansión, aumentando la resistencia de los agregados a la desintegración.

La materia orgánica estabiliza los agregados debido a una ordenación paralela de cristales de arcilla, donde se fortalece las uniones entre éstas y las

partículas de cuarzo, aunque las partículas de cuarzo pueden ser unidas directamente por la materia orgánica.

El contenido y la susceptibilidad a la mineralización de C, N, S, P orgánico y mineralización de la materia orgánica, esta en función del tamaño del agregado, varios trabajos han demostrado que estos componentes orgánicos al incrementarse, el tamaño del agregado disminuye (Coleman *et al.*, 1989), y que el contenido de carbono orgánico no fomenta la agregación, y que la mayor mineralización de C y N se presenta en macroagregados ( $> 300 \mu\text{m}$ ) que en microagregados ( $< 50-300 \mu\text{m}$ ).

Beare *et al.* (1994), apoyan la hipótesis de que los microagregados son estabilizados por una mayor humificación de la materia orgánica del suelo, el cual es un constituyente importante en la asociación órgano-mineral y un fragmento de materia orgánica humificada puede unir una sola partícula de arcilla y a su vez un simple fragmento de ésta es unida a más de una partícula de arcilla. Dorioz *et al.* (1993), mencionan que las propiedades físicas de la asociación arcilla-polisacáridos son completamente diferentes de aquellas de la arcilla pura.

La descomposición de la materia orgánica produce un aumento proporcional de compuestos de largas cadenas alifáticas (lípidos), y disminuye la proporción de polisacáridos. Dinel *et al.* (1992), mencionan que la estabilidad de los agregados es atribuida a la unión de compuestos alifáticos con componentes inorgánicos del suelo como resultado de la actividad microbiana, a través de puentes de cationes polivalentes de la superficie de las arcillas. Varios procesos biológicos y químicos del suelo afectan la superficie activa de las arcillas, así como las reacciones de los componentes de la materia orgánica. Ellos concluyen que los materiales húmicos son más efectivos en la estabilización de los agregados del suelo que los materiales fibrosos, ambos materiales aumentaron la cohesión de agregados; señalan que los grupos funcionales responsables de la estabilidad de los agregados en húmedo, son

cadenas de polimetileno, y alcoholes, resultado de la descomposición parcial de los materiales alifáticos; la presencia de grupos  $\text{CH}_2$ ,  $\text{CO}^-$  y  $\text{OH}^-$  y la ausencia de azúcares simples en el extracto de metanol-cloroformo, y que la estabilidad de los agregados al humedecimiento asociada a la acción estabilizadora de compuestos alifáticos.

La adición de ácidos húmicos a un Entisol de agregación frágil, incrementó la estabilidad de micro y macro-agregados, donde las sustancias húmicas representan a los agentes de unión persistentes en los microagregados del suelo. La materia orgánica juega un papel doble en la agregación y en la dispersión de arcillas, Gillman, citado por Tisdall y Oades (1982), presentan algunas evidencias donde los aniones orgánicos promueven la dispersión de las arcillas por bloqueamiento de los sitios positivos en la superficie coloidal y por complejos de cationes polivalentes en la solución. Beare *et al.* (1994), subrayan que los aniones orgánicos forman complejos con metales polivalentes, incrementan la dispersión de arcillas por cambios de las cargas positivas de la superficie de la arcilla.

Los grupos activos ácidos se distribuyen sobre las macromoléculas húmicas heterogéneas (incluye grupos ácidos hidrofílicos e hidrofóbicos, alifáticos y aromáticos), donde se presenta simultáneamente la quelatación de cationes polivalentes sobre las diferentes partículas de arcilla, como resultado una mayor agregación de las partículas del suelo. Esta adsorción no une únicamente minerales arcillosos, sino también, orienta los compuestos hidrófobos de las moléculas húmicas próximas al exterior de los agregados, esto contribuye a reducir la infiltración del agua e incrementa la estabilidad estructural.

Rasiah y Kay (1994), mencionan que la influencia del pH en la estabilidad de los suelos neutros o alcalinos se debe principalmente a la concentración de  $\text{Ca}^{++}$ . Se ha demostrado que algunos cationes metálicos influyen en la descomposición de los complejos orgánicos, en este caso, la adición de  $\text{Ca}^{++}$  da como resultado una mayor

estabilidad de los agregados > 1 mm, ésta es consecuencia del efecto de enlace que tiene el Ca<sup>++</sup> entre las moléculas policarboxílicas y la fracción mineral.

Churchman y Tate, citados por Piccolo y Mbagwu (1994), reportaron que la materia orgánica preferencialmente agrega suelos que presentan arcillas expandibles, mientras que suelos ricos en óxidos de Fe y Al fueron dispersados por la materia orgánica.

Colombo y Torrent (1991), indican que el Si puede contribuir a la agregación probablemente por la formación de puentes entre los óxidos de Fe y otras partículas del suelo. Nadler *et al.* (1993), señalan que el deterioro de la estructura del suelo puede ser relacionada con las cargas negativas de la superficie del Si, que aumenta la cementación, por los bajos niveles de materia orgánica. Sin embargo, Bartoli *et al.*, (1988), determinaron que la asociación entre materia orgánica y oxi-hidroxidos de aluminio no cristalinos reduce el humedecimiento del suelo y se incrementa la estabilidad de los macroagregados y suelos que contienen menos del 6% de carbono y menor cantidad de hidróxidos de aluminio y hierro pobremente ordenados son suelos menos estables y suelos que contienen mas del 6% de carbono y abundancia en minerales no cristalinos son mas estables.

Mc Queen (1982), observó que la estabilidad estructural por materia orgánica estuvo influenciada por la mineralogía del suelo, la capacidad de intercambio catiónico y los cationes intercambiables. Arias *et al.*, (1992), establecen que los metales polivalentes tales como el hierro y el aluminio favorecen la adsorción de la materia orgánica sobre los minerales de la arcilla al actuar como puente entre ambos coloides y de este modo, ejercen un efecto favorable en la agregación, atribuyéndole un papel fundamental en la formación de microagregados de gran estabilidad.

#### 7d. Organismos.

La biota del suelo juega un papel importante en el ciclo de los nutrientes, en la descomposición de la materia orgánica y de compuestos contaminantes del medio ambiente. La actividad microbiana es un factor que promueve la estabilidad de agregados del suelo, los hongos estabilizan agregados mayores de 1 mm, pero agregados menores de 500  $\mu\text{m}$  son principalmente estabilizados por bacterias (Tisdall y Oades, 1982 ; Bathke *et al*, 1992; Nadler *et al*, 1993),

Dorioz *et al*, (1993), en sus resultados confirman la existencia de modelos de agregación del suelo por medios biológicos, observaron que las partículas de arcilla se orientaban paralelamente alrededor de la pared celular de las hifas, incrementándose la porosidad; con bacterias, se presentó un efecto de adhesión de las arcillas y secreción de polisacáridos que penetró entre las arcillas. La formación de microagregados en las raíces, notaron que las partículas más pequeñas del suelo tienden a localizarse preferentemente alrededor de las raicillas, como un resultado de la distribución granulométrica.

Los efectos mecánicos debido a la penetración de raíces o hifas y a la absorción de agua de organismos, reorganiza la arcilla, caracterizada por una orientación y compactación de partículas. Asimismo, se presenta un efecto por polisacáridos producidos por secreciones extracelulares de cada organismo. Estos penetran e impregnan la parte superficial de la fase mineral a una distancia  $< 1 \mu\text{m}$  en el caso de bacterias y  $> 50 \mu\text{m}$  en el caso de las puntas de raíces.

Tisdall (1994), estudiando varios suelos, observó que las raíces de las especies vegetales y las hifas de hongos, específicamente la micorriza vesículo-arbuscular, estabiliza macroagregados ( $> 250 \mu\text{m}$  de diámetro), y que los residuos orgánicos, bacterias, polisacáridos y materiales inorgánicos estabilizan microagregados ( $< 250 \mu\text{m}$ ).

Forster (1990), observó tres tipos de agregados en dunas arenosas: agregado microbiano de 1-12 mm de diámetro, formado por la acción de bacterias, actinomicetos y hongos; agregado raíz-microbiano, formado por microorganismos en conjunto con exudados de raíces y componentes estructurales de las raíces y agregados por detritos microbianos, en los 6 mm de diámetro, formado durante la descomposición de las plantas macroscópicas.

Plantas, detritos microbianos y bacterias penetran en los poros de los microagregados y con sus secreciones extracelulares (polisacáridos) contribuyen a estabilizarlos.

Las investigaciones revelan que los microorganismos del suelo producen numerosas sustancias cementantes durante el ataque que realizan al material vegetal. Las sustancias cementantes producidas se dividen en las siguientes categorías:

- ◇ Coloides liofílicos y liofóbicos, se debe a los productos de descomposición de residuos de plantas.
- ◇ Los microorganismos y sus productos de secreción tales como, mucosidades, légamos y gomosidades y,
- ◇ Polisacáridos sintetizados por algunos microorganismos

Los efectos de agregación de los productos iniciales de la descomposición son temporales, mientras que la agregación declina a medida que los productos son destruidos por otros microorganismos. Los productos de la descomposición microbiana son adhesivos y no son completamente solubles al agua.

Hillel (1982), señala que los microorganismos del suelo agregan las partículas por mecanismos complejos como la adsorción, por envoltura o enrollamiento físico o cementación, por secreciones de productos mucilaginosos. Entre los principales mecanismos capaces de unir las partículas del suelo están los polisacáridos naturales, estos materiales se unen a la superficie de la arcilla mediante puentes catiónicos, puentes de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals, así como mecanismos de adsorción de aniones.

Dorioz *et al.*, (1993), observaron tres condiciones en la agregación por el efecto de hongos, a saber: (a) orientación de las partículas de arcilla alrededor de las células, (b) secreciones de polisacáridos extracelulares que inducen enlazamiento local de las partículas de arcilla y, (c) un efecto general de empaque por las hifas.

Tisdall y Oades (1982), establecen que los agentes de unión orgánicos involucrados en la estabilidad de agregados se deben a tres grupos basados en la edad y degradación de la materia orgánica y no de las propiedades de los componentes químicos definidos. Estos agentes de unión determinan la edad, tamaño y estabilidad de los agregados, a saber: transitorios, temporales y persistentes:

- ◊ Los agentes de unión transitorios, son materiales orgánicos descompuestos rápidamente por microorganismos, el grupo más importante son los polisacáridos, los cuales son degradados rápidamente y se asocian a los agregados mayores de 250  $\mu\text{m}$  de diámetro, son relativamente estables.
- ◊ Los agentes de unión temporal, está representados por las raíces, hongos, bacterias, algas y líquenes, que pueden durar por meses o quizás años, y son afectados por el manejo del suelo, se les asocia con macroagregados jóvenes. Este

grupo incluye a las lombrices, que estabilizan la estructura por ingestión del suelo y mezcla de los materiales orgánicos humificados.

- ◊ Los agentes de unión persistentes, son materiales húmicos degradados asociados al hierro, aluminio y aluminosilicatos amorfos, que forman la fracción organo-mineral. Aniones orgánicos asociados con cationes metálicos bi y trivalentes los cuales actúan como agentes estabilizadores, se incluye en este grupo a los polímeros adsorbidos fuertemente y algunos polisacáridos y materiales orgánicos estabilizados por asociaciones con metales (Figura 7).

Por otro lado, Primavesi (1980), señala que las bacterias más eficientes en formar agregados son las *Cytophagas* y *Sporocytophagas*, bacterias aerobias que producen gran cantidad de mucilago bacteriano. Para que se de esta agregación se requiere que los agregados sean formados por atracción electroquímica. De estos agregados primarios pueden formarse agregados mayores por acción de los grupos carboxílicos (COOH) donde los grumos orgánicos originados de la humificación de la materia orgánica, actúa como puente entre los agregados formados por atracción electroquímica, formándose así un complejo arcilla-humus, de difícil descomposición. Sin embargo, sólo una parte de los agregados se forman a partir de esta base.

Los cementantes, formados inicialmente (coloides liofílicos y liofóbicos, mucosidades, légamos y gomosidades, y varios tipos de polisacáridos), de manera gradual pierden sus propiedades adherentes o son destruidos y reemplazados por materiales secundarios que forman un conjunto complejo, que colectivamente recibe el nombre de humus (es una mezcla compleja y resistente de sustancias amorfas y coloides de color pardo o pardo oscuro, modificadas de tejidos originales o sintetizados por los diferentes organismos).

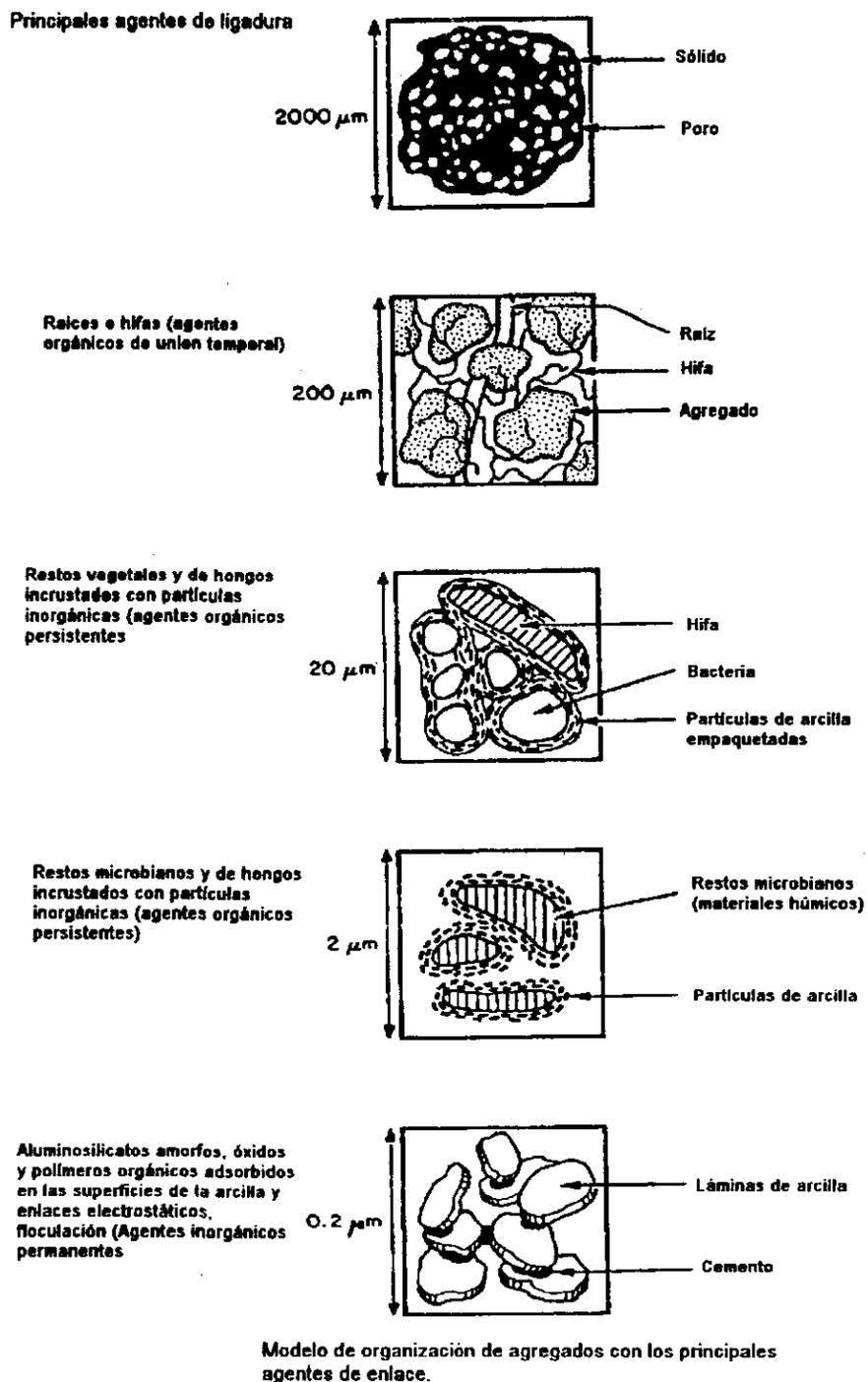


Figura 7. Agentes de unión en las partículas del suelo.

Los materiales húmicos son de más fácil rompimiento que los materiales cementantes inicialmente formados, son mucho más elásticos, por esta razón, los materiales húmicos forman mayor número de gránulos, la estructura granular es en esencia, estable al agua, los gránulos a su vez forman suelos francos y friables.

Tisdall y Oades (1982), señalan que para un buen desarrollo de cultivos, se requiere contar de una estructura adecuada, el cual depende de la presencia de agregados de partículas del suelo de 1 a 10 mm de diámetro, que permanecen estables cuando se humedecen. Por otro lado, Lal y Greenland (1979), mencionan que el tamaño ideal de agregados para el control de la erosión y facilitar la emergencia del cultivo es de 10 a 50 mm, y que las partículas menores de 2 mm presentan más problemas, aunque varios trabajos señalan otros rangos (Dexter *et al.*, 1990, de 2-8 mm; Cárter *et al.*, 1992, de 2-10 mm; Narro, 1994, 0.25-10 mm; Velázquez *et al* 1995, de 3-5 mm).

#### **7e. Ciclos de humedecimiento y secado.**

De acuerdo con la literatura, los ciclos de humedecimiento y secado influyen en la estructura de acuerdo al tipo de arcilla presente y la frecuencia de ciclos (Singer *et al.*,1992). Las fuerzas mecánicas de expansión y contracción ocasionadas por el humedecimiento y deshidratación, y por el congelamiento y deshielo aparentemente, generan el rompimiento de uniones orgánicas y, en consecuencia, la desintegración de los agregados, pasando a una condición más granular.

La generación de la estructura de un suelo se produce en tres etapas: floculación, cementación y finalmente material suelto por acción biológica. Estos procesos se inician con los fenómenos de contracción e hinchamiento, la contracción permite el acercamiento y la orientación de las partículas (Ellies, 1990).

Baver (1973), menciona que existen dos procesos que operan en la fragmentación de los terrones en unidades menores, cuando después de secarse se vuelven a humedecer, el rápido ingreso del agua causa desigual hinchamiento en el terrón, lo que produce fracturas y fragmentación; el otro proceso es la adsorción del agua en los poros capilares que comprime el aire ocluido en la cavidad de los poros hasta romperlos, esto pasa cuando la presión del aire sobrepasa la fuerza de cohesión de las partículas.

Rasiah y Kay (1994), señalan que los agregados estables al humedecimiento van a depender todo el tiempo no solo de las prácticas de manejo del suelo, si no también por los ciclos de humedecimiento y secado, la compactación, congelamiento y deshielo y el diámetro. La magnitud de la influencia de estos factores va a estar determinada por el clima, el cual varía dentro y entre estaciones de manera no determinada.

Los cambios en los agregados estables en húmedo son mucho más lentos cuando se deben a factores climáticos, que a las prácticas de labranza. Los ciclos de humedecimiento y secado de un suelo afectan la estabilidad de los agregados  $> 0.25$  mm (Utomo y Dexter, 1982).

Shiel *et al.*, (1988), determinaron que el tamaño y distribución de los agregados, tanto naturales como artificiales disminuyen cuando se incrementa el número de ciclos de humedecimiento y secado, esto se atribuye a las fracturas causadas por la contracción y expansión de las arcillas.

Por último, Singer *et al.* (1992) y Ellsworth *et al.*, (1991), proponen que al incrementarse los ciclos de humedecimiento y secado cambia la estabilidad de los agregados en húmedo, debido a:

- a. Las partículas de arcillas son reorientadas cara a cara con sucesivos ciclos de humedecimiento y secado, el cual depende del tipo de arcilla.
- b. El número de interacciones arena-arcilla se incrementan al distribuirse la arcilla en la superficie de las partículas de arena, dando como consecuencia un incremento en la estabilidad de los agregados.

Un cambio en el manejo de la superficie del suelo, por ejemplo, el laboreo provoca un cambio en el equilibrio del valor original del suelo (proporción de agregados). Esta proporción no cambia inmediatamente, pero se da un nuevo valor de equilibrio, por diferentes caminos dependiendo del tipo de suelo, de los ciclos de humedecimiento y secado y de la actividad microbiana.

#### 7f. Exudados.

Los exudados radicales comprenden, sustancias insolubles (mucílagos) y solubles o volátiles, estas últimas son las más importantes cualitativamente, pero es poco conocido el efecto que tienen en el suelo. La presencia de mucílago es elevada cuando están presentes los microorganismos (Oades, 1978), de esta manera, en la asociación planta-microorganismos de la rizósfera es evidente su efecto en la superficie de la raíz.

Varios factores afectan la composición de los exudados de la raíz, los cuales influyen en el número y clase de microorganismos de la rizósfera, a saber; edad de la planta, especie, luz, temperatura, aplicaciones foliares, naturaleza de la rizósfera, microflora y condiciones del suelo (nutrición de la planta), a este último factor, se le ha dado poca importancia.

Las secreciones de naturaleza mineral que resultan del mecanismo que regula los cambios entre el suelo y las células de la raíz, por ejemplo, las leguminosas

excretan cantidades apreciables de fósforo en el momento de la floración, mientras que, en cultivos con solución se observa una excreción de amoníaco debido a la reducción de los nitratos cuando éstos son absorbidos en cantidad excesiva. Si se introduce el sistema radical de una planta en una solución no tamponada, como el agua destilada vuelta ácida o alcalina, se observa que el pH se aproxima a la neutralidad debido a la excreción de iones básicos en el primer caso o aniones ácidos en el segundo. Las partículas de suelo, en contacto directo con las raicillas, presentan generalmente un pH inferior al de las partes más alejadas. La absorción de cationes por las raíces de las plantas generan un flujo de  $H^+$  dentro de la rizósfera, ésta promueve reacciones hidrolíticas que aceleran el intemperismo de los minerales (Demolon, 1966; Eeaterwood *et al.*, 1991).

La deficiencia de ciertos nutrimentos minerales en el suelo, no aumentan la cantidad total de exudados radicales, por ejemplo, con una deficiencia de potasio se presenta menor exudación de ácidos orgánicos; en el caso de una deficiencia de fósforo ó de zinc se exudan menos aminoácidos y ácido nítrico. Por otro lado, Olsen y Brown, citados por Marschner (1991), mencionan que con una deficiencia de hierro se mejora la liberación de fenoles como el ácido caféico observados en varias dicotiledóneas.

## CAPITULO VIII

### *8. Fundamento de la investigación.*

Las capas endurecidas representan un problema en su manejo para la agricultura y el aspecto forestal en la zona noroeste de la Cuenca de México, debido a su baja fertilidad, contenido bajo de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, dureza, conductividad hidráulica lenta entre otras, por lo que se requiere estudiar sus propiedades físicas, químicas, morfológicas, mineralógicas, así como la dinámica del endurecimiento de este material, con el fin de dar alternativas a los campesinos para reincorporar estas áreas al proceso productivo.

#### **8a. Objetivo general.**

Caracterizar morfogenéticamente suelos con tepetate de una área del Estado de México y su respectiva incorporación al proceso productivo

#### **8b. Objetivos específicos.**

- (A) estudiar el origen volcanogénico o pedogénico de capas endurecidas en una área de los Municipios de Tepetzotlán, Nicolás Romero y Cuautitlán Izcalli en el Estado de México; asimismo,
- (B) determinar el principal agente cementante que ocasiona este endurecimiento,
- (C) plantear un modelo que explique la secuencia diagenética en la formación de estas capas endurecidas y,
- (D) ubicar taxonómicamente a los suelos que sobreyacen a estos endurecimientos.

(E) Determinar el efecto de dos abonos orgánicos y de tres especies vegetales en la agregación y disgregación de dos tipos de tepetate fragmentado durante dos períodos de observación bajo condiciones de invernadero.

### 8c. Hipótesis

Las capas endurecidas que se presentan en la zona noroeste de la Cuenca de México se han formado a partir de procesos volcanogénicos, presentándose procesos secundarios pedogenéticos.

La sílice adsorbida a la arcilla forma el principal agente cementante en el endurecimiento de estas capas o se da únicamente el endurecimiento por consolidación y compactación del material.

Las especies vegetales promueven la fragmentación, agregación y desagregación del tepetate por efecto mecánico o por efecto de los exudados radicales y procesos físico y químicos modificando la estructura del tepetate.

El empleo de diferentes fuentes de abonos orgánicos promueven la formación y estabilidad de los agregados en el tepetate.

El tipo de tepetate (blanco y amarillo) es un factor que determina la agregación y disgregación.

## CAPITULO IX

### 9. Caracterización del área de estudio.

#### 9a. Localización.

Políticamente el área de estudio abarca tres municipios: Tepotzotlán, Cuautitlán Izcalli y Nicolás Romero, pertenecientes al Estado de México, en una extensión aproximada de 450 km<sup>2</sup> donde predominan suelos con horizontes o capas cementadas o afloramiento del tepetate (Figura 8).

La zona de estudio se encuentra ubicada geográficamente al noreste de la Cuenca de México entre las latitudes 19°33'14" y 19°45' norte y longitudes 99°10'42" y 99°23'27" oeste, y entre 2,300 y 2,650 msnm limitada por la Sierra de Tepotzotlán, Sierra de Monte Bajo y la Sierra de Guadalupe. Como se observa en la figura 9.

La Cuenca de México se localiza en la porción meridional de la altiplanicie mexicana, esta es de forma alargada en dirección NNE-SSW con longitud de unos 100 km. y anchura de unos 30 km y delimita al norte por la Sierra de Pachuca y Tezontlanpan, al sur por la de Chichinautzin, al este por las de Tepozán y Calpulalpan, al sureste por las Sierras de Río frío y Nevada, al suroeste por las de Monte Alto y Las Cruces y al oeste por la Sierra de Monte bajo y al noroeste por la Sierra de Tepotzotlán, abarcando una superficie de 9,560 km<sup>2</sup> (De Cserna *et al.*, 1988).

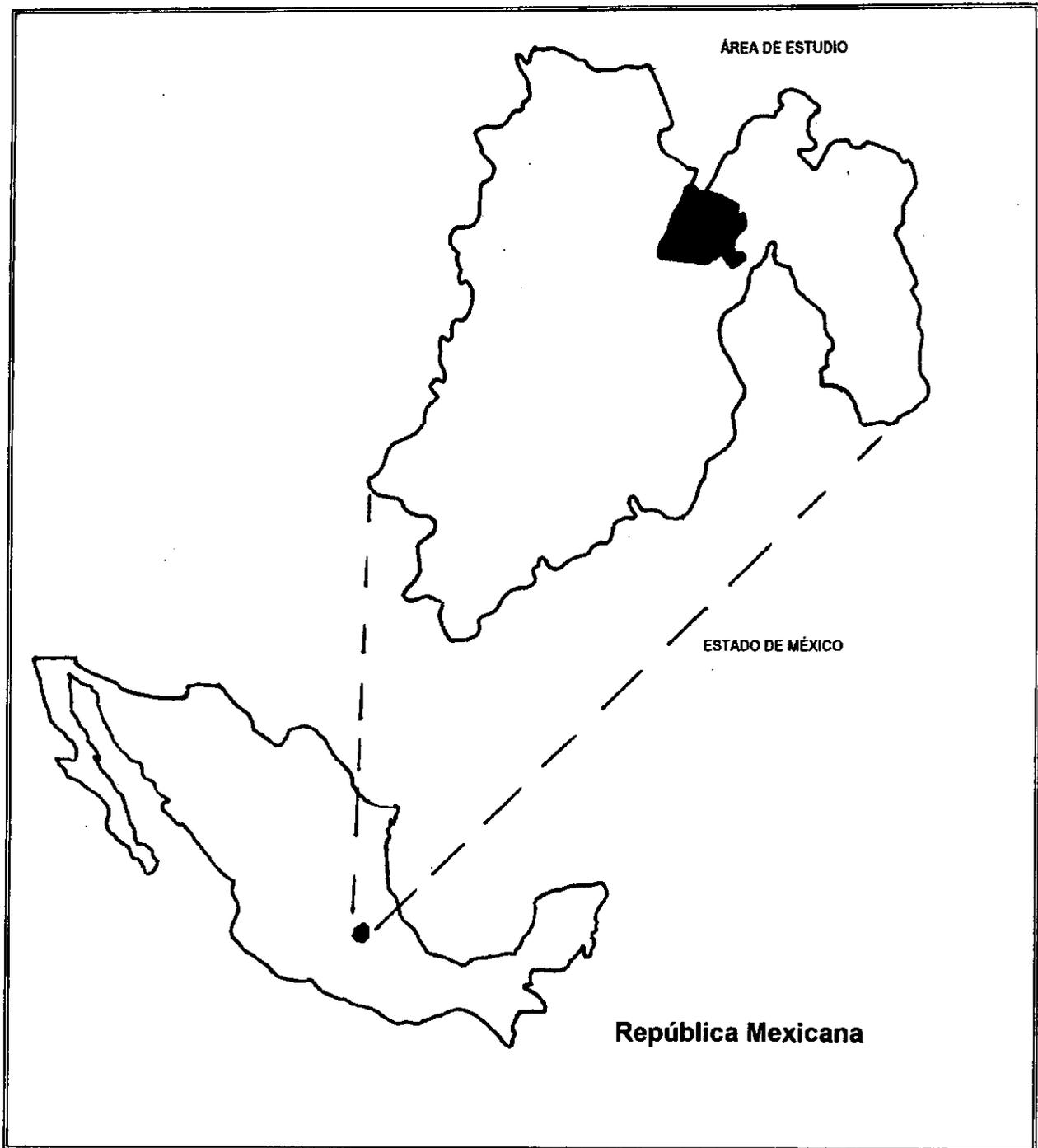


Figura 8. Localización general del área de estudio.

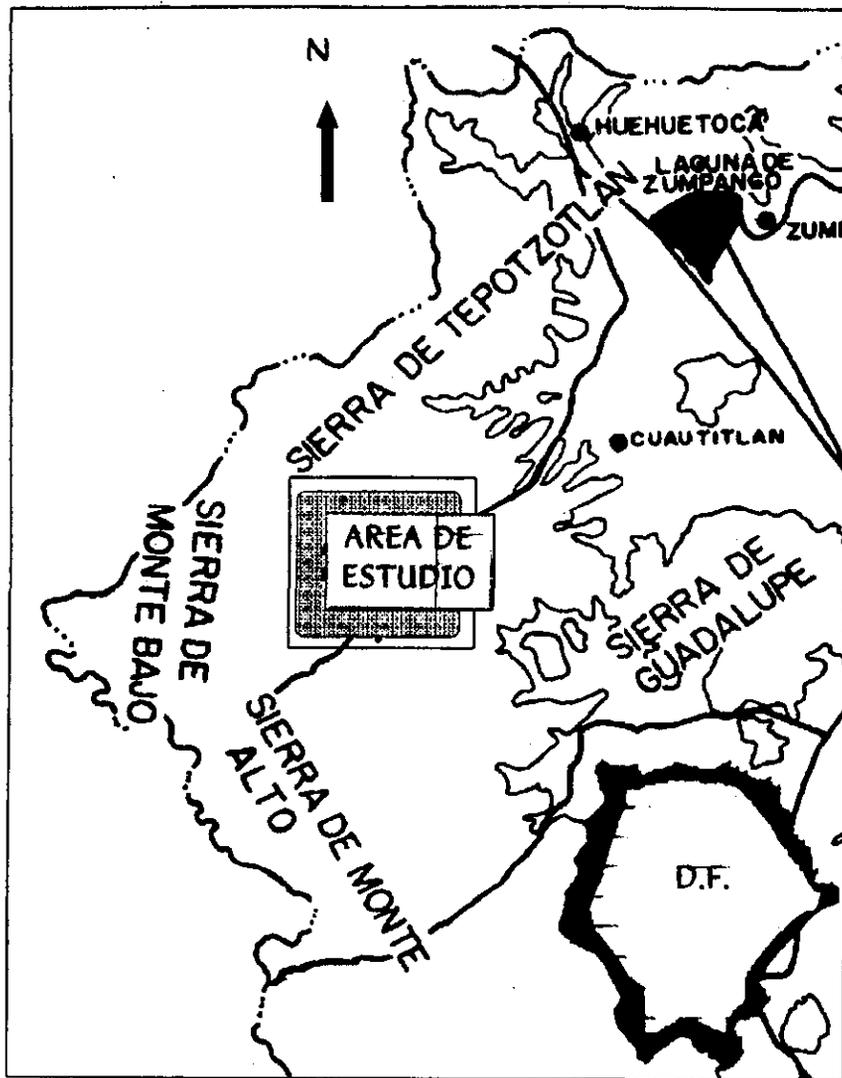


Figura 9. Localización de las Sierras que rodean el área de estudio.

### 9b. Geología.

De acuerdo con el mapa geológico de la cuenca, elaborado por Mooser (1961), ésta se encuentra situada en el centro de la faja volcánica que atraviesa la República Mexicana de este a oeste. La composición litológica se le atribuye a formaciones de terciario medio que comprenden restos de volcanes estratificados, tobas, brechas, derrames de lavas y depósitos laháricos (materiales piroclásticos de aluvión y origen lacustre que no han sufrido perturbaciones desde que se depositaron, {López, 1976}), donde los tipos de roca son muy variadas andesitas, andesitas-basálticas,

basaltos y dacitas, estas formaciones afloran principalmente en la parte inferior de las Sierras.

DDF (1997), menciona que previamente al Eoceno la Cuenca, estaba inundada por mares tropicales someros. A principios del Terciario éstos se retiraron al plegarse los sedimentos calizos y levantarse paulatinamente el continente.

Oviedo (1970), menciona que el origen de la Cuenca es a partir de levantamientos y plegamientos de las rocas Cretácicas a fines de la revolución Larámica (Orogenía) que permitió la acumulación de grandes depósitos de anhidrita y posteriormente la actividad ígnea con acumulación de lavas y materiales piroclásticos que ocupan las partes más bajas y van dando una nueva conformación a la cuenca de manera muy intensa entre el Oligoceno Superior al Mioceno Superior.

La estratigrafía volcánica, se inicio con la riolita Tilzapotla del período Oligoceno, misma que creo tobas, lahares y brechas volcánicas. Entre el período Mioceno-Plioceno se presentan extensas capas de andesitas y basalto misma que formaron el cuerpo principal de las grandes Sierras (Nevado de Toluca, Sierra de Las Cruces, Sierra Nevada).

En el Plioceno-Holoceno, se presentaron focos magmáticos con derrame de materiales de gran fluidez como las lavas basálticas de la formación Chichinautzin. Esta formación presentó una gran cantidad de focos que arrojaron piroclastos y formaron los volcanes monogenéticos de escorias. Las últimas manifestaciones se encuentran en diversas partes del Estado, desde las manifestaciones de toba pumíticas del Nevado de Toluca que datan de 11,000 años a.C.

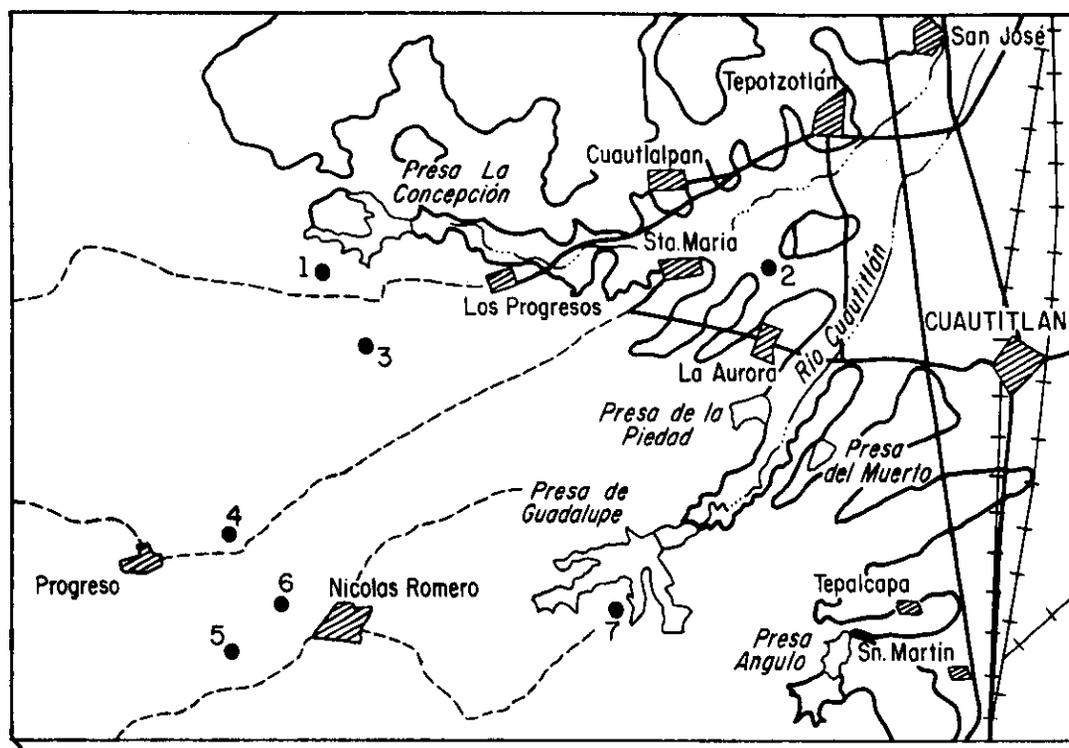


Figura 10. Localización de los siete perfiles estudiados.

Los principales estudios sobre la estratigrafía de la cuenca señalan a la formación Tarango como la transición Plio-pleistoceno y por lo tanto es la más antigua, constituida por abanicos aluviales y conos cineríticos de la serie volcánica basáltico-andesítica. Le sigue la formación Becerra que está subdividida por la presencia de caliche intraformacional en Becerra superior y Becerra inferior, como parte del Pleistoceno superior. En cuanto a la formación Nochebuena, por su carácter superficial no es posible tomarla en cuenta por su insuficiencia de definición, otra unidad de la estratificación Pleistocénica de la cuenca es la llamada Totolcingo que fue definida como una tierra tocosa oscura (Lorenzo, 1967).

Por su estratigrafía y por sus estudios palinológicos y paleontológicos efectuados se le asigna a la Cuenca una posición crono-estratigráfica Plioceno Superior-Cuaternario inferior (Fries, citado por López, 1987).

Las rocas más antiguas que se han detectado en el subsuelo de la Cuenca de México y que afloran en regiones colindantes son anhidritas que subyacen a calizas marinas del Cretácico Inferior que, a su vez, están cubiertas por calizas, lutitas y areniscas del Cretácico Superior. Esta secuencia sufrió plegamiento hacia el final del Cretácico, que fue seguido por un período de erosión.

El área de estudio se ubica dentro de la cuarta fase del volcanismo que se da en la Cuenca de México, lo constituye el grupo de las Sierras Menores (Sierra de Guadalupe, la de Tepotzotlán, el Patlachique y el Tepozán) {Figura 9}, caracterizados por lavas intermedias y ácidas, las cuales presentan un menor tectonismo y aún conservan por su menor antigüedad -14 a 12 millones de años sus formas cónicas originales, aunque erosionadas, esta fase empezó en el Mioceno.

#### 9c. Fisiografía.

La Cuenca de México se divide en tres subregiones, la parte sur o región de Xochimilco y Chalco, la parte central o región de Texcoco y México, y la región de los Llanos de Apan situados al noroeste.

#### 9d. Geomorfología

Hacia la porción centro-oriental del Sistema Volcánico Transversal, se localiza la Cuenca de México una estructura geomorfológica con límites espaciales precisos, un parteaguas cerrado que la define como una Cuenca endorreica. Es en sí una extensa planicie con una altitud mínima de 2,240 msnm rodeada por todos lados por conjuntos de montañas jóvenes y antiguas. Otros grupos de montañas se levantan sobre la planicie de la Cuenca, Sierra de Santa Catarina y la de Guadalupe (DDF, 1997).

La topografía es muy variada, posee una porción que es casi plana, ubicada al fondo o lecho de la cuenca a una altitud de 2,240 m.s.n.m. que corresponde a la planicie lacustre, otra parte esta ubicada por serranías y laderas con ligeras pendiente que contornean la cuenca y presenta diferencias de nivel que fluctúan entre los 2,300 y 2,500 m.s.n.m., por último, una región muy abrupta y escarpada de mayor altitud, especialmente en la Sierra Nevada.

#### **9e. Unidades morfoestructurales.**

Las más representativas de la Cuenca son cinco: Planicies bajas, planicies elevadas, talud transicional, estructura tectovolcánicas principales y elevaciones volcánicas menores.

#### **9f. Clima.**

Dadas las condiciones de relieve y altitud, prevalece el clima templado subhúmedo, siendo intermedio en cuanto a su humedad. Esta región se ve afectada todo el año por los vientos alisios, vientos del oeste en invierno, lo que provoca un régimen de lluvias de verano (mayo a octubre), la precipitación media anual es 641.2 mm (Ver anexo III)

La temperatura media anual fluctúa entre 12 y 16°C, la máxima temperatura corresponde a junio con un valor que oscila entre 17 y 18°C y la mínima a diciembre con una temperatura que va de 10 a 11°C. La mayor incidencia de lluvias se registra en los meses de junio a agosto, con un valor entre 100 y 120 mm, la menor se da en el mes de enero con una precipitación menor de 2 mm (Ver anexo III)

Las heladas, se presentan con una frecuencia de 20 a 120 días al año, destacando principalmente el rango de 80 a 100 días, éstas se pueden presentar en todo el año, pero generalmente comienzan en septiembre y terminan en mayo, la máxima incidencia se registra desde noviembre hasta febrero.

### 9g. Vegetación.

A continuación se presenta algunos de los aspectos mas importantes de la vegetación de la Cuenca de México que hizo Rzedowski, (1975).

Los pinares forman comunidades vegetales típicas de las montañas que rodean la cuenca de México, sobre todo en su parte meridional. En general crecen entre los 2,350 y los 4,000 m de altitud, con lluvias anuales entre 700 y 1,200 mm. a lo largo del gradiente altitudinal, *Pinus leiophylla*, crecen con frecuencia asociados a encinares, formando bosques ralos. Entre 2,500 y 3,100 m, se encuentran bosques de ocote (*Pinus montezumae*) en la parte sur de la cuenca, y bosques de *Pinus rudis* en las montañas mas secas del norte y del este. Por encima de los 3,000 m crecen bosques ralos de *Pinus hartwegii*, este pino se desarrolla acompañado de pastos amacollados, conocidos como zacatales, de los géneros *Festuca* y *Muhlenbergia*.

Los bosques de encino (*Quercus* spp.) son formaciones comunes en la Cuenca de México entre los 2,300 y los 3,000 m con lluvias de 700 a 1,200 mm anuales. Por debajo de los 2,500 m dominan *Quercus obtusata* y *Q. laeta*; entre los 2,500 y los 2,800 m domina *Q. laurina*, comúnmente asociado a los bosques de oyamel y de pino. Al norte de la Cuenca, en las partes mas secas, son comunes los bosques bajos de *Q. microphylla* y de *Q. gregii*.

Los juníperos (*Juniperus* spp.) son comunes en las partes norte, este y noreste de la Cuenca, entre los 2,400 y los 2,800 m de altitud. Se desarrollan sobre laderas o planicies semiáridas, con lluvias anuales entre 600 y 800 mm. La especie dominante es el *Juniperus deppeana*, este tipo de vegetación es inducida por la destrucción del bosque mas alto de pino o encino.

Existen comunidades de pastizales en varias partes de la Cuenca de México. La formación mas importante son los pastizales de *Hilaria cenchroides*, comunes al noroeste de la cuenca en Huehuetoca y Tepetzotlán y que también se pueden observar al pie de la Sierra Nevada. Esta comunidad prospera en laderas y lomerios entre 2,300 y 2,700 m de altitud, con precipitaciones anuales cercanas a los 600 y 700 mm.

Los matorrales xerófilos son frecuentes en la parte norte de la Cuenca, donde las precipitaciones son mas pobres, pero también ocurren en la parte meridional, sobre afloramiento rocosos y pedregales. En general ocupan partes bajas de la cuenca, entre 2,250 y 2,700 m de altitud, en áreas de precipitación media anual inferior a los 700 mm, donde domina el nopal (*Opuntia streptacantha*), la uña de gato (*Minosa biuncifera*), la palma (*Yucca filifera*) y la cenicilla (*Zaluzania augusta*). En algunas laderas del norte de la cuenca prospera el matorral de guapilla (*Hechtia podantha*) en el que dominan plantas con hojas en roseta, como la misma guapilla y lechuguilla (*Agave lechuguilla*), junto con arbustos deciduos como la sangre de drago (*Jatropha dioica*).

#### 9h. Suelos.

Geomorfológicamente el área de estudio corresponde a formaciones cerriles y montañosas de altitudes variables con pequeños valles, donde hay una conformación litológica compleja, lo que ha determinado que se desarrolle una gran cantidad de tipos de suelos asociados en agrupaciones diversas, en el área de trabajo sobresalen cinco unidades de suelo, donde predominan los Vertisoles pélicos, siguiendo en importancia Luvisol crómico, Cambisol vértico, Feozem háplico y Litosol, estos tienen características muy variables, los cuales están en función del material que los forma. Su susceptibilidad a erosionarse va a depender de la topografía y del mismo suelo.

En resumen, en las partes altas de la Cuenca predominan los suelos de origen volcánico, con una profundidad entre 50 y 120 cm, de textura franco-arenosa, con

moderados contenidos de materia orgánica y la presencia de minerales amorfos, con moderada pedregosidad, son muy susceptibles a la erosión.

#### 9i. Uso actual.

La mayoría de las áreas que presentan tepetate se dedican a la agricultura de temporal, donde se siembra principalmente maíz y frijol de autoconsumo, así como el establecimiento de huertos frutícolas, pero muchas de éstas han sido abandonadas por no ser rentable la producción, donde actualmente se encuentran gramíneas nativas. Otros campesinos han tratado de explotar el cultivo del nopal de forma comercial, esta es una alternativa viable y rentable, por otro lado, al tepetate se le utiliza en bloques para la construcción y en los casos más extremos se da la invasión de estas zonas para construir unidades habitacionales. Por parte del gobierno del Estado de México se llevan a cabo programas de reforestación de estas zonas, aunque falta mucho para poder restablecer estas áreas, además de la falta de programas en la recuperación y manejo de zonas con tepetate, así mismo, concientizar al campesino a conservar su entorno con prácticas de rehabilitación del suelo.

## CAPITULO X

### *10. Materiales y métodos*

#### **10a. Diseño metodológico.**

Para su realización el presente trabajo se dividió en dos etapas: la primera consistió en la caracterización morfogenética de suelos que presentaban capas u horizontes endurecidos, y la segunda fue evaluar el efecto de especies vegetales en dos tepetates (blanco y amarillo), fracturados para determinar la formación de agregados y su estabilidad en húmedo.

#### **10b. Etapa I.**

Para el desarrollo de la primera etapa se contemplaron las siguientes actividades denominadas fases:

##### **b<sub>1</sub>. Fase de gabinete.**

##### **b<sub>1a</sub> Recopilación de información bibliográfica.**

Se recopiló información sobre diferentes aspectos del tema de estudio: climatología, geología, edafología, cartografía, y fotografías aéreas, posteriormente se llevó a cabo su revisión y análisis.

##### **b<sub>1b</sub> - Selección del sitio de muestreo.**

Teniendo como base la información de las fotografías aéreas a escala 1:75,000 de INEGI se seleccionó el sitio de estudio. Los puntos de muestreo se seleccionaron dentro de un área de 425 km<sup>2</sup>, en las fotografías se demarcaron áreas que se diferenciaban por características como: geomorfología, topografía,

exposición de capas endurecidas y actividades económicas, dichas áreas se llamaron unidades terrestres (UT), ubicándose siete puntos de muestreo.

### 10c. Fase de Campo

#### c<sub>1</sub>. Reconocimiento de la zona

Ubicada el área, se realizó un recorrido en campo para rectificar la localización de los puntos de muestreo preestablecidos donde se describieron las características geomorfológicas, tipo de vegetación y uso del suelo.

#### c<sub>2</sub>. Descripción de los perfiles

La descripción de los perfiles se hizo con base en el Soil Survey Staff (1984), excavándolas hasta 1.5 m de profundidad, tomando en cuenta seis parámetros morfológicos, a saber: textura, estructura, diferenciación entre horizontes, presencia de raíces, consistencia en seco y húmedo y límites entre horizontes o capas.

#### c<sub>3</sub>- Muestreo

Se recolectaron muestras de aproximadamente 2 Kg. de suelo, por horizonte o capa observados. En el caso de los horizontes o capas endurecidas se tomaron muestras cada 30 cm. Las muestras fueron guardadas en bolsas de polietileno, etiquetadas y selladas. En total se estudiaron siete perfiles.

### 10d. Fase de laboratorio

Las muestras de suelos y tepetate se transportaron al laboratorio de Fertilidad de Suelos del Departamento de Edafología del Instituto de Geología, UNAM donde se secaron al aire para molerlas y tamizarlas a través de una malla

de 2 mm, para practicar los análisis físicos, químicos y mineralógicos correspondientes:

#### d<sub>a</sub>. Físicas

- a- Color: Determinado con las Tablas de color Munsell. En muestras de suelo en seco y húmedo (Munsell Soil Chart, 1975)
- b- Densidad real: método del picnómetro (A.S.T.M., 1958)
- c- Densidad aparente: método de la parafina en muestras inalteradas (Blake, 1965).
- d- Porosidad total: Por la relación entre DA y DR.
- e- Textura: Por el método de la pipeta (Day, 1965)
- f- Resistencia a compresión simple inconfiada: Se realizó en núcleos labrados (probetas) sujetos a peso incrementante en un marco de carga (Head, 1984).

#### d<sub>b</sub>. Químicas

- a- pH: en una solución acuosa en proporción 1:2.5 con un potenciómetro marca Metrohm Herisao, modelo E588
- b- Materia orgánica (%): Por el método de Walkley y Black modificado por Walkley (1947).
- c- Capacidad de intercambio catiónico total (C.I.C.T.): Por el método de percolación con acetato de amonio 1 N a pH 7 (Peech, 1947).
- d- Bases intercambiables por determinación en el extracto obtenido por percolación con acetato de amonio 1 N a pH 7.
  - d<sub>1</sub> - Calcio y magnesio: Por volumetría con EDTA a 0.02 N (Jackson, 1964).
  - d<sub>2</sub> - Sodio y potasio: Por flamometría (Corning 400) (Jackson, 1964).

e- Fósforo: Se cuantificó por el método de colorimetría (longitud de onda 640) utilizando una solución extractora de fluoruro de amonio (Bray y Kurtz, 1945).

f- Oxidos libres:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Hashimoto y Jackson, 1960).

g- Óxidos totales: Por el método de fusión con metaborato de litio en una disolución de ácido nítrico en medio ácido (Verbeek *et al.*, 1982.)

h- Minerales amorfos: Por el método de: Ditionito - citrato - bicarbonato, (Mehra y Jackson, citado por Wilson, 1994), Oxalato de amonio (Smith, citado por Wilson, 1994) y Pirofosfato de sodio (McKeague, citado por Wilson, 1994). La estimación del porcentaje de alofano por Parfitt y Henmi (1982).

#### 10e. Estabilidad de los horizontes endurecidos

e<sub>1</sub> - Por el método propuesto por USDA (1988) para capas endurecidas.

#### 10f. Mineralógicas

f<sub>1</sub> - Determinación del tipo de arcilla, mediante difracción de rayos X, utilizando un Difractómetro SIEMENS D5000, ánodo de Cu-K, condiciones de excitaciones de 40 kv. y 30 mA.

f<sub>2</sub> - Análisis de mineralogía de los cementantes por microscopía electrónica de barrido, microsonda en láminas delgadas elaboradas de muestras inalteradas de capas endurecidas.

f<sub>3</sub> - Estudio petrográfico de láminas delgadas, método de Kubiena (1939).

#### 10g. Morfológicas

g<sub>1</sub> - Descripción de poros, (Johnson *et al.*, 1959).

g<sub>2</sub>- Descripción morfológica de arenas finas y limos medios; redondez y esfericidad, mediante tablas de comparación Power, (1965)

g<sub>3</sub>- Índice de desarrollo del perfil (IDP) e índice de desarrollo de horizontes (IDH) {Birkeland *et al.*, 1990}

#### 10h. Clasificación taxonómica de los perfiles.

Las claves de clasificación taxonómica empleados fueron sistema FAO-UNESCO, 1991 y Soil Survey Staff, 1994.



Figura 11. Fragmentación del tepetate recolectado en campo en las instalaciones del invernadero del Instituto de Geología, UNAM.

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

## 10i. ETAPA II

Para la etapa dos se recolectó material de la capa endurecida del perfil 1 (tepetate blanco) y del perfil 5 (tepetate amarillo), que corresponden al municipio de Tepetzotlán y Nicolás de Romero en el Estado de México respectivamente. Este material se trasladó al invernadero del Instituto de Geología de la UNAM, donde se fragmentó manualmente y se pasó a través de una malla de 12 mm reteniéndose en una de 2.0 mm (Figura 11 y 12), el material fino se descartó. El material seleccionado se vació en macetas de plástico sin perforación (sistema cerrado), con capacidad para 5.0 kg. Simultáneamente se adicionó estiércol de bovino y de gallina, equivalente a 50 t/ha.

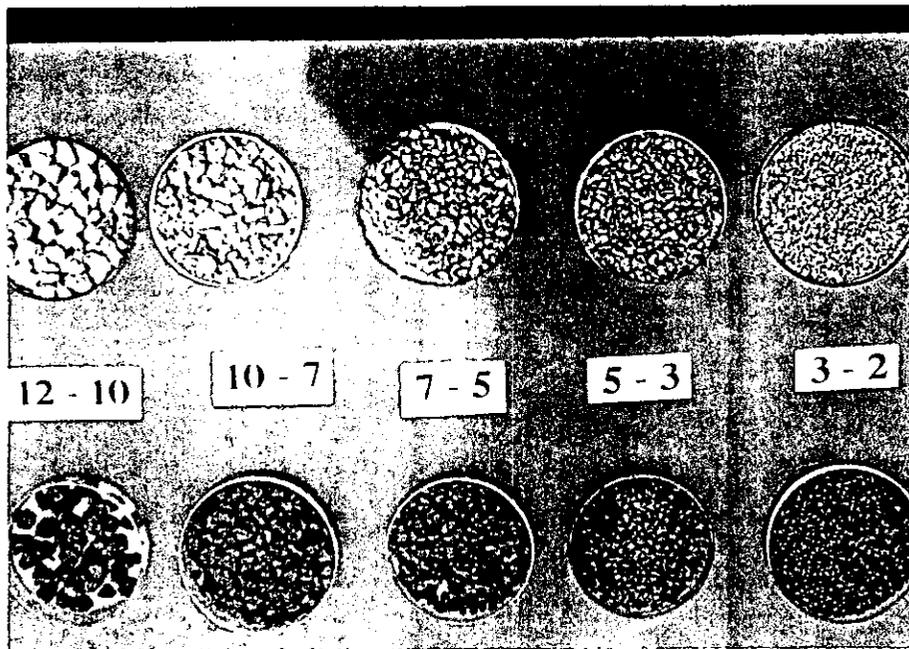


Figura 12. Intervalos de fragmentos del tepetate blanco y amarillo antes de ser colocados en las macetas.

Se seleccionaron tres especies vegetales: pasto Rhodes (*Chloris gayana* Kunth), huaje rojo (*Leucaena esculenta* M. et S. ex A. DC. Benth) y guayaba (*Psidium guajava* L. var. China) {Ver ANEXO I}. Las especies estudiadas se seleccionaron por las siguientes razones: el pasto Rhodes es una gramínea forrajera que ha demostrado su alta capacidad en procesos de agregación-disgregación (Velázquez, 1994 y 1995), el huaje rojo es una especie rústica que se establece con facilidad en condiciones adversas de suelo (Cruz *et al.*, 1994), y la guayaba ha sido utilizada con éxito en suelos con tepetate en diferentes regiones del país. El pasto Rhodes se sembró directamente en las macetas, para el huaje rojo se estableció un almácigo y el transplante se realizó a los 36 días de la emergencia, cuando las plántulas contaban con una altura de 10 cm; las plantas de guayaba de 20 cm de altura se aclimataron por un período de 45 días en el invernadero y se transplantaron a las macetas. El invernadero donde se realizó la experiencia tuvo una temperatura promedio durante el día de 22°C y una humedad relativa del 60%.

Una vez establecido el experimento se aplicó la solución nutritiva de Hoagland {ver anexo IV} (Renningsfeld *et al.*, 1983), en los tratamientos que así lo requerían, a intervalos de 15 días durante un año, entre una aplicación y otra se adicionaba agua de acuerdo con las necesidades hídricas de cada especie. El experimento se evaluó en dos etapas, la primera a los seis meses y la segunda a los doce meses. Una vez cosechadas las especies vegetales se tomó una muestra representativa de 200 g del material y se realizó el análisis de agregados por la técnica de Savinov (citado por Kaurichev *et al.*, 1980), método en seco, en el que se utiliza una columna de mallas con aperturas de 12, 10, 7, 5, 3, 2, 1, 0.5 y 0.25 mm. Al final, se determinó el porcentaje de agregados en cada una de las mallas. Para determinar la estabilidad en húmedo

se utilizó una columna de mallas de 5, 3, 2, 1, 0.5 y 0.25 mm (Kaúrichev *et al.*, 1980). En la siguiente tabla se muestra la distribución de los tratamientos.



**Figura 13.** Mantenimiento del experimento en el invernadero, Pasto Rhodes.

Se empleó un diseño experimental pentafactorial con un arreglo de los tratamientos completamente al azar y tres repeticiones. Dichas unidades fueron, para guayaba, una planta por maceta, tres para huaje rojo y para el pasto Rhodes, cuatro macollos. Los factores estudiados fueron (A) especies vegetales, (B) tepetate blanco y amarillo, (C) solución nutritiva, (D) estiércol de bovino y de gallina, y (E) dos períodos de corte, seis y doce meses. Así mismo, se establecieron testigos absolutos, es decir, sin el efecto de las especies vegetales. Finalmente se establecieron 48 tratamientos, con 3 repeticiones, lo cual dio un total de 144 unidades experimentales por cada etapa de evaluación.

**Tabla 4.** Distribución de los tratamientos en el invernadero del Instituto de Geología, UNAM.

TEPETATE BLANCO	TEPETATE AMARILLO	SOLUCIÓN NUTRITIVA (HOAGLAND)	ABONOS ORGÁNICOS
TRATAMIENTO 1	T - 7	SIN	SIN
T - 2	T - 8	CON	SIN
T - 3	T - 9	SIN	BOVINO
T - 4	T - 10	CON	BOVINO
T - 5	T - 11	SIN	GALLINAZA
T - 6	T - 12	CON	GALLINAZA

Los datos se analizaron estadísticamente utilizando un análisis de varianza pentafactorial para evaluar el efecto de cada uno de los factores y sus posibles interacciones, donde se encontró significancia se realizó la prueba de Tukey ( $P=0.01$ ), para determinar las diferencias de medias entre tratamientos.

## CAPÍTULO XI.

### *11. Descripción morfológica , caracterización, taxonomía y génesis de los perfiles .*

#### 11a. PERFIL 1.

##### 11a.1. Descripción del sitio.

Provincia fisiográfica: Eje Neovolcánico

Geoforma: Lomerio con suelos de profundidad variable.

Altitud: 2,450 msnm

Clima: Templado subhúmedo C(w<sub>0</sub>)(w)b(i') (Köeppen, modificado por García, 1883).

Localización: 1 km. del camino rural Francisco Magu - Lanzarote Edo. de Méx.

Erosión: Hídrica laminar moderada

Material parental: Tobas, cenizas volcánicas consolidadas

Uso del suelo: Pastizal inducido.

Pendiente: 15-20%

Drenaje superficial: Excesivamente drenado.

Pedregosidad: Ligeramente pedregoso.

Influencia humana: Alta

Vegetación natural y/o cultivo: Secundaria herbácea arbustiva, predominan las gramíneas.

11a.2. Morfología del perfil.

A11 0-20 cm. Color en seco, gris pardusco claro (10YR6/2) y gris muy oscuro (10YR3/1) en húmedo; limo arcilloso; estructura moderadamente desarrollada que rompe en bloques subangulares tamaño medio; consistencia en seco dura y en húmedo muy firme, ligeramente pegajosa y plástica; pedregosidad interna baja; poros, frecuentes, muy finos a finos; raíces abundantes finas y delgadas; límite marcado horizontal, desarrollo relativo del subhorizonte (DRH), ligeramente desarrollado (Tabla 5).

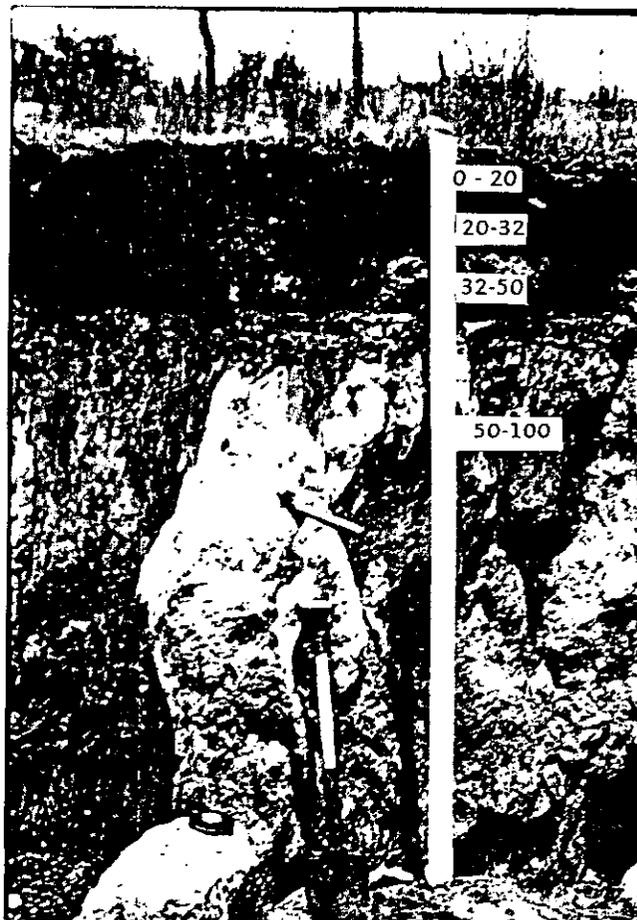


Figura 14. Perfil 1, clasificado como Entisol vitrandic udorthent.

A12 20-32 cm. Color en seco, gris claro (2.5Y7/0) y pardo grisáceo (2.5Y5/2) en húmedo; limo arcilloso; estructura moderadamente desarrollada que rompe en bloques subangulares tamaño medio; consistencia en seco dura y en húmedo muy firme, pegajoso y plástico; con gravas en el subhorizonte; poros frecuentes, finos y medianos; raíces comunes, delgadas a medias, límite marcado horizontal.

AC 32-50 cm. Color en seco, blanco (2.5Y8/0) y gris pardusco claro (2.5Y6/2) en húmedo; areno limoso; con estructura granular tamaño fino; consistencia en seco blanda y en húmedo muy friable, no pegajosa, no plástica; poros frecuentes, muy finos a finos; raíces comunes, delgadas y medias; límite marcado horizontal.

Toba 50-140 cm. Color en seco, blanco (2.5Y8/0) y gris claro (2.5Y7/2) en húmedo; limo arenoso; sin estructura, masiva, que rompe en bloques angulares, gruesos; consistencia en seco extremadamente duro y en húmedo firme, no pegajoso, no plástico; porosidad escasa.

### 11a.3. Caracterización física.

El subhorizonte superficial de 0 - 20 cm constituye un horizonte de diagnóstico ócrico por su connotación de color, estos subhorizontes sobreyace de manera plana y abrupta sobre una toba riolítica de edad pleistocénica.

Como se observa en la Tabla 7 se presenta la distribución de tamaño de partículas, donde los subhorizontes A<sub>11</sub>, A<sub>12</sub> y AC es evidente el dominio de las arenas, predominando las arenas finas (0.25-0.10 mm) y muy finas (0.10-0.05 mm). La presencia de estas arenas posiblemente se deba a tres causas principales: (1) escaso desarrollo del perfil y de sus subhorizontes debido a su juventud; (2) limitada



**Tabla 6. - CARACTERISITICAS FISICAS.**

Perfil	Horizonte	Profundidad cm	COLOR		DENSIDAD Mg/m <sup>3</sup>		Porosidad %	TEXTURA			
			Seco	Húmedo	Aparente	Real		% Arena	% Limo	% Arcilla	
1	A <sub>11</sub>	0-20	10YR 6/2 Gris pardusco claro	10YR 3/1 Gris muy oscuro	1.91	2.35	18.72	53.24	18.11	28.65	Franco arcillo arenoso
	A <sub>12</sub>	20-32	2.5Y 7/0 Gris claro	2.5Y 5/2 Pardo grisáceo	1.65	2.18	24.31	40.38	29.28	30.34	Franco arcilloso
	AC	32-50	2.5Y 8/0 Blanco	2.5Y 6/2 Gris pardusco claro	1.25	2.11	40.76	49.20	27.40	23.40	Franco arcillo arenoso
	Cqm <sub>1</sub>	50-80	2.5Y 8/0 Blanco	2.5Y 7/2 Gris claro	1.17	2.01	41.79	30.19	39.40	30.41	Franco arcilloso
	Cqm <sub>2</sub>	80-110	2.5Y 8/0 Blanco	2.5Y 7/2 Gris claro	1.17	1.91	38.74	22.34	41.54	36.12	Franco arcilloso
	Cqm <sub>3</sub>	110-140	2.5Y 8/0 Blanco	2.5Y 7/2 Gris claro	1.27	1.82	30.22	26.90	40.82	32.28	Franco arcilloso

**Tabla 7.- DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE PARTICULAS (mm).**

Perfil	Horizonte	Prof. cm	Arena muy gruesa 2-1	Arena gruesa 1-0.5	Arena media 0.5-0.25	Arena fina 0.25-0-10	Arena muy fina 0.10-0.05	Total	Limo grueso 0.05-0.02	Limo medio 0.02-0.005	Limo fino 0.005-0.002	Total	Arcilla <0.002	CLASIFICACION TEXTURAL
1	A11	0-20	3.03	11.38	8.63	17.76	12.44	53.24	10.69	7.42	0.00	18.11	28.63	Franco arcillo arenoso
	A12	20-32	2.46	8.68	7.59	12.50	9.15	40.38	13.76	7.30	8.22	29.28	30.30	Franco arcilloso
	AC	32-50	4.95	14.91	8.07	13.19	8.08	49.20	8.52	12.83	6.05	27.40	23.36	Franco arcillo arenoso
	Cqm1	50-80	1.56	8.14	5.76	9.37	5.36	30.19	13.25	16.69	9.46	39.40	30.37	Franco arcilloso
	Cqm2	80-110	0.41	4.25	3.82	7.92	5.94	22.34	12.58	21.21	7.75	41.54	36.07	Franco arcilloso
	Cqm3	110-140	1.12	7.22	5.69	7.84	5.03	26.90	10.29	21.78	8.75	40.82	32.23	Franco arcilloso

**Tabla 8.- CARACTERISTICAS QUIMICAS**

Perfil	Horizonte	Prof. cm	pH 1:2.5	Mat. org. %	C %	N %	C/N	CICT cmol+Kg	BASES Na+	INTERCAMBIABLES K+	Ca++	cmol+Kg Mg++	Sat. Bases %	P aprov mg/kg
1	A11	0-20	7.40	1.66	0.96	0.13	7.38	17.30	9.00	0.14	9.00	9.00	100.00	0.10
	A12	20-32	7.50	0.49	0.28	0.10	2.80	21.80	11.50	0.15	7.00	11.50	100.00	0.05
	AC	32-50	8.30	0.28	0.16	0.03	5.33	28.90	19.50	0.24	19.50	19.50	100.00	0.05
	Cqm1	50-80	9.00	0.14	0.08	0.03	2.67	61.90	20.50	0.19	4.50	20.50	73.81	0.05
	Cqm2	80-110	9.10	0.14	0.08	0.03	2.67	50.50	8.00	0.12	8.00	8.00	47.76	0.05
	Cqm3	110-140	8.60	0.14	0.08	0.03	2.67	29.50	1.50	0.22	14.00	1.50	58.37	0.05

Tabla 9. Porcentaje de redondez en limos medios (0.02-0.005 mm)<sup>1</sup>. PERFIL 1

Perfil	Horizonte	Prof. cm.	A %	B %	C %	D %	E %
1	A11	0 - 20	3.84	26.92	34.61	30.76	3.84
	A12	20 - 32	0.00	27.27	40.90	31.81	0.00
	AC	32 - 50	4.54	18.18	36.36	31.81	9.09
	Cqm1	50 - 80	0.00	11.76	11.76	70.58	5.88
	Cqm2	80 - 110	0.00	5.00	10.00	75.00	10.00
	Cqm3	110 - 140	12.5	4.16	20.83	41.66	20.83

Tabla 10. Porcentaje de redondez en arenas muy finas (0.10-0.05 mm)<sup>1</sup>. PERFIL 1

Perfil	Horizonte	Prof. cm.	A %	B %	C %	D %	E %
1	A11	0 - 20	34.48	37.93	24.13	0.00	3.44
	A12	20 - 32	17.24	13.79	31.03	31.03	6.89
	AC	32 - 50	0.00	57.69	34.61	3.84	3.84
	Cqm1	50 - 80	0.00	67.74	9.67	22.58	0.00
	Cqm2	80 - 110	0.00	57.89	26.31	13.15	2.63
	Cqm3	110 - 140	0.00	6.38	72.34	10.63	10.63

A. Muy angular      B. Angular      C. Subangular  
 D. Subredondeado      E. Redondeado

<sup>1</sup> En todos los rangos predomina baja esfericidad.

Como se hace evidente en la Tabla 7 los limos gruesos predominan en los primeros 32 cm y decrece su porcentaje en relación a la profundidad, así los limos medios dominan en la toba riolítica, esto parece confirmar una baja alteración diferencial debido a la naturaleza del material parental, los limos en esta capa se caracterizan por presentar una esfericidad baja y son subredondeados, lo que sugiere fuertemente que se trata de un material *in situ* y no transportado por los agentes erosivos (Flores *et al.*, 1992).

La fracción arcilla de los subhorizontes A<sub>11</sub>, A<sub>12</sub> y AC se observa una acumulación iluvial entre los 20 y 32 cm, aunque no es suficiente para calificar como un horizonte B cámbico, dado su espesor. Subyaciendo a estos subhorizontes se

encuentra la toba de naturaleza riolítica, poco intemperizada; los porcentajes de arcilla fluctúan de 30-36% interpretándose como un proceso leve de iluviación de este material (Figura 27); clasificando texturalmente el horizonte superior como franco arcillo arenoso y la toba, franco arcillosa. Sin embargo, de acuerdo a la USDA (1990), estos porcentajes de arcilla no pueden ser clasificadas como un cambio textural abrupto entre las capas es menor del 20%; lo que confirma la presencia de un horizonte de alteración total con características policíclicas.

Los datos contenidos en la tabla 6 muestran que la densidad aparente (DA), en los subhorizontes y capas del perfil estudiado fluctúan de 1,91 en los subhorizontes superficiales a 1.17 Mg/m<sup>3</sup> en la parte inferior. Los valores mayores de 1.3 Mg/m<sup>3</sup> sugieren un nivel de compactación significativo (Primavesi, 1980), la DA se incrementa cuando se presenta el fenómeno de consolidación y/o compactación ya sea por simples presiones o por consolidaciones de los materiales por pérdida de agua, ambos procesos se evidencia por los bajos porcentajes de porosidad que se presentan en las capas denominadas toba 1, 2 y 3.

Estos valores de DA son bajos debido a que se trata de un material pumítico de naturaleza riolítica, a estos valores se les atribuye la gran cantidad de pómez vesicular que se encuentra en abundancia y distribuida a través de la toba. Los valores obtenidos tanto de DA y de densidad real (DR), en la toba se encuentran por debajo de los reportados en otros trabajos relacionados con tepetates. Los valores de DR son congruentes con la naturaleza del material parental del suelo, indicando que los contenidos de minerales pesados descienden en función de la profundidad. Los valores bajos de DR muestran la presencia de minerales ligeros en todas sus fracciones lo que manifiesta la aparición de haloisita y otros minerales ricos en silicio en los que se incluye la cristobalita y el cuarzo los cuales son confirmados en el análisis de rayos X.

Observaciones al microscopio petrográfico muestran que los poros que se tienen en este material se caracterizan por su falta de continuidad con la superficie exterior, predominan las fisuras y vesículas, donde se ha depositado material que impide el flujo del agua, lo que a su vez no permite la alteración de los minerales que se observa cuando hay poros continuos (Figura 28).

La morfología de los poros en general se caracteriza por ser discontinuos, intersticiales de orientación caótica.

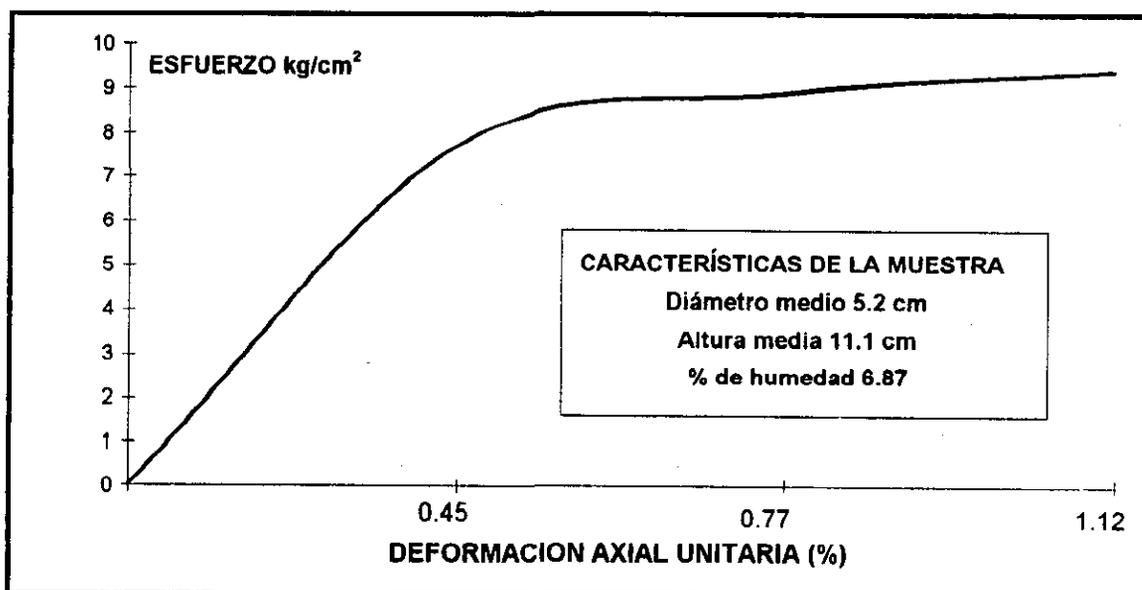


Figura 15. Prueba de compresión simple de la capa endurecida, Perfil 1.

La resistencia a compresión confinada que se le realizó a la toba resultó de  $9.3 \text{ kg/cm}^2$  con un porcentaje de humedad del 6.87 (Figura 15), Quantin *et al.*, (1993), consideran a este material por su comportamiento a esta prueba como de tipo fragipan, por otro lado Flores *et al.*, (1992), en fragipanes del estado de Morelos obtuvieron valores a esta prueba de  $4.5\text{-}8.8 \text{ kg/cm}^2$ , sin embargo de acuerdo a lo observado, este material podría clasificarse como de tipo intermedio entre fragipan y duripan, ya que al realizarse la prueba de estabilidad de fragmentos en los tratamientos con agua, KOH y HCl (Nimlos, 1987), el fragmento no se colapso en

agua por lo que no se le puede considerar un material del tipo fragipan; sin embargo, al colocarse los fragmentos en KOH concentrado y con calentamiento, estos se fracturaron, disgregaron y colapsaron totalmente después de 60 minutos, lo que indica que la cementación de estos materiales es debido principalmente a la sílice (Grossman & Cline, 1957, Nimlos 1989) clasificándose como toba vítrea.

#### 11a.4. Génesis, alteración y mineralogía.

En relación a las propiedades químicas (Tabla 8) es notoria la baja del estatus nutricional del suelo, ya que los contenidos de M.O., N, y P son pobres a muy pobres, tanto en el suelo como en el material tobaceo, en cuanto al pH es alcalino a fuertemente alcalino (7.4-9.1) incrementándose en función de la profundidad, este aumento se debe tanto a adiciones secundarias como al tipo de mineral del material parental, donde predominan principalmente feldespatos (albita y andesina) que al intemperizarse liberan sodio; además de la presencia de plagioclasas cálcicas (anortita) favoreciéndose el incremento del pH (Flores *et al.*,1992 ; Etchevers *et al.*, 1992) .

En relación a las bases intercambiables, el calcio, magnesio y potasio presentan valores medios a altos (Tabla 8), así mismo la CIC muestra un potencial de fertilidad medio. Para los primeros 50 cm el porcentaje de saturación de bases es alto, donde el calcio, magnesio y sodio saturan el complejo; mientras que, en la toba los porcentajes de saturación decrece de 73.8 a 47.7% en relación a la profundidad, considerándose como media. Esto indica, que se presenta un proceso de lixiviación de cationes de la superficie al interior del perfil acumulándose entre 32 y 80 cm (Tabla 8), debido al tipo de material presente en el horizonte superficial (dacita) que se intemperiza con mayor facilidad que la riolita que la subyace.

Existe otra probabilidad para explicar esta acumulación, la cual consiste en que la capa de 50 a 80 cm presenta compactación, poco poroso, que limita el paso

del agua y consecuentemente se da la acumulación de las bases disueltas en ella, incrementándose así éstas en el horizonte superior.

En cuanto a la CIC, se considera que va de media a muy alta en relación a la profundidad, este incremento se debe principalmente a un aumento en minerales amorfos presentes en las capas inferiores, principalmente la sílice en forma de gel o como ópalo A (como se observa en las láminas delgadas), que reviste a minerales primarios y poros; proviniendo estos minerales principalmente de la alteración de vidrio volcánico y feldespatos poco cristalinos que al intemperizarse liberan ácido ortosilícico, que al precipitarse con el hidróxido de aluminio y polimerizarse la sílice se forman minerales amorfos, los cuales por su tamaño presentan una mayor área específica que trae como consecuencia una mayor capacidad de intercambio catiónico (Shoji *et al.*, 1993; Etchevers *et al.*, 1992).

#### 11a.4.1. Óxidos Totales.

Como se observa en la Tabla 11, este perfil presenta cenizas de naturaleza diferente que en conjunto lo constituyen. La primera capa de 0-32 cm compuesta de cenizas de naturaleza dacítica, la cual fue depositada por procesos geomorfológicos (coluvio-aluviales) donde se observa además que dentro de estos 32 cm la presencia de materiales de arrastre, como es el caso de cantos rodados lo que favorece la aseveración anterior (Figura 13). En esta capa predomina además del óxido de sílice, el de aluminio y el sodio, las relaciones moleculares de las dos subcapas (0-20 y 20-32 cm) presentan una moderada alteración lo que indica que son materiales de depósitos jóvenes y poca alteración de minerales primarios. Mientras que, la segunda capa (>32 cm) la forman cenizas volcánicas de naturaleza riolítica, en la capa de 32-50 cm presenta una ligera alteración de los minerales primarios en comparación con las otras tres subcapas (50-80, 80-110 y 110-140 cm) donde predomina además del óxido de sílice, el de aluminio y el sodio. En general se puede definir que se trata de una toba con poca alteración, como lo demuestran las relaciones moleculares altas típicas de materiales poco intemperizados (Tabla 11).

**Tabla 11.- Óxidos totales en suelo total y relaciones molares PERFIL 1**

Oxidos	PERFIL 1						A5*K	A4*K	A3*K	A2*K	A1*K	Pérdidas o ganancias									
	Horizontes											de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>qm2</sub>	C <sub>qm1</sub>	AC	A <sub>12</sub>	A <sub>11</sub>				
	C <sub>qm3</sub>	C <sub>qm2</sub>	C <sub>qm1</sub>	AC	A <sub>12</sub>	A <sub>11</sub>															
Totales	110-140	80-110	50-80	32-50	20-32	0-20	de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>qm2</sub>	C <sub>qm1</sub>	AC	A <sub>12</sub>	A <sub>11</sub>					
SiO <sub>2</sub>	84.42	87.79	80.91	75.56	65.97	67.99	108.48	120.06	53.60	29.56	23.70	24.06	35.64	-30.82	-54.86	-60.72					
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.37	1.38	1.15	2.2	2.78	2.29	1.76	1.89	0.76	0.86	1.00	0.39	0.52	-0.61	-0.51	-0.37					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.32	4.14	3.89	8.03	13.6	14.81	6.84	5.66	2.58	3.14	4.89	1.52	0.34	-2.74	-2.18	-0.43					
TiO <sub>2</sub>	0.68	0.73	0.5	1.33	2.25	2.1	0.87	1.00	0.33	0.52	0.81	0.19	0.32	-0.35	-0.16	0.13					
MnO	0.17	0.17	0.21	0.17	0.52	0.52	0.22	0.23	0.14	0.07	0.19	0.05	0.06	-0.03	-0.10	0.02					
CaO	0.87	0.81	1.72	1.33	1.66	2.21	1.12	1.11	1.14	0.52	0.60	0.25	0.24	0.27	-0.35	-0.27					
MgO	1.11	1.23	1.38	2.09	2.17	2.12	1.43	1.68	0.91	0.82	0.78	0.32	0.57	-0.20	-0.29	-0.33					
Na <sub>2</sub> O	5.09	5.09	3.35	5.092	7.504	10.98	6.54	6.96	2.22	1.99	2.70	1.45	1.87	-2.87	-3.10	-2.39					
K <sub>2</sub> O	2.41	2.41	2.41	2.65	2.89	2.89	3.10	3.30	1.60	1.04	1.04	0.69	0.89	-0.81	-1.37	-1.37					
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.11	0.11	0.25	0.11	0.11	0.18	0.15	0.07	0.10	0.04	0.04	0.01	-0.07	-0.04	-0.10					
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	5.04	5.54	4.95	5.56	2.12	1.46	6.48	7.58	3.28	2.17	0.76	1.44	2.54	-1.76	-2.87	-4.28					
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	4.41	4.41	6.52	6.01	4.92	5.18	5.67	6.03	4.32	2.35	1.77	1.26	1.62	-0.09	-2.06	-2.64					
TOTAL	111.03	113.81	107.1	110.27	106.49	112.66															
							C <sub>qm3</sub>	C <sub>qm2</sub>	C <sub>qm1</sub>	AC	A <sub>12</sub>	A <sub>11</sub>									
							SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.93	35.98	35.29	15.97	8.23	7.79								
							SiO <sub>2</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	163.77	169.07	186.99	91.28	63.07	78.91								
							SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.38	0.47	0.42	0.40	0.31	0.24								

Los valores altos de óxidos de silicio en la toba hablan de un material reciente donde los feldespatos y el vidrio volcánico han sido poco alterados, esto se comprobó al realizar el estudio petrográfico de las laminas delgadas, donde se observó el bajo grado de intemperización de los minerales primarios.

#### 11a.4.2. Óxidos Libres.

Como se observa en la Tabla 12 la relación molar de los óxidos libres  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$  muestra la alteración que se presenta en el perfil de intemperismo. La relación  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  es significativa desde el punto de vista de alteración, solo en los primeros 32 cm, donde las relaciones oscilan de 2.82-2.90 manifiestan procesos de transformación, esto se corrobora con la relación  $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ , donde incide de forma directa los factores pedogenéticos. Posterior a esta profundidad se tienen valores muy altos que sugieren una alteración relativa de algunos minerales primarios principalmente feldespatos calco-sódicos, en conjunto se trata de un suelo débilmente desarrollado que sobreyace a capas cuya naturaleza lítica esta demostrada por sus relaciones molares. Flores *et al.*, (1996), obtuvieron relaciones molares  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  de 2.6-10.0 valores que ponen de manifiesto el desarrollo escaso de esos suelos.

Tabla 12. Óxidos libres en suelo total del perfil 1.

Hz.	Prof. cm	$\text{SiO}_2$ %	$\text{Al}_2\text{O}_3$ %	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ %	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ libre/ $\text{Fe}_2\text{O}_3$ total
A11	0 - 20	0.12	0.07	0.19	2.90	1.65	5.11
A12	20 - 32	0.10	0.06	0.14	2.82	1.88	3.48
AC	32 - 50	0.16	0.03	0.06	9.05	6.99	7.32
Cqm <sub>1</sub>	50 - 80	0.17	0.02	0.04	14.42	11.16	15.21
Cqm <sub>2</sub>	80 - 110	0.14	0.01	0.05	23.75	7.35	10.08
Cqm <sub>3</sub>	110 - 140	0.11	0.01	0.02	18.66	14.18	8.81

La secuencia de los óxidos libres que se presenta en la capa endurecida de este perfil es :  $\text{SiO}_2 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Al}_2\text{O}_3$  lo que indica una etapa temprana de meteorización de acuerdo a lo reportado por Chesworth (1977) confirmando el poco grado de intemperización de la toba.

#### 11a.4.3. Análisis Selectivos.

En relación a los análisis selectivos con oxalato y pirofosfato de sodio (Tabla 13), se presentó un decremento en el porcentaje de alofano del horizonte superior al inferior lo que confirma el poco grado de intemperización de los minerales que conforman a la toba. Los valores altos de las relaciones molares ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 2$ ) indican que el material amorfo se presenta en forma de gel cuando predomina la sílice (Tabla 13). Estos valores coinciden con las relaciones altas tanto en óxidos totales y libres.

Tabla 13. Análisis selectivo de la fracción no cristalina del Perfil 1.

Prof. cm	Ac. OXALICO			PIROFOSFATO			ALOFANO		Ferrihi drita	$\text{Al}_{\text{ox}} +$ $\frac{1}{2}\text{Fe}_{\text{ox}}$	Vidrio %
	Si	Al	Fe	Si	Al	Fe	Al/Si	%			
0 - 20	0.26	0.46	0.22	0.17	0.15	0.13	1.18	1.30	0.37	0.57	11.76
20-32	0.26	0.09	0.05	0.26	0.04	0.03	0.21	1.28	0.09	0.12	2.37
32-50	0.26	0.20	0.06	0.58	0.13	0.06	0.25	1.28	0.10	0.23	4.74
50-100	0.23	0.10	0.03	0.16	0.01	0.09	0.38	1.15	0.05	0.12	2.37

#### 11a.4.4. Mineralogía.

Las relaciones molares altas, se deben principalmente a la presencia de cristobalita, cuarzo y feldespatos. La aparición de montmorillonita se puede considerar eventual, dado que ésta es una arcilla característica de suelos maduros (Gama, comunicación personal 1997), en gran parte la haloisita se considera un producto primario de la alteración de minerales feldespáticos y posiblemente de algunas fracciones del vidrio volcánico y procesos de cristalización del ópalo A (Acevedo, 1997; Campos y Dubroeuq, 1992; Parfitt *et al.*, 1984). Esta arcilla

pertenece al grupo de las kanditas, típica de suelos volcánicos jóvenes, a partir de los 50 cm de profundidad, los minerales primarios y productos inmediatos de su alteración (amorfos) son dominantes, la presencia de montmorillonita en esta capa se interpreta como la de un material heredado o a una alta concentración de sílice en la solución y con drenaje impedido que favoreció la formación de esta arcilla (Hidalgo *et al.*, 1992; Gama, comunicación personal 1997) Ver anexo 5.

#### **11a.4.5. Análisis Petrográfico.**

En relación al estudio petrográfico en lámina delgada, presentó una distribución relacionada de tipo porfírica cerrada, de textura arcillosa con un débil desarrollo de pedalidad, donde predomina la microestructura masiva constituida principalmente por fenocristales, predominando en la matriz vidrio volcánico, donde se encuentran incrustados otros minerales como son feldespatos (albita y andesina) y micas del tipo biotita, así mismo la presencia de roca volcánica y un porcentaje bajo (4%) de minerales opacos en general presentan un grado bajo de alteración, lo cual se correlaciona con los resultados obtenidos en las relaciones molares tanto en óxidos libres como en los totales.

La fábrica de birrefringencia es cristalina y la porosidad que se presenta en este material es menor del 15%. En forma general se trata de una toba consolidada al momento de su depositación con bajo grado de alteración.

#### **11a.4.6. Microanálisis del cementante.**

El cementante que se localiza en la toba de este perfil, se distingue por su composición puramente silícea, típico de geles puros de silicio (Miehlich *et al.*, 1980). En la Figura 28 se aprecia gran cantidad de minerales de origen volcánico donde destacan vidrios y feldespatos alterados, así como la presencia de geles de sílice amorfa y probablemente minerales de tipo protoalofánico (Acevedo, 1997). La composición aproximada del material analizado se muestra en la siguiente tabla, donde el óxido de silicio predomina en su totalidad.

Tabla 14. Microanálisis del cementante que une las partículas de la toba, Perfil 1.

SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
97.66	0.00	0.61	0.29	0.00	0.11	0.39	0.15	0.02	268.21

#### 11a.5. Clasificación propuesta.

De acuerdo a las características antes descritas, el presente perfil se clasifica de acuerdo a la FAO-UNESCO (1988) como un Regosol éutrico. Para la clasificación de la Soil Survey Staff (1994) se agruparía en Entisol vitrandic udorthent, esto se debe a la evolución incipiente que presenta el perfil, por una u otra, causa, no le ha permitido desarrollar horizontes de diagnóstico, como se menciona anteriormente esto se debe al corto tiempo de exposición del material parental (toba vítrea de naturaleza riolítica muy reciente), a la acción de los factores de formación del suelo y a la fuerte erosión la cual fue inducida por la acción del hombre al talar el bosque y darle un manejo agrícola inadecuado.

El suborden orthent al que pertenece este suelo es muy predominante en el área de estudio.

**11b. PERFIL 2.****11b.1. Descripción del sitio.**

Provincia fisiográfica: Eje Neovolcánico

Geoforma: Ladera.

Altitud: 2,300 msnm

Clima: Templado subhúmedo C(w<sub>o</sub>)(w)b(i').

Localización: Sta. María Tianguistenco, Edo. de Méx.

Erosión: Hídrica laminar moderada

Material parental: Tobas, cenizas volcánicas consolidadas, material coluvio-aluvial

Uso del suelo: Pastizal inducido, plantación de nopales y agaves.

Pendiente: 6-10%

Drenaje superficial: Drenado en láminas.

Pedregosidad: Media.

Influencia humana: Alta

Vegetación natural y/o cultivo: Secundaria, predominan las gramíneas y las xerófitas

**11b.2. Morfología del perfil.**

A1 0-17 cm. Color en seco, pardo (7.5YR5/2) y pardo oscuro (7.5YR3/2) en húmedo; franco arcillo arenoso; estructura débilmente desarrollada, de bloques subangulares tamaño medio y fino; consistencia en seco blanda y en húmedo muy friable, ligeramente plástico y ligeramente pegajoso; poros frecuentes, muy finos a finos; raíces abundantes, finas a muy finas; límite moderadamente ondulado; desarrollo relativo del subhorizonte (DRH), ligeramente desarrollado.(Tabla 15).

A2 17-31 cm. Color en seco, pardo oscuro (7.5YR4/2) y negro (7.5YR2/0) en húmedo; franco arcillo arenoso; estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares tamaño medio y gruesos; consistencia en seco ligeramente dura y en húmedo muy friable, ligeramente plástica y ligeramente pegajosa; poros frecuentes, finos a medios; raíces comunes, finas a delgadas, límite medio, ondulado con presencia de restos de cerámica y gravas.



Figura 16. Perfil 2, clasificado como Lithic ustorthent.

AC 31-43 cm. Color en seco, gris rosáceo (7.5YR7/2) y pardo claro (7.5YR5/2) en húmedo; limo arenoso; estructura débilmente desarrollada de bloques subangulares; consistencia en seco dura y en húmedo friable,

no plástico, no pegajoso; poros frecuentes continuos; raíces muy raras, límite marcado horizontal, con presencia de cutanes discontinuos

Toba 43-133 cm. Color en seco, blanco rosáceo (7.5YR8/2) y gris rosáceo (7.5YR6/2) en húmedo; arenoso; estructura masiva que rompe en bloques angulares tamaño medio y gruesos; consistencia en seco ligeramente dura y en húmedo firme, no plástica, no pegajosa; poros frecuentes, finos y medianos, con fisuras; raíces muy raras, presencia de cutanes discontinuos de arcilla y sesquióxidos de hierro.

### 11b.3. Caracterización física.

El horizonte de diagnóstico ócrico tanto por su color en húmedo y seco como por espesor y saturación de bases. De modo similar al perfil 1, no presenta horizonte subsuperficial de diagnóstico, ya que sobreyace directamente sobre un subhorizonte mineral AC de naturaleza basáltica andesítica, que a su vez se encuentra sobre una serie de capas de naturaleza dacítica.

Como se observa en la Tabla 17 las arenas finas (0.25-0.10 mm) y muy finas (0.10-0.05 mm), son dominantes en porcentaje. Observándose que los limos gruesos (0.05-0.02 mm) muestran una distribución irregular, en tanto que los limos finos (0.005-0.002 mm) tienden a decrecer con la profundidad dentro del suelo. Dentro de las capas la denominada T1, que corresponde a la toba, moderadamente alterada según se demuestra por sus altos porcentajes de arena fina y muy fina. Sin embargo, dada la escasa edad evolutiva del perfil, la alteración limitada y nuevamente las condiciones ambientales, la granulometría no presenta una clasificación regular, es decir, se presenta de forma caótica.

**Tabla 15.** Clasificación morfométrica y de producto de intemperismo PERFIL 2 (Birkeland *et al.*, 1990).

Perfil	Horizonte	DRH	IDP
2	A <sub>11</sub> - A <sub>12</sub>	0.28	0.16
	A <sub>12</sub> - AC	0.29	
	AC - Cqm <sub>1</sub>	0.29	
	Cqm <sub>1</sub> - Cqm <sub>2</sub>	0.13	
	Cqm <sub>2</sub> - Cqm <sub>3</sub>	0.19	

0.00 - 0.20 Joven                      0.21 - 0.40 Ligeramente desarrollado

0.41 - 0.60 Moderadamente desarrollado    0.61 - 0.80 Desarrollado

0.42 - 1.00 Fuertemente desarrollado      T = Toba

DRH= Desarrollo relativo del horizonte. IDP= Índice de desarrollo del perfil

De modo similar al Perfil 1, la forma de las partículas se caracteriza por su baja esfericidad y un índice de redondez de tipo angular, lo que sugiere que en este caso también se trata de un material depositado *in situ*. Sin embargo, la fracción fina menor a 2  $\mu\text{m}$  indica que dentro del *solum* hay una tendencia de moderado arreglo de los porcentajes de arcilla que resulta congruente dentro de los primeros 103 cm de profundidad. La capa 3 muestra porcentajes de arcilla que tienden a incrementarse, es probable que se trate de arcilla alogénica (heredada) y no de arcilla de neoformación.

Tabla 16.- CARACTERISITICAS FISICAS.

Perfil	Horizonte	Profundidad cm	COLOR		DENSIDAD Mg/m <sup>3</sup>		Porosidad %	TEXTURA			
			Seco	Húmedo	Aparente	Real		% Arena	% Limo	% Arcilla	
2	A <sub>11</sub>	0-17	7.5 YR 5/2 Pardo	7.5YR 3/2 Pardo oscuro	1.14	2.25	49.33	40.58	25.07	34.35	Franco arcilloso
	A <sub>12</sub>	17-31	7.5YR 4/2 Pardo oscuro	7.5YR 2/0 Negro	1.66	2.13	22.07	53.58	16.74	29.68	Franco arcillo arenoso
	AC	31-48	7.5YR 7/2 Gris rosaseo	7.5YR 5/2 Pardo claro	1.68	2.10	20.00	43.67	31.50	24.83	Franco
	Cqm <sub>1</sub>	43-73	7.5YR 8/2 Blanco rosaseo	7.5YR 6/2 Gris rosaseo	1.59	2.05	22.44	62.63	27.30	10.07	Franco arenoso
	Cqm <sub>2</sub>	78-108	7.5YR 7/2 Gris rosaseo	7.5YR 6/2 Gris rosaseo	1.58	2.10	24.76	57.65	34.27	8.08	Franco arenoso
	Cqm <sub>3</sub>	103-133	7.5YR 7/2 Gris rosaseo	7.5YR 6/2 Gris rosaseo	1.70	2.09	18.66	43.57	38.61	17.82	Franco

Tabla 17.- DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE PARTICULAS (mm)

Perfil	Horizonte	Prof. cm	Arena muy gruesa 2-1	Arena gruesa 1-0.5	Arena media 0.5-0.25	Arena fina 0.25-0-10	Arena muy fina 0.10-0.05	Total	Limo grueso 0.05-0.02	Limo medio 0.02-0.005	Limo fino 0.005-0.002	Total	Arcilla <0.002	CLASIFICACION TEXTURAL
2	A11	0-17	2.54	9.48	7.22	12.69	8.65	40.58	14.20	6.61	4.26	25.07	34.30	Franco arcilloso
	A12	17-31	2.86	11.24	10.01	18.12	11.35	53.58	6.22	5.89	4.63	16.74	29.64	Franco arcillo arenoso
	AC	31-43	0.65	9.25	9.05	15.37	9.35	43.67	13.75	15.39	2.36	31.50	24.79	Franco
	Cqm1	43-73	0.73	9.96	12.12	21.71	18.11	62.63	8.54	15.22	3.54	27.30	10.01	Franco arenoso
	Cqm2	73-103	0.80	11.81	11.94	18.96	14.14	57.65	11.22	15.01	8.04	34.27	8.03	Franco arenoso
	Cqm3	103-133	0.61	9.81	9.11	13.80	10.24	43.57	14.05	18.16	6.40	38.61	17.77	Franco

Tabla 18.- CARACTERISTICAS QUIMICAS

Perfil	Horizonte	Prof. cm	pH	Mat. org. %	C %	N %	C/N	CICT cmol+Kg	BASES INTERCAMBIABLES				Sat. Bases %	P aprov mg/kg
									Na+	K+	Ca++	Mg++		
2	A11	0-17	7.40	3.19	1.85	0.25	7.40	30.80	0.20	1.28	27.50	2.00	100.00	0.05
	A12	17-31	8.20	2.77	1.61	0.21	7.67	22.90	0.20	0.07	36.00	1.00	100.00	0.05
	AC	31-48	8.20	1.94	1.12	0.08	14.00	29.80	0.22	0.44	32.50	2.00	100.00	0.05
	Cqm1	48-78	8.20	0.28	0.16	0.04	4.00	36.00	0.22	0.92	19.50	6.00	74.00	0.05
	Cqm2	78-108	8.10	0.14	0.08	0.02	4.00	22.10	0.35	0.96	21.00	9.50	100.00	0.05
	Cqm3	103-133	8.50	0.14	0.08	0.01	8.00	34.60	0.39	0.54	9.50	10.50	60.49	0.05

Tabla 19. Porcentaje de redondez en limos medios (0.02-0.005 mm)<sup>1</sup>. PERFIL 2

Perfil	Horizonte	Prof. cm.	A %	B %	C %	D %	E %
2	A <sub>11</sub>	0 - 17	7.57	46.96	25.75	18.18	4.54
	A <sub>12</sub>	17 - 31	2.00	62.00	18.00	16.00	2.00
	AC	31 - 43	2.63	57.89	21.05	18.42	0.00
	Cqm <sub>1</sub>	43 - 73	1.81	43.63	27.27	21.81	5.45
	Cqm <sub>2</sub>	73 - 103	4.65	55.81	25.58	13.95	0.00
	Cqm <sub>3</sub>	103 - 133	5.26	56.14	22.8	12.28	3.50

Tabla 20. Porcentaje de redondez en arenas muy finas (0.10-0.05 mm)<sup>1</sup>.

Perfil	Horizonte	Prof. cm.	A %	B %	C %	D %	E %
2	A <sub>11</sub>	0 - 17	6.14	67.34	8.16	18.36	0.00
	A <sub>12</sub>	17 - 31	7.69	66.15	10.76	13.84	1.56
	AC	31 - 43	5.37	66.07	16.07	7.14	5.35
	Cqm <sub>1</sub>	43 - 73	4.85	77.41	11.29	6.45	0.00
	Cqm <sub>2</sub>	73 - 103	6.35	64.55	18.98	10.12	0.00
	Cqm <sub>3</sub>	103 - 133	3.84	70.51	17.94	5.15	2.56

A. Muy angular

B. Angular

C. Subangular

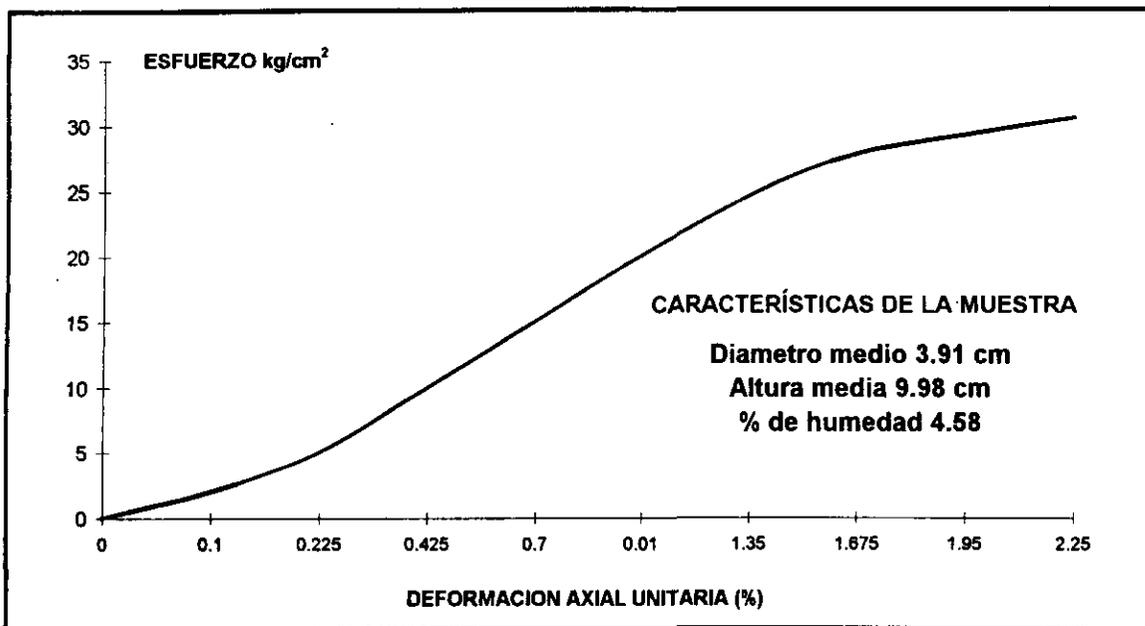
D. Subredondeado

E. Redondeado

<sup>1</sup> En todos los rangos predomina baja esfericidad.

Con excepción del subhorizonte A<sub>11</sub> la densidad aparente en este suelo es alta en los horizontes y en las capas endurecidas, lo que indica una consolidación y probablemente compactación propiciada en gran parte por la presencia de cantidades significativas de arenas finas y muy finas, así como de limos en sus diferentes fracciones, no obstante las cantidades de materia orgánica presentes en el suelo. La densidad real en todos los casos se considera normal y puede indicar por sus valores (Tabla 16), que los contenidos en minerales pesados no son abundantes ya que en ningún caso exceden el valor de 2.65 Mg/m<sup>3</sup>.

La porosidad tan baja en la mayoría de los subhorizontes y capas nuevamente confirman la probabilidad de que estas capas están consolidadas y/o cementadas.



**Figura 17.** Prueba de compresión simple de la capa endurecida, perfil 2

La resistencia a compresión inconfiada en la toba resultó de  $30 \text{ kg/cm}^2$  a un porcentaje de humedad de 4.58, (Figura 17), al respecto Quantin *et al.*, (1993), mencionan que valores entre  $15\text{-}25 \text{ kg/cm}^2$  consideran al tepetate como de un comportamiento intermedio entre el tipo fragipan y el duripan, sin embargo para Torrent *et al.*, (1980), lo indican como de comportamiento de duripan, por lo cual se le debe clasificar como una toba altamente consolidada y compactada aunque friable en agua, lo cual se debe a procesos predominantemente diagenéticos y secundariamente pedológicos, dado al escaso índice de desarrollo que muestra el suelo y la presencia de pedobiota que se observan en las láminas delgadas del estudio petrográfico realizado. La cementación en esta toba es débil ya que basta ser colocada en agua para propiciar su total fragmentación y disgregación en menos de cinco minutos.

#### 11b. 4. Génesis, alteración y mineralogía.

Con relación a sus propiedades químicas y biológicas se observa en la Tabla 18 que el *solum* muestra contenidos moderados de materia orgánica, así como de carbono y nitrógeno, éste último en los primeros 31 cm. Por otra parte la capacidad de intercambio catiónico le confiere una fertilidad potencial significativa dentro del *solum*.

Los contenidos de bases intercambiables fueron exagerados por las técnicas empleadas (Tabla 18). De ahí se observa que la saturación de bases rebasa el 100%. La capacidad de intercambio catiónico alta esta demostrando la presencia de algunos amorfos del tipo alofánico inferidos por su relaciones molares próximas a la unidad en los subhorizontes A<sub>11</sub> y A<sub>12</sub>. Para los demás horizontes es difícil establecer una jerarquía para determinar el amorfo presente, sin embargo, es posible inferir que aún se sigue tratando de compuestos predominantemente de Si/Al. Los análisis de disolución selectiva que se muestran en la Tabla 23 indican que estos amorfos deben ser considerados como alofánicos o protoalofánicos ricos en sílice no obstante sus porcentajes bajos (Acevedo, 1997).

##### 11b.4.1. Óxidos Totales.

En relación a los óxidos totales, como se observa en la Tabla 21 este perfil presenta tres tipos de cenizas volcánicas que lo están constituyendo, la primera capa de 0 - 31 cm compuesta de cenizas de naturaleza andesítica y la segunda capa de 31- 43 cm de naturaleza basalto-andesítica, las cuales fueron depositadas por procesos coluvio-aluvial y por último la que corresponde a la toba está compuesta de cenizas de naturaleza dacítica. Las relaciones molares que se presentan en las tres capas indican una moderada alteración lo que indica poca intemperización de minerales primarios. Las tres capas se caracterizan además de la predominancia de los óxidos de silicio, de aluminio y de sodio, este último se debe a la presencia de andesina, similares resultados obtuvieron Flores *et al.*, (1995) y Pacheco y Estrada (1987)

donde comprueban que el mineral que predomina tanto en Morelos como en el Estado de México es la andesina.

#### 11b.4.2 Óxidos Libres.

En cuanto a óxidos libres, los índices de alteración que muestran la relación  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  en los primeros 73 cm son indicativos de un proceso de devitrificación y desilicificación significativos, producto de una alteración básicamente geoquímica típica de clima templado, sin embargo, la relación  $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$  indica que la alteración sólo se presenta de manera evidente en los primeros 31 cm, y continúa en una intensidad moderada hasta los 108 cm. Los datos obtenidos para Fe libre también confirman una alteración significativa en los primeros 31 cm, existiendo una anomalía en la capa 73-103 cm, debida probablemente a la presencia de una facie rica de minerales pesados.

Las relaciones moleculares mayores de 2 en óxidos libres ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) indican que el material amorfo esta en forma de geles al predominar el sílice, mientras que en relaciones menores de 2 el material está en forma de alofano. Por lo que, se indica que la dureza o cementación de este material se debe a la presencia de la sílice en forma amorfa coincidiendo con lo reportado por Besoain (op. cit.) donde menciona que los geles al polimerizarse son eficientes cementantes (Tabla 22). La secuencia que presentan los óxidos libres ( $\text{Si} > \text{Fe} > \text{Al}$ ) se encuentran en el primer nivel de meteorización de acuerdo a Chesworth (1977), es decir, que los materiales primarios están poco alterados, esto se debe a las condiciones climáticas que prevalecen a la zona de estudio y/o a depositaciones recientes.

Tabla 21.- Óxidos totales en suelo total y relaciones molares  
PERFIL 2

Óxidos	PERFIL 2						A5*K	A4*K	A3*K	A2*K	A1*K	Pérdidas o ganancias									
	Horizontes											de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>qm2</sub>	C <sub>qm1</sub>	AC	A <sub>12</sub>	A <sub>11</sub>				
	C <sub>qm3</sub>	C <sub>qm2</sub>	C <sub>qm1</sub>	AC	A <sub>12</sub>	A <sub>11</sub>															
Totales	103-133	73-103	43-73	31-43	17-31	0-17															
SiO <sub>2</sub>	69.83	64.39	63.41	55.28	59.09	61.74	66.54	62.45	65.78	51.81	55.02	-3.29	-7.38	-4.05	-18.02	-14.81					
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.96	2.02	1.76	1.71	2.42	2.37	1.87	1.96	1.83	1.60	2.25	-0.09	0.00	-0.13	-0.36	0.29					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.18	14.88	14.62	13.67	15.13	15.23	13.51	14.43	15.17	12.81	14.09	-0.67	0.25	0.99	-1.37	-0.09					
TiO <sub>2</sub>	2.08	1.43	1.23	1.83	2.1	1.91	1.98	1.39	1.28	1.72	1.96	-0.10	-0.69	-0.80	-0.36	-0.12					
MnO	0.94	0.61	0.52	0.72	0.61	0.62	0.90	0.59	0.54	0.67	0.57	-0.04	-0.35	-0.40	-0.27	-0.37					
CaO	1.86	2.57	2.46	4.31	2.85	1.96	1.77	2.49	2.55	4.04	2.65	-0.09	0.63	0.69	2.18	0.79					
MgO	1.56	2.02	1.81	1.77	2.2	1.92	1.49	1.96	1.88	1.66	2.05	-0.07	0.40	0.32	0.10	0.49					
Na <sub>2</sub> O	7.5	7.5	8.04	6.96	9.11	8.57	7.15	7.27	8.34	6.52	8.48	-0.35	-0.23	0.84	-0.98	0.98					
K <sub>2</sub> O	2.89	2.89	2.89	2.89	3.13	3.13	2.75	2.80	3.00	2.71	2.91	-0.14	-0.09	0.11	-0.18	0.02					
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.35	0.35	0.32	0.23	0.55	0.41	0.33	0.34	0.33	0.22	0.51	-0.02	-0.01	-0.02	-0.13	0.16					
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	2.91	2.71	3.85	3.66	2.35	2.48	2.77	2.63	3.99	3.43	2.19	-0.14	-0.28	1.08	0.52	-0.72					
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	5.5	6.73	7.65	12.05	9.4	8.97	5.24	6.53	7.94	11.29	8.75	-0.26	1.03	2.44	5.79	3.25					
TOTAL	111.56	108.1	108.56	105.08	108.94	109.31															
							C <sub>qm3</sub>	C <sub>qm2</sub>	C <sub>qm1</sub>	AC	A <sub>12</sub>	A <sub>11</sub>									
				SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			8.36	7.34	7.36	6.86	6.63	6.88									
				SiO <sub>2</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			94.69	84.72	95.75	85.92	64.89	69.23									
				SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			0.22	0.21	0.19	0.20	0.25	0.24									

Tabla 22. Óxidos libres en suelo total del Perfil 2.

Hz.	Prof. cm	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> / Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> libre/ Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> total
A11	0 - 17	0.15	0.21	0.54	1.19	0.73	6.34
A12	17 - 31	0.12	0.20	0.36	1.00	0.87	5.10
AC	31 - 43	0.14	0.11	0.18	2.13	2.03	8.35
T1	43 - 73	0.14	0.09	0.12	2.61	3.06	7.87
T2	73 - 103	0.12	0.05	0.11	4.02	2.85	6.01
T3	103 - 133	0.14	0.05	0.06	4.69	6.22	7.20

#### 11b.4.3. Análisis Petrográfico.

El estudio petrográfico arroja como resultado de la interpretación de la lámina delgada de la toba, que ésta presenta una distribución relacionada de tipo porfírica cerrada, de textura limo arcillosa con una morfología de los pedos de bloques subangulares los cuales están moderadamente desarrollados. La microestructura de la toba es principalmente de fisuras, aunque en algunas zonas se presenta de tipo masivo (empaquetamiento) con fábrica de birrefringencia de tipo cristalina y de poro estriado.

Esta lámina se caracteriza por la presencia de revestimientos arcillosos lo que indica que se presentan procesos de eluviación e iluviación, donde la depositación es en forma de microláminas, es decir arcillas orientadas siendo éstas haloisita o montmorillonita, y minerales ricos en sílice como la cristobalita, según el análisis de difracción de rayos X, además de geles de sílice que favorecen la cementación de este material, esto trae como consecuencia la reducción de la porosidad.

Por otro lado, se observan residuos orgánicos dentro de los poros, lo que indica la presencia de actividad biológica (pedobiota), dentro de la toba caracterizándose como pedofábrica, además de nódulos pseudomórficos en forma de

agregados debido a la alteración de minerales ferromagnesianos, a diferencia del perfil anterior, en éste se presenta un mayor grado de alteración de los minerales que componen a la toba, así mismo zonas de debilitamiento (depleted) lo que indica procesos de óxido-reducción y lixiviación de materiales.

**Tabla 23.** Análisis selectivo de la fracción no cristalina del Perfil 2.

Prof. cm	Ac. OXALICO			PIROFOSFATO			ALOFANO		Ferrihi drita	Al <sub>ox</sub> + ½Fe <sub>ox</sub>	Vidrio %
	Si	Al	Fe	Si	Al	Fe	Al/Si	%			
0-17	0.29	0.48	0.19	0.19	0.13	0.08	1.20	1.45	0.32	0.58	11.86
17-31	0.28	0.45	0.11	-	-	-	-	-	0.19	0.51	10.42
31-43	0.29	0.25	0.07	0.28	0.05	0.01	0.69	1.45	0.12	0.29	5.88
43-133	0.30	0.25	0.03	0.14	0.03	0.03	0.74	1.50	0.05	0.27	5.47

Los minerales primarios presentan un grado de alteración moderado donde predomina el vidrio volcánico, siguiendo en importancia los feldespatos, hematita y limonita así como algunas micas de tipo biotita.

#### 11b.4.4. Mineralogía.

El análisis mineralógico muestra en la fracción fina del suelo la presencia dominante de arcillas 1 : 1 y secundaria de arcillas 2 : 1, además de la presencia de cristobalita.

Los feldespatos se presentan como el mineral primario predominante, en términos generales se trata de una asociación mineralógica típica para materiales volcánicos de naturaleza basáltica-andesítica. Su depositación posiblemente fue en forma de nube ardiente.

## 11b.4.5. Microanálisis del cementante.

La relación  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  para la muestra del cementante que se localiza en la toba de este perfil, da un valor alto de 1,039.4 típico de geles de sílice. Goudie (1973), menciona que porcentajes altos de sílice son típicos de estos materiales.

**Tabla 24.** Microanálisis del cementante (%) que une las partículas de la toba, Perfil 2.

$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{FeO}$	$\text{MnO}$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$
99.27	0.04	0.16	0.08	0.13	0.11	0.00	0.32	0.00	1039.43

## 11b.5. Clasificación propuesta.

Por sus características antes descritas, este suelo se considera incluido dentro del orden de los Entisoles, suborden orthents, grupo ustorthents, subgrupo lithic, clasificandose como Lithic ustorthents (Soil Survey Staff, 1994), su correspondencia estimada por la FAO-UNESCO (1988), es la de un Regosol éutrico. Al igual que el perfil 1, por no presentar un horizonte de diagnóstico genético, y por su incipiente desarrollo debido a su juventud quedan clasificados en este orden.

## 11c. PERFIL 3.

### 11c.1. Descripción del sitio.

Provincia fisiográfica: Eje Neovolcánico

Geoforma: Ladera.

Altitud: 2,480 msnm

Clima: Templado subhúmedo C(w<sub>0</sub>)(w)b(i').

Localización: 2 km. de la Presa Concepción-Lanzarote, Edo. de Méx.

Erosión: Hídrica laminar.

Material parental: Tobas, cenizas volcánicas consolidadas.

Uso del suelo: Pastizal inducido.

Pendiente: 10%

Drenaje superficial: Muy drenado en forma de láminas.

Pedregosidad: Moderada.

Influencia humana: Alta

Vegetación natural y/o cultivo: Secundaria, predominan los pastizales.

### 11c.2. Morfología del perfil.

A11 0-8 cm. Color en seco, pardo pálido (10YR6/3) y pardo oscuro (10YR3/3) en húmedo; areno limoso; estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares, tamaño fino; consistencia en seco dura y en húmedo friable, no plástico, no pegajoso; poros numerosos, finos, medios y gruesos, continuos; raíces abundantes, finas y delgadas; límite moderadamente ondulado; desarrollo relativo del subhorizonte (DRH), joven (Tabla 25).

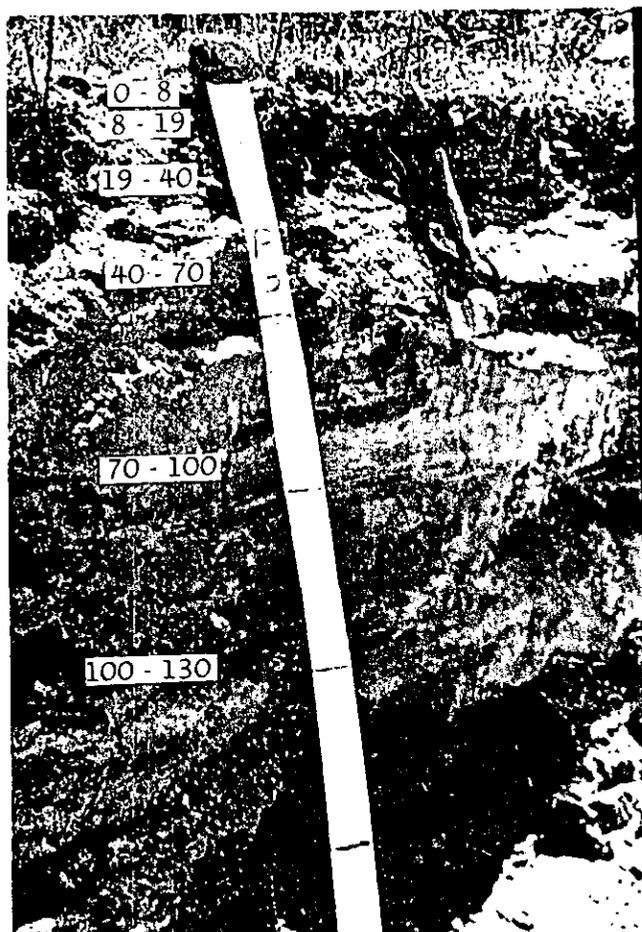


Figura 18. Perfil 3, clasificado como Vitranitic udorthent.

A12 8-19 cm. Color en seco, pardo muy pálido (10YR7/3) y pardo (7.5YR5/4) en húmedo; areno limoso; estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares, medios; consistencia en seco ligeramente dura y en húmedo friable, no plástico, no pegajoso; poros frecuentes muy finos a finos; raíces, medias y fina, límite medio ondulado, con un ligero desarrollo relativo del subhorizonte.

AC 19-40 cm. Color en seco, pardo muy pálido (10YR8/4) y pardo amarillento oscuro (10YR4/4) en húmedo; arenoso; estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares, tamaño

fino; consistencia en seco dura y en húmedo friable; no plástico, no pegajoso; poros frecuentes, finos y medianos; raíces pocas, finas a delgadas; presencia de cutanes zonales; límite marcado horizontal; DRH, es ligeramente desarrollado.

Toba C1 40-70 cm. Color en seco, blanco (2.5Y8/2) y pardo olivo tenue (2.5Y5/4) en húmedo; arenoso; estructura granular, tamaño fino; consistencia en seco muy dura y en húmedo firme, no pegajosa, no plástica; poros pocos; raíces escasas; DRH, ligeramente desarrollo.

Toba C2-C3 70-130 cm. Color en seco, gris claro (2.5Y7/2) y pardo grisáceo (2.5Y5/2) en húmedo; arenoso; sin estructura, suelta granular, fino; consistencia en seco suelta y en húmedo suelto, no pegajoso no plástico; DRH, joven.

### 11c.3. Características físicas.

Es un suelo con un horizonte A ócrico que sobreyace a una capa mineral que en conjunto representa un ciclo evolutivo desde el punto de vista edafogénico. Se encuentra el suelo sobreyaciendo a estratos ricos en piroclástos que probablemente fueron depositados en medios acuosos. El depósito fue por caída aérea, según lo sugiere la forma de grano predominantemente subangular (Tablas 26 y 27).

La textura se caracteriza desde el punto de vista de tamaño de partícula por la dominancia de arenas finas (0.25-0.10 mm) y muy finas (0.10-0.05 mm), así como de limos gruesos (0.05-0.02 mm) que están presentes en los primeros 40 cm de profundidad. Los contenidos de arcilla, probablemente heredada en su mayoría son moderados, existiendo un contacto textural abrupto entre el horizonte AC y la toba como se puede observar en la Tabla 29.

Tabla 25. Clasificación morfométrica y de producto de intemperismo PERFIL 3.

Perfil	Horizonte	DRH	IDP
3	A <sub>II</sub> - A <sub>12</sub>	0.19	0.18
	A <sub>12</sub> - AC	0.24	
	AC - Cqm <sub>1</sub>	0.37	
	Cqm <sub>1</sub> - Cqm <sub>2</sub>	0.21	
	Cqm <sub>2</sub> - Cqm <sub>3</sub>	0.18	

0.00 - 0.20 Joven                      0.21 - 0.40 Ligeramente desarrollado  
 0.41 - 0.60 Moderadamente desarrollado    0.61 - 0.80 Desarrollado  
 0.42 - 1.00 Fuertemente desarrollado

DRH= Desarrollo relativo del horizonte. IDP= Índice de desarrollo del perfil

Este contacto demuestra la presencia de una discontinuidad litológica entre el suelo y la toba; esto parece sugerir que el suelo se formó a partir de un depósito más joven y no de la toba que le subyace. Aunque la mineralogía muestra una naturaleza dacítica para todo el perfil, se puede observar que el cambio textural abrupto es una buena evidencia para establecer 2 ciclos.

Como se observa en la Tabla 29 entre el contacto correspondiente AC y la toba 1 se observa una pérdida de arcilla que comúnmente corresponde a un lavado por el efecto de drenaje lateral, esto parece reforzar más la idea de una discontinuidad. Los contenidos de carbono orgánico tan irregulares con la profundidad (Tabla 30) refuerzan esta hipótesis y se evidencia la presencia de estratificación.

**Tabla 26. Porcentaje de redondez en limos medios (0.02-0.005 mm)<sup>1</sup>. PERFIL 3**

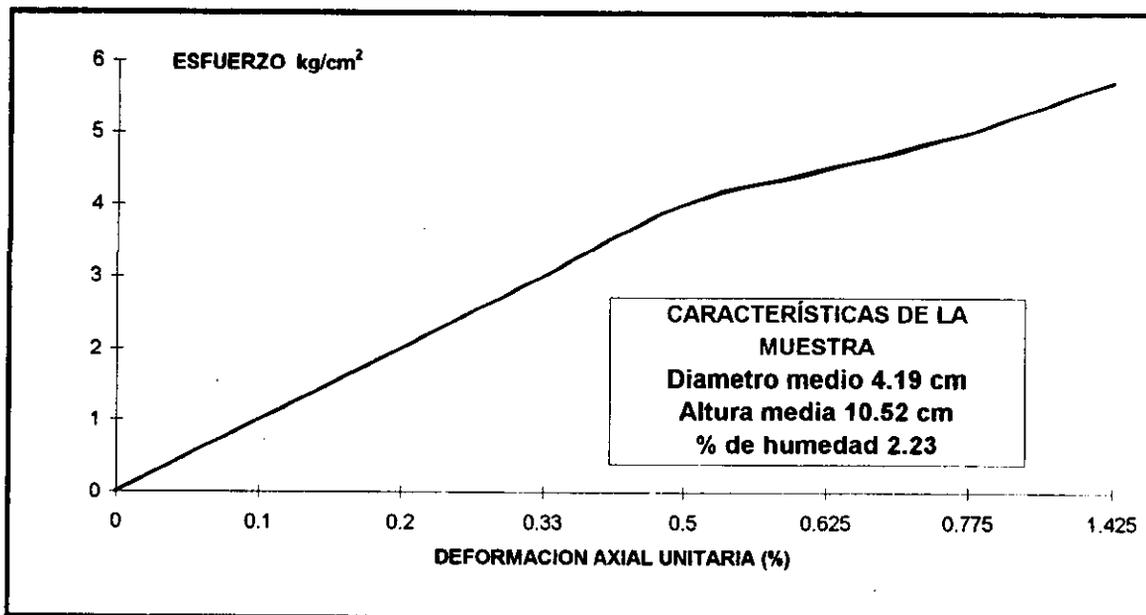
Perfil	Horizonte	Prof. cm.	A %	B %	C %	D %	E %
3	A11	0 - 8	2.90	20.29	69.56	5.80	1.45
	A12	8 - 19	2.63	10.53	78.95	7.89	0.00
	AC	19 - 40	4.08	12.24	77.55	6.12	0.00
	Cqm1	40 - 70	3.85	15.38	67.3	13.46	0.00
	Cqm2	70 - 100	1.79	21.43	75.00	1.79	0.00
	Cqm3	100 - 130	4.35	26.09	69.56	0.00	0.00

**Tabla 27. Porcentaje de redondez en arenas muy finas (0.10-0.05 mm)<sup>1</sup>.**

Perfil	Horizonte	Prof. cm.	A %	B %	C %	D %	E %
3	A11	0 - 8	4.11	80.82	6.85	8.22	0.00
	A12	8 - 19	4.39	71.43	8.79	15.38	0.00
	AC	19 - 40	3.66	84.15	12.19	2.44	0.00
	Cqm1	40 - 70	6.17	83.95	7.41	2.47	0.00
	Cqm2	70 - 100	7.37	81.05	8.42	3.16	0.00
	Cqm3	100 - 130	6.74	79.77	13.48	0.00	0.00

A. Muy angular      B. Angular      C. Subangular  
D. Subredondeado      E. Redondeado

<sup>1</sup> En todos los rangos predomina baja esfericidad.



**Figura 19. Prueba de compresión simple de la capa endurecida, Perfil 3.**

Tabla 28.- CARACTERISITICAS FISICAS

Perfil	Horizonte	Profundidad cm	COLOR		DENSIDAD Mg/m <sup>3</sup>		Porosidad %	TEXTURA			
			Seco	Húmedo	Aparente	Real		% Arena	% Limo	% Arcilla	
3	A <sub>11</sub>	0-80	10YR 6/3 Pardo pálido	10YR 3/3 Pardo oscuro	1.03	2.06	50.00	47.29	28.37	24.34	Franco arcillo arenoso
	A <sub>12</sub>	8-19	10YR 7/3 Pardo muy pálido	7.5YR 5/4 Pardo	1.07	2.20	51.36	42.48	28.62	28.00	Franco arcillo arenoso
	AC	19-40	10YR 8/4 Pardo muy pálido	10YR 4/4 Pardo amarillento oscuro	1.21	2.19	44.75	54.18	30.17	15.65	Franco arenoso
	Cqm <sub>1</sub>	40-70	2.5Y 8/2 Blanco	2.5Y 5/4 Pardo olivo tenue	1.06	2.25	52.89	77.96	12.69	9.35	Franco arenoso
	Cqm <sub>2</sub>	70-100	2.5Y 7/2 Gris claro	2.5Y 5/2 Pardo grisáceo	0.99	2.23	55.61	80.13	9.19	10.68	Franco arenoso
	Cqm <sub>3</sub>	100-130	2.5Y 7/2 Gris claro	2.5Y 6/4 Pardo amarillento claro	1.01	2.32	56.47	81.80	6.92	11.28	Franco arenoso

**Tabla 29.- DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE PARTICULAS (mm)**

Perfil	Horizonte	Prof. cm	Arena muy gruesa 2-1	Arena gruesa 1-0.5	Arena media 0.5-0.25	Arena fina 0.25-0.10	Arena muy fina 0.10-0.05	Total	Limo grueso 0.05-0.02	Limo medio 0.02-0.005	Limo fino 0.005-0.002	Total	Arcilla <0.002	CLASIFICACION TEXTURAL
3	A <sub>11</sub>	0-8	1.14	8.10	8.90	17.85	11.30	47.29	12.28	10.26	5.83	28.37	24.29	Franco arcillo arenoso
	A <sub>12</sub>	8-19	0.54	4.83	8.73	17.69	10.69	42.48	13.99	12.80	1.83	28.62	28.87	Franco arcillo arenoso
	AC	19-40	1.40	9.93	12.44	19.97	10.44	54.18	13.53	13.49	3.15	30.17	15.60	Franco arenoso
	C <sub>qm1</sub>	40-70	1.34	16.56	23.29	27.24	9.53	77.96	3.75	6.85	2.09	12.69	9.30	Franco arenoso
	C <sub>qm2</sub>	70-100	1.93	21.07	25.78	25.24	6.11	80.13	1.89	5.94	1.36	9.19	10.64	Franco arenoso
	C <sub>qm3</sub>	100-130	5.17	33.16	22.97	15.63	4.87	81.80	1.51	5.41	0.00	6.92	11.23	Franco arenoso

**Tabla 30.- CARACTERISTICAS QUIMICAS**

Perfil	Horizonte	Prof. cm	pH	Mat. org. %	C %	N %	C/N	CIC	BASES INTERCAMBIABLES g				Sat. Bases %	P aprov mg/kg
									cmol+K Na+	cmol+K K+	cmol+K Ca++	cmol+K Mg++		
3	A <sub>11</sub>	0-8	7.40	2.85	1.65	0.15	11.00	19.50	0.24	0.32	12.50	5.50	95.18	0.10
	A <sub>12</sub>	8-19	7.80	1.94	1.12	0.08	14.00	21.90	0.26	0.24	14.50	5.00	91.32	0.05
	AC	19-40	8.00	0.28	0.16	0.04	4.00	25.10	0.74	0.19	9.50	7.50	71.43	0.05
	C <sub>qm1</sub>	40-70	8.30	0.21	0.12	0.02	6.00	11.90	0.54	0.14	6.50	3.50	89.75	0.05
	C <sub>qm2</sub>	70-100	8.10	0.21	0.12	0.02	6.00	7.70	0.91	0.15	7.50	1.50	100.00	0.05
	C <sub>qm3</sub>	100-130	8.30	0.21	0.12	0.01	12.00	7.60	0.42	0.12	4.50	2.50	99.21	0.05

Desde luego existen otras evidencias claras para incrementar las probabilidades de que se trate de una discontinuidad litológica, entre ellas basta observar las diferencias tan notables en densidad aparente y densidad real, así como la de la porosidad que se da entre las capas AC y la toba. La relación C/N también muestra evidencias fuertes de esta discontinuidad.

La prueba de resistencia a compresión simple indica que la toba se encuentra débilmente cementada (5.8 kg/cm<sup>2</sup> y un porcentaje de humedad de 2.23), así mismo la prueba de estabilidad de fragmentos de la toba, cuando fue colocada en KOH concentrado y con calentamiento se fragmentó y disgregó en las primeras 48 horas lo que indica que el agente que actúa como cementante es el silicio (Nimlos, 1987), donde los agentes silicatados sufrieron una hidrólisis y una disolución muy intensa (Flores *et al.*, 1992).

### 11c.4. Génesis, alteración y mineralogía.

Dentro de las características químicas relevantes para este suelo destaca la capacidad de intercambio catiónico más la suma de sodio y potasio que como puede observarse en la Tabla 30 presenta una secuencia lógica dentro de los primeros 40 cm, de profundidad. Esta secuencia nuevamente es rota en contacto con la toba. Así mismo, el orden lógico de la capacidad de intercambio catiónico muestra una discordancia muy evidente entre el suelo y la toba.

#### 11c.4.1. Óxidos Totales.

Como se observa en la Tabla 31 este perfil está formado por ceniza volcánica dacítica; donde predomina además del óxido de sílice, óxido de aluminio y óxido de sodio esto se explica por la abundancia de vidrio volcánico y de andesina, detectados en el estudio petrográfico. A partir de esta ceniza se ha desarrollado el *solum* que yace sobre la toba.

Tabla 31.- Óxidos totales en suelo total y relaciones molares

Oxidos	PERFIL 3						A5*K	A4*K	A3*K	A2*K	A1*K	Pérdidas o ganancias									
	Horizontes											de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>qm2</sub>	C <sub>qm1</sub>	AC	A <sub>12</sub>	A <sub>11</sub>				
	C <sub>qm3</sub>	C <sub>qm2</sub>	C <sub>qm1</sub>	AC	A <sub>12</sub>	A <sub>11</sub>															
Totales	100-130	70-100	40-70	19-40	8-19	0-8	de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>qm2</sub>	C <sub>qm1</sub>	AC	A <sub>12</sub>	A <sub>11</sub>					
SiO <sub>2</sub>	62.25	62.81	61.91	64.78	62.55	62.3	65.38	64.85	60.91	62.80	62.43	3.13	2.60	-1.34	0.55	0.18					
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.59	2.81	2.96	2.59	3.16	3.14	2.72	2.90	2.91	2.51	3.15	0.13	0.31	0.32	-0.08	0.56					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.26	14.53	14.78	15.51	15.74	15.29	16.03	15.00	14.54	15.04	15.71	0.77	-0.26	-0.72	-0.22	0.45					
TiO <sub>2</sub>	2.2	2.4	2.58	2.43	3.25	2.75	2.31	2.48	2.54	2.36	3.24	0.11	0.28	0.34	0.16	1.04					
MnO	0.7	0.71	0.72	0.55	0.73	0.73	0.74	0.73	0.71	0.53	0.73	0.04	0.03	0.01	-0.17	0.03					
CaO	2.84	2.64	2.6	1.99	2.11	2.15	2.98	2.73	2.56	1.93	2.11	0.14	-0.11	-0.28	-0.91	-0.73					
MgO	3.58	3.58	3.7	2.25	2.39	2.52	3.76	3.70	3.64	2.18	2.39	0.18	0.12	0.06	-1.40	-1.19					
Na <sub>2</sub> O	8.57	7.5	8.04	8.04	8.04	7.5	9.00	7.74	7.91	7.79	8.02	0.43	-0.83	-0.66	-0.78	-0.55					
K <sub>2</sub> O	2.89	3.13	2.89	2.89	2.65	2.89	3.04	3.23	2.84	2.80	2.64	0.15	0.34	-0.05	-0.09	-0.25					
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.27	0.3	0.37	0.21	0.14	0.09	0.28	0.31	0.36	0.20	0.14	0.01	0.04	0.09	-0.07	-0.13					
H <sub>2</sub> O*	0.92	1.25	1.68	2.29	2.15	2	0.97	1.29	1.65	2.22	2.15	0.05	0.37	0.73	1.30	1.23					
H <sub>2</sub> O	2.02	2.75	3.42	5.04	6.7	7.21	2.12	2.84	3.36	4.89	6.69	0.10	0.82	1.34	2.87	4.67					
TOTAL	104.09	104.41	105.65	108.57	109.61	108.57															
							C <sub>qm3</sub>	C <sub>qm2</sub>	C <sub>qm1</sub>	AC	A <sub>12</sub>	A <sub>11</sub>									
							SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.92	7.34	7.11	7.09	6.74	6.91								
							SiO <sub>2</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	63.88	59.41	55.59	66.47	52.61	52.73								
							SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.26	0.29	0.30	0.26	0.30	0.31								

Las relaciones moleculares de los óxidos totales en todo el perfil presentan una ligera alteración, indicando que son materiales de depositación joven y de poca intemperización. En cuanto a la pérdida y ganancia de óxidos se observa en la Tabla 31 muy bajas ganancias de sílice, hierro, aluminio, titanio y manganeso en el horizonte A<sub>11</sub> el cual no presenta significancia alguna; sucede lo mismo con las pérdidas, esto sustenta el poco grado de alteración de los minerales que coincide con las relaciones molares, en general se puede decir que el *solum* y la toba presentan una mediana alteración. Por otro lado, la ganancia de H<sub>2</sub>O (-) en los subhorizontes A<sub>11</sub> y A<sub>12</sub> se debe a la presencia de sílice opalina, la cual es producto de la alteración del vidrio volcánico y de feldespatos mal estructurados (Flores *et al.*, 1992; Duchaufour, 1984).

#### 11c.4.2. Óxidos Libres.

Las relaciones de los óxidos libres obtenida a través del método de Hashimoto y Jackson (1960) resultan contundentes para probar una alteración moderada dentro de los primeros 40 cm. Los valores SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en los primeros 40 cm están indicando la liberación y presencia de materiales protoalofánicos, en tanto que los valores SiO<sub>2</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> muestran un grado de alteración moderada. En este caso los valores Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> libre/ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> total son apenas significativos de esta alteración.

Tabla 32. Óxidos libres en suelo total del Perfil 3.

H <sub>z</sub> .	Prof. cm	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> / Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> libre/ Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> total
A11	0 - 8	0.18	0.18	0.87	1.68	0.54	5.86
A12	8 - 19	0.15	0.13	0.80	1.93	0.49	4.64
AC	19 - 40	0.15	0.11	0.76	2.28	0.52	5.93
T1	40 - 70	0.13	0.02	0.10	10.92	3.39	4.35
T2	70 - 100	0.12	0.02	0.07	10.05	4.47	4.43
T3	100 - 130	0.11	0.03	0.14	6.16	2.06	4.27

La concentración de óxidos libres disminuye en función de la profundidad, debiéndose principalmente a que en los horizontes superficiales los minerales primarios están en contacto directo con los procesos pedogenéticos, es decir, presentan un mayor grado de alteración y solución de éstos, que lo que se llega a presentar en los horizontes subsuperficiales. La secuencia que presentan los óxidos libres ( $S_i > Fe > Al$ ) se localizan en el primer nivel de meteorización, lo que confirma nuevamente el poco grado de alteración de los minerales primarios (Chesworth, 1977).

#### 11c.4.3. Análisis Petrográfico.

Con relación al análisis petrográfico la toba presenta una distribución relacionada de tipo porfírica cerrada, con una microestructura de bloques subangulares índice de la reorganización de la masa basal con un desarrollo fuerte de pedalidad; principalmente predominan los poros de tipo cámara, recubiertos por arcilla eluviada de los subhorizontes superiores lo que le da la característica de una fábrica de birrefringencia de poro y grano estriado, los revestimientos antes mencionados se caracterizan por ser de tipo hipo- de forma creciente, porosidad del 35%, además se observan nódulos de ferromagnesianos en forma de agregados, lo que indica procesos de óxido-reducción dentro de la toba.

En cuanto a los minerales primarios observados se tiene vidrio volcánico, feldespatos, roca volcánica, algunos piroxenos los cuales presentan un ligero grado de alteración y limonita dado por el intemperismo de minerales ferromagnesianos, este bajo grado de intemperismo se correlaciona con las relaciones molares de los óxidos totales. Todos estos minerales se encuentran dentro de una matriz argílica donde la sílice se encuentra impregnando todas las arcillas junto con los sesquióxidos la cual es completamente isótropa con nicoles cruzados y de color amarillo en luz plana (Figura 27).

## 11c.4.4. Disolución Selectiva.

Los análisis selectivos realizados por pirofosfato y oxalato de sodio indican la presencia de porcentajes bajos de alofano (Tabla 33), aunque suficientes para afectar la capacidad de intercambio catiónico, así como el área superficial específica de los minerales presentes, lo cual explica la alta saturación de bases que se presenta en el suelo.

Tabla 33. Análisis selectivo de la fracción no cristalina del Perfil 3.

Prof. cm	Ac. OXALICO			PIROFOSFATO			ALOFANO		Ferrihi drita	Al <sub>ox</sub> + 1/2Fe <sub>ox</sub>	Vidrio %
	Si	Al	Fe	Si	Al	Fe	Al/Si	%			
0-8	0.29	0.35	0.17	0.16	0.04	0.01	1.09	1.43	0.29	0.44	8.97
8-19	0.32	0.24	0.10	0.11	0.01	0.00	0.71	1.60	0.17	0.29	5.98
19-40	0.28	0.35	0.18	0.13	0.01	0.00	1.23	1.40	0.31	0.44	9.08
40-130	0.28	0.28	0.19	0.14	0.04	0.06	0.86	1.40	0.32	0.38	7.73

## 11c.4.5. Microanálisis del Cementante.

Al realizarse el microanálisis en el cementante se observa que en los óxidos totales destaca los contenidos altos de sílice y de alúmina así como su respectiva relación molecular (Tabla 34), lo que indica poco desarrollo y que se trata probablemente de geles de sílice amorfa y posiblemente minerales de tipo protoalofánico.

Tabla 34. Microanálisis del cementante (%) que une las partículas de la toba, Perfil 3

SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
75.28	0.17	15.64	1.31	0.00	0.60	2.36	2.07	2.58	8.06

## 11c.5. Clasificación propuesta.

De acuerdo a la clasificación propuesta por la Soil Survey Staff (1994), este suelo se sitúa dentro del orden de los Entisoles, suborden orthents, del grupo

udorthents y del subgrupo de los vitrandic, consecuentemente se trata de un suelo Vitrandic udorthent. Para la FAO-UNESCO (1988), queda dentro del Regosol téfrico. Nuevamente, al igual que los perfiles anteriores la clasificación de este suelo se da por su desarrollo incipiente y la falta de un horizonte de diagnóstico.

## 11d. PERFIL 4.

### 11d.1. Descripción del sitio.

Provincia fisiográfica: Eje Neovolcánico

Geoforma: Lomerio.

Altitud: 2,500 msnm

Clima: Templado subhúmedo  $C(w_o)(w)b(i')$ .

Localización: San José del Vidrio, Edo. de Méx.

Erosión: Hídrica laminar.

Material parental: Cenizas volcánicas.

Uso del suelo: Agrosilvícola.

Pendiente: 5-7%

Drenaje superficial: Drenado.

Pedregosidad: Moderada.

Influencia humana: Alta

Vegetación natural y/o cultivo: Bosque de encino.

### 11d.2. Morfología del perfil.

A11 0-6 cm. Color en seco, pardo pálido (10YR6/3) y pardo amarillento oscuro (10YR3/4) en húmedo; limo arcilloso; estructura débilmente desarrollada de bloques subangulares tamaño medio; consistencia en seco blanda y en húmedo muy friable, ligeramente pegajoso y plástico; poros frecuentes, muy finos a finos; raíces abundantes, finas delgadas y medias, límite medio ondulado; desarrollo relativo del subhorizonte (DRH), joven (Tabla 35).

- A12 6-18 cm. Color en seco, pardo amarillento claro (10YR6/4) y pardo oscuro (10YR3/3) en húmedo; limo arcilloso; estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares, tamaño medio; consistencia en seco dura y en húmedo muy firme, ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; poros frecuentes, muy finos, finos y medianos; raíces abundantes, finas, delgadas y medias; límite tenue ondulado; DRH, ligeramente desarrollado.
- B<sub>t</sub>1 18-36cm. Color en seco, gris claro (10YR7/2) y pardo amarillento oscuro (10YR4/4) en húmedo; arcillo limoso; estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares, tamaño medio; consistencia en seco dura y en húmedo muy friable, pegajoso y plástico; poros frecuentes, muy finos y finos; raíces comunes, delgadas y finas; límite tenue ondulado; DRH ligeramente desarrollado.
- B<sub>t</sub>21 36-59 cm. Color en seco, pardo amarillento claro (10YR6/4) y pardo (10YR4/3) en húmedo; arcillo limoso; estructura moderadamente desarrollada que rompe en bloques subangulares tamaño grueso; consistencia en seco dura y en húmedo friable, ligeramente pegajoso y plástico; poros frecuentes, finos y muy finos; raíces comunes, delgadas y medias; límite tenue ondulado; DRH, ligeramente desarrollado; presencia de cutanes discontinuos y nódulos frecuentes de color negro.
- B<sub>t</sub>22 59-73 cm. Color en seco, amarillo (10YR8/6) y pardo amarillo oscuro (10YR4/4) en húmedo; arcillo limoso; estructura, moderadamente desarrollada de bloques subangulares tamaño medio; consistencia en seco muy dura y en húmedo friable, pegajoso y plástico; poros

frecuentes, finos y medianos; raíces escasas; límite medio ondulado;  
DRH ligeramente desarrollado; presencia de cutanes discontinuos.

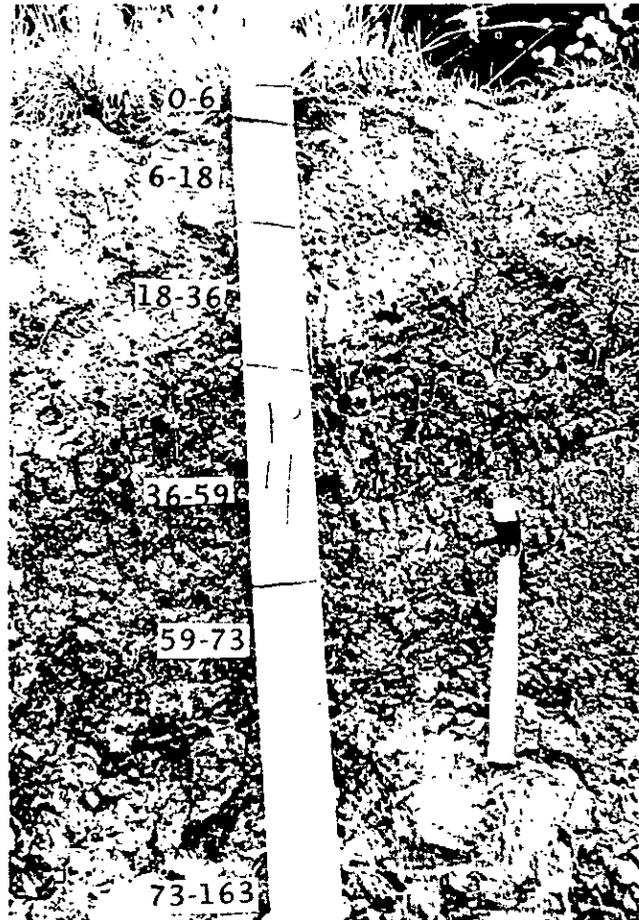


Figura 20. Perfil 4, clasificado como Typic fragiudalfs.

C<sub>d</sub> 73-163 cm. Color en seco, amarillo (10YR8/6) y pardo amarillento (10YR5/8) en húmedo; arcillo limoso; estructura moderadamente desarrollada tamaño fino a grueso; consistencia en seco extremadamente dura y en húmedo muy firme, pegajoso y

plástico; poros frecuentes, finos; presencia de cutanes zonales y nódulos de color rojo y negro.

**Tabla 35.** Clasificación morfométrica y de producto de intemperismo. PERFIL 4

Perfil	Horizonte	DRH	IDP
4	AII - A12	0.11	0.22
	A12 - B <sub>t</sub> 1	0.26	
	B <sub>t</sub> 1 - B <sub>t</sub> 21	0.21	
	B <sub>t</sub> 21 - B <sub>t</sub> 22	0.38	
	B <sub>t</sub> 22 - C <sub>d</sub> 1	0.37	
	C <sub>d</sub> 1 - C <sub>d</sub> 2	0.17	
	C <sub>d</sub> 2 - C <sub>d</sub> 3	0.19	

0.00 - 0.20 Joven                      0.21 - 0.40 Ligeramente desarrollado

0.41 - 0.60 Moderadamente desarrollado    0.61 - 0.80 Desarrollado

0.42 - 1.00 Fuertemente desarrollado      C<sub>d</sub> = Densipan o Claypan

DRH= Desarrollo relativo del horizonte. IDP= Índice de desarrollo del perfil

### 11d.3. Características físicas.

Es un suelo que muestra características de desarrollo de moderado a alto, presenta un horizonte ócrico de textura fina que sobreyace a un horizonte B argílico muy bien desarrollado, porcentaje de arcilla con densidad aparente muy alta a partir de los 59 cm que denota la presencia de un pan arcilloso (Claypan), denominado actualmente como densipan (USDA, 1990). El término densipan fue primeramente reconocido por Smith *et al.*, 1975 citados por Van (1992), en suelos de Trinidad definiéndolos como masivos, limosos, horizonte álbico firme o extremadamente firme con una elevada densidad aparente 1.8 Mg/m<sup>3</sup>, donde los fragmentos del densipan se colapsan al colocarse en agua, presentan una baja conductividad hidráulica y son libres de raíces. La presencia del densipan indica la ocurrencia natural o inducida por actividad del hombre sobre el perfil del suelo (Gama 1997, comunicación personal). Esta incidencia se manifiesta por la presencia de horizontes

y/o capas compactadas con elevada DA que impide el paso de las raíces y agua, excepto a lo largo de las fracturas (Figura 19). Sin embargo Van (1992), menciona que el origen de los densipanes es oscuro. El densipan es considerado como un horizonte álbico muy viejo que por largos períodos no es penetrado por las raíces, el contenido de carbono orgánico es de 0.1% y el espacio poroso es del 27%.

La porosidad en estas capas del perfil 4 a partir de los 36 cm de profundidad resulta sumamente baja. Al Claypan o densipan (Van, 1992), se les da el nombre genérico de tepetate en México (Tabla 36).

La granulometría de este perfil esta constituida en más del 55% por arcilla (<0.002 mm) y limo medio (0.02-0.005 mm), siendo la montmorillonita la arcilla predominante. La presencia de esta arcilla y del alto porcentaje en el que se muestra confieren al suelo propiedades físicas y mecánicas muy particulares como serían condiciones hidráulicas reducidas, aireación muy limitada, además de un coeficiente de expansión lineal muy alta. Como se observa en la Figura 19 en la profundidad de 36-59 cm se presenta una capa muy compactada que muestra una estructura cúbica y que en muchas regiones del país se le conoce con el nombre de chautle (chicloso) {Gama 1997, comunicación personal}. Esta capa regionalmente representa para los productores una limitante no deseada, ya que limita el crecimiento radical y el paso del agua.

Tabla 36.- CARACTERISITICAS FISICAS

Perfil	Horizonte	Profundidad cm	COLOR		DENSIDAD Mg/m <sup>3</sup>		Porosidad %	TEXTURA		
			Seco	Húmedo	Aparente	Real		% Arena	% Limo	% Arcilla
4	A <sub>11</sub>	0-6	10YR 6/3 Pardo pálido	10YR 3/4 pardo amarillento oscuro	1.46	1.90	23.16	39.62	35.83	24.55
	A <sub>12</sub>	6-18	10YR 6/4 Pardo amarillento claro	10YR 3/3 Pardo oscuro	1.55	2.11	26.54	12.61	55.66	31.73
	B <sub>11</sub>	18-36	10YR 7/2 Gris claro	10YR 4/4 Pardo amarillento oscuro	1.58	2.20	28.18	20.06	44.92	35.02
	B <sub>21</sub>	36-59	10YR 6/4 Pardo amarillento claro	10YR 4/3 Pardo	1.85	2.24	17.41	16.30	27.13	56.57
	B <sub>22</sub>	59-73	10YR 8/6 Amarillo	10YR 4/4 Pardo amarillento oscuro	1.90	2.24	15.18	12.03	27.29	60.68
	C <sub>d1</sub>	73-103	10YR 8/6 Amarillo	10YR 5/8 Pardo amarillento	2.07	2.23	7.17	8.13	29.39	62.48
	C <sub>d2</sub>	103-133	10YR 8/6 Amarillo	10YR 5/8 Pardo amarillento	2.08	2.27	8.37	2.08	33.45	64.47
	C <sub>d3</sub>	133-163	10YR 8/4 Pardo muy pálido	10YR 5/6 Pardo amarillento	2.08	2.26	7.96	0.74	40.66	58.6

**Tabla 37.- DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE PARTICULAS (mm)**

Perfil	Horizonte	Prof. cm	Arena muy	Arena	Arena	Arena	Arena muy	Total	Limo	Limo	Limo	Total	Arcilla	CLASIFICACION TEXTURAL
			gruesa 2-1	gruesa 1-0.5	media 0.5-0.25	fina 0.25-0-10	fina 0.10-0.05		guroso 0.05-0.02	medio 0.02-0.005	fino 0.005-0.002		<0.002	
4	A <sub>11</sub>	0-6	0.42	3.15	5.32	15.10	15.63	39.62	16.64	11.74	7.45	35.83	24.50	Franco
	A <sub>12</sub>	6-18	0.00	0.68	3.73	0.17	8.03	12.61	28.01	18.89	8.76	55.66	31.69	Franco arcillo limoso
	B <sub>11</sub>	18-36	0.58	1.89	2.60	7.90	7.09	20.06	20.51	11.25	13.16	44.92	34.98	Franco arcilloso
	B <sub>121</sub>	36-59	1.12	2.34	2.24	5.57	5.03	16.30	9.49	12.16	5.48	27.13	56.52	Arcilla
	B <sub>122</sub>	59-73	0.29	1.47	1.56	4.89	3.82	12.03	9.38	13.27	4.64	27.29	60.65	Arcilla
	C <sub>d1</sub>	73-103	0.11	0.77	1.01	3.04	3.20	8.13	6.36	11.95	11.08	29.39	62.45	Arcilla
	C <sub>d2</sub>	103-133	0.10	0.20	0.29	0.73	0.76	2.08	7.06	8.32	18.07	33.45	64.42	Arcilla
	C <sub>d3</sub>	133-163	0.00	0.05	0.10	0.28	0.31	0.74	2.59	18.45	19.62	40.66	58.55	Arcilla

**Tabla 38.- CARACTERISTICAS QUIMICAS**

Perfil	Horizonte	Prof. cm	pH	Mat. org. %	C %	N %	C/N	CICT cmol*Kg	BASES INTERCAMBIABLES cmol*Kg				Sat. Bases %	P aprov mg/kg
									Na+	K+	Ca++	Mg++		
4	A <sub>11</sub>	0-6	5.80	4.65	2.70	0.27	10.00	18.60	0.26	0.33	8.00	2.50	59.62	0.05
	A <sub>12</sub>	6-18	6.00	1.80	1.04	0.10	10.40	21.80	0.22	0.19	4.00	4.00	38.58	0.05
	B <sub>11</sub>	18-36	6.10	0.90	0.52	0.05	10.40	33.20	0.24	0.08	5.50	3.50	28.07	0.10
	B <sub>121</sub>	36-59	6.10	0.49	0.28	0.04	7.00	24.80	0.48	0.40	7.50	6.50	60.00	0.10
	B <sub>122</sub>	59-79	6.60	0.69	0.40	0.04	10.00	28.00	0.63	0.59	10.00	6.50	63.29	0.05
	C <sub>d1</sub>	79-103	7.60	0.56	0.32	0.03	10.67	33.30	0.54	0.54	5.50	8.00	43.78	0.10
	C <sub>d2</sub>	103-133	7.20	0.49	0.28	0.03	9.33	29.80	0.67	0.72	7.50	8.50	58.36	0.05
	C <sub>d3</sub>	133-163	7.10	0.14	0.08	0.02	4.00	53.90	0.89	0.73	8.50	7.50	32.69	0.05

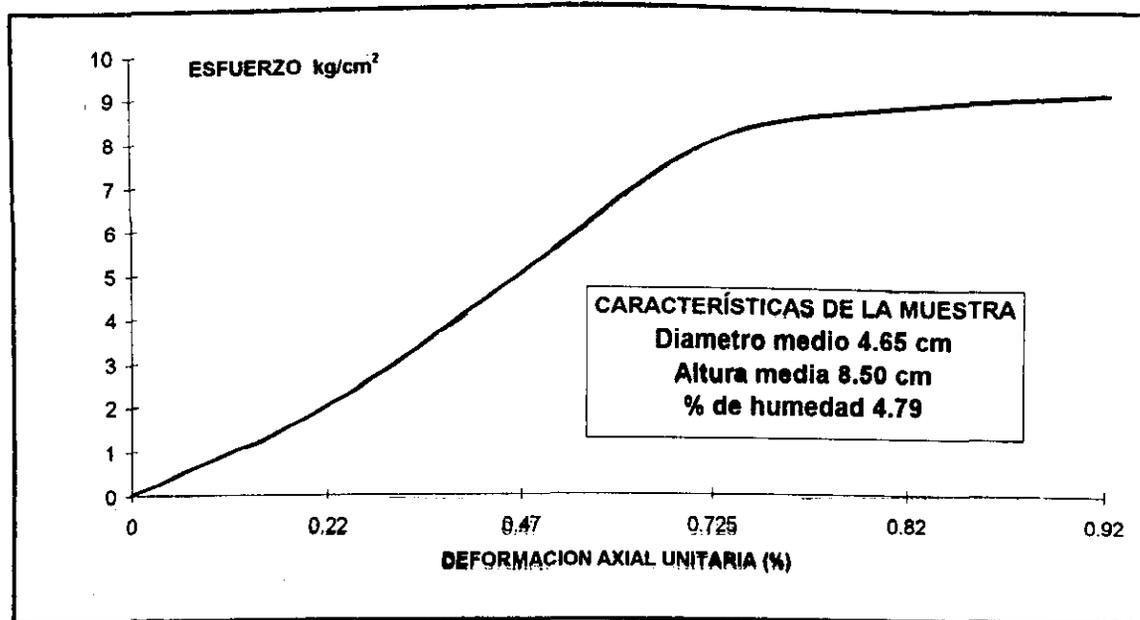


Figura 21. Prueba de compresión simple del densipan, Perfil 4.

La prueba de compresión simple que oscila entre los 9 kg/cm<sup>2</sup> con un porcentaje de humedad de 9.1 indica la presencia de una capa arcillosa muy compactada, que nuevamente sugiere la presencia del Claypan, el valor que se obtuvo se considera como material de tipo fragipan (Quantin *et al.*, 1993); mientras que en fragipanes del estado de Morelos se tuvieron valores de 4.5 a 8.8 kg/cm<sup>2</sup> (Flores *et al.*, 1992) por otro lado para Grossman y Cline (1957) su intervalo fue de 4 a 25 kg/cm<sup>2</sup>. Al colocar fragmentos de estas capas tienden a colapsarse cuando son sumergidos en agua en menos de cinco minutos, lo que muestra su baja cementación dándose principalmente la compactación mecánica de las partículas.

#### 11d.4. Génesis, alteración y mineralogía.

Dentro de las propiedades químicas destaca el hecho de una distribución más o menos ordenada de la materia orgánica, lo que descarta la posibilidad de la presencia de capas. La capacidad de intercambio catiónico a partir de los 18 cm de

profundidad resulta diagnóstica de la presencia de arcillas del grupo de las esmectitas, principalmente montmorillonita.

**Tabla 39. Porcentaje de redondez en limos medios (0.02-0.005 mm)<sup>1</sup>.**

Perfil	Horizonte	Prof. cm.	A %	B %	C %	D %	E %
4	A11	0 - 6	2.56	74.36	17.24	13.79	0.00
	A12	6 - 18	1.89	64.15	26.42	3.77	3.77
	B <sub>t</sub> 1	18 - 36	6.45	58.06	29.03	3.23	3.23
	B <sub>t</sub> 21	36 - 59	2.70	75.68	10.81	10.81	0.00
	B <sub>t</sub> 22	59 - 73	0.00	70.83	25.00	4.17	0.00
	Cd1	73 - 103	0.00	73.08	23.08	3.84	0.00
	Cd2	103 - 133	0.00	68.75	21.88	9.38	0.00
	Cd3	133 - 163	3.22	77.42	12.91	6.45	0.00

**Tabla 40. Porcentaje de redondez en arenas muy finas (0.10-0.05 mm)<sup>1</sup>.**

Perfil	Horizonte	Prof. cm.	A %	B %	C %	D %	E %
4	A11	0 - 6	6.94	81.94	22.22	2.78	0.00
	A12	6 - 18	10.71	73.21	14.28	1.78	0.00
	B <sub>t</sub> 1	18 - 36	8.82	83.82	4.41	1.47	1.47
	B <sub>t</sub> 21	36 - 59	5.71	80.00	8.57	4.28	1.43
	B <sub>t</sub> 22	59 - 73	6.41	82.28	7.59	2.53	1.19
	Cd1	73 - 103	5.33	78.67	13.33	1.33	1.33
	Cd2	103 - 133	6.85	72.60	12.33	6.85	1.37
	Cd3	133 - 163	5.68	73.86	13.64	2.27	4.54

A. Muy angular                      B. Angular                      C. Subangular  
 D. Subredondeado                  E. Redondeado

<sup>1</sup> En todos los rangos predomina baja esfericidad.

Duchaufour (1984), menciona que las arcillas 2:1 neoformadas en climas templados, como las que se presentan en este trabajo, son raras; se encuentran sobre todo en algunas lateritas, poco permeables y ricas en bases formadas sobre materiales volcánicos, algunos geles evolucionan, dando primero alofanos y luego, en

los medios pobres en materia orgánica y sometidos a alternancias estacionales acusadas, hacia arcillas de neoformación.

El complejo de intercambio está dominado principalmente por el calcio, no obstante las características morfológicas y físicas del perfil, éste presenta un hecho poco usual y difícil de explicar como es el bajo porcentaje de saturación de bases. No existe aún una explicación razonable para este fenómeno que se presenta en el perfil estudiado. Es posible que su situación topográfica facilite el lavado y remoción de bases por drenaje lateral, pero esta hipótesis requiere de una mayor investigación.

#### 11d.4.1. Óxidos totales.

Los porcentajes de óxidos totales determinados en el suelo sugieren la presencia de materiales geológicos que oscilan de naturaleza basáltica a naturaleza dacítica. Sin embargo, como se observa en la tabla 41 estos datos también pueden reflejar de manera indirecta la presencia de las arcillas esmectíticas que son dominantes de los primeros 36-163 cm de profundidad.

En relación a las ganancias y pérdidas de óxidos totales se presenta una mayor ganancia de óxido de silicio en los horizontes superiores, debiéndose a la abundancia y alteración del vidrio volcánico y de feldespatos mal estructurados, siguiendo en importancia el óxido de sodio en los horizontes superiores y disminuyendo en los inferiores llegando a tener valores hasta de cero en el densipan, este enriquecimiento se debe a la presencia de minerales ricos en sodio como es el caso de la andesina.

Tabla 41.- Óxidos totales en suelo total y relaciones molares.

Oxidos	PERFIL 4								A7*K	A6*K	A5*K	A4*K	A3*K	A2*K	A1*K	Pérdidas o ganancias						
	Horizontes																					
	C <sub>d3</sub>	C <sub>d2</sub>	C <sub>d1</sub>	B <sub>t22</sub>	B <sub>t21</sub>	B <sub>t1</sub>	A <sub>12</sub>	A <sub>11</sub>								C <sub>d2</sub>	C <sub>d1</sub>	B <sub>t22</sub>	B <sub>t21</sub>	B <sub>t1</sub>	A <sub>12</sub>	A <sub>11</sub>
Totales	133-163	103-133	73-103	59-73	36-59	18-36	6-18	0-6	de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>d2</sub>	C <sub>d1</sub>	B <sub>t22</sub>	B <sub>t21</sub>	B <sub>t1</sub>	A <sub>12</sub>	A <sub>11</sub>						
SiO <sub>2</sub>	50.91	51.17	54.94	57.27	59.64	65.55	67.22	63.07	51.15	54.04	62.38	74.49	88.42	104.25	109.57	0.24	3.13	11.47	23.58	37.51	53.34	58.66
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.39	3.62	3.9	3.9	4.28	3.73	3.64	3.21	3.41	3.82	4.43	5.07	6.35	5.93	5.93	0.02	0.43	1.04	1.68	2.96	2.54	2.54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.63	21.53	20.48	19.05	16.63	14.59	13.6	13.27	21.73	22.74	23.25	24.78	24.65	23.20	22.17	0.10	1.11	1.62	3.15	3.02	1.57	0.54
TiO <sub>2</sub>	2.85	3.06	4.11	4.55	4.98	5.22	6.08	5.53	2.86	3.23	4.67	5.92	7.38	8.30	9.91	0.01	0.38	1.82	3.07	4.53	5.45	7.06
MnO	0.35	0.59	0.84	1.03	1.83	0.45	0.57	0.75	0.35	0.62	0.95	1.34	2.71	0.72	0.93	0.00	0.27	0.60	0.99	2.36	0.37	0.58
CaO	0.49	0.52	0.92	1.06	0.94	1.15	1.78	1.52	0.49	0.55	1.04	1.38	1.39	1.83	2.90	0.00	0.06	0.55	0.89	0.90	1.34	2.41
MgO	0.33	0.33	1.13	1.23	1.34	1.38	1.72	1.71	0.33	0.35	1.28	1.60	1.99	2.19	2.80	0.00	0.02	0.95	1.27	1.66	1.86	2.47
Na <sub>2</sub> O	0	0	2.81	5.62	3.35	5.62	6.43	6.03	0.00	0.00	3.19	7.31	4.97	8.94	10.48	0.00	0.00	3.19	7.31	4.97	8.94	10.48
K <sub>2</sub> O	1.93	2.41	2.41	2.41	2.41	2.65	2.65	2.65	1.94	2.55	2.74	3.13	3.57	4.21	4.32	0.01	0.62	0.81	1.20	1.64	2.28	2.39
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.25	0.16	0.28	0.23	0.16	0.18	0.23	0.14	0.25	0.17	0.32	0.30	0.24	0.29	0.37	0.00	-0.08	0.07	0.05	-0.01	0.04	0.12
H <sub>2</sub> O*	5.45	4.9	4.33	4.48	4.29	3.28	2.26	2.58	5.48	5.18	4.92	5.83	6.36	5.22	3.68	0.03	-0.27	-0.53	0.38	0.91	-0.23	-1.77
H <sub>2</sub> O·	11.64	11.57	11.09	10.5	9.14	7.07	6.57	10.25	11.69	12.22	12.59	13.66	13.55	11.24	10.71	0.05	0.58	0.95	2.02	1.91	-0.40	-0.93
TOTAL	99.22	99.86	107.24	111.33	108.99	110.9																
							C <sub>d3</sub>	C <sub>d2</sub>	C <sub>d1</sub>	B <sub>t22</sub>	B <sub>t21</sub>	B <sub>t1</sub>	A <sub>12</sub>	A <sub>11</sub>								
							SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.99	4.03	4.55	5.10	6.09	7.62	8.39	8.07							
							SiO <sub>2</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	39.91	37.57	37.44	39.03	37.03	46.71	49.08	52.22							
							SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.24	0.26	0.29	0.31	0.38	0.37	0.39	0.36							

El óxido de titanio a diferencia de los anteriores perfiles presenta una ganancia dentro de los 73 cm decreciendo en el densipan (Tabla 41), así mismo se presenta un enriquecimiento de óxidos de calcio, magnesio y potasio debido a la presencia de feldespatos calco-sódicos y potásicos detectados en el estudio petrográfico.

En cuanto a las relaciones molares  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  es notorio que la naturaleza de la ceniza volcánica favorece el grado de alteración de sus minerales, presentándose el mayor grado de intemperismo en los horizontes profundos.

**Tabla 42.** Óxidos libres en suelo total del perfil 4.

H <sub>z</sub> .	Prof. cm	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> / Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> libre/ Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> total
A11	0 - 6	0.07	0.25	0.88	0.47	0.21	2.03
A12	6 - 18	0.10	0.32	1.20	0.52	0.22	2.70
B <sub>t</sub> 1	18 - 36	0.08	0.26	1.01	0.51	0.21	2.24
B <sub>t</sub> 21	36 - 59	0.14	0.26	2.16	0.90	0.17	3.32
B <sub>t</sub> 22	59 - 73	0.20	0.35	3.03	0.96	0.17	5.05
C <sub>d</sub> 1	73 - 103	0.23	0.42	4.97	0.92	0.12	5.85
C <sub>d</sub> 2	103 - 133	0.21	0.43	2.52	0.82	0.22	5.82
C <sub>d</sub> 3	133 - 163	0.20	0.41	3.22	0.85	0.16	5.80

#### 11d.4.2. Óxidos libres.

Con relación a los óxidos libres las relaciones  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$  muestran un grado significativo de alteración que parece confirmar la presencia de un suelo con alteración significativa. La relación  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  libre/  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  total (Tabla 42) también tiende a confirmar esta hipótesis, principalmente si se considera que las arcillas generalmente emigran, asociadas con el hierro (Duchaufour, 1984).

La secuencia que presentan los óxidos libres (Si > Fe > Al) se localizan en el quinto nivel de meteorización, lo que confirma el alto grado de meteorización de los minerales primarios (Chesworth, 1977).

11d.4.3. Mineralogía.

Los minerales presentes son fenocristales que presentan un grado de alteración elevado que en muchas de las ocasiones se dificultó identificarlo pero predominaban los feldespatos, clastos de basaltos algunas micas de tipo biotita, vidrio volcánico y aisladamente algunos piroxenos, olivinos y un porcentaje medio de minerales opacos. Estos minerales se encuentran incrustados en una matriz argílica la cual actúa como cementante dando una consolidación al densipan.

Por otra parte se presentan pequeños porcentajes de alofano que desde luego están influyendo en los fenómenos fisico-químicos de intercambio catiónico, aunque por su porcentaje tan limitado no es posible considerar este suelo como un suelo de carga variable.

Tabla 43. Análisis selectivo de la fracción no cristalina del Perfil 4.

Prof. cm	Ac. OXALICO			PIROFOSFATO			ALOFANO		Ferrihi drita	Al <sub>ox</sub> + ½Fe <sub>ox</sub>	Vidrio %
	Si	Al	Fe	Si	Al	Fe	Al/Si	%			
0-6	0.28	0.44	0.34	0.23	0.20	0.12	0.86	1.40	0.58	0.61	12.58
6-18	0.26	0.41	0.20	1.51	0.55	0.15	-	-	0.34	0.51	10.52
18-36	0.26	0.40	0.15	0.59	0.33	0.08	0.30	1.28	0.26	0.48	9.80
36-59	0.26	0.34	0.10	0.34	0.22	0.05	0.48	1.30	0.17	0.39	8.04
59-73	0.29	0.37	0.10	0.23	0.16	0.04	0.75	1.45	0.17	0.42	8.66
73-163	0.28	0.23	0.25	0.29	0.15	0.03	0.28	1.40	0.43	0.36	7.32

11d.4.4. Estudio petrográfico.

El estudio petrográfico del densipan arroja la siguiente información: presenta una distribución relacionada de tipo porfírica cerrada, textura arcillo limosa,

morfología de los pedos de bloques subangulares presentándose una reorganización de la masa basal con una microestructura de tipo cámara y masiva, fabrica de birrefringencia de retícula estriada (argílica), con hipo-revestimientos y rellenos de poros en forma de microláminas (pedofábrica arcilla microlaminar), lo que indica procesos de eluviación e iluviación (procesos pedológicos), porosidad del 30%, así mismo la presencia de nódulos seudomórficos de morfología amiboidal debido al intemperismo de minerales primarios.

#### 11d.4.5. Microanálisis del cementante.

El microanálisis del cementante muestra una relación  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  de 2.45 esto lleva a considerar que se trata de geles de sílice que pudiera llamarse semiópalo o protoópalo (Acevedo, 1997), en función del porcentaje de  $\text{SiO}_2$  o una arcilla de tipo protoalofánica rica en sílice, la cual actúa como cementante en el densipan.

**Tabla 44.** Microanálisis del cementante (%) que une las partículas de la toba, Perfil 4

$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{FeO}$	$\text{MnO}$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$
54.57	0.73	37.21	5.39	0.10	1.10	0.12	0.47	0.31	2.45

#### 11d.5. Clasificación propuesta.

Por las características mencionadas, es decir la presencia de un horizonte A ócrico y un horizonte genético B argílico, así como la baja saturación de bases que muestra, el hecho de que se presente en un régimen údico, este suelo queda incluido dentro del orden Alfisol suborden udalfs, grupo fragiudalfs, subgrupo typic, consecuentemente se trata de un suelo Typic fragiudalf (Soil Survey Staff, 1994). Para la FAO-UNESCO (1988), se clasifica como Luvisol háplico.

Estos Alfisoles se caracterizan por presentar una saturación de bases mayor del 35%, y la característica predominante es la traslocación de la arcilla desde la parte superficial del perfil hasta la acumulación en el horizonte B, además del proceso de pardificación o braunificación libera un floculante mas suave como es el hierro, el cual fomenta la depositación de la arcilla en el horizonte B (Buol *et al.*, 1973), aunque también puede ocurrir movimiento de sílice y alúmina en solución, compuestos que posteriormente se cristalizan en arcilla en el horizonte B. Así mismo, la formación de arcillas en el horizonte B por intemperismo de feldespatos, micas y minerales ferromagnesianos.

## 11e. PERFIL 5.

### 11e.1. Descripción del sitio.

Provincia fisiográfica: Eje Neovolcánico

Geoforma: Ladera.

Altitud: 2,600 msnm

Clima: Templado subhúmedo C(w<sub>o</sub>)(w)b(i').

Localización: Nicolás Romero, Edo. de Méx.

Erosión: Hídrica en surcos.

Material parental: Tobas, cenizas volcánicas consolidadas.

Uso del suelo: Pastizal inducido.

Pendiente: 12%

Drenaje superficial: Muy drenado.

Pedregosidad: Media.

Influencia humana: Alta

Vegetación natural y/o cultivo: Secundaria, predominan los pastizales.

### 11e.2. Morfología del perfil.

A11 0-13 cm. Color en seco, pardo grisáceo (10YR5/2) y pardo oscuro (10YR3/3) en húmedo; franco limoso; estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares tamaño medio; consistencia en seco ligeramente dura y en húmedo muy friable, ligeramente pegajoso y plástico; poros frecuentes, muy finos a medianos; raíces abundantes, finas y delgadas, límite medio ondulado; desarrollo relativo del subhorizonte (DRH), joven (Tabla 45 ).



Figura 22. Perfil 5, clasificado como Typic dystrochrept.

**A12** 13-27 cm. Color en seco, gris (10YR6/1) y pardo grisáceo muy oscuro ((10YR3/2) en húmedo; franco limoso; estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares tamaño medio; consistencia en seco dura y en húmedo muy friable, ligeramente pegajoso y plástico; poros numerosos, finos; raíces comunes, delgadas; límite medio ondulado; DRH, ligeramente desarrollado.

**Bw** 27-57 cm. Color en seco, pardo pálido (10YR6/3) y pardo amarillento oscuro (10YR4/4) en húmedo; franco limoso; sin estructura, masiva que rompe en bloques subangulares tamaño grueso; consistencia en seco dura y en húmedo friable, ligeramente pegajosa y ligeramente

plástica; poros frecuentes, finos y medianos; raíces pocas, medias; límite marcado horizontal; DRH, ligeramente desarrollado.

Cqm 57-117 cm. Color en seco, pardo muy pálido (10YR7/3) y pardo amarillento oscuro (10YR4/4) en húmedo; areno limoso; sin estructura, masiva que rompe en bloques angulares tamaño grueso; consistencia en seco muy dura y en húmedo muy firme, no plástico, no pegajosa; poros frecuentes muy finos y finos; raíces escasas; presencia de cutanes zonales delgados y nódulos frecuentes, pequeños de color negro (manganeso).

### 11e.3. Caracterización física.

Suelo que presenta un epipedón de color oscuro, pobre en bases, compactado y de espesor limitado, lo que lo sitúa como un horizonte A ócrico, subyaciendo a este horizonte se encuentra un Bw que muestra una acumulación iluvial de arcilla aunque no suficiente para considerarlo como argílico.

Su granulometría muestra un predominio en los contenidos de arcilla, arena muy fina y limo particularmente fino dentro de lo que es el *solum*. Los granos se caracterizan por presentar una esfericidad baja y redondez angular y subangular (Tabla 47), estos materiales deben su forma a un depósito *in situ* y a cierto transporte eólico-aluvial y a procesos de alteración moderados. Este perfil subyace a una serie de capas de aluvión volcanogénico las cuales se caracterizan por una alta densidad aparente y una muy baja porosidad.

Los valores de densidad aparente indican una compactación severa en todas las capas (Tabla 46), en tanto que los valores de densidad real resultan muy bajos para denotar la presencia de minerales ferromagnesianos en cantidades significativas (Flores *et al.*, 1996; Arias, 1992; Nimlos, 1989).



Tabla 46.- CARACTERISITICAS FISICAS

Perfil	Horizonte	Profundidad cm	COLOR		DENSIDAD Mg/m <sup>3</sup>		Porosidad %	TEXTURA		
			Seco	Húmedo	Aparente	Real		% Arena	% Limo	% Arcilla
5	A <sub>11</sub>	0-13	10YR 5/2 Pardo grisáceo	10YR 3/3 Pardo oscuro	1.65	2.24	26.34	42.41	30.12	27.47
	A <sub>12</sub>	13-27	10YR 6/1 Gris	10YR 4/2 Pardo grisáceo oscuro	1.70	2.24	24.11	40.72	33.85	25.43
	B <sub>w</sub>	27-57	10RY 6/3 Pardo pálido	10YR 4/4 Pardo amarillento oscuro	1.91	2.19	12.79	38.48	30.14	30.38
	C <sub>qm1</sub>	57-87	10YR 7/3 Pardo muy pálido	10YR 4/4 Pardo amarillento oscuro	1.90	2.22	14.41	49.52	34.26	16.22
	C <sub>qm2</sub>	87-117	10YR 6/4 Pardo amarillento claro	10YR 4/4 Pardo amarillento oscuro	1.83	2.29	20.09	55.66	31.71	12.63

Tabla 47.- DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE PARTICULAS (mm)

Perfil	Horizonte	Prof. cm	Arena muy gruesa 2-1	Arena gruesa 1-0.5	Arena media 0.5-0.25	Arena fina 0.25-0-10	Arena muy fina 0.10-0.05	Total	Limo grueso 0.05-0.02	Limo medio 0.02-0.005	Limo fino 0.005-0.002	Total	Arcilla <0.002	CLASIFICACION TEXTURAL
5	A <sub>11</sub>	0-13	3.25	9.30	22.40	7.46	0.00	42.41	13.15	9.62	7.35	30.12	27.43	Franco
	A <sub>12</sub>	13-27	0.83	4.99	7.72	16.39	10.79	40.72	14.96	8.44	10.45	33.85	25.39	Franco
	B <sub>w</sub>	27-57	0.61	5.09	7.31	16.10	10.37	39.48	13.66	7.91	8.57	30.14	30.33	Franco arcilloso
	C <sub>qm1</sub>	57-87	2.75	8.96	7.36	17.92	12.53	49.52	8.76	14.15	11.35	34.26	16.17	Franco arenoso
	C <sub>qm2</sub>	87-117	1.80	8.68	9.52	22.57	13.09	55.66	13.65	9.65	8.41	31.71	12.58	Franco arenoso

Tabla 48.- CARACTERISTICAS QUIMICAS

Perfil	Horizonte	Prof. cm	pH 1: 2.5	Mat. org. %	C %	N %	C/N	CICT cmol*Kg	BASES INTERCAMBIABLES cmol*K g				Sat. Bases %	P aprov mg/kg
									Na+	K+	Ca++	Mg++		
5	A <sub>11</sub>	0-13	6.10	3.26	1.89	0.15	12.60	21.10	0.21	0.27	6.50	3.00	47.30	0.05
	A <sub>12</sub>	13-27	6.60	1.45	0.84	0.08	10.50	22.30	0.22	0.12	6.00	3.50	44.13	0.05
	B <sub>w</sub>	27-57	7.70	0.90	0.52	0.04	13.00	16.70	0.24	0.13	4.50	5.50	62.10	0.10
	C <sub>qm1</sub>	57-87	7.40	0.28	0.16	0.01	16.00	17.30	0.50	0.55	6.50	8.50	92.77	0.05
	C <sub>qm2</sub>	87-117	7.20	0.28	0.16	0.01	16.00	30.70	0.64	0.31	5.50	9.00	50.33	0.05

Tabla 49. Porcentaje de redondez en limos medios (0.02-0.005 mm)<sup>1</sup>.

Perfil	Horizonte	Prof. cm.	A %	B %	C %	D %	E %
5	A11	0 - 13	0.00	55.26	36.84	7.89	0.00
	A12	13 - 27	3.23	64.52	29.03	0.00	3.23
	BW	27 - 57	0.00	14.29	71.43	14.29	0.00
	Cqm1	57 - 87	6.45	35.48	54.84	3.23	0.00
	Cqm2	87 - 117	0.00	39.47	52.63	5.26	2.63

Tabla 50. Porcentaje de redondez en arenas muy finas (0.10-0.05 mm)<sup>1</sup>.

Perfil	Horizonte	Prof. cm.	A %	B %	C %	D %	E %
5	A11	0 - 13	8.43	71.08	13.25	4.82	2.41
	A12	13 - 27	7.58	68.18	21.21	3.03	0.00
	BW	27 - 57	5.00	71.25	16.25	7.50	0.00
	Cqm1	57 - 87	4.76	71.43	19.05	4.76	0.00
	Cqm2	87 - 117	6.82	61.36	26.14	5.68	0.00

A. Muy angular      B. Angular      C. Subangular  
 D. Subredondeado      E. Redondeado

<sup>1</sup> En todos los rangos predomina baja esfericidad.

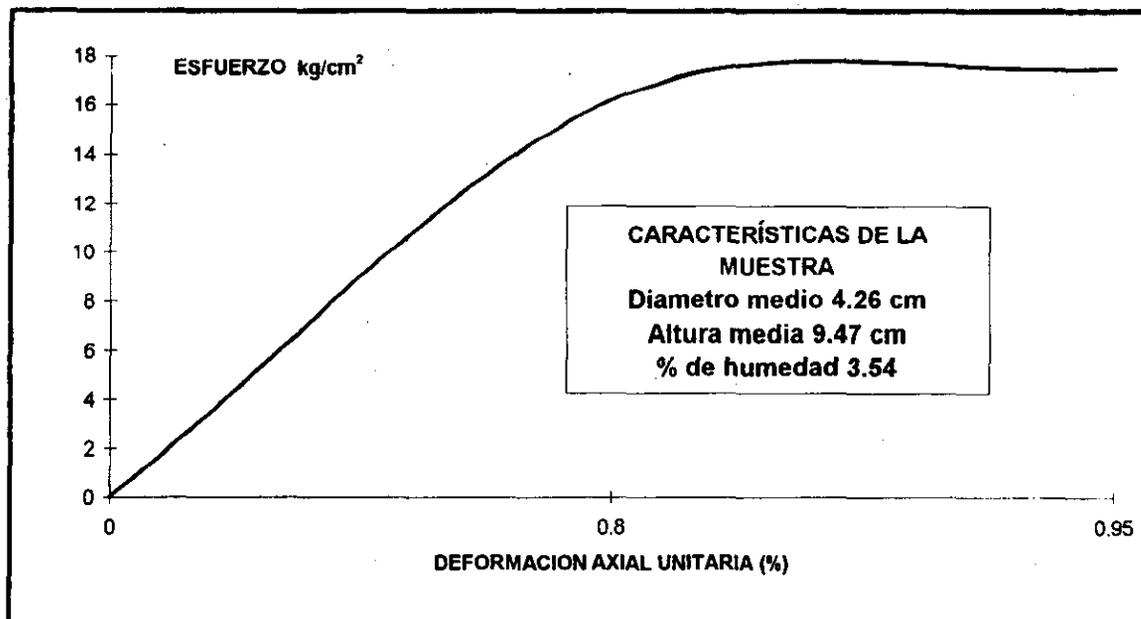


Figura 23. Prueba de compresión simple de la capa endurecida, Perfil 5.

Cuando los fragmentos de la capa cementada fueron sometidos al agua no se colapsaron; sin embargo, cuando estos fueron sometidos a KOH concentrado su estabilidad solo fue significativa durante 38 minutos, por lo que se considera que el agente cementante es la sílice (Nimlos, 1987; Flach *et al.*, 1992).

#### 11e.4. Génesis, alteración y mineralogía.

El perfil se caracteriza por su tendencia a la alcalinización con la profundidad aunque en ningún caso los valores de pH resulten extremos, es producto de la alteración de los feldespatos calco-sódicos que favorecen esta alcalinización. La materia orgánica por su parte decrece de manera brusca entre el contacto del horizonte A y del horizonte Bw manteniéndose estable y en bajas proporciones en las capas que subyacen al horizonte Bw (Tabla 48).

La capacidad de intercambio catiónico resulta moderada en todos los subhorizontes y capas con excepción de la que se localiza después de los 87 cm de profundidad. Este incremento se atribuye a la presencia de alofano y de hierro libre tal vez en forma de ferrihidrita (Shoji *et al.*, 1993). Dentro de las bases intercambiables se notan fuertes antagonismos entre calcio y magnesio, siendo en las capas el magnesio más alto que el calcio, lo que en parte explica la tendencia de alcalinización en estos suelos.

La saturación de bases se presenta de manera caótica siendo baja en los horizontes superiores y alta en las capas, con excepción de las mas profundas. Esto sugiere un lavado en las capas superiores y una acumulación de bases en las inferiores, nuevamente por efecto de drenaje (Tabla 48).

Tabla 51.- Óxidos totales en suelo total y relaciones molares

Óxidos	PERFIL 5					A4*K	A3*K	A2*K	A1*K	Pérdidas o ganancias							
	Horizontes									de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>qm1</sub>	Bw	A <sub>12</sub>	A <sub>11</sub>			
	C <sub>qm2</sub>	C <sub>qm1</sub>	Bw	A <sub>12</sub>	A <sub>11</sub>												
Totales	87-117	57-87	27-57	13-27	0-13	de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>qm1</sub>	Bw	A <sub>12</sub>	A <sub>11</sub>				
SiO <sub>2</sub>	60.58	58.83	61.61	59.9	61.05	60.13	62.86	68.44	69.08	-0.45	2.28	7.86	8.50				
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.85	2.85	2.78	2.74	2.75	2.91	2.84	3.13	3.11	0.06	-0.01	0.28	0.26				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.55	17.17	17.2	15.36	15.51	17.55	17.55	17.55	17.55	0.00	0.00	0.00	0.00				
TiO <sub>2</sub>	2.72	2.91	3.3	4.22	3.58	2.97	3.37	4.82	4.05	0.25	0.65	2.10	1.33				
MnO	0.58	0.55	0.35	0.4	0.59	0.56	0.36	0.46	0.67	-0.02	-0.22	-0.12	0.09				
CaO	1.59	1.45	1.47	1.47	1.65	1.48	1.50	1.68	1.87	-0.11	-0.09	0.09	0.28				
MgO	1.09	1.04	0.91	0.99	1.11	1.06	0.93	1.13	1.26	-0.03	-0.16	0.04	0.17				
Na <sub>2</sub> O	3.21	2.81	3.21	2.81	3.21	2.87	3.28	3.21	3.63	-0.34	0.07	0.00	0.42				
K <sub>2</sub> O	2.41	2.41	2.65	2.41	2.41	2.46	2.70	2.75	2.73	0.05	0.29	0.34	0.32				
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12	0.12	0.25	0.35	0.09	0.12	0.26	0.40	0.10	0.00	0.14	0.28	-0.02				
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	3.45	3.37	2.45	2.2	2.28	3.44	2.50	2.51	2.58	-0.01	-0.95	-0.94	-0.87				
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	5.85	6.23	6.48	6.51	7.68	6.37	6.61	7.44	8.69	0.52	0.76	1.59	2.84				
TOTAL	102	99.74	102.66	99.36	101.91												
						C <sub>qm2</sub>	C <sub>qm1</sub>	Bw	A <sub>12</sub>	A <sub>11</sub>							
						SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.86	5.81	6.08	6.62	6.68						
						SiO <sub>2</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	56.49	54.86	58.90	58.10	59.00						
						SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.25	0.25	0.25	0.27	0.27						

#### 11e.4.1. Óxidos Totales.

Como se muestra en la Tabla 51 este perfil presenta cenizas de naturaleza andesítica donde además del predominio del óxido de silicio, se tiene aluminio y titanio, las relaciones molares de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$  indican una alteración limitada del suelo y toba que sugiere una edad evolutiva también limitada.

En relación a las pérdidas y ganancias de óxidos, la Tabla 51 muestra que el óxido de silicio presenta una ganancia dentro de los primeros 27 cm., se debe a la alteración de vidrio volcánico y de algunos feldespatos mal estructurados a arcillas de neoformación, mientras que el resto de los óxidos sus valores no son significativos, por otro lado, la ganancia de  $\text{H}_2\text{O}$  (-) en los dos horizontes superficiales se debe a la presencia de sílice opalina (Flores *et al.*, 1992).

Los valores altos que se presentan en las relaciones molares posiblemente se deban a la presencia de haloisita y cristobalita que se detectaron en el estudio mineralógico por difracción de rayos X como se observa en la Tabla 51, además de la presencia de montmorillonita.

#### 11e.4.2. Óxidos libres.

Los valores de óxidos libres que se presentan en la Tabla \_\_, no obstante de ser significativos en el *solum* no corresponden con el perfil de intemperismo que se esta analizando, es decir, resulta muy poco representativo del grado limitado de alteración que muestra el perfil en relación a los resultados obtenidos que determinan un mayor intemperismo de minerales primarios, según los resultados obtenidos dentro de los primeros 57 cm. se presentó una mayor alteración de estos, por lo consiguiente estos óxidos pueden ser aporte dados por drenaje lateral.

Tabla 52. Óxidos libres en suelo total del perfil 5.

H <sub>z</sub> .	Prof. cm	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> / Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> libre/ Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> total
A11	0 - 13	0.12	0.19	0.79	1.06	0.40	4.41
A12	13 - 27	0.11	0.23	1.07	0.80	0.27	3.90
BW	27 - 57	0.14	0.20	1.10	1.17	0.33	4.94
Cqm <sub>1</sub>	57 - 87	0.14	0.07	0.78	3.33	0.47	4.93
Cqm <sub>2</sub>	87 - 117	0.16	0.07	0.78	3.81	0.53	5.50

La secuencia que presentan los óxidos libres (Fe > Si > Al) se localizan en el sexto nivel de meteorización, lo que confirma el alto grado de meteorización de los minerales primarios (Chesworth, 1977).

#### 11e.4.3. Análisis petrográfico.

En cuanto al estudio petrográfico esta toba se caracteriza por presentar una distribución relacionada de tipo porfírica cerrada, textura areno limosa, con un desarrollo de pedalidad frágil, donde predomina la microestructura de cámaras debido al intemperismo de los minerales, aunque en algunas zonas se presenta de forma masiva, fábrica de birrefringencia cristalina constituido principalmente por fenocristales del tipo feldespatoides y fábrica de poro estriado. Los minerales presentes presentan un grado avanzado de alteración en su mayoría, sustentando lo antes mencionado en óxidos libres.

Al igual que los perfiles anteriores los minerales que predominan son los feldespatos, vidrio volcánico, así como la presencia de algunas micas y piroxenos. La limonita se da por la alteración de materiales ferromagnesianos y un bajo porcentaje de minerales opacos, los cuales presentan una moderada alteración. Éstos están incrustados dentro de una matriz argílica. Los valores de arcilla reportados en

estas capas son bajas (Tabla 47) lo cual se debe a que buena parte de ésta se encuentra cementada (Figura 27), y no es detectada en el análisis granulométrico.

11e.4.4. Análisis selectivo.

Los datos de laboratorio indican la presencia de alofano aunque en cantidades no altas (Tabla 53). Lo que en este caso se juzga incongruente son las cantidades de alofano con relación a los valores de capacidad de intercambio catiónico. Esto es posible si se considera que un suelo como el estudiado aquí está en un intergrado entre el orden Entisol e Inceptisol, es decir, se caracteriza por su bajo nivel de organización, tanto en sus cualidades físico-químicos como mineralógicas.

Tabla 53. Análisis selectivo de la fracción no cristalina del Perfil 5.

Prof. cm	Ac. OXALICO			PIROFOSFATO			ALOFANO		Ferrihi drita	Al <sub>ox</sub> + 1/2Fe <sub>ox</sub>	Vidrio %
	Si	Al	Fe	Si	Al	Fe	Al/Si	%			
0-13	0.26	0.51	0.33	0.23	0.15	0.11	1.42	1.30	0.56	0.68	13.92
13-27	0.26	0.45	0.25	0.16	0.15	0.06	1.16	1.30	0.43	0.58	11.86
27-117	0.23	0.37	0.14	0.11	0.09	0.03	1.26	1.13	0.24	0.44	9.08

11e.4.5. Microanálisis del cementante.

Como se muestra en la Tabla 54 la composición aproximada de los óxidos totales del cementante destaca la relación SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> con un valor de 3.98, que indican un moderado desarrollo, donde probablemente se trata de materiales silíceos de tipo protoópalo o protoalofánicos que actúan junto con la arcilla como cementante de este material.

Tabla 54. Microanálisis del cementante (%) que une las partículas de la toba, Perfil 5

SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
60.43	0.90	25.42	8.84	0.10	0.82	1.11	1.42	0.96	3.98

#### 11e.5. Clasificación propuesta.

Taxonómicamente el suelo estudiado debido a la presencia de un horizonte Bw muy incipiente puede ser incluido dentro del orden Inceptisol, suborden ochrepts, grupo dystrochrepts, subgrupo typic, caracterizándose como Typic dystrochrept (Soil Survey Staff, 1994). En la FAO-UNESCO (1988), lo clasifica como un Cambisol dystrico.

Se caracteriza por presentar uno o más horizontes de diagnóstico de formación más o menos rápida y en cuya génesis no han intervenido, por lo menos en forma significativa, procesos de traslocación de materiales o alteración son los más importantes en la génesis de este grupo y son los que conducen a la formación de horizontes Bs que se ajustan a la definición del horizonte diagnóstico cámbico tan común en los suelos de este orden.

f. PERFIL 6.

11f.1. Descripción del sitio.

Provincia fisiográfica: Eje Neovolcánico

Geoforma: Ladera.

Altitud: 2,600 msnm

Clima: Templado subhúmedo C(w<sub>o</sub>)(w)b(i').

Localización: Progreso Industrial, Edo. de Méx.

Erosión: Hídrica en cárcavas.

Material parental: Cenizas volcánicas.

Uso del suelo: Forestal.

Pendiente: 15%

Drenaje superficial: Drenado en forma de carcavas.

Pedregosidad: Moderada.

Influencia humana: Escasa.

Vegetación natural y/o cultivo: Bosque de encino y pino con cierto grado de alteración.

11f.2. Morfología del perfil.

A<sub>11</sub> 0-12.5 cm. Color en seco, pardo pálido (10YR6/3) y pardo amarillento oscuro (10YR3/4) en húmedo; limo arenoso; estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares tamaño fino a medio; consistencia en seco dura y en húmedo muy firme, ligeramente pegajosa y plástica; poros numerosos, muy finos, finos y medios; raíces abundantes, finas, delgadas y medias, límite marcado ondulado; desarrollo relativo del subhorizonte (DRH), joven.

A<sub>12</sub> 12.5-29 cm. Color en seco, amarillo pardusco (10YR6/6) y pardo rojizo (5YR4/4) en húmedo; franco arcillo arenoso; estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares tamaño medio; consistencia en seco ligeramente dura y en húmedo muy friable, ligeramente pegajosa y plástico; poros numerosos, finos y medios; raíces abundantes, finas y medias; límite medio ondulado; DRH, ligeramente desarrollado.



Figura 24. Perfil 6, clasificado como Typic fragiudalf.

B<sub>t</sub> 29-48 cm. Color en seco, pardo (7.5YR3/4) y pardo rojizo oscuro (5YR2/2) en húmedo; arcillo limoso; de estructura desarrollada en bloques subangulares tamaño medio y grueso; consistencia en seco dura y en húmedo friable, pegajoso y plástico; poros numerosos, muy finos a

finos; raíces comunes, finas y delgadas; con presencia de cutanes zonales, límite medio ondulado; DRH, ligeramente desarrollado.

BC<sub>a</sub> 48-72 cm. Color en seco, rosa (5YR7/3) y rojo amarillento (5YR4/6) en húmedo; arcillo limoso; estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares tamaño medio; consistencia en seco muy dura y en húmedo muy friable, ligeramente pegajosa y plástica; poros frecuentes, muy finos a finos; raíces comunes, delgadas y finas; límite tenue ondulado; DRH, ligeramente desarrollado.

C<sub>a</sub> 72-162 cm. Color en seco, rosa (5YR7/3) y pardo rojizo (5YR4/4) en húmedo; arcilloso; estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares tamaño medio y grueso; consistencia en seco muy dura y en húmedo muy firme, pegajoso y plástico; poros frecuentes, finos y medios escasos; raíces pocas, presencia abundante de nódulos de color negro y cutanes zonales espesos.

### 11f.3. Caracterización física.

Suelos que se caracterizan por presentar un horizonte A ócrico sobre un horizonte B argílico no muy desarrollado. Los contenidos de arcilla presentes en el horizonte B<sub>t</sub> son altos y los valores de densidad aparente así como los de porosidad indican la presencia de capas compactadas de modo similar a las que se presentan al Perfil 4. Como se mencionó estas capas constituyen un Claypan (Van, 1992), ahora específicamente denominado densipan (Soil Survey Staff, 1994).

Tabla 55. Porcentaje de redondez en limos medios (0.02-0.005 mm)<sup>1</sup>. PERFIL 6

Perfil	Horizonte	Prof. cm.	A %	B %	C %	D %	E %
6	A <sub>11</sub>	0 - 12.5	2.27	59.09	27.27	11.36	0.00
	A <sub>12</sub>	12.5 - 29	2.13	25.23	46.81	2.13	2.13
	B <sub>t</sub>	29 - 48	0.00	39.53	46.51	13.95	0.00
	BC <sub>d1</sub>	48 - 72	7.89	44.74	39.47	7.89	0.00
	C <sub>d1</sub>	72 - 102	9.09	30.30	54.55	6.06	0.00
	C <sub>d2</sub>	102 - 132	2.86	45.71	42.86	8.57	0.00
	C <sub>d3</sub>	132 - 162	8.33	50.00	29.17	12.50	0.00

Tabla 56. Porcentaje de redondez en arenas muy finas (0.10-0.05 mm)<sup>1</sup>.

Perfil	Horizonte	Prof. cm.	A %	B %	C %	D %	E %
6	A <sub>11</sub>	0 - 12.5	4.17	70.83	18.05	5.56	1.39
	A <sub>12</sub>	12.5 - 29	0.00	78.87	16.90	4.23	0.00
	B <sub>t</sub>	29 - 48	4.62	73.85	13.85	6.15	1.54
	BC <sub>d1</sub>	48 - 72	6.85	73.97	15.07	2.74	1.37
	C <sub>d1</sub>	72 - 102	8.82	66.18	22.06	2.94	0.00
	C <sub>d2</sub>	102 - 132	5.10	58.16	30.61	5.10	1.02
	C <sub>d3</sub>	132 - 162	9.86	63.38	23.94	2.82	0.00

A. Muy angular

B. Angular

C. Subangular

D. Subredondeado

E. Redondeado

<sup>1</sup> En todos los rangos predomina baja esfericidad.Tabla 57. Clasificación morfométrica y de producto de intemperismo PERFIL 6 (Birkeland *et al.*, 1990).

Perfil	Horizonte	DRH	IDP
6	A <sub>11</sub> - A <sub>12</sub>	0.14	0.20
	A <sub>12</sub> - B <sub>t</sub>	0.33	
	B <sub>t</sub> - BC <sub>d1</sub>	0.37	
	BC <sub>d1</sub> - C <sub>d1</sub>	0.36	
	C <sub>d1</sub> - C <sub>d2</sub>	0.20	
	C <sub>d2</sub> - C <sub>d3</sub>	0.16	

0.00 - 0.20 Joven

0.21 - 0.40 Ligeramente desarrollado

0.41 - 0.60 Moderadamente desarrollado

0.61 - 0.80 Desarrollado

0.42 - 1.00 Fuertemente desarrollado

C<sub>d</sub> = Densipan o Claypan

DRH= Desarrollo relativo del horizonte. IDP= Índice de desarrollo del perfil

Tabla 58.- CARACTERISITICAS FISICAS

Perfil	Horizonte	Profundidad cm	COLOR		DENSIDAD Mg/m <sup>3</sup>		Porosidad %	TEXTURA		
			Seco	Húmedo	Aparente	Real		% Arena	% Limo	% Arcilla
6	A <sub>11</sub>	0-12.5	10YR 6/3 Pardo pálido	10YR 3/4 pardo amarillento oscuro	1.64	2.09	21.53	35.91	35.34 Franco	28.75
	A <sub>12</sub>	12.5-29	10YR 6/6 Amarillo pardusco	5YR 4/4 Pardo rojizo	1.91	2.16	11.57	32.51	28.02 Franco	39.47
	B <sub>t</sub>	29-48	7.5YR 3/4 Pardo	5YR 4/4 Pardo rojizo oscuro	1.59	2.03	21.67	22.90	33.37 Arcilla	43.73
	BC <sub>d1</sub>	48-72	5YR 7/3 Rosa	5YR 4/6 Rojo amarillento	1.98	2.23	11.21	35.36	29.93 Franco	34.71
	C <sub>d1</sub>	72-102	5YR 7/3 Rosa	5YR 4/4 Pardo rojizo	1.98	2.25	12.00	25.19	27.77 Arcilla	47.04
	C <sub>d2</sub>	102-132	5YR 7/3 Rosa	10YR 5/8 Pardo amarillento	1.96	2.14	8.41	26.87	27.48 Arcilla	45.65
	C <sub>d3</sub>	132-162	5YR 7/3 Rosa	10YR 5/8 Pardo amarillento	1.96	2.16	9.26	20.8	28.89 Arcilla	50.31

Tabla 59.- DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE PARTICULAS (mm)

Perfil	Horizonte	Prof. cm	Arena muy gruesa	Arena gruesa	Arena media	Arena fina	Arena muy fina	Total	Limo grueso	Limo medio	Limo fino	Total	Arcilla	CLASIFICACION TEXTURAL
			2-1	1-0.5	0.5-0.25	0.25-0-10	0.10-0.05		0.05-0.02	0.02-0.005	0.005-0.002		<0.002	
6	A <sub>11</sub>	0-12.5	0.85	4.41	5.39	13.39	11.87	35.91	10.50	7.35	17.49	35.34	28.70	Franco arcilloso
	A <sub>12</sub>	12.5-29	2.30	5.55	5.35	11.67	7.64	32.51	10.96	13.35	3.71	28.02	39.43	Franco arcilloso
	B <sub>1</sub>	29-48	0.94	2.71	3.76	8.51	6.98	22.90	15.44	11.06	6.87	33.37	43.68	Arcilla
	BC <sub>d1</sub>	48-72	1.10	5.89	7.02	13.04	8.31	35.36	11.09	13.65	5.19	29.93	34.67	Franco arcilloso
	C <sub>d1</sub>	72-102	1.25	4.05	3.85	9.39	6.65	25.19	15.95	9.34	2.48	27.77	46.98	Arcilla
	C <sub>d2</sub>	102-132	0.84	4.01	5.11	9.94	6.97	26.87	13.91	8.83	4.74	27.48	45.61	Arcilla
	C <sub>d3</sub>	132-162	0.76	2.84	2.91	7.35	6.94	20.80	12.57	12.62	3.70	28.89	50.28	Arcilla

Tabla 60.- CARACTERISTICAS QUIMICAS

Perfil	Horizonte	Prof. cm	pH 1:2.5	Mat. org. %	C %	N %	C/N	CIC cmol*Kg	BASES INTERCAMBIABLES			Sat. Bases %	P aprov mg/kg	
									Na+	K+	Ca++			
6	A <sub>11</sub>	0-12.5	6.10	2.92	1.69	0.14	12.07	20.90	0.24	0.31	8.50	3.00	57.66	0.10
	A <sub>12</sub>	12.5-29	5.90	1.04	0.60	0.06	10.00	23.20	0.24	0.27	6.50	7.00	60.39	0.05
	B <sub>1</sub>	29-48	6.00	2.01	1.16	0.10	11.60	27.30	0.46	0.29	7.00	6.00	50.37	0.05
	BC <sub>d1</sub>	48-72	6.00	0.76	0.44	0.05	8.80	21.70	0.26	0.12	3.00	5.50	40.92	0.05
	C <sub>d1</sub>	72-102	6.90	0.07	0.04	0.04	1.00	16.50	0.30	0.31	1.80	6.50	54.00	0.05
	C <sub>d2</sub>	102-132	6.00	0.35	0.20	0.03	6.67	25.60	0.50	0.26	6.50	5.00	47.89	0.05
	C <sub>d3</sub>	132-162	5.80	0.14	0.08	0.02	4.00	25.90	0.51	0.26	5.00	6.00	45.44	0.05

Desde el punto de vista granulométrico la arcilla es la fracción dominante seguida del limo grueso (0.05-0.02 mm) {Tabla 59}. Los datos de rayos X muestran una mezcla de arcillas de relación 1 : 1 y 2 : 1, lo cual de alguna manera se confirma por los valores de capacidad de intercambio que se reportan, los cuales en general son moderados a ligeramente altos en los horizontes B<sub>t</sub> y BC<sub>d1</sub>

La prueba de resistencia a compresión simple indica que el densipan se encuentra fuertemente compactado con valores de 21 kg/cm<sup>2</sup> con un porcentaje de humedad de 3.4 (Figura 24). Denota una capa arcillosa muy compactada que afirma la presencia del densipan. Al colocar un fragmento de estas capas en KOH concentrado este tiende a fragmentarse y dispersarse completamente a los 70 minutos, por lo que el agente cementante es la sílice (Nimlos, 1987; Flach et al., 1992).

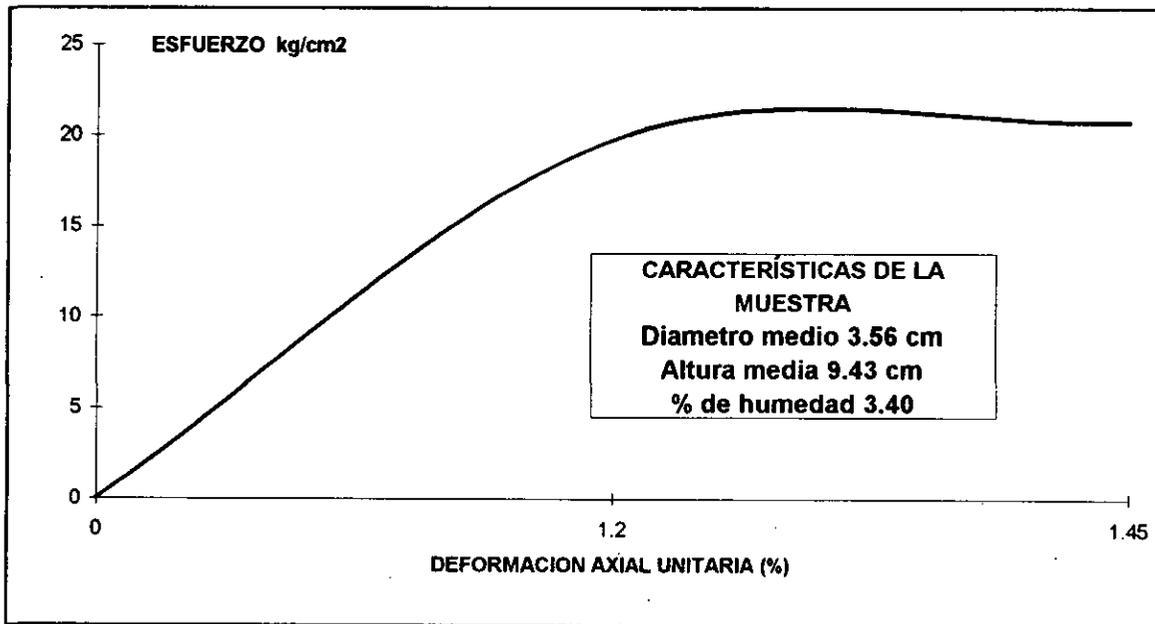


Figura 25. Prueba de compresión simple del densipan, Perfil 6.

Con los valores de resistencia obtenidos en este material Quantin *et al.*, (1993), lo considerarían como de tipo intermedio entre el fragipan y el duripan, mientras que para Grossman y Cline (1957), sería un fragipan.

#### 11f.4. Génesis, alteración y mineralogía.

Dentro de las propiedades químicas y físico-químicas se observa nuevamente una tendencia a la alcalinización en función de la profundidad y como en el perfil anterior (No. 4), esto se explica por la presencia dominante del magnesio sobre el calcio y a la presencia de feldespatos calco-sódicos que se describieron en el estudio petrográfico. Estos feldespatos al intemperizarse liberan sus minerales e incrementan el pH. La saturación de bases tiende a ser baja en la mayoría de los horizontes particularmente en los horizontes B<sub>t</sub> (Tabla 60).

##### 11f.4.1. Óxidos totales.

Los óxidos totales muestran una naturaleza predominantemente básica a intermedia, considerándose altas las relaciones  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$  para un suelo como este. Posiblemente estos valores se deben a la presencia de haloisita, cristobalita y a minerales de cuarzo de tamaño de arcilla que se detectaron por difracción de rayos X.

La ganancia de óxidos de silicio dentro de los primeros 72 cm se debe a la abundancia y alteración del vidrio volcánico y de feldespatos, mientras que el resto de los óxidos no presentan significancia (Tabla 61).

##### 11f.4.2. Óxidos libres.

Con respecto a los óxidos libres estos indican una alteración significativa en los primeros 72 cm, y aún considerable después de esa profundidad las relaciones  $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  libre/  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  total también son indicativas de la edad evolutiva del perfil.

La secuencia que presentan los óxidos libres (Fe > Al > Si) se localizan en el quinto nivel de meteorización, lo que confirma el alto grado de meteorización de los minerales primarios (Chesworth, 1977).

#### 11f.4.3. Análisis petrográfico.

El estudio petrográfico señala que se presenta una distribución relacionada de tipo porfírica cerrada, textura arcillo arenosa con una morfología de los pedos de bloques subangulares lo que caracteriza una reorganización de la masa basal, microestructura de cámaras, fábrica de birrefringencia de grano y retícula estriada (argílica), con hipo-revestimientos y relleno de poros en forma de microláminas, lo que indica procesos pedogenéticos, porosidad del 37%, un porcentaje moderado de nódulos pseudomórficos dado por la alteración de minerales ferromagnesianos que presentan una morfología de agregado.



Tabla 62. Óxidos libres en suelo total del perfil 6.

Hz.	Prof. cm	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> / Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> libre/ Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> total
A11	0 - 12.5	0.13	0.32	1.51	0.68	0.23	4.27
A12	12.5 - 29	0.11	0.29	1.62	0.64	0.18	4.14
B <sub>t</sub>	29 - 48	0.13	0.36	1.59	0.60	0.21	4.67
BC <sub>d</sub> 1	48 - 72	0.12	0.23	1.52	0.87	0.21	4.17
C <sub>d</sub> 1	72 - 102	0.20	0.31	1.75	1.01	0.30	8.11
C <sub>d</sub> 2	102 - 132	0.16	0.25	1.66	1.07	0.25	6.36
C <sub>d</sub> 3	132 - 162	0.18	0.21	1.45	1.43	0.32	7.32

Tabla 63. Análisis selectivo de la fracción no cristalina del Perfil 6.

Prof. cm	Ac. OXALICO			PIROFOSFATO			ALOFANO		Ferrihi drita	Al <sub>ox</sub> + %Fe <sub>ox</sub>	Vidrio %
	Si	Al	Fe	Si	Al	Fe	Al/Si	%			
0-12	0.26	0.56	0.25	1.96	0.60	0.14	-	-	0.43	0.69	14.13
12-29	0.26	0.46	0.18	0.09	0.11	0.03	1.37	1.28	0.31	0.55	11.34
29-48	0.29	0.66	0.38	0.12	0.15	0.09	1.77	1.74	0.65	0.85	17.53
48-72	0.30	0.53	0.20	0.11	0.12	0.03	1.39	1.48	0.34	0.63	12.99
72-162	0.31	0.42	0.20	0.46	0.28	0.06	0.46	1.53	0.34	0.52	10.73

Los minerales que se encuentran presentes son vidrios volcánicos, feldespatos, algunas micas (biotita) y piroxenos, así como un porcentaje bajo de minerales opacos presentándose un moderado grado de alteración, éstos se encuentran inmersos dentro de una matriz argílica, la cual actúa como cementante dando la consolidación al densipan.

#### 11f.4.4. Microanálisis del cementante.

El microanálisis del cementante muestra altos porcentajes de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, se considera que es debido a la presencia de arcillas y de óxidos de aluminio adsorbidos

a éstas. La relación molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  con valores de 2.81 (Tabla 64), se establece que se trata de un material silíceo de tipo protoalofánico o protoópalo (Acevedo, 1997).

Tabla 64. Microanálisis del cementante (%) que une las partículas de la toba, Perfil 6.

$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{FeO}$	$\text{MnO}$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$
55.37	1.46	32.97	8.23	0.15	0.38	0.28	0.23	0.92	2.81

Es probable como lo denotan algunos análisis que se trate de un suelo de origen transportado que ha alcanzado un grado considerable de evolución ya que no se observa salvo algunos indicios como son distribución de la arcilla y distribución irregular de la materia orgánica que indiquen una antigua estratificación.

#### 11f.5. Clasificación propuesta.

Las características taxonómicas que muestra este perfil son similares a las mencionadas para el perfil 4. Esto es, son suelos que pertenecen al orden Alfisol suborden udalfs, grupo fragiudalfs, subgrupo typic, consecuentemente se trata de un suelo Typic fragiudalf (Soil Survey Staff, 1994). Para la FAO-UNESCO (1988), se clasificaría como Luvisol háplico.

Estos Alfisoles se caracterizan por presentar saturación de bases mayor del 35%, y la característica predominante es la traslocación de la arcilla desde la parte superficial del perfil hasta la depositación en el horizonte B, además del proceso de pardificación el cual libera un floculante mas suave como es el hierro, fomentando la depositación de la arcilla en el horizonte B (Buol *et al.*, 1973), aunque también puede ocurrir movimiento de sílice y alúmina en solución, compuestos que posteriormente se sintetizan en arcilla en el horizonte B.

## 11g. PERFIL 7.

### 11g.1. Descripción del sitio.

Provincia fisiográfica: Eje Neovolcánico

Geoforma: Ladera.

Altitud: 2,300 msnm

Clima: Templado subhúmedo C(w<sub>0</sub>)(w)b(i').

Localización: Lago de Guadalupe, Edo. de Méx.

Erosión: Hídrica laminar.

Material parental: Tobas, cenizas volcánicas consolidadas, material coluvio-aluvial.

Uso del suelo: Urbano y recreativo.

Pendiente: 15%

Drenaje superficial: Muy drenado en forma laminar.

Pedregosidad: Moderada.

Influencia humana: Alta.

Vegetación natural y/o cultivo: Secundaria, reforestación con Eucaliptus.

### 11g.2. Morfología del perfil.

A 0-12 cm. Color en seco, pardo (10YR4/3) y pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2) en húmedo; arcillo limoso; estructura moderadamente desarrollada que rompe en bloques subangulares tamaño medio y gruesos; consistencia en seco ligeramente duro y en húmedo friable, ligeramente pegajoso y plástico; poros numerosos, finos, muy finos y medianos; raíces abundantes, finas, medias y gruesas; límite medio ondulado; desarrollo relativo del subhorizonte (DRH), joven.

Bw1 12-56 cm. Color en seco, pardo amarillento (10YR5/6) y pardo amarillento oscuro (10YR4/4) en húmedo; limo arcilloso; estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares tamaño medio; consistencia en seco ligeramente duro y en húmedo friable, ligeramente pegajoso y plástico; poros frecuentes, muy finos a medios; raíces abundantes, medias a finas; límite medio ondulado; DRH, ligeramente desarrollado; presencia de cutanes zonales.

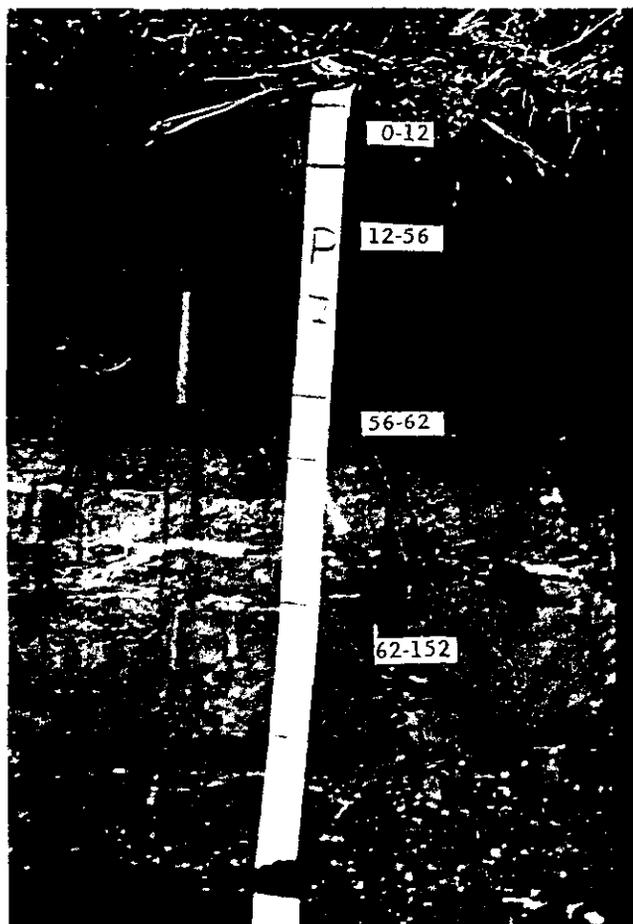


Figura 26. Perfil 7, clasificado como Typic eutrocrepht.

Bw2 56-62 cm. Color en seco, pardo pálido (10YR6/3) y pardo grisáceo oscuro (10YR4/2) en húmedo; arcillo arenoso; estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares tamaño fino y medios; consistencia en seco dura y en húmedo muy friable,

pegajoso y plástico; poros frecuentes, finos y medios; raíces comunes, delgadas y medias; límite marcado horizontal; DRH, moderadamente desarrollado; presencia de cutanes zonales.

C<sub>(lacustre)</sub> 62-152 cm. Color en seco, pardo muy pálido (10YR7/3) y pardo amarillento (10YR5/6) en húmedo; arenoso; estructura masiva que rompe en bloques angulares de tamaño grueso (pseudoestructura); consistencia en seco ligeramente dura y en húmedo friable, no pegajoso, no plástico; poros escasos, muy finos; fisuras abundantes; raíces escasas, medias y gruesas; presencia de abundantes nódulos muy grandes de color blanco.

### 11g.3. Caracterización física.

El horizonte superficial califica para un horizonte A ócrico por su connotación de color y espesor. Este horizonte sobreyace de manera plana y abrupta sobre una serie de capas tobáceas de edad pleistocénica.

Como se observa en la Tabla 69 la distribución de partículas esta bien graduada siendo evidente el dominio de las arenas finas y de manera extraordinaria el de limo grueso en el horizonte B<sub>1</sub>. Esta distribución permite inferir que aun no existe un reordenamiento de los apartados texturales debido a la juventud y moderada alteración del perfil.

Tabla 65. Clasificación morfométrica y de producto de intemperismo.

Perfil	Horizonte	DRH	IDP
7	AII - B <sub>w</sub> 1	0.16	0.16
	B <sub>w</sub> 1 - B <sub>w</sub> 2	0.21	
	B <sub>w</sub> 2 - T1	0.44	
	T1 - T2	0.24	
	T2 - T3	0.15	

0.00 - 0.20 Joven                      0.21 - 0.40 Ligeramente desarrollado

0.41 - 0.60 Moderadamente desarrollado    0.61 - 0.80 Desarrollado

0.42 - 1.00 Fuertemente desarrollado      T = Toba

DRH= Desarrollo relativo del horizonte. IDP= Índice de desarrollo del perfil

Tabla 66. Porcentaje de redondez en limos medios (0.02-0.005 mm)<sup>1</sup>. PERFIL 7

Perfil	Horizonte	Prof. cm.	A %	B %	C %	D %	E %
7	A	0 - 12	4.55	52.27	34.09	9.09	0.00
	B <sub>w</sub> 1	12 - 56	2.63	51.32	32.89	10.53	2.63
	B <sub>w</sub> 2	56 - 62	10.53	42.11	36.84	7.89	2.63
	C <sub>qm</sub> 1	62 - 92	0.00	27.59	51.72	13.79	6.90
	C <sub>qm</sub> 2	92 - 122	0.00	50.00	41.18	8.82	0.00
	C <sub>qm</sub> 3	122 - 152	0.00	55.88	26.47	14.71	2.94

Tabla 67. Porcentaje de redondez en arenas muy finas (0.10-0.05 mm)<sup>1</sup>.

Perfil	Horizonte	Prof. cm.	A %	B %	C %	D %	E %
7	A	0 - 12	5.08	71.18	20.33	3.38	0.00
	B <sub>w</sub> 1	12 - 56	10.44	62.68	19.40	7.46	1.49
	B <sub>w</sub> 2	56 - 62	5.33	58.66	26.66	8.00	1.33
	C <sub>qm</sub> 1	62 - 92	7.81	54.68	26.56	10.95	0.00
	C <sub>qm</sub> 2	92 - 122	9.62	67.31	19.23	3.84	0.00
	C <sub>qm</sub> 3	122 - 152	5.00	63.33	28.33	3.34	0.00

A. Muy angular

B. Angular

C. Subangular

D. Subredondeado

E. Redondeado

<sup>1</sup> En todos los rangos predomina baja esfericidad.

Tabla 68.- CARACTERISITICAS FISICAS

Perfil	Horizonte	Profundidad cm	C O L O R		D E N S I D A D Mg/m <sup>3</sup>		Porosidad %	T E X T U R A			
			Seco	Húmedo	Aparente	Real		% Arena	% Limo	% Arcilla	
7	A	0-12	10YR 4/3 Pardo	10YR 3/2 Pardo grisaceo muy oscuro	1.00	2.29	56.33	23.55	36.90	39.55	Franco arcilloso
	B <sub>w1</sub>	12-56	10YR 5/6 Pardo amarillento	10YR 4/4 Pardo amarillento oscuro	1.31	2.47	46.96	21.08	47.71	31.21	Franco arcilloso
	B <sub>w2</sub>	56-62	10YR 6/3 Pardo olivo	10YR 4/2 Pardo grisaceo oscuro	1.26	2.43	48.14	43.40	16.92	39.68	Arcilla
	C <sub>qm1</sub>	62-92	10YR 8/3 Pardo muy pálido	10YR 7/6 Amarillento	1.10	2.28	51.75	68.99	16.10	14.91	Franco arenoso
	C <sub>qm2</sub>	92-122	10YR 7/3 Pardo muy pálido	10YR 5/6 Pardo amarillento	1.16	2.06	43.68	63.25	26.13	10.62	Franco arenoso
	C <sub>qm3</sub>	122-152	10YR 7/3 Pardo muy pálido	10YR 5/6 Pardo amarillento	1.18	2.84	58.45	70.14	21.22	8.64	Franco arenoso
	Capa endurecida	a 80 cm	10YR 8/2 Blanco	10YR 7/3 Pardo muy pálido	1.01	2.16	53.24	59.43	22.66	17.91	Franco arenoso

Tabla 69.- DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE PARTICULAS (mm)

Perfil	Horizonte	Prof. cm	Arena muy gruesa 2-1	Arena gruesa 1-0.5	Arena media 0.5-0.25	Arena fina 0.25-0.10	Arena muy fina 0.10-0.05	Total	Limo guroso 0.05-0.02	Limo medio 0.02-0.005	Limo fino 0.005-0.002	Total	Arcilla <0.002	CLASIFICACION TEXTURAL
7	A	0-12	0.28	2.33	4.16	9.25	7.53	23.55	11.46	12.61	12.83	36.90	39.50	Franco arcilloso
	B <sub>w1</sub>	0-56	0.10	0.99	3.52	11.80	4.67	21.08	40.20	6.96	0.55	47.71	31.15	Franco arcilloso
	B <sub>w2</sub>	56-62	1.26	9.16	7.71	15.12	10.15	43.40	9.67	4.92	2.33	16.92	39.63	Arcilla
	C <sub>qm1</sub>	62-92	5.62	27.36	12.47	14.01	9.53	68.99	2.31	13.79	0.00	16.10	14.88	Franco arenoso
	C <sub>qm2</sub>	92-122	4.51	20.75	11.99	14.78	11.22	63.25	18.91	7.20	0.02	26.13	10.58	Franco arenoso
	C <sub>qm3</sub>	122-152	3.68	21.18	12.01	21.12	12.15	70.14	9.14	9.05	3.03	21.22	8.58	Franco arenoso
	capa endurecida	a 80 cm	7.61	17.73	9.11	14.71	10.27	59.43	10.90	7.89	3.87	22.66	17.87	Franco arenoso

Tabla 70.- CARACTERISTICAS QUIMICAS

Perfil	Horizonte	Prof. cm	pH 1:2.5	Mat. org. %	C %	N %	C/N	CICT cmol*Kg <sup>-1</sup>	BASES INTERCAMBIABLES			cmol*K g <sup>-1</sup> Mg <sup>++</sup>	Sat. Bases %	P aprov mg/kg
									Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>			
7	A	0-12	6.70	9.93	5.76	0.37	15.57	44.60	0.37	0.72	26.50	4.50	71.95	0.10
	B <sub>w1</sub>	0-56	6.60	0.69	0.40	0.05	8.00	15.20	0.67	0.18	8.00	3.50	81.25	0.05
	B <sub>w2</sub>	56-62	6.70	0.49	0.28	0.01	28.00	28.90	0.28	0.18	13.00	2.00	53.49	0.10
	C <sub>qm1</sub>	62-92	7.70	0.35	0.20	0.02	10.00	27.20	0.48	0.35	20.00	6.50	100.00	0.05
	C <sub>qm2</sub>	92-122	8.00	0.14	0.08	0.01	8.00	23.80	0.50	0.29	11.50	4.00	68.45	0.10
	C <sub>qm3</sub>	122-152	8.10	0.14	0.08	0.01	8.00	21.40	0.50	0.31	15.00	7.00	100.00	0.10
	C80	Capa	8.10	1.01	0.58	0.07	8.29	30.20	0.89	0.19	21.00	4.00	86.36	0.05

Las arenas estudiadas de este perfil se caracterizan por presentar en el *solum* una esfericidad baja y una redondez de tipo angular (Tabla 66 y 67), lo que indica que se trata de un material depositado *in situ*. En contraste los materiales tobáceos muestran evidencias de depósitos volcanogénicos. En general los porcentajes de arena dentro de los 152 cm muestran un incremento claro que denotan una tendencia a la horizontalización.

Dentro de este perfil se presenta una capa endurecida aproximadamente a los 80 cm, que muestra evidencias de alteración y depositación hidrotermal. Esta capa se formó principalmente en condiciones de medio lacustre. Los porcentajes de arcilla dentro del *solum* muestran algunas irregularidades en cuanto a su distribución, aunque la presencia de algunos cutanes y acumulación de minerales secundarios (Tabla 68) permite establecer la presencia de un horizonte B de intemperismo. Como se observa en la Tabla 69 el contacto entre el Bw<sub>2</sub> y la toba se caracteriza por un cambio textural muy abrupto que de acuerdo a USDA (1990), resulta típico de una discontinuidad litológica.

Como se muestra en la Tabla 68 los valores de densidad aparente en los horizontes varían de 1.00 a 1.31 Mg/m<sup>3</sup> en función del material orgánico. Esta densidad resulta normal para las capas de tobas que subyacen al suelo, los valores sugieren niveles significativos de consolidación y/o cementación (Flores *et al.*, 1992, 1996; Peña y Zebrowski, 1992).

Observaciones al microscopio muestran que la porosidad es alta en los horizontes y capas aunque solo en los horizontes se presenta una porosidad continua y comunicada. En las capas predominan los espacios vacíos cerrados. Este fenómeno de porosidad confinada no afecta un incremento en los valores de compresión confinada que se observa en la Figura 27, sin embargo, la presencia de

algunos cementantes silícico-alumínicos impiden que los fragmentos de este material se colapsen rápidamente en el agua.

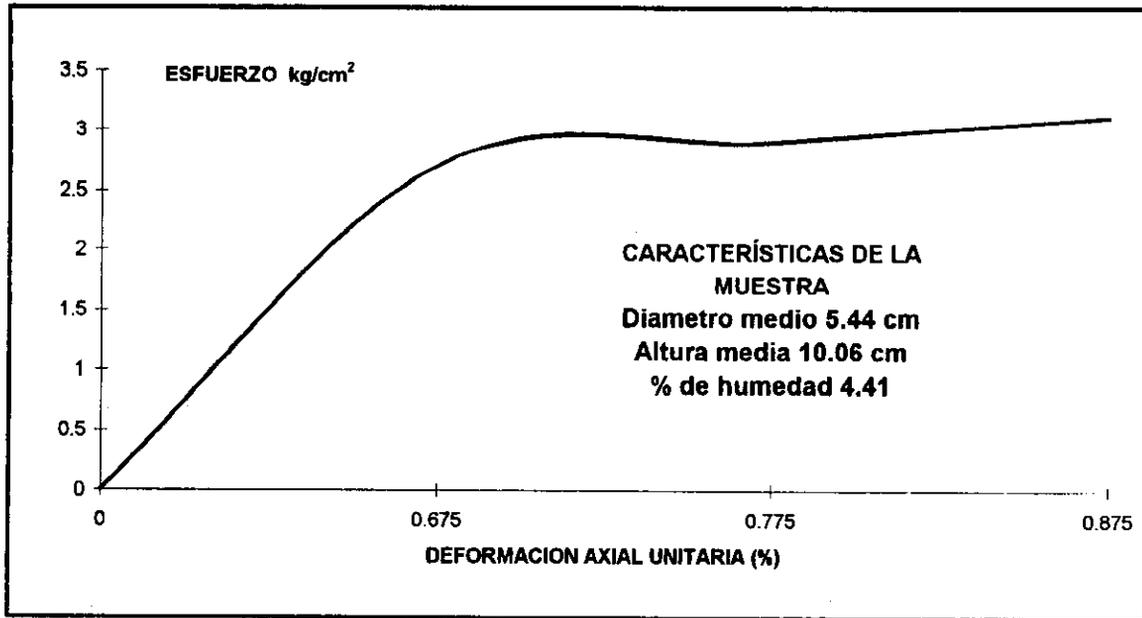


Figura 27. Prueba de compresión simple de la capa endurecida, Perfil 7.

#### 11g.4. Génesis, alteración y mineralogía.

En relación a las propiedades químicas se observa que el *solum* muestra contenidos de bases altos dentro de los primeros 19 cm, medios dentro de los 19-40 cm y nuevamente muy altos dentro de los 40-70 cm (toba), estas fluctuaciones sugieren la formación de un drenaje lateral dentro del horizonte Cqm<sub>1</sub> (Tabla 70).

En relación a las bases intercambiables el calcio muestra una relación muy aceptable con el magnesio y la relación Ca + Mg / K indica una deficiencia muy significativa de este elemento.



En cuanto a la capacidad de intercambio catiónico los valores, con excepción del que se presenta en el horizonte B<sub>1</sub>, se consideran altos, lo que confiere al suelo entre otras cosas una fertilidad potencial también alta. Si se observan los valores de materia orgánica contra los valores de capacidad de intercambio catiónico se verá que no existe correlación y ésta tampoco resulta lógica con los porcentajes reportados de arcilla. Este fenómeno como se ve en la Tabla 70 tampoco depende del pH del suelo, por lo que resulta incierto dar una explicación. Sin embargo, Flach (1990) citado por Flores *et al.*, (1992), menciona que las arcillas al quedar cementadas, no se dispersan bien cuando se realiza el análisis granulométrico, por lo que se detecta porcentaje menores; la determinación de la capacidad de intercambio catiónico total da una información más cercana a la realidad.

#### 11g.4.1. Óxidos Totales.

Los valores de óxidos totales que se observan en la Tabla 71 se relacionan con los materiales básicos e intermedios. La relación  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  muestra que se trata de un suelo moderadamente alterado en el que la alteración química según los valores de  $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$  también son moderados a bajos. En este caso solamente las evidencias morfológicas, permiten considerar al suelo que presenta un horizonte B<sub>w</sub> ya que los datos físicos y químicos aún lo integrarían en el orden de los Inceptisoles.

#### 11g.4.2. Análisis Selectivo.

Los porcentajes de alofano como en los perfiles anteriores son sumamente bajos, sin embargo, se estima que están influyendo significativamente en la capacidad de intercambio catiónico, particularmente la que se presenta en las capas de la toba.

Tabla 72. Análisis selectivo de la fracción no cristalina del Perfil 7.

Prof. cm	Ac. OXALICO			PIROFOSFATO			ALOFANO		Ferrihi drita	Al <sub>ox</sub> + ½Fe <sub>ox</sub>	Vidrio %
	Si	Al	Fe	Si	Al	Fe	Al/Si	%			
0-12	0.28	0.53	0.27	1.27	0.66	0.20	-	-	0.46	0.67	13.72
12-56	0.31	0.30	0.15	0.58	0.36	0.08	-	-	0.26	0.38	7.73
56-62	0.30	0.46	0.20	0.40	0.28	0.09	0.61	1.48	0.34	0.56	11.55
62-152	0.26	0.41	0.15	0.16	0.08	0.05	1.30	1.28	0.26	0.49	10.00
80	0.30	0.13	0.03	-	-	-	-	-	0.05	0.15	2.99

#### 11g.4.3. Mineralogía.

Los análisis mineralógicos realizados por difracción de rayos X indican una composición predominantemente de haloisita en los horizontes y capas con excepción de la capa endurecida donde la calcita es dominante, la montmorillonita, cristobalita y feldespatos se consideran minerales de importancia y en este caso el cuarzo no se presenta en cantidades para ser considerado como un mineral accesorio. Estos datos confirman la naturaleza basáltica-andesítica del suelo.

#### 11g.4.4. Óxidos libres.

Los valores de óxidos libres de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> son bajos, indican el bajo grado de alteración de los minerales primarios, por otro lado las relaciones molares SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> apenas son significativas para demostrar la presencia de un horizonte Bw. La relación SiO<sub>2</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> muestra contenidos significativos de hierro producto de la alteración que confirma la existencia del horizonte Bw, la relación de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> libre/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> total, son indicativos de una alteración significativa dentro de los minerales ferromagnesianos, lo que también se interpreta como suficiente para caracterizar un horizonte B de intemperismo.

La secuencia que presentan los óxidos libres ( $Fe > Si > Al$ ) se localiza en el sexto nivel de meteorización, lo que confirma el grado alto de meteorización de los minerales primarios (Chesworth, 1977).

Tabla 73. Óxidos libres en suelo total del perfil 6.

H <sub>z</sub> .	Prof. cm	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> / Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> libre/ Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> total
A	0 - 12	0.20	0.34	1.32	0.98	0.40	6.41
B <sub>w</sub> 1	12 - 56	0.13	0.06	0.50	3.62	0.68	3.49
B <sub>w</sub> 2	56 - 62	0.22	0.16	0.88	2.30	0.65	5.92
Cqm <sub>1</sub>	62 - 92	0.19	0.09	0.78	3.54	0.63	7.53
Cqm <sub>2</sub>	92 - 122	0.18	0.09	0.80	3.36	0.46	6.28
Cqm <sub>3</sub>	122 - 152	0.19	0.10	1.03	3.18	0.48	7.56

#### 11g.4.5. Análisis petrográfico.

En relación al estudio petrográfico este material muestra una distribución relacionada de tipo porfirica cerrada, textura areno limosa, microestructura de tipo cámara y masiva, fábrica de birrefringencia de grano estriado con hiporevestimientos y relleno de poro, lo que indica efecto de procesos pedogenéticos, presencia de nódulos seudomórficos de tipo agregado dado por la intemperización de minerales ferromagnesianos.

Los minerales que se presentan en este material son feldespatos, algunas micas de tipo biotita, roca basáltica y vidrio volcánico y en menor porcentaje olivinos y piroxenos; a diferencia de los anteriores perfiles en este se presenta revistiendo a poros la micrita el cual se detectó en el análisis de difracción de rayos X.

## 11g.4.6. Microanálisis del cementante.

El microanálisis del cementante muestra altos porcentajes de  $Al_2O_3$ , se considera que es debido a la presencia de arcillas y de óxidos de aluminio adsorbidos a éstas. La relación molar  $SiO_2/Al_2O_3$  con valores de 3.41 (Tabla 74), establece que se trata de un material silíceo-alumínico. Como se observa en la Tabla 74, en la capa endurecida de los 80 cm de profundidad los principales cementante es la micrita, que en combinación con la sílice, cementa la toba, incrementando su dureza.

**Tabla 74.** Microanálisis del cementante que une las partículas de la toba, Perfil 7

$SiO_2$	$TiO_2$	$Al_2O_3$	$FeO$	$MnO$	$MgO$	$CaO$	$Na_2O$	$K_2O$	$SiO_2/Al_2O_3$
56.19	0.85	27.23	6.59	0.16	3.08	3.65	1.68	0.57	3.45
*56.73	0.48	9.57	2.03	0.03	1.06	29.20	0.62	0.26	9.93

\*Capa endurecida a 80 cm. de profundidad.

## 11g.5. Clasificación propuesta.

De acuerdo con las características antes descritas el perfil se clasifica como Cambisol éutrico FAO-UNESCO (1988) mientras que para la Soil Survey Staff (1994), se considera dentro del orden Inceptisol, suborden ocrepths, grupo eutrocrepths, subgrupo typic, quedando como Typic eutrocrepth.

## CAPITULO XII

*12. Análisis y conclusiones de la génesis de los suelos y capas endurecidas.***12.a. Análisis general de la descripción morfogenética.**

El origen de los suelos aquí tratados es predominantemente aluvio-coluvial, a excepción de los perfiles 3 y 5, que son de desarrollo *in situ* que su origen es de cenizas volcánicas de naturaleza dacítica y andesítica respectivamente, mientras que el perfil 1 es de naturaleza félsica y el perfil 7 basáltica.

En el caso de los perfiles 2, 4 y 6 se caracterizan por presentar a través del perfil depósitos de cenizas de naturaleza variable, donde se tienen ácidas, básicas e intermedias.

Las capas endurecidas de los perfiles 4 y 6 se caracterizan por que se han formado por procesos pedogenéticos (iluvación-eluvación), donde las arcillas y el agente cementante (sílice), han promovido la consolidación y compactación de estas capas, para constituirse como Densipan o Claypan, donde la sílice está íntimamente ligada a la arcilla; mientras que los otros cinco perfiles el endurecimiento se debió al origen volcanogénico, con procesos secundarios pedogenéticos.

Los suelos estudiados presentan un desarrollo incipiente, bajos en contenido de materia orgánica, nitrógeno, fósforo; sin embargo, la principal limitante son las características físicas, como su alta densidad aparente, baja porosidad en la capa endurecida. Estas propiedades actúan sobre el movimiento vertical del agua, reducen los procesos geoquímicos y pedogenéticos, por consecuencia el escaso desarrollo evolutivo de los suelos de edad del plioceno-pleistoceno.

El horizonte superior de diagnóstico que predomina es el ócrico; en general en todos los suelos la mineralogía de la fracción menor de 2  $\mu\text{m}$  que predomina es la haloisita 7Å, cristobalita y plagioclasa detectados en el estudio de difracción de rayos X. Otros de los minerales arcillosos que se presenta es la montmorillonita, la cual se considera que su presencia sea alógena o heredada. Duchaufour (1984), menciona que este tipo de arcilla se da cuando algunos geles evolucionan dando primero alofano y luego, en medios pobres en materia orgánica y sometidos a alternancias estacionales acusadas, hacia arcillas de neoformación, algunas de las cuales son esmectitas-montmorillonita, posiblemente se de este proceso en esta zona de estudio del presente trabajo.

Las observaciones realizadas en el presente estudio revelan que las capas endurecidas son variables en cuanto a disposición, color, profundidad, tamaño etc., pero no obstante ello, siempre mantienen características generales que lo definen o reconocen fácilmente. Las diferencias que se presentaron no fueron suficientemente radicales como para clasificar a estos materiales como diferentes. Por ejemplo, la variación en color de los tepetates se debe particularmente al grado de alteración de los minerales, colores blancos- grisáceos a estados iniciales de alteración, amarillo a estados intermedios de intemperismo y colores rojos a estados más avanzados.

La haloisita y la cristobalita se relaciona a los niveles de intemperismo del vidrio volcánico y de los feldespatos. La haloisita es una indicadora de un medio rico en sílice (Shoji *et al.*, 1993; Parfitt *et al.*, 1984). Las condiciones climáticas del área de estudio, con una estación bien definida de periodo seco promueven la precipitación y cristalización de la sílice que se encuentra en la solución del suelo, favoreciéndose la presencia de estos minerales; mientras que el alofano se presenta en un régimen de mayor humedad.

Las capas endurecidas de los perfiles 1, 2, 3, 5 y 7 son de origen geológico con procesos secundarios pedogenéticos las cuales se clasifican como tobas o ignimbritas de naturaleza variable (riolítica, dacítica, andesítica y basáltica). Estas tobas se caracterizan por ser de dos tipos (A) de cenizas consolidadas, cuando estas son fragmentadas y disgregadas completamente al ser colocados los fragmentos en agua y (B) tobas de naturaleza vítrea, que no se colapsan sus fragmentos al colocarse en agua. En general la composición mineralógica de las tobas se caracteriza por presentar una gran cantidad de minerales ligeros y un bajo porcentaje de minerales pesados, característico de cenizas volcánicas intermedias.

El análisis micromorfológico confirma que las capas endurecidas están constituidas fundamentalmente por partículas de vidrio volcánico, plagioclasa, fragmentos líticos y escasos piroxenos y minerales pesados, además se observan procesos pedogenéticos, donde las fisuras y cámaras están rellenas por depósitos iluviales los cuales están separados por una densa estructura lenticular, la cual se ha formado por procesos de desecación.

La dureza de las capas endurecidas se atribuye a un empaquetamiento cerrado, a una buena matriz del esqueleto de los granos, la cual es unida por puentes de arcillas, consistentes en arcillas no expansibles. Miehllich (1978), estudió los fenómenos de compactación desde un punto de vista mineralógico y subrayó el efecto de los cementantes constituidos por la sílice amorfa y arcillas acumuladas mediante una migración vertical.

La densidad aparente alta que se presenta en algunos perfiles se atribuye no únicamente a la consolidación, compactación y/o cementación, sino también al relleno de poros por limos, arcillas iluviadas y la sílice adsorbida a estas, donde se forman puentes entre los granos, lo cual resulta en impedancia en el movimiento del agua (Figura 28).

En los tepetates blancos la densidad aparente en general fue baja ( $1.1 \text{ Mg/m}^3$ ) debido a que se trata de materiales pumíticos de naturaleza riolítica. Similares resultados obtuvieron Luzio y Saavedra (1992), en suelos endurecidos de Chile.



**Figura 28.** Fotomicrografías (250X) de láminas delgadas de toba donde se muestra (Lámina A) iluviación de arcilla depositada en poros en forma microlaminar (poro y grano estriado) se observa además vidrio volcánico alterado, {vv}; (Lámina B) revestimiento de arcillas orientadas en forma paralela en fisuras y poros cámaras. Es claro el proceso de pedogénesis (iluviación-eluviación) que se presenta en las tobas de los perfiles,

Las características que predominan en las láminas delgadas es el carácter de birrefringencia, donde la arcilla se presenta con orientación continua paralela a las paredes de los poros y granos, además la presencia de nódulos pseudomórficos ferromagnesianos.

La micromorfología indica que la subsecuente percolación del agua y procesos de eluviación/iluviación es activa en el desarrollo de las capas endurecidas. Las que se analizaron en el presente trabajo, indican que las características morfológicas, físicas, químicas y el grado de consolidación, compactación y/o cementación están dadas por la naturaleza de las cenizas volcánicas y del entorno pedogenético. Dicho entorno en última instancia, es quien orientará la dirección tanto del desarrollo del suelo o del endurecimiento o compactación de estas capas.

De forma general se plantea que el endurecimiento de estas capas se presenta por dos procesos: **Primero;** Procesos volcanogénicos, dados por la consolidación del material al momento de depositarse y, **Segundo;** por procesos volcanogénicos y pedogenéticos, donde el principal agente cementante es el silicio, el cual proviene de la alteración del vidrio volcánico y de feldespatos (ver ecuación V.b). En la Figura 29 se hace una propuesta de la diagénesis de la cementación de las capas endurecidas.

La secuencia diagenética que se describe en la Figura 29 se ha simplificado, ya que en ella influyen otros factores que se describieron en el marco teórico.

El alofano que se determinó mediante análisis selectivos, se presenta en porcentajes bajos, donde predominan principalmente los alofanos ricos en sílice, estos aunque son pocos influyen directamente en las propiedades físicas y químicas de los perfiles estudiados. Los bajos porcentajes se deben a la presencia de un período marcado de sequía, incrementándose la acumulación de la sílice en la solución del suelo, al cristalizarse dan origen a la formación de haloisita y

cristobalita (Wada, 1985), donde la primera es la que en mayor porcentaje predomina en la fracción arcilla de todos los perfiles estudiados. Lo antes descrito favorece ambientalmente la formación de capas endurecidas. Las relaciones moleculares altas indican que el material amorfo que se presenta en estas capas endurecidas esta en forma de geles de sílice, como el principal cementante, similares resultados obtuvo Werner (1986).

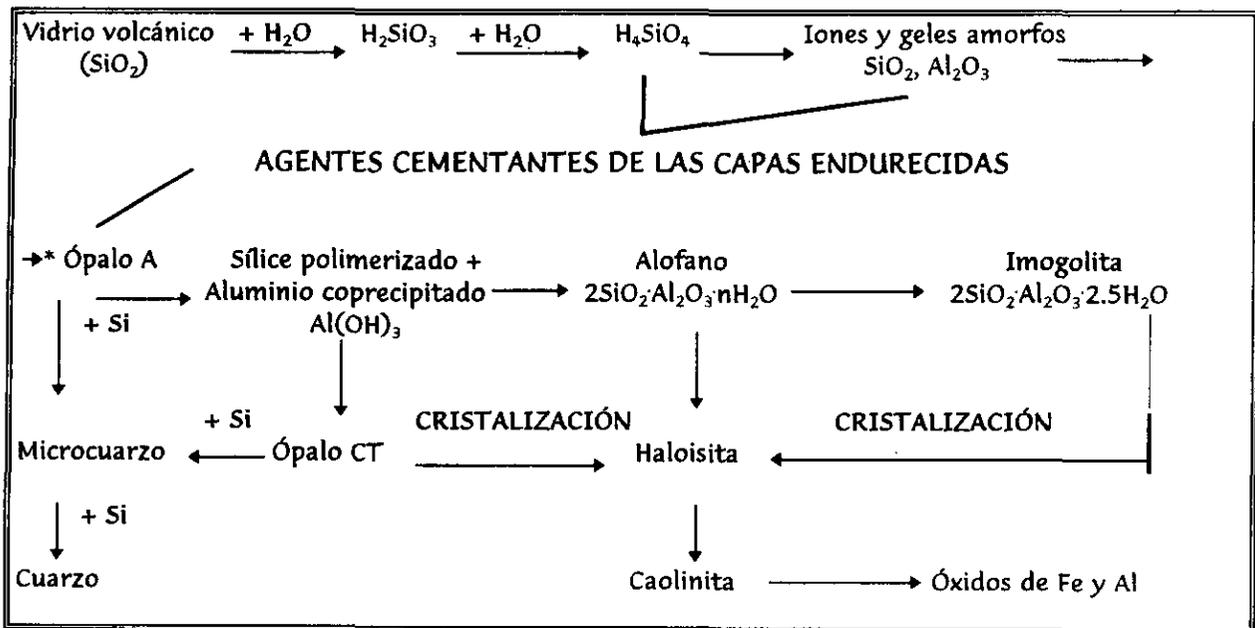


Figura 29. Propuesta de la diagénesis de las capas endurecidas a partir de la alteración del vidrio volcánico, agentes cementantes y formación de principales minerales arcillosos.

La pérdida y ganancia de óxidos totales se relaciona a nuevos aportes de cenizas, o se asocia a la posición en la geoforma o a ciclos de formación del suelo. Las relaciones molares de  $SiO_2/Al_2O_3$ ,  $SiO_2/Fe_2O_3$  sus valores mayores de 5, es decir, corresponden a materiales que se encuentran en una etapa inicial de alteración.

El microanálisis del cementante realizado por microscopio electrónico de barrido muestra que el principal agente cementante son los geles de sílice,

proto ópalo y/o protoalofánico que se encuentran distribuidos en toda la matriz, lo cual es indicativo del grado de alteración que se presenta en estos materiales. Se requiere mayor estudio y análisis en este proceso, donde la pérdida o traslado por disolución de la sílice es redepositada en los intersticios de la matriz y sería la responsable de la cementación y dureza que presenta el tepetate.

Se puede afirmar que existe una uniformidad notable en la composición mineralógica, física y química de las capas endurecidas, por lo cual podemos decir que no existen diferentes tipos de material, sino solamente diferentes estadios de evolución de un material común (vidrio volcánico), por lo que se pueden clasificar como toba mixta.

La génesis de estas capas endurecidas se produce a partir de la acumulación de piroclastos de naturaleza intermedia de proyección aérea ricos en partículas de vidrio. Por las características que presentan estas tobas, se suponen que se han formado por piroclastos derivados de erupciones volcánicas recientes, poco violentas, característico de volcanes de composición intermedia, lo que hace pensar que son materiales que han sido derivados de un mismo complejo volcánico.

El incremento en la capacidad de intercambio catiónico en los horizontes subsuperficiales es gobernados principalmente por los porcentajes de alofano y protoalofano, estos resultados coinciden con los obtenidos por Shoji *et al.*, (1993). La ferrihidrita también puede influir en ésta propiedad debido a su área superficial específica.

El predominio de vidrio incoloro y la menor cantidad de feldespatos, piroxenos y minerales ferromagnesianos que se observo en el microscopio petrográfico se debe a la naturaleza andesítica y dacítica de la ceniza volcánica coincidiendo con lo reportado por Shoji *et al.*, (1993).

El material que llamamos tepetate presenta en forma general una estratigrafía bien marcada (perfiles 4, 6 y 7), o en ocasiones de forma masiva (perfiles 1, 2, 3 y 5), como así también dentro de una misma unidad se presenta partes masivas y partes estratigráficas.

De acuerdo a la propuesta de Chesworth (1977), los tepetates blancos presentan un bajo grado de meteorización de los minerales primarios mientras que los perfiles 4, 5, 6 y 7 que corresponden a tepetates de color amarillo se encuentran en la secuencia 5 y 6, indica un mayor grado de alteración de los minerales primarios, y coincide con lo reportado en los resultados ya analizados y discutidos anteriormente.

Determinar los procesos de formación de las capas endurecidas es de gran importancia, ya que permite establecer los patrones o modelos que siguen los diferentes agentes cementantes.

Las siguientes figuras muestran el proceso de alteración del vidrio volcánico y otros minerales, así como la sílice en forma protoalofánica o protoópalo y por último el proceso de solidificación que se da en la toba.

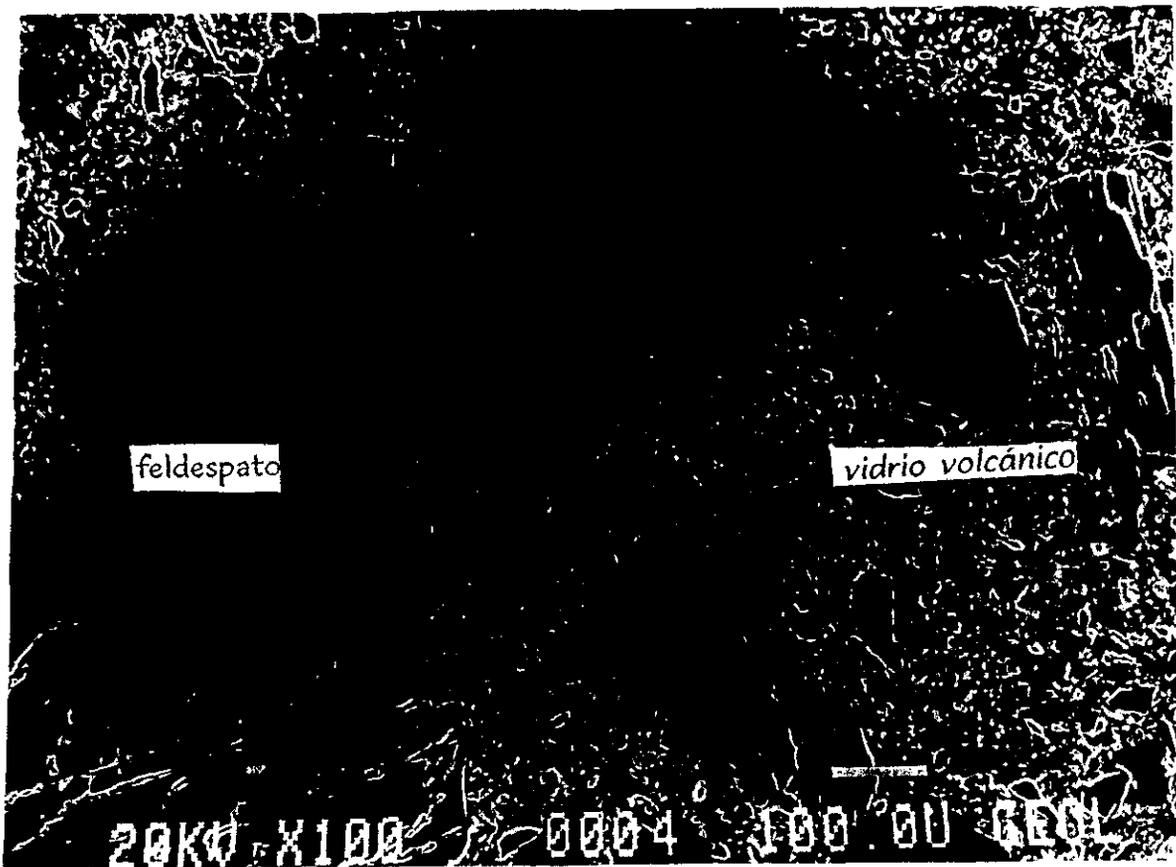
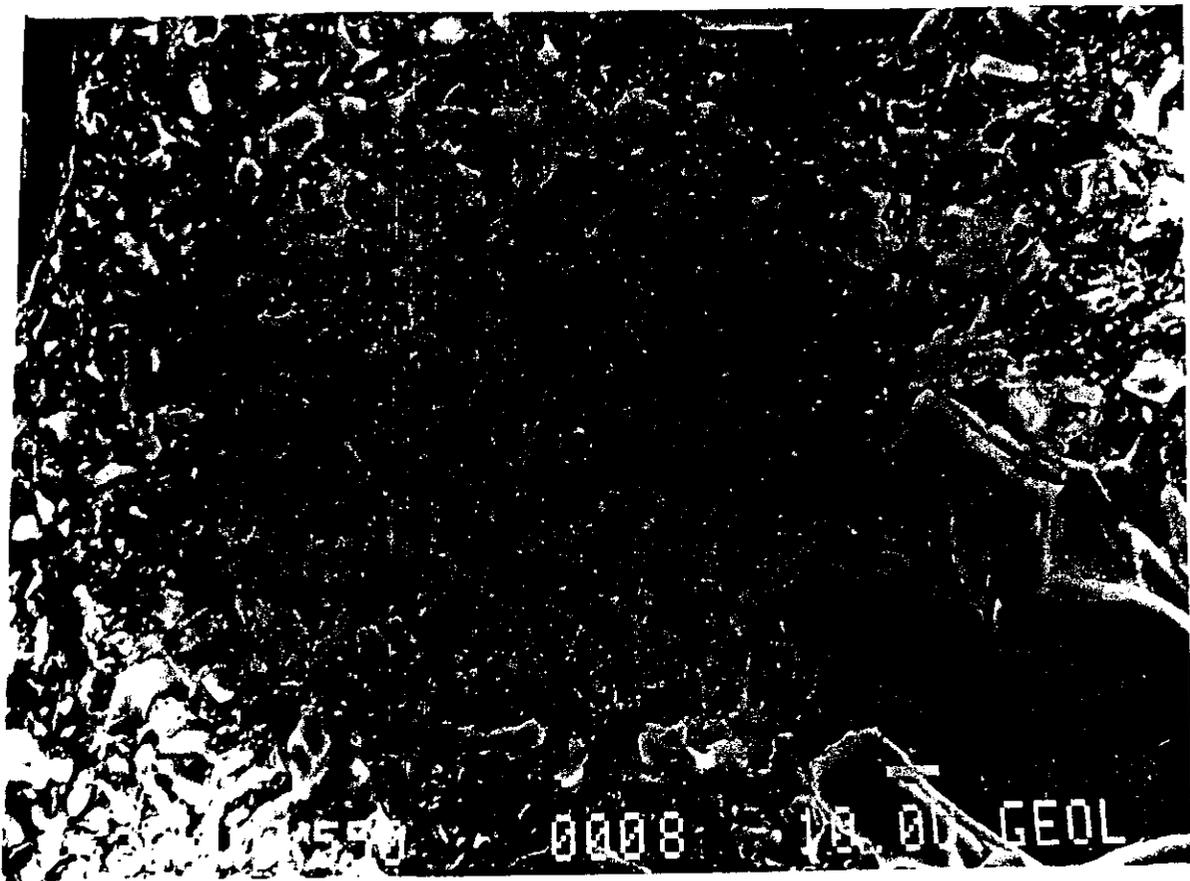
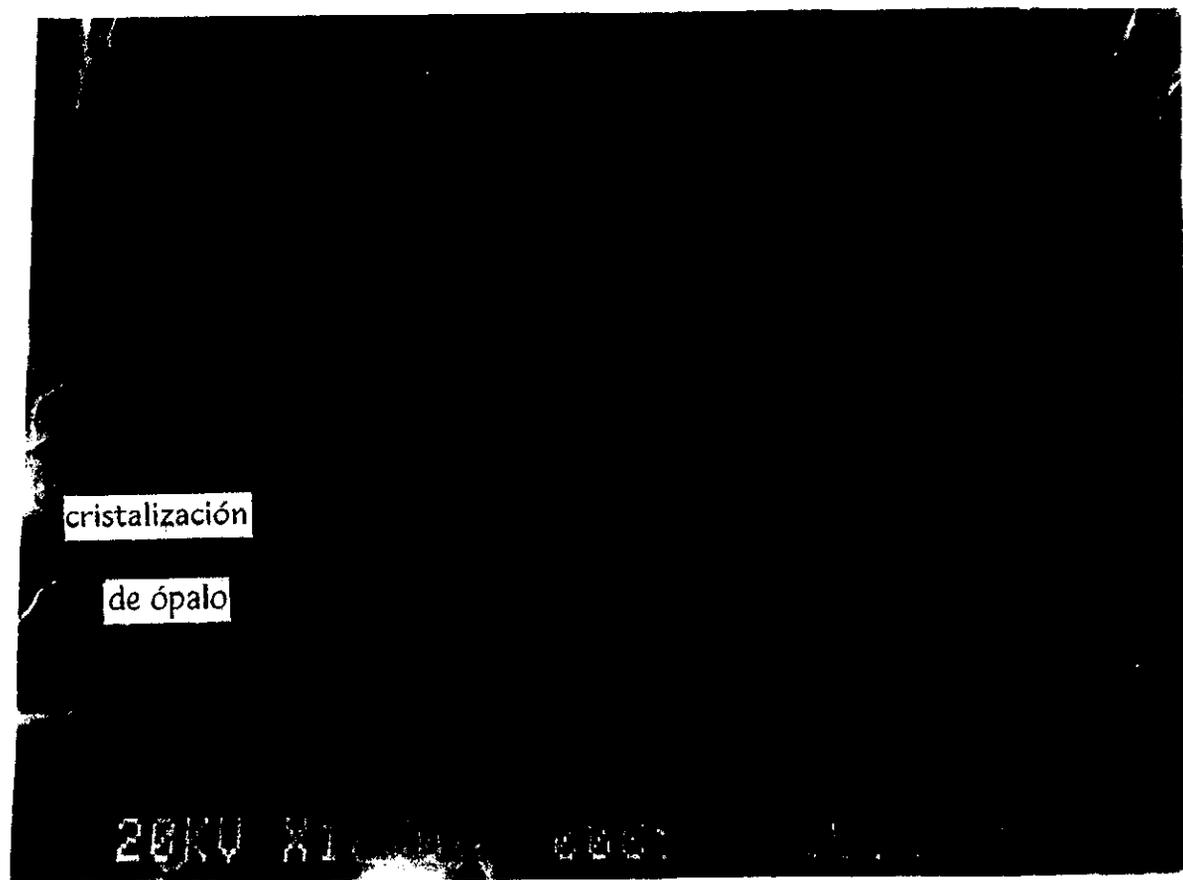


Figura 30. Fotomicrografía tomada a partir del microscopio de barrido muestra fragmentos líticos volcánicos escasamente alterados de formas muy angulares, lo que indica materiales de depositación reciente.



**Figura 31.** Fotomicrografía tomada a partir del microscopio de barrido muestra la toba vítrea con fenocristales de plagioclasas, donde se presentan minerales con bordes subredondeados y alteración de vidrio volcánico.



**Figura 32.** Fotomicrografía tomada a partir del microscopio electrónico de barrido donde se muestra vidrio volcánico alterado y formación de ácido silícico, el cual esta cementando las partículas de la toba, se observa una incipiente cristalización de ópalo.



Figura 33. Fotomicrografía donde se muestra al ácido silícico, proceso de silicificación de la toba.

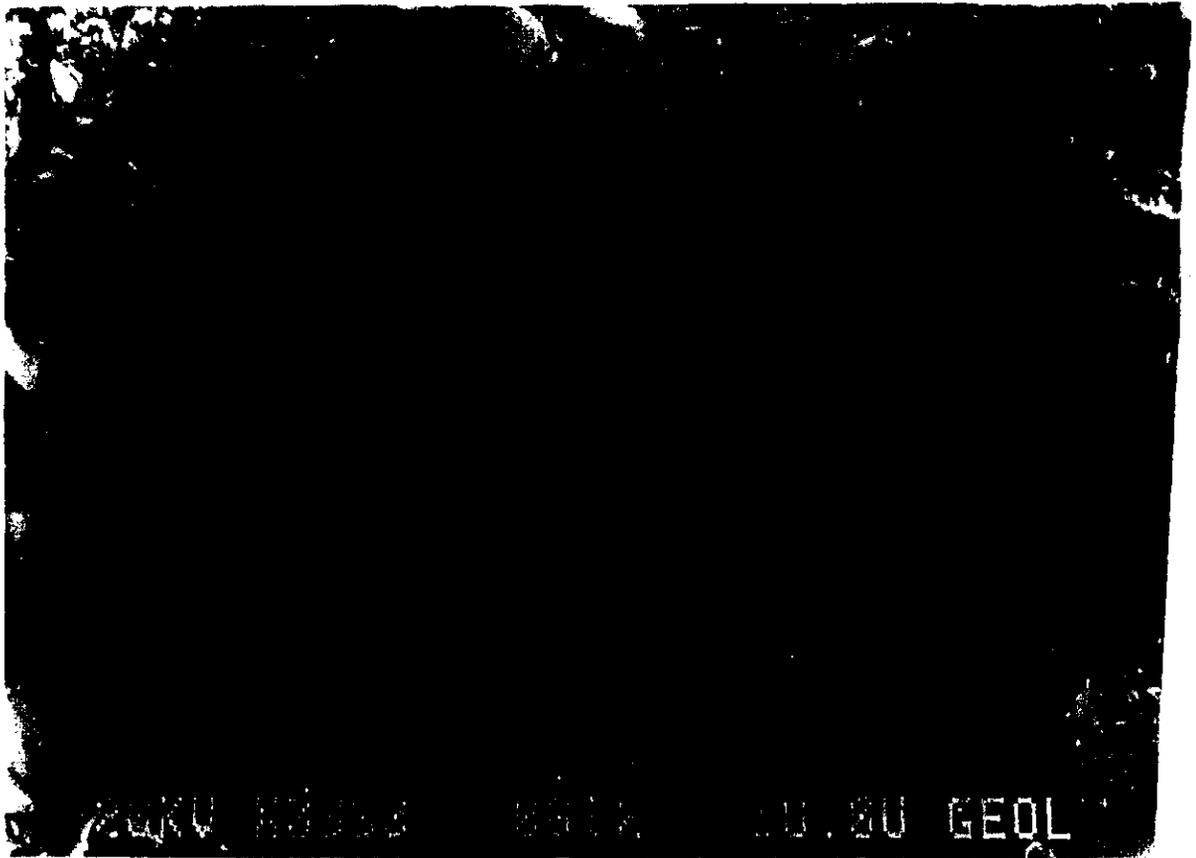


Figura 34. Fotomicrografía donde se muestra el aspecto general de la solidificación de la toba.

## 12.b. Conclusiones

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

- El origen de los suelos es predominantemente aluvio-coluvial de desarrollo incipiente, mientras que el perfil 3 y 5 son de desarrollo *in situ*, con bajos contenidos de nitrógeno, fósforo y materia orgánica.
- La clasificación morfológica de campo caracterizó a los suelos y capas endurecidas de leve a ligeramente desarrollados.
- La granulometría que predomina en las capas endurecidas de los perfiles 4 y 6 es la arcilla en más del 45%, se les denomina Claypan o Densipan.
- Las arenas finas y muy finas así como los limos gruesos y medios predominan en más del 60% en los perfiles 1, 2, 3, 5 y 7.
- Las capas endurecidas de los perfiles 2, 3, 5 y 7predomina la textura franco arenosas.
- Imperan en los perfiles las arenas de esfericidad baja y redondez angular y subangular.
- Los valores obtenidos tanto para DA y DR en las capas endurecidas de los perfiles no corresponden a lo reportado por otros trabajos relacionados a tepetate.
- El mineral secundario que predomina es la haloisita 7 Å, producto de la alteración de materiales piroclásticos y con menor frecuencia la montmorillonita.
- La resistencia a la fracturación de las probetas (marco de carga), la humedad no es un factor que determine la resistencia (dureza), sino el grado de cementación de cada una de ellas.
- La sílice esta íntimamente adsorbida a las arcillas, ambas producen la dureza del tepetate.
- La capa endurecida de los perfiles 4 y 6 se formo por procesos pedogenéticos dados por la iluviación de las arcillas, a las bases, alternancia climática (seca y húmeda) y agentes cementantes, factores que promovieron la consolidación y cementación de estas.

- Los valores bajos de densidad aparente del tepetate blanco se debe al material pumítico de naturaleza riolítica.
- En los perfiles 1, 2, 3, 5 y 7 la capa endurecida se formo por origen volcanogénico enriquecidos por procesos secundarios pedogenéticos.
- Las ganancias de los óxidos totales de los horizontes meteorizados, en relación con la roca basal, fueron poco significativas, con excepción del perfil 4, donde el óxido de silicio predomina.
- La ganancia de H<sub>2</sub>O (-) indica la presencia de arcillas microcristalinas y de sílice opalina.
- Las relaciones molares de los óxidos totales en general son altas, lo que indican que se trata de materiales que se encuentran en etapas de alteración leve.
- Los tepetates blancos presentan un moderado estado de meteorización, mientras que los tepetates amarillos muestran un mayor grado de intemperismo con relación a los contenidos de óxidos libres.
- Los bajos porcentajes de óxidos libres señalan el poco grado de alteración de los minerales primarios.
- Las relaciones molares SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mayores de 2 en los óxidos libres, indican que el material amorfo esta en forma de geles de silicio, protoalofano o protoópalo que al polimerizarse son eficientes cementantes.
- El alofano se presentó en bajos porcentajes en todo el perfil, con predominio de alofanos ricos en sílice, aunque son pocos influyen directamente en las propiedades físicas y químicas.
- La petrografía de las capas endurecidas, presentan una distribución relacionada porfírica cerrada, de estructura masiva y subangular, B-fábrica de poros y granos estriados con predominio de poros de tipo cámara y fisuras, con un porcentaje de porosidad de 32%, los minerales primarios se encuentran dentro de una matriz argílica.
- Las capas endurecidas de los perfiles 1, 2, 3, 5 y 7 son tobas o ignimbritas de naturaleza variable.

- Es necesario realizar una guía para la identificación y clasificación taxonómica de los materiales endurecidos de origen piroclástico.
- La dominancia de la arcilla haloisita es reflejo de una marcada estación de seca.

## CAPITULO XIII

### *13. Evaluación del efecto de especies vegetales en la fragmentación, agregación y su estabilidad en húmedo en dos tepetates fracturados.*

#### 13.a. Determinación de fragmentos y agregados

##### 13a.1. Agregados > 12 mm de diámetro.

En la Figura 34, se presentan los porcentajes de agregados en seco mayores de 12 mm de diámetro, en tepetate blanco, de las tres especies vegetales y el testigo sin planta, en la primera etapa de evaluación (6 meses). Tanto el testigo sin planta como los tratamientos con especies vegetales presentan un comportamiento similar; la guayaba, al realizarle la comparación de medias por Tukey ( $P=0.01$ ), no presentó diferencias significativas entre tratamientos, ni en la época de corte (Tabla 75); mientras que, en el huaje rojo a los seis meses, el testigo con planta es estadísticamente similar a los tratamientos con estiércol de bovino y con solución nutritiva, sin embargo a los doce meses el testigo con planta sobresale significativamente con respecto a los demás tratamientos (Tabla 77).

En cuanto al cultivo del pasto Rhodes se observa claramente en la Figura 34, un incremento en la agregación en seco, para la segunda etapa de evaluación al adicionarle estiércol de gallina más solución nutritiva, estadísticamente diferente a los demás tratamientos (Tabla 79), presentando un decremento en los agregados cuando se adiciona individualmente estiércol de gallina o solución nutritiva.

En tepetate amarillo (Figura 35), la formación de agregados presentó mayor porcentaje en la primera etapa de evaluación en el cultivo de la guayaba,

Tabla 75.- Distribución de macroagregados en seco y húmedo, comparación de medias del tepetate blanco cultivado con guayaba.

Período	TRAT.	MACROAGREGADOS Diámetro en mm.									
		>12	10 - 12	7 - 10	5 - 7	3 - 5	2 - 3	1 - 2	0.5 - 1	0.25 - 0.5	< 0.25
<b>AGREGADOS EN SECO</b>											
6	T	5.21 a	9.38 d	48.62 a	4.51 b	12.07 b	5.17 d	1.91 c	1.28 a	1.83 a	1.11 a
M	B	6.05 a	18.83 bc	42.63 b	5.12 a	12.32 b	8.48 b	3.07 b	1.64 a	0.82 b	1.05 a
E	G	5.33 a	19.07 b	45.92 ab	5.57 a	12.61 ab	6.74 cd	1.84 c	1.05 a	0.83 b	1.05 a
S	TS	3.97 a	19.52 b	39.70 c	4.41 b	13.64 a	10.61 a	4.08 a	1.82 a	0.91 ab	1.13 a
E	BS	5.15 a	17.24 c	43.72 b	4.34 b	13.38 a	10.12 a	2.48 bc	1.43 a	0.87 ab	0.94 a
S	GS	5.22 a	25.05 a	41.19 bc	3.62 c	13.34 ab	7.13 c	1.76 c	0.95 a	0.70 b	1.03 a
12	T	7.05 a	17.38 a	38.33 a	5.77 b	12.42 b	8.66 c	4.35 d	2.95 c	1.32 b	1.76 a
M	B	4.81 a	13.12 bc	38.17 ab	7.01 a	13.93 ab	8.76 c	5.52 bc	4.55 ab	1.67 ab	2.47 a
E	G	6.85 a	14.86 b	31.39 c	3.94 c	13.17 b	13.54 a	6.23 ab	5.24 ab	2.01 ab	2.79 a
S	TS	5.67 a	13.76 bc	36.32 b	6.65 a	14.27 a	8.61 c	6.16 b	4.35 b	1.88 ab	2.34 a
E	BS	5.96 a	13.54 bc	35.55 b	5.79 b	14.34 a	10.84 b	5.23 c	4.46 b	1.85 ab	2.45 a
S	GS	5.88 a	14.74 b	29.30 c	5.68 b	12.51 b	13.45 a	7.01 a	5.71 a	2.38 a	3.34 a
<b>ESTABILIDAD EN HUMEDO</b>											
				> 5	3 - 5	2 - 3	1 - 2	0.5 - 1	0.25 - 0.5	< 0.25	
6	T			65.55 a	6.91 a	14.6 c	2.84 c	1.43 b	0.49 a	8.18 b	
M	B			66.25 a	5.39 b	17.02 b	3.24 bc	1.76 ab	0.43 a	5.91 b	
E	G			68.99 a	5.96 b	12.31 d	1.84 d	1.12 b	0.42 a	9.36 ab	
S	TS			53.99 b	5.51 b	17.82 ab	4.76 a	2.91 a	0.83 a	14.17 a	
E	BS			58.33 b	6.35 ab	19.67 a	4.10 ab	1.97 ab	0.51 a	9.07 b	
S	GS			58.98 b	5.65 b	17.52 b	3.85 b	1.99 ab	0.63 a	11.43 ab	
12	T			69.29 ab	4.33 c	13.47 c	3.54 b	2.05 ab	0.67 a	6.64 ab	
M	B			54.24 c	7.03 a	20.70 a	4.76 a	2.34 a	0.77 a	10.16 a	
E	G			69.77 ab	4.65 c	13.11 c	1.56 c	0.5 b	0.15 a	10.26 a	
S	TS			68.13 ab	6.74 a	15.52 bc	2.92 b	0.87 b	0.18 a	5.65 b	
E	BS			73.33 a	5.91 b	10.67 d	1.30 c	0.54 b	0.15 a	8.05 ab	
S	GS			65.27 b	5.39 b	17.07 b	4.25 ab	2.47 a	0.87 a	4.69 b	
T = Testigo		B = Estiércol de bovino			G = Estiércol de gallina			S = Solución nutritiva			

cuando se le aplicó estiércol de gallina más solución nutritiva (Figura 35), dando diferencias significativas entre los tratamientos; sin embargo, este porcentaje de agregación se ve disminuido a los doce meses hasta en un 50%, por otra parte, el estiércol de gallina continua presentando los porcentajes más elevados de agregación (Tabla 76), en la segunda etapa de evaluación, estadísticamente diferente con respecto a los demás tratamientos.

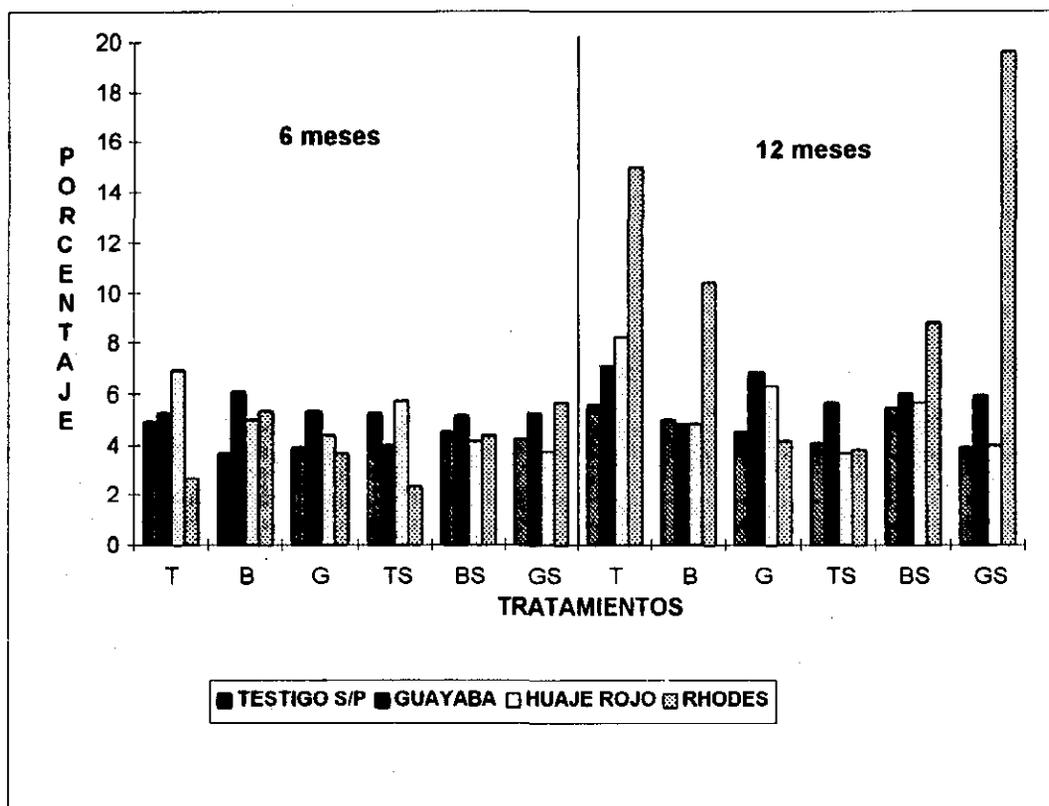


Figura 35. Agregados > 12 mm en tepetate blanco.

En cuanto al huaje rojo (Figura 35), no manifestó ningún efecto significativo entre los tratamientos, ni en las dos épocas de corte (Tabla 78). Por otra parte, el pasto Rhodes, tanto en la primera etapa como para la segunda evaluación el testigo con planta incrementó la formación de agregados (Figura 35), estadísticamente diferente a los demás tratamientos (Tabla 80), a excepción del tratamiento con estiércol de bovino a doce meses, similar estadísticamente al testigo con planta.

Tabla 76.- Distribución de macroagregados en seco y húmedo, comparación de medias del tepetate amarillo cultivado con guayaba.

Periodo	TRAT.	MACROAGREGADOS Diámetro en mm.									
		>12	10 - 12	7 - 10	5 - 7	3 - 5	2 - 3	1 - 2	0.5 - 1	0.25 - 0.5	< 0.25
<b>AGREGADOS EN SECO</b>											
6	T	10.51 d	17.09 a	29.01 b	3.05 a	10.96 a	6.88 ab	4.54 b	5.88 c	4.85 b	7.21 b
M	B	30.10 b	14.45 b	25.95 b	2.74 ab	7.39 c	5.85 b	3.11 c	3.52 d	2.73 d	4.22 c
E	G	14.20 c	9.43 d	24.44 c	2.48 b	7.08 cd	3.63 c	5.41 a	11.71 a	6.92 a	11.36 a
S	TS	10.40 d	12.25 c	27.43 b	2.83 ab	9.68 b	7.38 a	5.75 a	8.63 b	6.35 a	9.66 a
E	BS	10.40 d	14.65 b	38.53 a	3.23 a	10.81 a	7.32 a	2.53 d	3.93 d	3.84 c	4.78 c
S	GS	47.30 a	7.26 e	16.52 d	2.43 b	6.29 d	3.36 c	3.75 c	4.61 d	3.21 c	5.25 bc
12	T	19.91 b	9.73 b	18.28 d	3.77 d	7.38 d	9.04 b	7.38 a	9.58 b	7.53 b	7.88 bc
M	B	6.42 cd	12.77 a	33.01 a	6.21 a	9.42 b	10.24 ab	5.72 b	6.49 c	3.88 d	5.87 c
E	G	23.20 a	4.81 c	14.47 e	2.32 e	5.78 e	5.55 c	7.41 a	13.99 a	9.61 a	12.89 a
S	TS	17.50 b	12.37 a	28.84 b	5.43 b	9.54 b	9.67 b	3.92 c	4.32 d	3.07 d	5.35 c
E	BS	7.32 c	8.60 b	23.27 c	4.78 c	8.34 c	6.54 c	6.33 b	13.46 a	10.26 a	11.09 a
S	GS	4.86 d	12.66 a	26.75 b	4.48 c	11.03 a	11.7 a	6.38 b	8.61 b	5.19 c	8.34 b
<b>ESTABILIDAD EN HUMEDO</b>											
				> 5	3 - 5	2 - 3	1 - 2	0.5 - 1	0.25 - 0.5	< 0.25	
6	T			31.07 c	3.35 b	12.16 a	4.04 ab	6.83 bc	6.95 c	35.61 b	
M	B			44.75 b	3.41 b	11.15 a	3.6 b	6.57 c	5.49 d	25.02 c	
E	G			22.13 d	1.58 c	4.15 c	4.55 ab	12.57 a	16.55 a	38.47 ab	
S	TS			42.21 b	2.87 b	9.46 b	3.79 b	8.32 b	6.60 cd	26.75 c	
E	BS			51.03 a	4.73 a	12.21 a	2.69 c	5.57 c	6.61 cd	17.18 d	
S	GS			23.60 d	2.09 c	5.12 c	4.78 a	13.12 a	11.07 b	40.22 a	
12	T			44.07 b	3.91 b	10.83 b	5.21 a	8.69 bc	6.49 b	20.83 c	
M	B			65.93 a	4.47 b	8.91 b	2.01 d	3.24 e	2.77 d	12.67 d	
E	G			12.29 d	1.47 c	4.67 c	4.38 b	12.80 a	12.75 a	51.63 a	
S	TS			37.45 c	4.79 a	14.45 a	3.33 c	6.42 d	3.72 cd	29.83 b	
E	BS			47.45 b	4.59 ab	9.72 b	3.51 c	9.43 b	6.52 b	18.78 cd	
S	GS			48.21 b	4.08 b	14.40 a	4.76 ab	7.77 c	4.88 c	15.89 d	

T = Testigo

B = Estiércol de bovino

G = Estiércol de gallina

S = Solución nutritiva

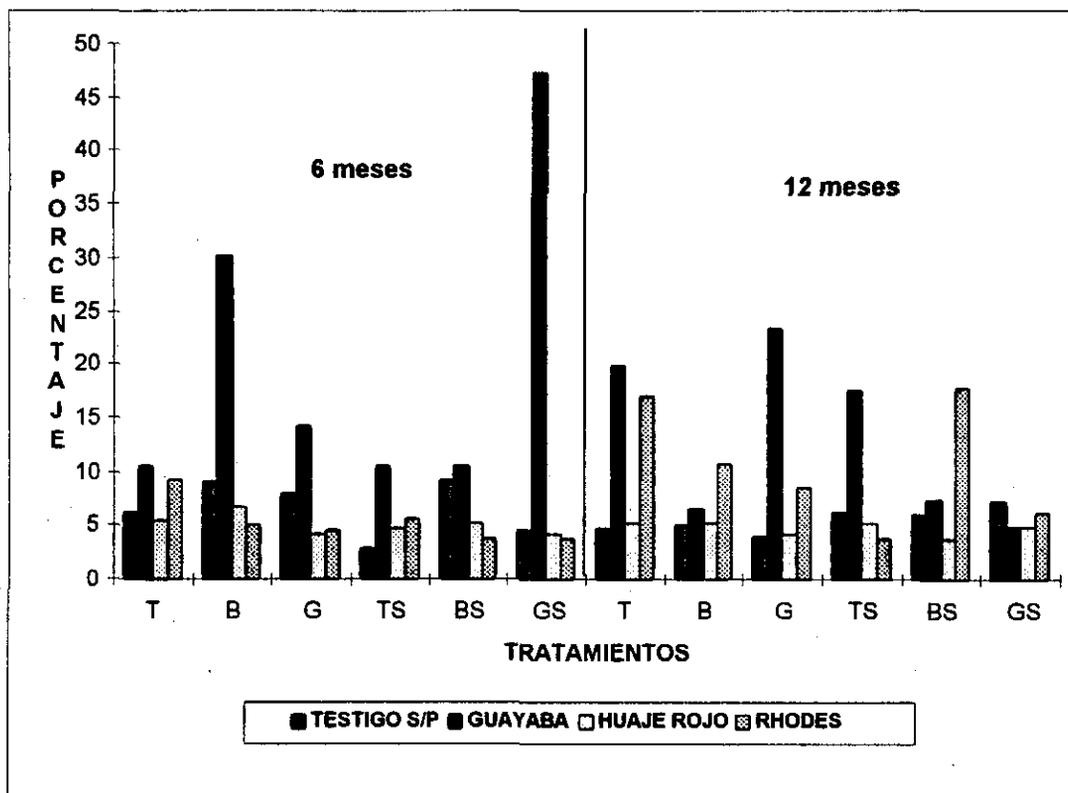


Figura 36. Agregados > 12 mm en tepetate amarillo.

Es importante asentar que al inicio del establecimiento del experimento únicamente se contaba con fragmentos de tepetate menores de 12.0 a 2.0 mm de diámetro y al término de la investigación se obtuvieron agregados > 12 mm y < 2.0 mm de diámetro, esto indica, que mientras estuvo establecido el trabajo, se presentaron conjuntamente procesos físicos, químicos y biológicos que incidieron directamente sobre los fragmentos del tepetate, lo que promovió la agregación y disgregación de este material.

Con respecto a los agregados mayores de 12 mm de diámetro, al analizarse los resultados entre el testigo sin planta contra las especies vegetales en tepetate blanco, la guayaba produjo los porcentajes mayores de agregación en seco en la mayoría de los tratamientos siempre por arriba de los porcentajes del testigo sin planta (Figura 34), mientras que el huaje rojo, tuvo un comportamiento

Tabla 77.- Distribución de macroagregados en seco y húmedo, comparación de medias del tepetate blanco cultivado con huaje rojo.

Período	TRAT.	MACROAGREGADOS Diámetro en mm.									
		>12	10 - 12	7 - 10	5 - 7	3 - 5	2 - 3	1 - 2	0.5 - 1	0.25 - 0.5	< 0.25
<b>AGREGADOS EN SECO</b>											
6	T	6.92 a	26.83 ab	35.62 b	3.53 c	12.83 c	9.28 c	2.25 c	0.93 c	0.67 b	0.82 b
M	B	4.97 ab	26.42 b	39.71 a	4.08 b	13.79 c	8.98 c	1.90 c	1.00 c	0.73 b	0.90 ab
E	G	4.32 b	21.04 d	32.59 c	3.59 bc	15.40 ab	12.85 ab	4.44 b	2.59 b	1.29 ab	1.88 ab
S	TS	5.72 ab	28.11 a	35.00 bc	3.30 c	14.87 b	9.18 c	1.68 c	0.79 c	0.60 b	0.75 b
E	BS	4.09 b	22.75 c	32.80 c	5.40 a	14.12 bc	11.78 b	4.03 b	2.27 b	1.20 ab	1.57 ab
S	GS	3.71 b	17.53 e	29.96 d	3.34 c	16.00 a	13.98 a	5.85 a	4.49 a	2.17 a	2.96 a
12	T	8.23 a	13.93 b	26.10 b	2.68 c	11.48 c	7.85 c	6.91 a	3.64 d	5.57 a	6.95 a
M	B	4.86 bc	16.33 a	34.91 a	3.92 a	13.45 b	9.86 b	5.42 bc	4.94 c	2.54 c	3.76 b
E	G	6.32 ab	12.91 b	33.94 a	3.04 bc	12.17 c	8.71 bc	5.85 b	7.27 ab	4.22 b	5.36 ab
S	TS	3.68 c	15.65 a	27.22 b	3.36 b	13.04 bc	11.26 a	6.65 ab	8.14 a	4.60 ab	5.74 ab
E	BS	5.69 bc	14.77 ab	34.25 a	3.13 bc	12.25 c	8.90 bc	5.76 b	6.68 b	3.76 bc	4.81 b
S	GS	4.00 bc	12.89 b	36.47 a	3.45 b	16.69 a	11.35 a	4.66 c	4.35 cd	2.34 c	3.81 b
<b>ESTABILIDAD EN HUMEDO</b>											
				> 5	3 - 5	2 - 3	1 - 2	0.5 - 1	0.25 - 0.5	< 0.25	
6	T			69.56 a	5.39 b	16.65 b	2.49 bc	1.05 b	0.29 b	4.57 b	
M	B			59.36 b	5.79 b	18.45 ab	4.45 a	2.46 a	1.87 a	7.62 ab	
E	G			63.41 b	6.57 a	18.37 ab	2.97 b	1.29 b	0.45 b	6.93 ab	
S	TS			60.53 b	6.57 a	19.65 a	3.21 b	1.03 b	0.27 b	8.75 a	
E	BS			70.92 a	4.65 c	11.63 c	1.99 c	0.99 b	0.41 b	9.41 a	
S	GS			68.00 ab	5.68 b	18.36 ab	3.21 b	1.47 ab	0.46 b	7.48 ab	
12	T			70.92 ab	5.10 b	14.83 c	2.04 b	0.75 a	0.18 a	6.18 a	
M	B			72.78 a	5.13 b	14.24 bc	2.88 ab	1.21 a	0.26 a	3.49 a	
E	G			71.14 ab	5.44 b	16.17 bc	2.19 b	0.73 a	0.15 a	4.17 a	
S	TS			66.02 b	6.39 a	17.17 b	3.10 a	1.42 a	0.41 a	5.49 a	
E	BS			73.01 a	5.62 b	15.61 bc	1.15 c	0.31 a	0.09 a	4.10 a	
S	GS			59.80 c	6.54 a	24.82 a	2.25 b	0.64 a	0.27 a	5.67 a	

T = Testigo

B = Estiércol de bovino

G = Estiércol de gallina

S = Solución nutritiva

aparentemente similar al testigo sin planta, para las dos etapas de evaluación (Figura 34). Al referirse al pasto Rhodes su efecto en la formación de agregados en la primera etapa, los porcentajes son cercanos al testigo sin planta, sin embargo se advierte que a doce meses se incrementó la agregación con respecto al testigo con planta hasta en un 200%.

En cuanto al tepetate amarillo (Figura 35), los porcentajes de agregación en seco del testigo sin planta se encuentran por debajo de la guayaba, tanto para la primera y segunda etapa, mientras que, el huaje rojo presentó valores de agregación análogos al testigo sin planta en la mayoría de los tratamientos. El pasto Rhodes, tuvo porcentajes por debajo del testigo sin planta en la primera etapa de evaluación, mientras que la segunda etapa, los porcentajes se incrementaron con respecto al testigo sin planta con excepción donde se adicionó solución nutritiva y estiércol de gallina mas solución nutritiva.

En relación a los dos materiales empleados (tepetate blanco y amarillo), la formación de agregados mayores de 12 mm de diámetro, se presentaron diferencias significativas entre ellos, predominando la mayor presencia de agregados en el tepetate amarillo que en el blanco.

De forma general, la guayaba promueve la formación de agregados mayores de 12 mm de diámetro en la primera etapa, es decir, es una especie que se puede utilizar como pionera en zonas con tepetate recién roturados, de fácil manejo y de una gran rusticidad.

El pasto Rhodes, favoreció la agregación en seco mayor de 12 mm de diámetro a través del tiempo, mientras que el huaje rojo presentó bajos porcentajes en relación a los otros cultivos.

Tabla 78.- Distribución de macroagregados en seco y húmedo, comparación de medias del tepetate amarillo cultivado con huaje rojo.

Periodo	TRAT.	MACROAGREGADOS Diámetro en mm.									
		>12	10 - 12	7 - 10	5 - 7	3 - 5	2 - 3	1 - 2	0.5 - 1	0.25 - 0.5	< 0.25
<b>AGREGADOS EN SECO</b>											
6	T	5.40 a	15.78 ab	30.46 a	5.13 b	12.74 b	14.69 bc	7.21 b	4.43 b	1.85 c	2.33 b
M	B	6.60 a	13.97 b	26.16 b	5.54 b	13.00 b	15.09 ab	7.02 bc	5.62 a	2.85 b	4.14 ab
E	G	4.15 a	14.58 ab	32.40 a	6.11 a	15.90 a	13.03 d	6.29 c	5.18 ab	2.56 bc	3.81 ab
S	TS	4.63 a	14.37 b	27.65 b	4.62 c	13.07 b	16.28 a	8.39 a	5.72 a	2.42 bc	2.85 b
E	BS	5.17 a	16.20 a	32.24 a	4.62 c	13.72 b	13.45 bc	5.44 d	3.94 b	2.09 bc	3.13 b
S	GS	4.17 a	11.56 c	30.62 a	4.61 c	13.62 b	13.58 c	5.98 cd	6.09 a	4.00 a	5.76 a
12	T	5.30 a	10.24 a	26.86 a	3.77 b	10.09 a	10.30 ab	8.39 a	11.00 b	5.67 c	8.37 ab
M	B	5.32 a	11.55 a	28.19 a	5.14 a	8.92 b	9.05 b	6.30 b	9.32 c	6.44 c	9.77 a
E	G	4.15 a	11.20 a	23.74 b	4.23 b	8.51 bc	9.98 ab	7.91 a	12.17 ab	7.80 b	10.31 a
S	TS	5.26 a	11.38 a	28.20 a	4.20 b	9.13 ab	9.55 ab	7.89 a	11.13 b	5.87 c	7.39 b
E	BS	3.78 a	10.67 a	23.73 b	4.24 b	8.77 b	10.85 a	8.24 a	11.85 ab	7.51 b	10.35 a
S	GS	4.79 a	11.21 a	21.54 b	4.91 a	7.68 c	9.61 ab	8.29 a	12.70 a	10.16 a	9.11 ab
<b>ESTABILIDAD EN HUMEDO</b>											
					> 5	3 - 5	2 - 3	1 - 2	0.5 - 1	0.25 - 0.5	< 0.25
6	T				34.47 b	3.36 a	11.10 c	4.94 b	11.34 a	8.26 a	26.54 b
M	B				45.47 a	5.21 ab	13.79 b	5.13 ab	8.47 b	5.77 b	16.16 d
E	G				40.81 a	4.61 b	15.75 ab	5.16 ab	8.53 b	5.75 b	19.4 cd
S	TS				33.11 b	3.53 c	12.77 bc	5.53 ab	11.03 a	7.79 a	30.91 a
E	BS				40.55 a	2.58 d	12.25 bc	5.71 ab	10.55 a	7.19 a	21.18 c
S	GS				41.44 a	5.35 a	16.93 a	5.77 a	8.53 b	5.86 b	16.12 d
12	T				45.19 b	3.30 b	10.52 b	4.89 b	8.45 bc	6.81 b	20.81 b
M	B				49.67 a	3.66 b	12.77 ab	5.16 b	9.27 bc	5.65 bc	13.82 c
E	G				43.33 b	5.19 a	13.48 ab	6.02 a	11.76 a	5.65 bc	14.57 c
S	TS				31.52 c	3.74 b	11.86 b	6.35 a	11.83 a	8.37 a	26.33 a
E	BS				45.65 b	3.13 b	13.10 ab	5.57 ab	9.47 b	6.27 bc	16.92 c
S	GS				48.43 ab	4.90 a	14.81 a	5.04 b	7.97 c	5.27 c	13.59 c

T = Testigo

B = Estiércol de bovino

G = Estiércol de gallina

S = Solución nutritiva

### 13a.2. DE 7.0-12.0 mm DE DIÁMETRO

Los porcentajes de agregación de 7.0-12.0 mm de diámetro del tepetate blanco y amarillo, donde se incluye el valor obtenido del testigo absoluto que representa el valor medio de tres muestras tomadas al azar, resultado de la fragmentación del material obtenido antes de iniciar el experimento (Figuras 36 y 37).

El valor medio del testigo absoluto se encuentra por encima de los porcentajes obtenidos al término del experimento para cada especie vegetal y del testigo sin planta, esto indica, que por efecto de factores tanto físicos (fragmentación, disgregación, compactación, empaquetamiento), químicos (hidrólisis y  $H_2CO_3$ ) y biológicos (exudados radicales, biota del suelo), se presentó conjuntamente procesos de fragmentación, agregación y disgregación de los fragmentos; sería imposible indicar cual de estos procesos se presentó con mayor regularidad, se manifestaron en mayor porcentaje en el tepetate amarillo (Figura 37), debido a que este material presenta una mayor intemperización que el tepetate blanco.

La guayaba, promueve la agregación de 12.0-7.0 mm de diámetro en tepetate blanco en la primera etapa de evaluación (Figura 36), cuando se le adicionó estiércol de gallina y solución nutritiva, estadísticamente semejante pero diferente al resto de los tratamientos (Tabla 75), estos porcentajes decrecen en la segunda etapa de evaluación, por abajo del testigo absoluto, por lo que se podría decir, que los procesos de fragmentación, agregación y disgregación están presentes.

Al adicionarle estiércol de bovino al huaje rojo se favoreció el proceso de agregación de 7.0-12.0 mm de diámetro a los seis meses (Figura 36),

Tabla 79.- Distribución de macroagregados en seco y húmedo, comparación de medias del tepetate blanco cultivado con pasto Rhodes.

Período	TRAT.	MACROAGREGADOS Diámetro en mm.									
		>12	10 - 12	7 - 10	5 - 7	3 - 5	2 - 3	1 - 2	0.5 - 1	0.25 - 0.5	< 0.25
		<b>AGREGADOS EN SECO</b>									
6	T	2.64 b	14.78 a	41.73 a	5.44 b	15.12 d	12.73 c	3.62 d	1.52 c	1.09 b	1.32 b
M	B	5.30 ab	11.06 c	28.30 d	5.17 b	16.38 c	16.37 b	6.53 b	4.73 a	2.64 a	3.54 a
E	G	3.68 ab	12.82 b	37.69 b	6.94 a	18.12 ab	12.60 c	3.75 d	1.89 c	1.12 b	1.38 b
S	TS	2.30 b	11.89 bc	27.11 d	4.56 c	18.68 a	21.36 a	7.72 a	3.44 b	1.32 b	1.65 ab
E	BS	4.37 ab	13.52 ab	40.83 a	4.57 c	15.39 cd	13.77 c	3.78 d	1.62 c	0.95 b	1.18 b
S	GS	5.71 a	13.49 ab	34.17 c	4.10 d	17.62 b	15.44 b	4.61 c	2.28 bc	1.00 b	1.59 ab
12	T	15.00 b	12.47 a	20.94 c	3.43 a	9.38 c	8.58 c	7.00 b	9.23 c	5.96 a	7.99 b
M	B	10.40 c	12.91 a	27.41 b	1.84 c	13.43 ab	13.11 a	6.20 b	5.95 d	3.16 b	4.54 c
E	G	4.12 d	7.59 b	21.19 c	3.53 a	12.95 b	12.77 a	9.87 a	12.95 b	6.88 a	8.16 b
S	TS	3.80 d	8.67 b	22.63 c	2.67 b	9.05 c	8.51 c	9.40 a	15.22 a	6.10 a	10.58 a
E	BS	8.77 c	12.39 a	30.39 a	3.84 a	12.60 b	10.70 b	6.61 b	6.71 d	3.43 b	4.60 c
S	GS	19.60 a	13.63 a	27.03 b	3.38 a	14.07 a	10.81 b	3.42 c	3.61 e	1.66 c	2.83 c
		<b>ESTABILIDAD EN HUMEDO</b>									
					> 5	3 - 5	2 - 3	1 - 2	0.5 - 1	0.25 - 0.5	< 0.25
6	T				57.39 ab	4.69 c	14.55 d	3.41 b	1.65 bc	0.48 b	17.81 ab
M	B				51.59 b	5.57 b	16.18 cd	4.54 a	2.63 b	1.01 b	18.49 a
E	G				53.29 b	6.44 ab	17.49 bc	4.77 a	2.79 b	0.93 b	14.30 b
S	TS				50.27 c	4.77 c	17.01 c	4.78 a	5.95 a	3.57 a	13.65 b
E	BS				62.31 a	6.71 a	19.57 b	3.09 b	1.23 c	0.35 b	6.73 c
S	GS				53.09 b	5.98 b	25.33 a	4.68 a	1.76 bc	0.52 b	8.64 c
12	T				75.97 a	6.59 a	12.05 c	1.09 e	0.33 d	0.11 a	3.86 c
M	B				64.53 b	5.34 b	16.21 b	4.31 c	1.97 c	0.59 bc	7.05 bc
E	G				66.56 b	5.16 b	17.43 b	3.16 d	1.89 c	0.59 bc	5.21 c
S	TS				52.35 c	6.22 ab	20.49 a	6.15 b	3.96 b	1.24 bc	9.59 b
E	BS				51.24 c	5.67 b	21.73 a	7.59 b	5.13 b	1.37 b	7.27 bc
S	GS				39.51 d	4.31 c	17.81 b	8.55 a	7.62 a	2.96 a	19.47 a

T = Testigo

B = Estiércol de bovino

G = Estiércol de gallina

S = Solución nutritiva

estadísticamente difiere de los demás tratamientos (Tabla 77), sin embargo, los porcentajes decrecen para el segundo período; por otro lado, el pasto Rhodes, presentó un mayor porcentaje de disgregación de los fragmentos originales tanto en la primera y segunda etapa, este proceso fue mas marcado en el segundo período.

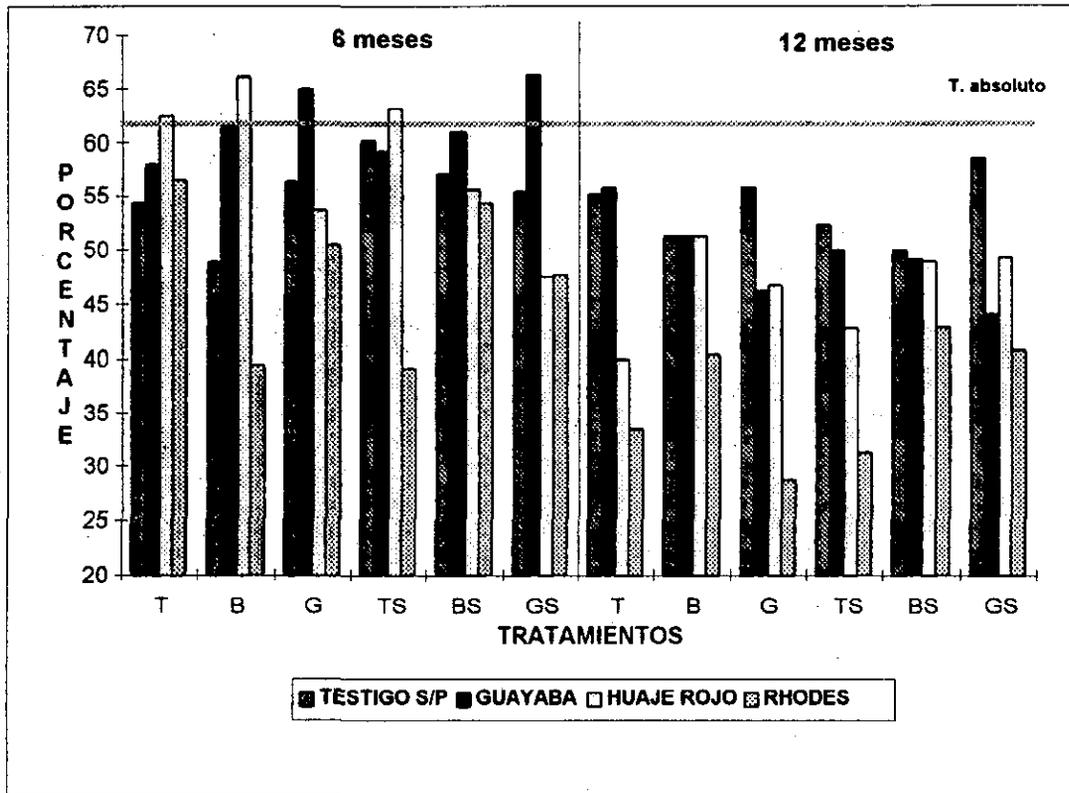


Figura 37. Agregados de 7 - 12 mm en tepetate blanco.

En el tepetate amarillo (Figura 37), los porcentajes que se obtuvieron por las especies vegetales y el testigo sin planta en los agregados de 7.0-12.0 mm de diámetro están por abajo del testigo absoluto, por lo que nuevamente se presenta un efecto físico, químico y biológico en la fragmentación, agregación y disgregación del tepetate amarillo, en general las especies vegetales manifiestan valores por abajo del testigo sin planta, esto indica, el papel que tienen las especies vegetales en la agregación y disgregación del material. Principalmente la guayaba y el pasto Rhodes presentan porcentajes más bajos en la segunda etapa de evaluación, por lo que, estas dos especies se puede considerar que su sistema radical, ya sea por exudados

Tabla 80.- Distribución de macroagregados en seco y húmedo, comparación de medias del tepetate amarillo cultivado con pasto Rhodes.

Período	TRAT.	MACROAGREGADOS Diámetro en mm.									
		>12	10 - 12	7 - 10	5 - 7	3 - 5	2 - 3	1 - 2	0.5 - 1	0.25 - 0.5	< 0.25
<b>AGREGADOS EN SECO</b>											
6	T	9.20 a	16.31 a	30.97 a	6.91 a	13.51 a	13.54 b	4.29 e	2.19 d	1.78 c	1.29 b
M	B	5.00 b	15.29 a	28.18 b	5.58 c	11.67 b	13.17 b	7.89 c	5.87 b	3.02 b	4.34 ab
E	G	4.57 b	12.25 b	25.78 b	5.74 c	14.38 a	15.80 a	8.17 c	6.65 b	2.81 b	3.85 ab
S	TS	5.68 b	16.08 a	31.83 a	6.18 b	14.05 a	13.38 b	5.92 d	3.45 c	1.43 c	3.00 b
E	BS	3.74 b	10.42 c	25.52 b	4.81 d	11.68 b	15.47 a	11.00 a	8.91 a	3.72 ab	4.73 ab
S	GS	3.75 b	8.78 c	26.68 b	4.52 d	13.39 a	14.78 ab	9.59 b	8.52 a	4.08 a	5.91 a
12	T	17.00 a	11.45 a	24.94 ab	3.86 b	10.84 a	9.73 c	5.72 e	6.31 d	4.08 c	6.10 bc
M	B	10.61 b	7.56 b	21.51 bc	3.24 c	10.78 a	12.11 a	9.65 bc	10.96 c	6.45 b	7.21 b
E	G	8.48 bc	8.22 b	17.14 c	3.04 c	8.35 b	9.24 c	10.36 b	16.04 a	9.69 a	9.43 a
S	TS	3.84 c	6.82 b	19.23 c	3.69 bc	8.58 b	11.34 ab	12.65 a	16.15 a	9.52 a	8.17 ab
E	BS	17.60 a	10.50 a	25.48 a	3.81 b	10.64 a	10.67 b	7.66 d	6.73 d	2.94 d	4.02 c
S	GS	6.05 c	7.65 b	22.54 b	4.70 a	8.27 b	8.14 d	8.86 c	14.70 b	9.52 a	9.57 a
<b>ESTABILIDAD EN HUMEDO</b>											
				> 5	3 - 5	2 - 3	1 - 2	0.5 - 1	0.25 - 0.5	< 0.25	
6	T			28.01 c	2.41 c	8.53 c	4.45 b	11.80 a	10.79 b	34.03 b	
M	B			38.29 b	3.38 b	12.19 b	5.81 a	11.57 ab	8.75 c	19.99 c	
E	G			16.25 d	0.53 d	6.86 c	4.16 bc	10.42 b	12.68 a	49.09 a	
S	TS			19.59 d	1.83 c	4.46 d	3.62 c	10.42 b	10.93 b	49.15 a	
E	BS			30.66 c	2.72 bc	10.22 bc	5.39 a	11.86 a	8.76 c	30.39 b	
S	GS			45.71 a	5.31 a	14.88 a	2.52 d	4.37 c	4.33 d	22.87 c	
12	T			56.13 a	2.61 b	9.66 ab	3.03 c	4.93 e	3.87 d	19.77 d	
M	B			46.79 b	2.59 b	6.89 c	3.45 c	8.60 cd	6.43 c	25.25 c	
E	G			36.95 c	3.13 ab	11.65 a	4.85 b	7.31 d	5.97 c	30.13 b	
S	TS			42.42 b	3.30 a	8.58 bc	4.44 b	9.39 c	6.69 c	25.19 c	
E	BS			32.07 c	2.73 ab	9.11 b	5.71 a	13.73 a	10.32 a	26.33 bc	
S	GS			33.61 c	3.25 ab	8.95 bc	5.53 ab	12.11 b	8.68 b	34.55 a	

T = Testigo

B = Estiércol de bovino

G = Estiércol de gallina

S = Solución nutritiva

radicales o fuerzas mecánicas o empaquetamiento de partículas promueven la agregación y disgregación en el tepetate.

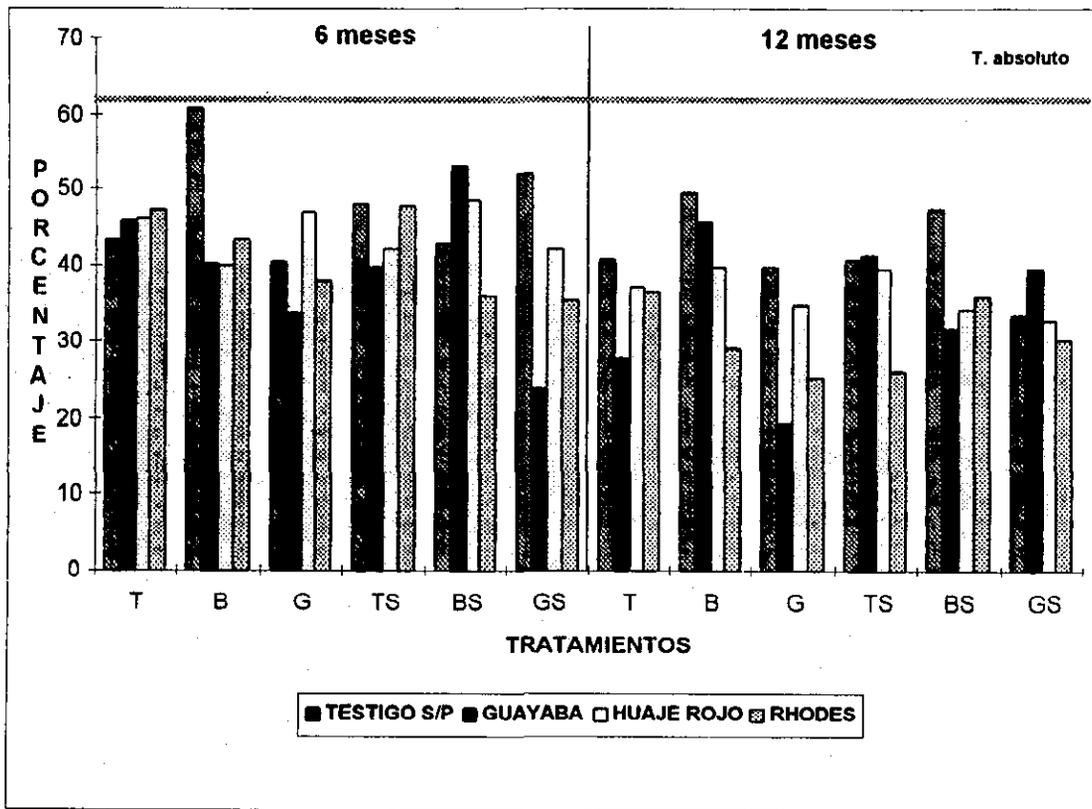


Figura 38. Agregados de 7 - 12 mm en tepetate amarillo.

En relación al testigo sin planta, sus porcentajes se encuentran por abajo del testigo absoluto, esto habla del efecto de los procesos físicos, químicos y biológicos (cuando se le adicionó alguna fuente orgánica) sobre el material fragmentado inicialmente, donde no intervienen las especies vegetales.

### 13a.3. DE 2.0-7.0 mm DE DIAMETRO

En el tepetate blanco, el testigo absoluto está por abajo de los valores obtenidos tanto por las especies vegetales como por el testigo sin planta (Figura 38), a excepción del pasto Rhodes y el huaje rojo que al segundo corte, los porcentajes se encuentran ligeramente por abajo del testigo absoluto, se interpretaría como disgregación de los fragmentos, tanto del intervalo superior como de éste.

La guayaba incrementó la agregación de este diámetro para la segunda etapa (Tabla 75), mientras que el huaje rojo en la primera etapa presentó valores semejantes al testigo sin planta decreciendo los porcentajes para la segunda etapa (Tabla 77). Por otro lado, el pasto Rhodes favoreció la agregación en la primera etapa, obteniéndose valores por arriba del testigo sin planta y del absoluto, cuando se le adicionó solución nutritiva el incrementó de la agregación (Figura 38), fué estadísticamente diferente a los demás tratamientos (Tabla 79), estos valores decrecen para la segunda etapa, inferior al testigo absoluto lo que indica que esta especie promovió la fragmentación y la disgregación.

Llama la atención en la Figura 38 el comportamiento del testigo sin planta donde sus valores se encuentran por arriba del testigo absoluto y de las especies vegetales, esto se interpretaría como un proceso de agregación, sin embargo, lo que realmente se presenta son fragmentos de este diámetro debido a la fragmentación del intervalo superior de 12.0-7.0 mm, o por proceso de compactación o recementación por sílice principalmente, además del efecto que tiene la materia orgánica en la agregación ya que ambas fuentes de abonos orgánicos presentaron un mayor efecto estadístico (Tabla 81).

Tabla 81.- Distribución de macroagregados en seco y húmedo, comparación de medias del tepetate blanco, testigo sin planta.

Período	TRAT.	MACROAGREGADOS Diámetro en mm.									
		>12	10 - 12	7 - 10	5 - 7	3 - 5	2 - 3	1 - 2	0.5 - 1	0.25 - 0.5	< 0.25
<b>AGREGADOS EN SECO</b>											
6	T	4.92 a	12.19 d	42.11 a	4.04 b	12.39 d	7.01 d	1.93 b	1.20 a	0.92 a	1.27 a
M	B	3.62 a	16.25 c	32.65 c	3.53 c	17.7 a	3.40 a	2.94 a	1.73 a	1.02 a	1.16 a
E	G	3.89 a	19.65 b	36.73 b	5.60 a	15.79 b	12.36 b	2.61 ab	1.39 a	0.84 a	1.21 a
S	TS	5.19 a	15.84 c	44.33 a	5.12 a	14.24 c	9.91 c	1.82 b	1.06 a	1.23 a	1.25 a
E	BS	4.50 a	21.67 a	35.43 b	4.15 b	16.04 b	12.05 b	2.79 a	1.41 a	0.85 a	1.10 a
S	GS	4.18 a	19.80 b	35.66 b	4.41 b	15.91 b	12.51 b	2.92 a	1.74 a	1.19 a	1.69 a
12	T	5.58 a	15.98 c	39.35 a	6.52 b	12.77 b	12.70 b	2.99 c	1.55 b	1.09 a	1.46 a
M	B	4.98 a	19.04 b	32.2 c	6.88 ab	13.75 ab	13.95 b	3.73 b	2.48 ab	1.38 a	1.60 a
E	G	4.49 a	18.10 b	37.64 ab	7.16 a	13.51 ab	12.50 c	2.77 c	1.57 b	0.95 a	1.32 a
S	TS	4.06 a	17.55 bc	34.79 c	6.50 b	12.96 b	11.89 c	4.66 a	3.29 a	1.76 a	2.54 a
E	BS	5.45 a	17.92 b	32.1 c	5.82 c	14.52 a	16.04 a	3.61 b	1.96 b	1.09 a	1.48 a
S	GS	3.90 a	22.09 a	36.35 b	7.02 ab	13.11 b	12.22 c	2.31 c	1.02 b	0.99 a	0.99 a
<b>ESTABILIDAD EN HUMEDO</b>											
				> 5	3 - 5	2 - 3	1 - 2	0.5 - 1	0.25 - 0.5	< 0.25	
6	T			60.88 bc	5.46 c	19.98 c	3.33 b	1.43 a	0.47 a	8.44 ab	
M	B			66.45 b	4.83 c	17.42 d	2.54 c	0.95 a	0.33 a	7.48 ab	
E	G			58.8 cd	8.02 a	23.02 b	2.62 bc	1.28 a	0.57 a	5.69 b	
S	TS			59.63 cd	6.52 b	19.35 cd	2.49 c	0.68 a	0.25 a	11.11 a	
E	BS			54.71 d	5.91 bc	26.54 a	4.69 a	1.68 a	0.42 a	6.04 b	
S	GS			71.07 a	5.17 c	15.55 d	1.42 d	0.56 a	0.22 a	6.02 b	
12	T			64.82 ab	6.41 b	20.89 c	2.22 c	0.92 b	0.41 a	4.33 b	
M	B			48.17 c	5.34 c	25.73 a	4.99 a	2.67 a	1.01 a	12.1 a	
E	G			57.61 b	7.20 a	23 b	3.51 b	1.77 ab	0.5 a	6.41 b	
S	TS			62.68 b	4.54 d	18.94 cd	3.68 b	2.19 ab	0.9 a	7.07 b	
E	BS			68.89 a	5.98 bc	17.15 d	2.53 c	1.07 ab	0.29 a	4.10 b	
S	GS			65.28 ab	5.88 bc	19.39 c	2.28 c	1.21 b	0.61 a	6.49 b	

T = Testigo

B = Estiércol de bovino

G = Estiércol de gallina

S = Solución nutritiva

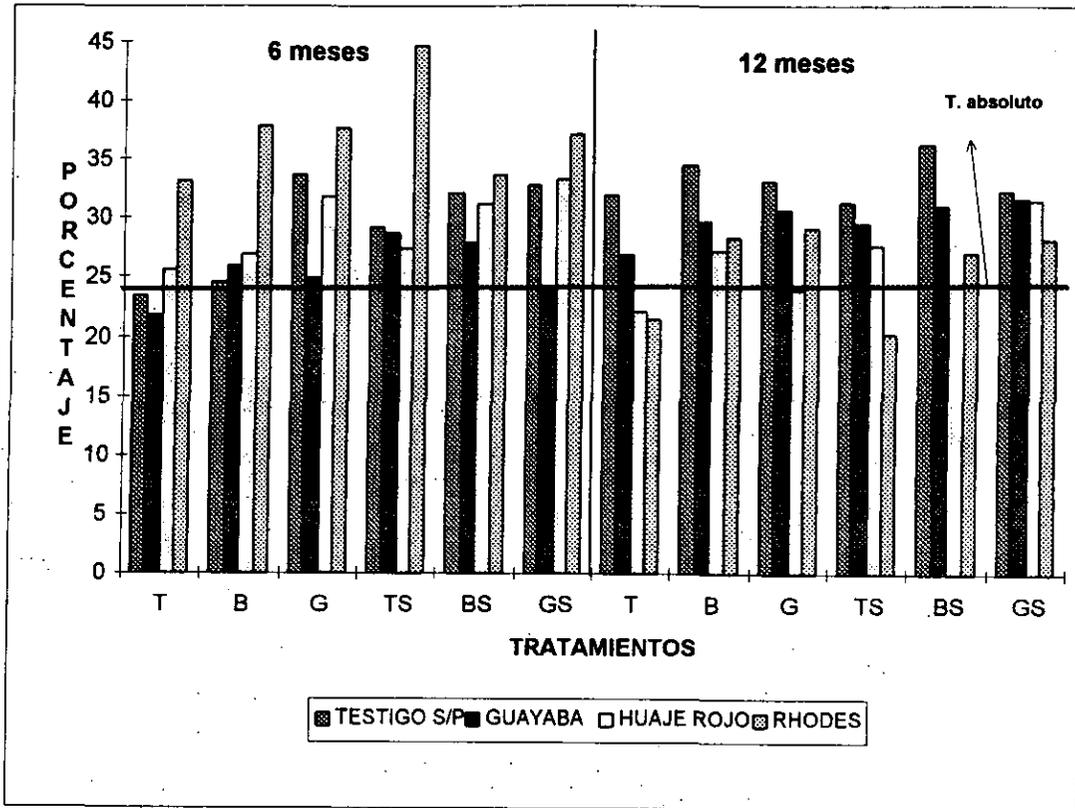


Figura 39. Agregados de 2 - 7 mm en tepetate blanco.

A diferencia de los resultados anteriores en la Figura 39, el valor del testigo absoluto se encuentra por arriba de las especies vegetales y el testigo sin planta, por lo que se puede hablar de fragmentación, agregación y disgregación del tepetate.

La guayaba, tanto en la primera como en la segunda etapa se promovió la fragmentación, agregación y disgregación de los fragmentos el cual se incrementa cuando se le adiciona estiércol de gallina (Tabla 76), e incrementándose la agregación con estiércol de gallina mas solución nutritiva. Por otro lado, el huaje rojo como el pasto Rhodes presentan porcentajes semejantes en las dos etapas de evaluación (Figura 39).

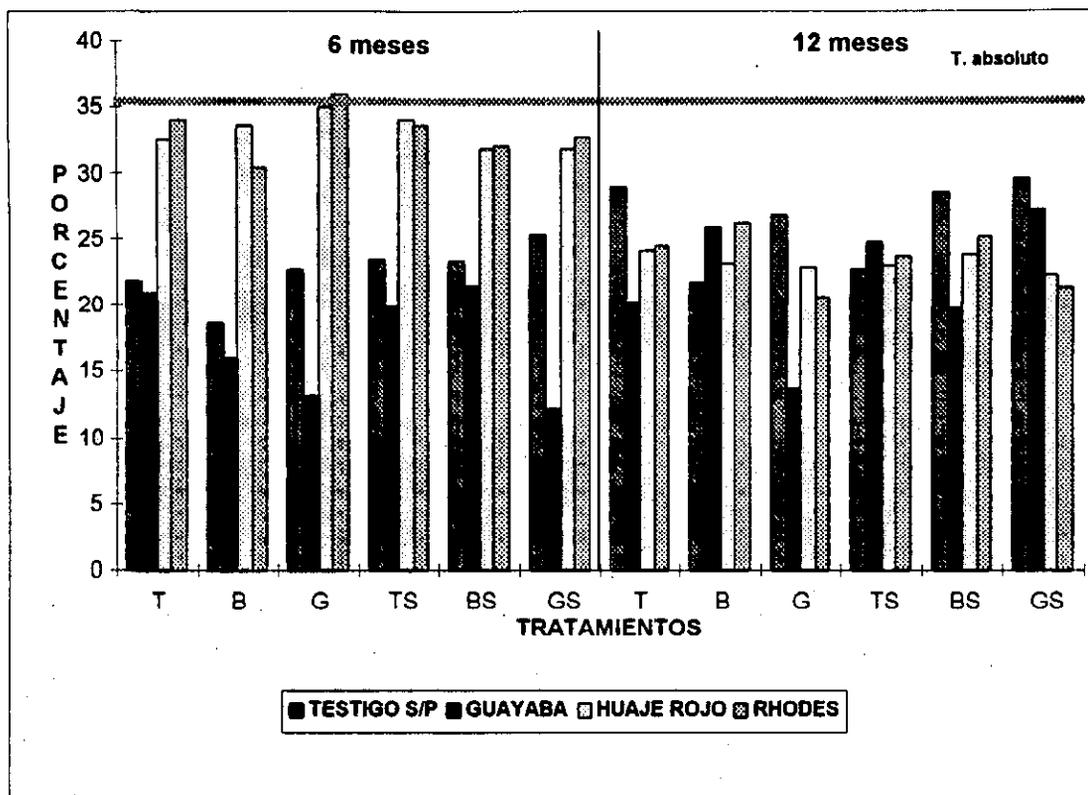


Figura 40. Agregados de 2 - 7 mm en tepetate amarillo.

En la primera etapa, estas dos especies favorecen la agregación al adicionarle estiércol de gallina (Tabla 77 y 79), al relacionarlos con el testigo sin planta sus porcentajes están por arriba de éste, lo que indica la formación de agregados, además de la fragmentación y disgregación del intervalo de 7.0-12.0 mm de diámetro, que pasan a formar parte del intervalo de 2.0-7.0 mm de diámetro. Estos porcentajes decrecen para la segunda etapa llegando a tener porcentajes por debajo del testigo sin planta.

En general, en el tepetate blanco (Figura 38), se presentaron porcentajes por arriba del testigo absoluto (Tabla 81) por lo que se induce, que se presentaron procesos de fragmentación en el intervalo superior, así como, recementación por efecto de la sílice amorfa en los fragmentos menores y la formación de agregados por efectos bióticos, sin embargo, en el tepetate amarillo se presentó en mayor grado la fragmentación y disgregación del material (Figura 39).

Tabla 82.- Distribución de macroagregados en seco y húmedo, comparación de medias del tepetate amarillo, testigo sin planta.

Período	TRAT.	MACROAGREGADOS Diámetro en mm.									
		>12	10 - 12	7 - 10	5 - 7	3 - 5	2 - 3	1 - 2	0.5 - 1	0.25 - 0.5	< 0.25
<b>AGREGADOS EN SECO</b>											
6	T	6.22 b	15.82 c	27.69 bc	2.87 b	10.43 b	8.43 a	5.33 ab	7.77 a	6.56 a	8.89 a
M	B	8.97 a	25.80 a	35.00 a	3.05 b	8.92 c	6.68 b	2.97 c	3.24 c	2.02 d	3.35 b
E	G	7.96 ab	14.61 c	25.89 c	2.67 b	10.38 b	9.65 a	5.56 ab	8.35 a	6.36 ab	8.57 a
S	TS	2.92 c	18.93 b	29.11 b	3.10 b	11.11 ab	9.19 a	5.75 a	7.87 a	5.17 b	6.86 ab
E	BS	9.15 a	17.81 b	25.09 c	3.72 a	10.56 b	8.96 a	4.86 b	7.28 a	5.41 b	7.16 a
S	GS	4.58 bc	19.32 b	32.89 a	3.76 a	11.88 a	9.60 a	4.69 b	5.31 b	3.18 c	4.79 b
12	T	4.65 b	12.92 b	27.94 b	5.30 a	10.85 ab	12.82 a	5.63 c	6.61 c	5.18 c	8.09 a
M	B	5.14 b	17.71 a	31.88 a	4.56 b	8.53 c	8.45 b	5.56 c	8.26 b	4.31 d	5.60 b
E	G	3.92 b	13.30 b	26.58 b	4.75 b	9.84 b	12.11 a	6.54 b	9.81 a	6.18 b	6.96 b
S	TS	6.16 ab	12.87 b	27.85 b	5.12 ab	8.21 c	9.25 b	6.10 bc	9.09 ab	7.19 a	8.16 a
E	BS	6.04 ab	16.61 a	30.86 a	5.31 a	10.86 ab	12.33 a	5.14 c	5.53 c	3.13 e	4.19 c
S	GS	7.26 a	9.63 c	23.86 c	5.11 ab	10.96 a	13.37 a	7.37 a	9.34 ab	6.15 bc	6.96 b
<b>ESTABILIDAD EN HUMEDO</b>											
				> 5	3 - 5	2 - 3	1 - 2	0.5 - 1	0.25 - 0.5	< 0.25	
6	T			43.03 a	3.91 a	10.8 b	4.55 ab	8.77 bc	6.19 b	22.74 b	
M	B			42.95 a	2.18 c	8.48 c	3.98 b	9.01 bc	8.07 a	25.33 ab	
E	G			37.39 a	3.64 ab	13.58 a	4.66 ab	9.16 b	7.05 ab	24.53 ab	
S	TS			35.19 b	3.6 ab	11.33 b	5.19 a	11.58 a	7.64 a	25.47 ab	
E	BS			35.25 b	3.39 ab	10.27 bc	4.49 ab	11.91 a	7.65 a	27.11 a	
S	GS			42.47 a	3.2 b	10.62 b	4.31 b	7.84 c	7.05 ab	24.51 ab	
12	T			49.39 a	4.58 a	14.01 ab	5.73 bc	7.12 c	4.74 c	14.43 c	
M	B			41.21 b	4.44 a	14.61 a	6.79 a	11.85 a	5.94 b	15.15 c	
E	G			40.21 bc	3.72 b	13.32 ab	6.83 a	11.06 ab	6.91 b	17.95 bc	
S	TS			35.45 c	3.71 b	13.59 ab	5.95 b	10.33 b	6.63 b	24.36 a	
E	BS			39.34 bc	3.01 c	12.42 b	6.25 ab	11.70 a	7.47 ab	19.81 b	
S	GS			40.21 bc	3.06 bc	9.61 c	5.09 c	9.95 b	7.80 a	24.29 a	

T = Testigo

B = Estiércol de bovino

G = Estiércol de gallina

S = Solución nutritiva

#### 13a.4. DE 0.25-2.0 mm DE DIAMETRO.

Se observa en las Figuras 40 y 41, el efecto que tienen los procesos físicos, químicos y biológicos en los fragmentos de diámetro de 2.0-12.0 mm, recordemos que al inicio del experimento únicamente contábamos con fragmentos de este tamaño, pero al término se obtuvieron fragmentos y agregados menores de 2.0 mm de diámetro.

La Figura 40 muestra el comportamiento de las especies vegetales y el testigo sin planta, donde los porcentajes de las especies se presentan por arriba del testigo sin planta, es notorio el efecto de las plantas en la agregación, dándose un incremento en la segunda etapa, mientras que el testigo sin planta presentó un comportamiento estable en las dos etapas. La guayaba en la primera etapa no presentó diferencias estadísticas entre tratamientos (Tabla 75), sin embargo, para la segunda etapa, la adición de estiércol de gallina y de solución nutritiva y el estiércol de gallina promovió la agregación, estadísticamente igual pero diferente a los demás tratamientos.

El huaje rojo incrementó los porcentajes de agregación cuando se le adicionó estiércol de gallina más solución nutritiva en la primera etapa (Figura 40), estadísticamente diferente a los demás tratamientos (Tabla 77), sin embargo, para la segunda etapa, el testigo del huaje rojo mostró los porcentajes mayores, significativamente distinto a los tratamientos.

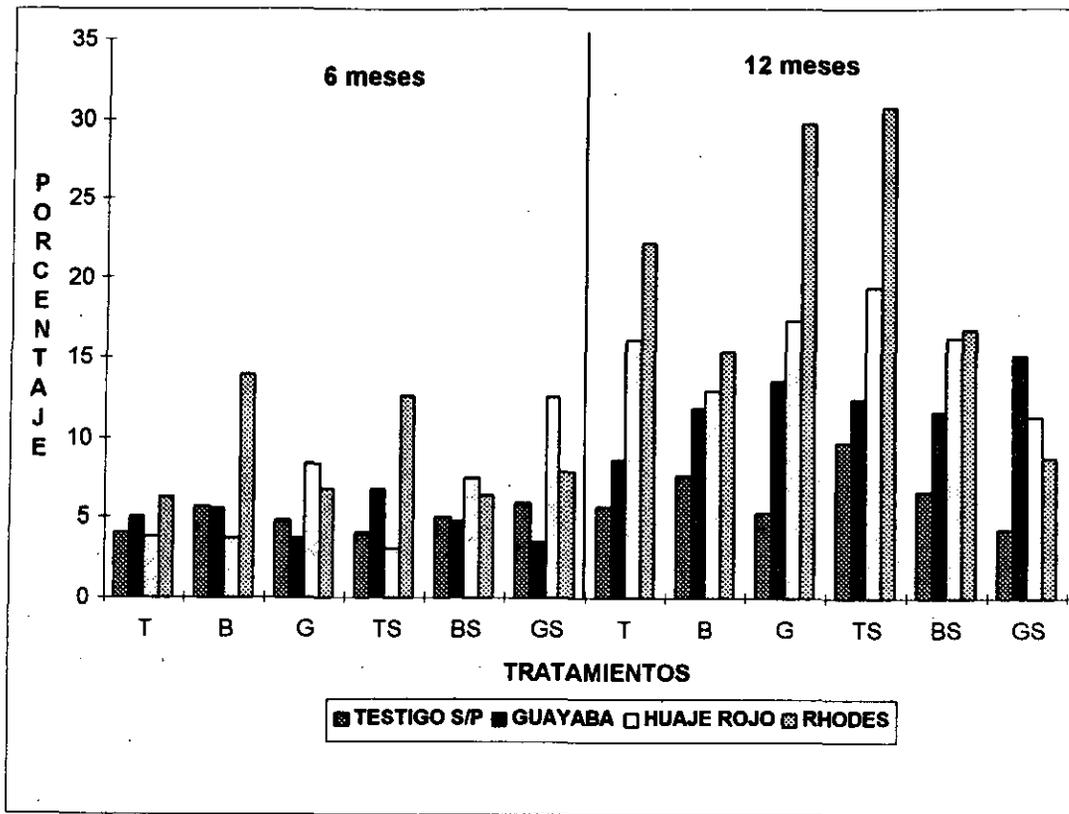


Figura 41. Agregados de 0.25 - 2 mm en tepetate blanco.

Al adicionar estiércol de bovino al pasto Rhodes, se favoreció la agregación para la primera etapa, presentando diferencias significativas con relación a los demás tratamientos (Tabla 79), sin embargo, para la segunda etapa, únicamente la adición de solución nutritiva o estiércol de gallina promovió la agregación, estadísticamente iguales.

En tepetate amarillo, el comportamiento de las especies vegetales y el testigo sin planta es muy irregular (Figura 41), en ambos períodos. En la primera etapa, se observa que las especies vegetales así como los diferentes tratamientos presentan procesos de fragmentación, agregación y disgregación, tanto de fragmentos como de agregados formados en otros intervalos mayores o menores a éste, sin embargo, para la segunda etapa se incrementaron los porcentajes de agregación al relacionarse con el testigo sin planta, por lo que, las especies vegetales promueven la agregación.

La guayaba, al adicionarse estiércol de gallina promovió la formación de agregados en la primera y segunda etapa, estadísticamente diferente a los demás tratamientos (Tabla 76). Para la primera etapa el huaje rojo, presentó valores inferiores al testigo sin planta (Figura 41), esto indica que la especie promueve en las primeras etapas la fragmentación y disgregación de agregados y fragmentos, sin embargo, al pasar el tiempo, se incrementó el porcentaje de agregación, hipotéticamente, el material fragmentado y disgregado en la etapa anterior se reorganiza y forma agregados tanto por procesos químicos y/o biológicos, sobre todo cuando se le adiciona estiércol de gallina con o sin solución nutritiva (Tabla 78).

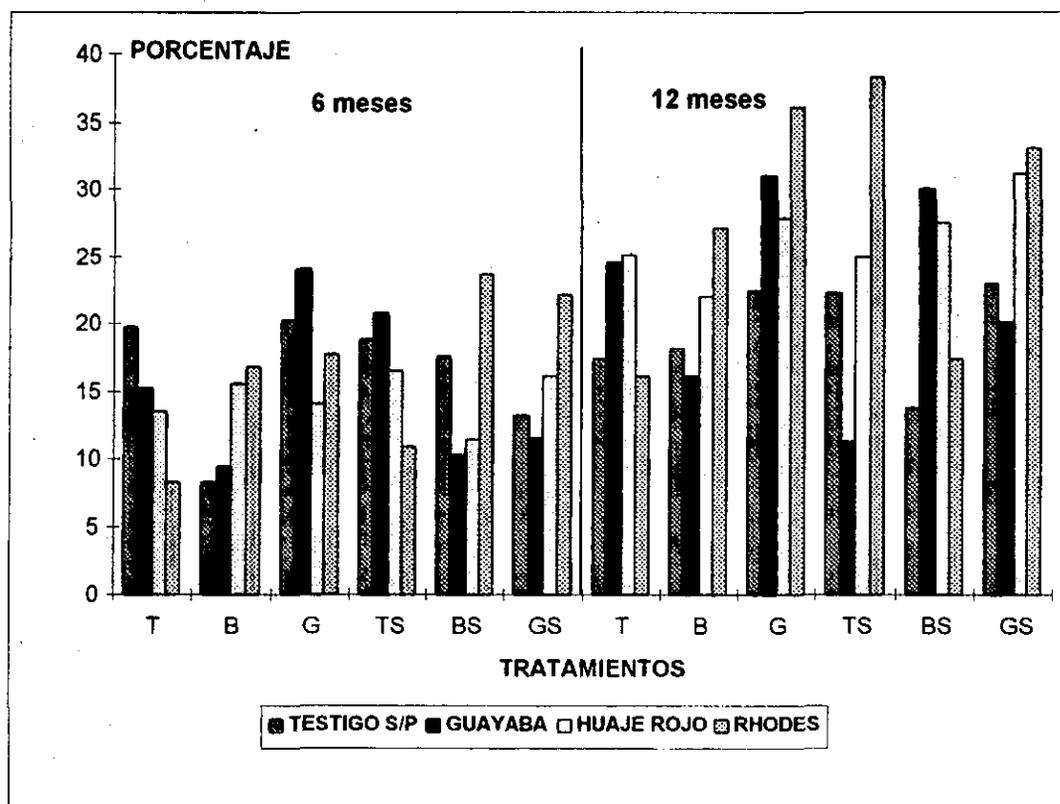


Figura 42. Agregados de 0.25 - 2 mm en tepetate amarillo.

La doble adición de fuentes nutrimentales incrementaron la agregación en el pasto Rhodes, durante la primera etapa, mientras que, a doce meses la adición de solución nutritiva la favoreció estadísticamente (Figura 41, Tabla 80).

### 13a.5. MENORES DE 0.25 mm DE DIÁMETRO

En tepetate blanco, se presentó un comportamiento estable entre tratamientos y las especies vegetales para la primera etapa (Figura 42), a excepción del pasto Rhodes al adicionarle estiércol de bovino promovió la microagregación (Tabla 79), es claro que esta especie promueve la micro y macroagregación y/o fragmentación en mayor porcentaje debido a que en el intervalo de 7.0-12.0 mm de diámetro se presentó la mayor fragmentación y disgregación del tepetate por efecto de esta especie (Figura 36), mientras que, en los otros intervalos (2.0-7.0 ; 0.25-2.0 y < 0.25 mm) se presentaron mayores porcentajes de agregación (Figuras 38, 40 y 42).

La guayaba no presentó diferencias significativas entre tratamientos en la primera y segunda etapa de evaluación (Tabla 75), mientras que, el huaje rojo y el pasto Rhodes en la segunda etapa se presentaron los porcentajes mayores de microagregados, donde el testigo sin o con solución nutritiva son estadísticamente diferente a los demás tratamientos (Tabla 77 y 79).

En tepetate amarillo, los porcentajes mayores de microagregación se presentan en la guayaba para la primera y segunda etapa cuando se le adicionó estiércol de gallina, estadísticamente diferente a los demás tratamientos (Figura 43 y Tabla 76), al relacionar las Figuras 39, 41 y 43 en guayaba, se presentó los porcentajes más bajos de la Figura 39 corresponden a los mayores porcentajes de la Figura 41 y 43, lo que indica que esta especie promueve tanto la fragmentación, agregación y disgregación de 2.0-7.0 mm de diámetro formando agregados menores de 2.0 mm de diámetro.

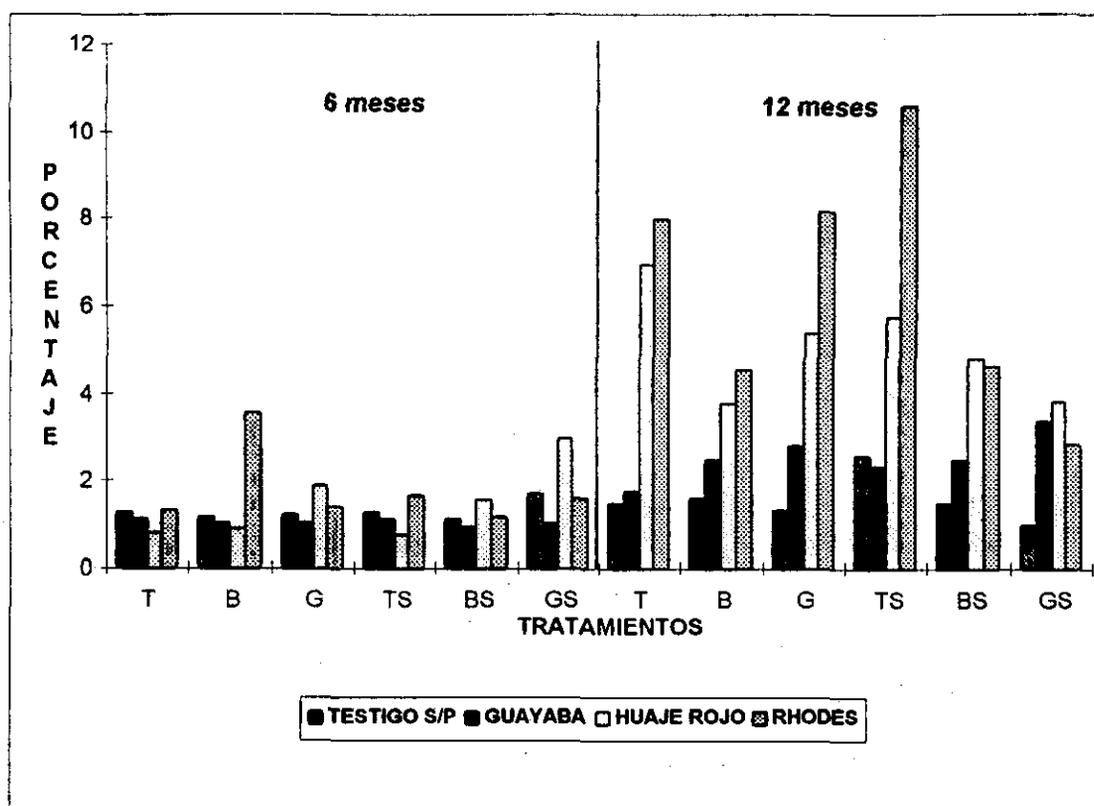
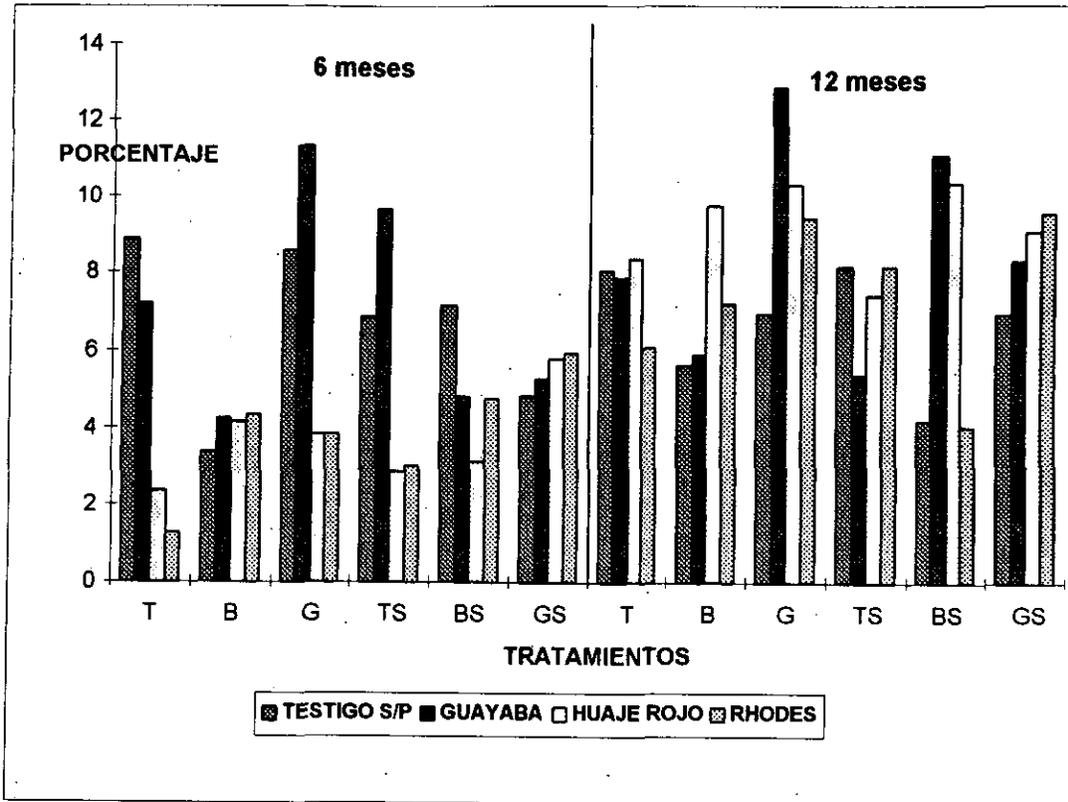


Figura 43. Agregados < 0.25 mm en tepetate blanco.

Por otro lado, el huaje rojo y el pasto Rhodes presentan porcentajes por debajo del testigo sin planta en la primera etapa, esto se explicaría, que estas dos especies promueven en menor porcentaje la fragmentación y disgregación en la primera etapa del intervalo de 2.0-7.0 mm, incrementándose esta para el segundo periodo (Figura 39), es decir, se forman agregados de 2.0-7.0 mm de diámetro por lo que resulta en un menor porcentaje de microagregados (Figura 43) para la primera etapa, a doce meses se incrementan los porcentajes de microagregación cuando se le adicionó estiércol de gallina sin o con solución nutritiva (Tablas 78 y 80).

En forma general, la guayaba incrementó los agregados mayores de 12 mm de diámetro en tepetate amarillo, siguiendo en importancia el pasto Rhodes y por último el huaje rojo, mientras que en tepetate blanco el pasto Rhodes incrementó estos agregados a doce meses, a diferencia de las otras especies.



**Figura 44. Agregados < 0.25 mm en tepetate amarillo.**

En las tablas de 6 a 13 se observa que los porcentajes de macroagregados entre 0.25-2.0 mm y los de microagregados no son altos en el tepetate blanco, mientras que en el tepetate amarillo esto puede considerarse como un resultado negativo, ya que varios autores mencionan que solamente los macroagregados del tamaño de 2.0 a 10.0 mm proporcionan las propiedades físicas consideradas como positivas para el crecimiento de los cultivos.

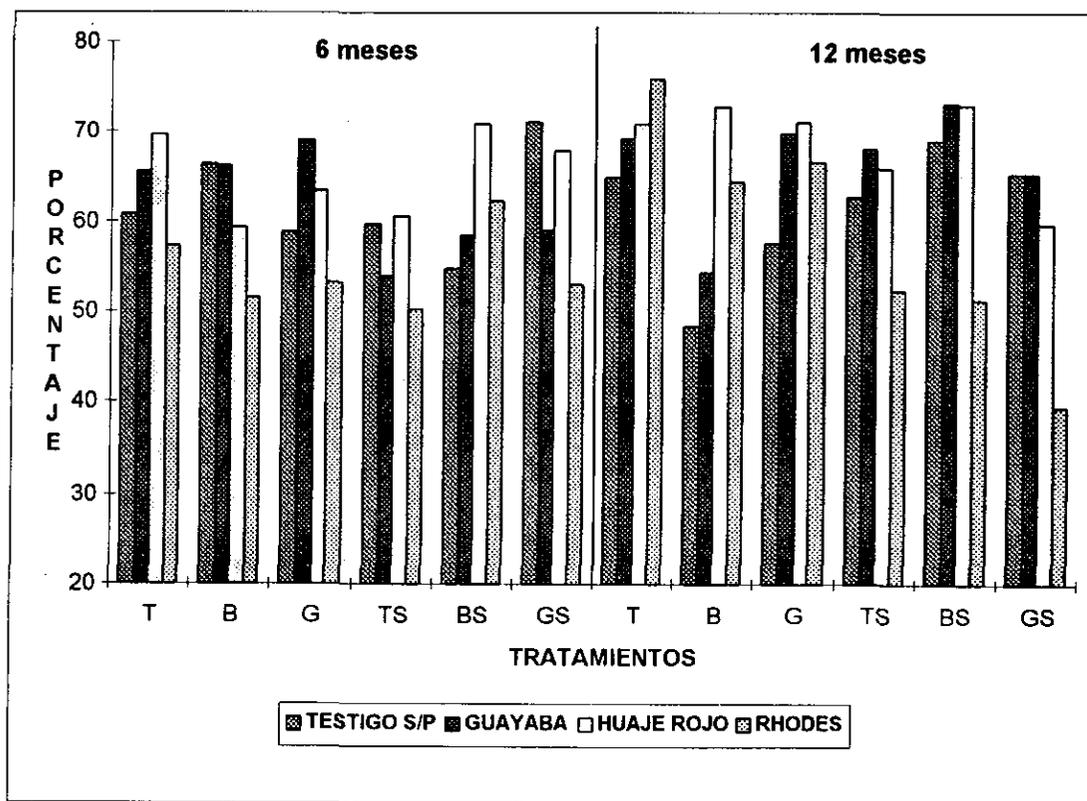


Figura 45. Efecto de agregación por empaquetamiento de raíces de guayaba.

### 13.b. Estabilidad de agregados en humedo

#### 13b.1. MAYORES DE 5 mm DE DIÁMETRO

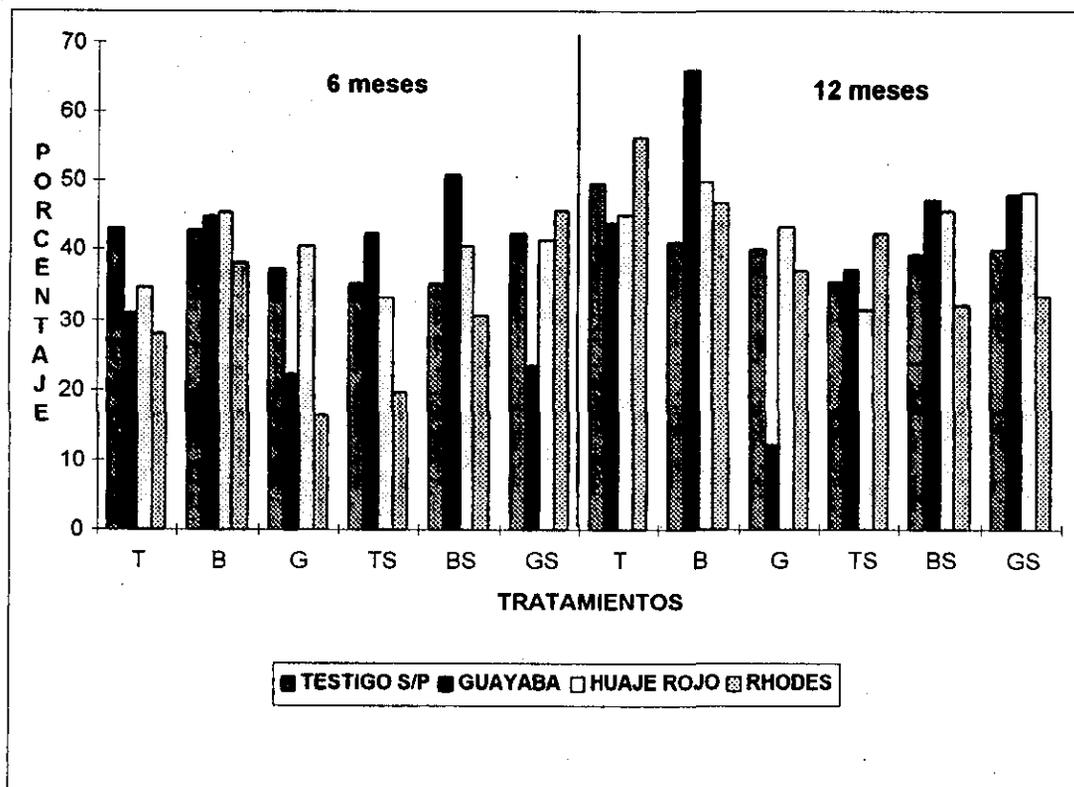
La Figura 45 muestra la estabilidad de agregados en húmedo por efecto de las especies vegetales y de los tratamientos en tepetate blanco, donde la guayaba y el huaje rojo promovieron la formación de agregados estables, tanto en la primera como en la segunda etapa, no se presentaron diferencias significativas entre el testigo de cada especie con relación a los tratamientos donde se adicionó alguna fuente nutrimental (Tabla 75 y 77); mientras que, el pasto Rhodes presentó menor estabilidad de sus agregados en la primera y segunda etapa, cuando se aplicó estiércol de gallina más solución nutritiva (Figura 45). El testigo del pasto Rhodes sobresalió estadísticamente en la primera y segunda etapa con relación a los demás tratamientos (Tabla 79).



**Figura 46. Estabilidad de agregados > 5 mm en tepetate blanco.**

La Figura 46 muestra la estabilidad de agregados mayores de 5.0 mm de diámetro, en tepetate amarillo, que presentó menor porcentaje al compararse con el tepetate blanco, la guayaba favorece la estabilidad de agregados al adicionar estiércol de bovino con o sin solución nutritiva en la primera y segunda etapa respectivamente, sus porcentajes son estadísticamente diferentes al resto de los tratamientos (Tabla 76).

El huaje rojo presentó la mayor estabilidad de agregados al adicionar alguna fuente nutrimental en relación al testigo con planta (Tabla 78), a diferencias del pasto Rhodes, el testigo incrementó los porcentajes de estabilidad de los agregados en húmedo, estadísticamente diferente a los demás tratamientos en la segunda etapa (Tabla 80).



**Figura 47. Estabilidad de agregados > 5 mm en tepetate amarillo.**

Se observa en la Figura 46, que el pasto Rhodes en los primeros seis meses, se presentó poca estabilidad de los agregados, pero al transcurrir el tiempo, estos se incrementan hasta en un 20%.

### 13b.2. DE 3.0-5.0 mm DE DIÁMETRO

En la primera etapa, el testigo de la guayaba promovió la mayor estabilidad de los agregados (Figura 47), en tepetate blanco, estadísticamente diferente a los demás tratamientos (Tabla 75), sin embargo, a los doce meses la adición de estiércol de bovino incrementó la estabilidad, decreciendo el porcentaje del testigo con planta.

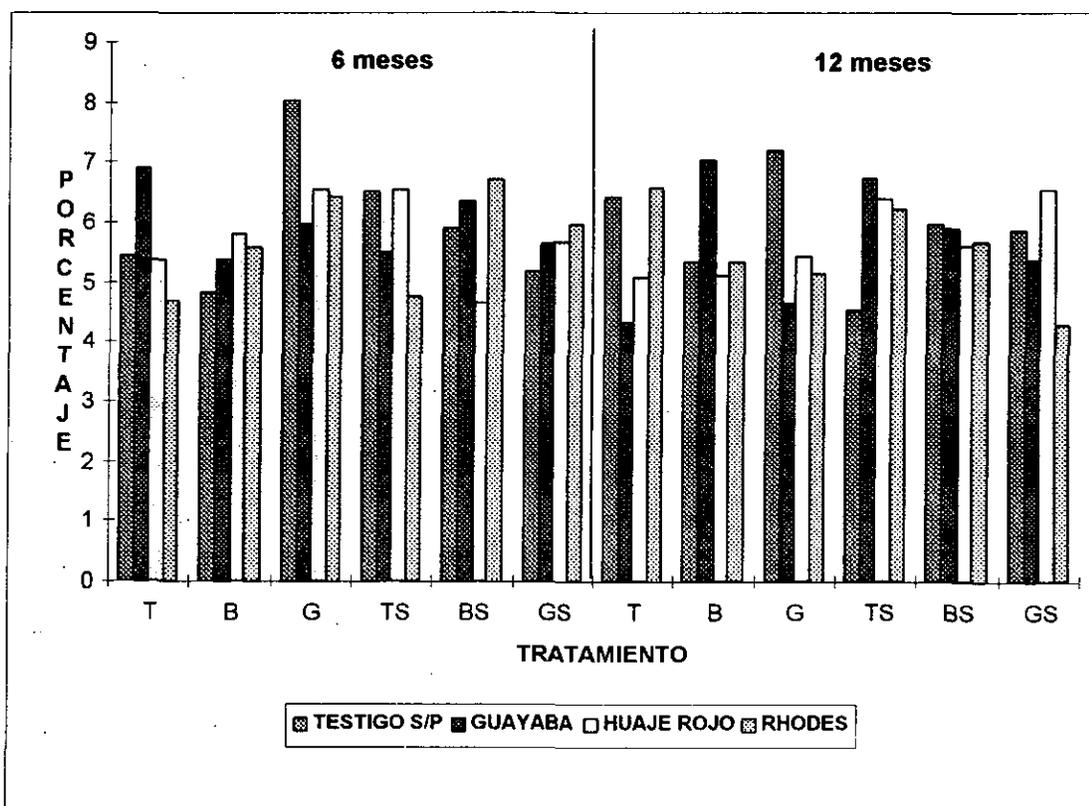


Figura 48. Estabilidad de agregados de 3 - 5 mm en tepetate blanco.

El huaje rojo favoreció la estabilidad en húmedo, cuando se le aplicó estiércol de gallina sin o con solución nutritiva a los seis y doce meses respectivamente (Tabla

77), mientras que, el pasto Rhodes, el testigo con planta fue estadísticamente diferente a los demás tratamientos para la segunda etapa (Tabla 79).

Es importante hacer notar que la mayor estabilidad de los agregados en húmedo en tepetate blanco se presentó en los primeros seis meses, tanto para el intervalo > 5.0 y de 3.0-5.0 mm de diámetro, cuando no se adicionó alguna fuente nutrimental.

La guayaba, en tepetate amarillo incrementó la estabilidad cuando se le aplicó estiércol de gallina mas solución nutritiva (Tabla 76), mientras que, el huaje rojo promovió la mayor estabilidad cuando se le adicono estiércol de gallina sin o con solución nutritiva, tanto para la primera y segunda etapa de evaluación (Figura 48, Tabla 78).

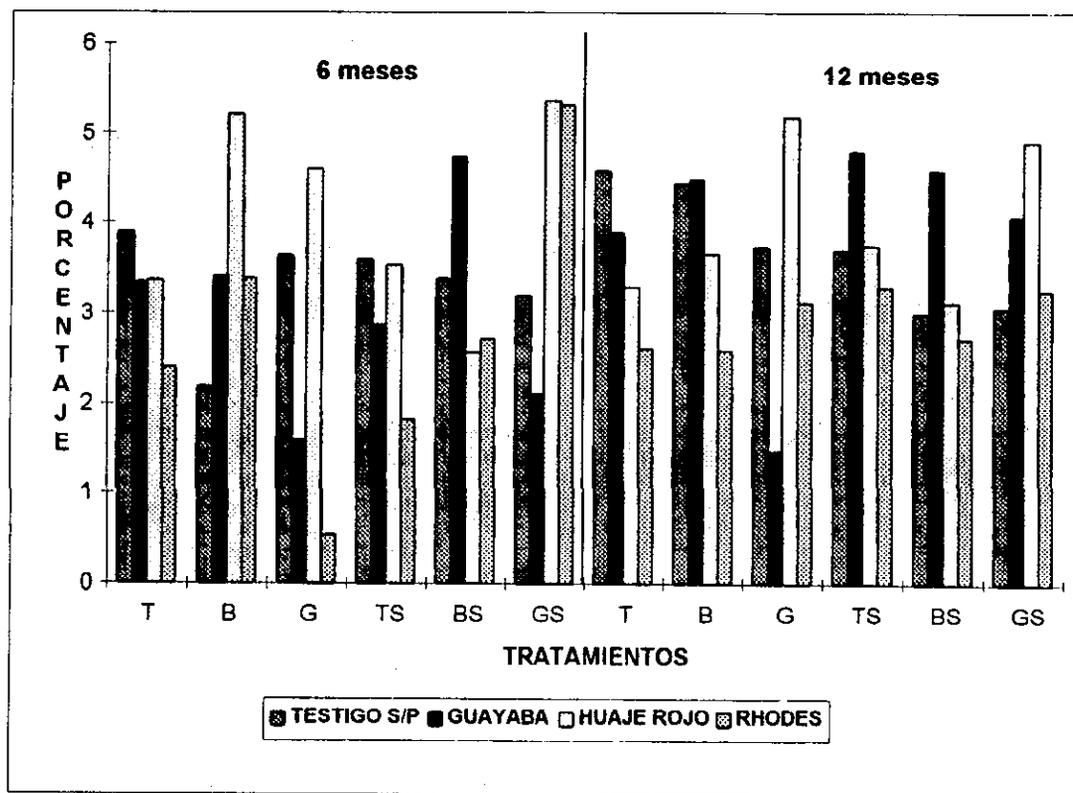


Figura 49. Estabilidad de agregados de 3 - 5 mm en tepetate amarillo.

Por otro lado, el pasto Rhodes presentó una menor estabilidad a los seis meses en todos los tratamientos con excepción del tratamiento con estiércol de gallina mas solución nutritiva, estadísticamente diferente al resto de los tratamientos (Tabla 80), sin embargo, a doce meses se tuvo un comportamiento estable entre tratamientos (Figura 48).

**13b.3. DE 2.0-3.0 mm DE DIÁMETRO**

El porcentaje de estabilidad de agregados de este intervalo en tepetate blanco decrece de seis a doce meses en la guayaba, a excepción del tratamiento donde se adicione estiércol de bovino (Tabla 75), que presentó un incremento en la estabilidad de sus agregados, mientras que, el huaje rojo promovió la formación de agregados estables cuando se le aplicó estiércol de gallina mas solución nutritiva a los doce meses (Figura 49, Tabla 77).

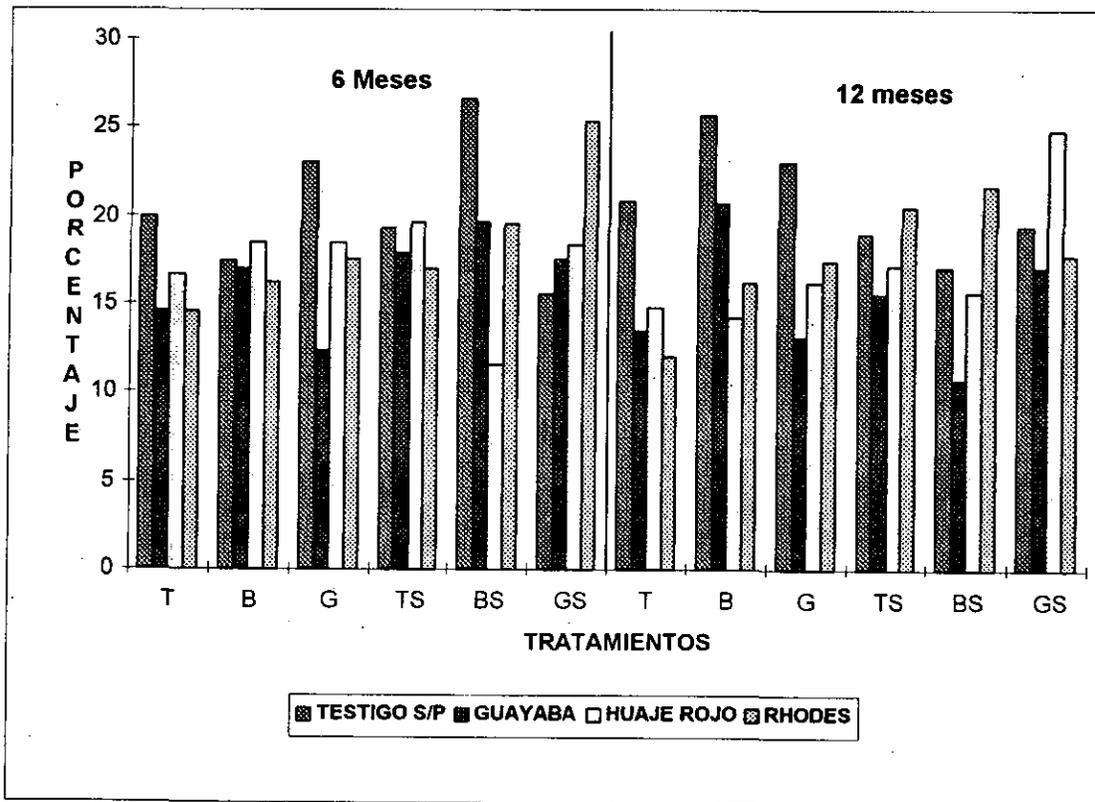


Figura 50. Estabilidad de agregados de 2 - 3 mm en tepetate blanco.

Por otro lado, el pasto Rhodes incrementó la estabilidad cuando se le adicionó estiércol de gallina más solución nutritiva a seis meses, decreciendo este porcentaje a los doce meses (Figura 49), la doble fertilización (bovino más solución nutritiva), aumentó la estabilidad, estadísticamente semejante al tratamiento con solución nutritiva, pero diferente a los demás tratamientos (Tabla 79).

Para tepetate amarillo, la estabilidad de agregados decreció al adicionar alguna fuente nutrimental con respecto al testigo de la guayaba en los primeros seis meses, exceptuando al tratamiento con estiércol de bovino más solución nutritiva, sin embargo, a los doce meses, la adición de solución nutritiva sola o con estiércol de gallina promovió la formación de agregados estables (Tabla 76). Por otro lado, el huaje rojo y el pasto Rhodes al adicionarse estiércol de gallina sin o con solución nutritiva incrementó la estabilidad de agregados a los seis y doce meses (Figura 50, tablas 78 y 80).

El huaje rojo promovió la formación de agregados de 2.0-3.0 mm de diámetro, en relación a las otras dos especies vegetales en tepetate amarillo.

Hasta este momento no se ha hablado del testigo sin planta, esto se debe a que la mayoría de los resultados presentados en las gráficas, tanto en tepetate blanco y amarillo corresponden principalmente a fragmentos en su mayoría y un menor porcentaje de agregados, la mayor parte de los tratamientos el testigo sin planta se encuentra por arriba de los porcentajes obtenidos por efecto de las especies vegetales, esto indica que las plantas, promueven la fragmentación del material original, la formación de agregados y la disgregación de estos, formándose así agregados estables en húmedo.

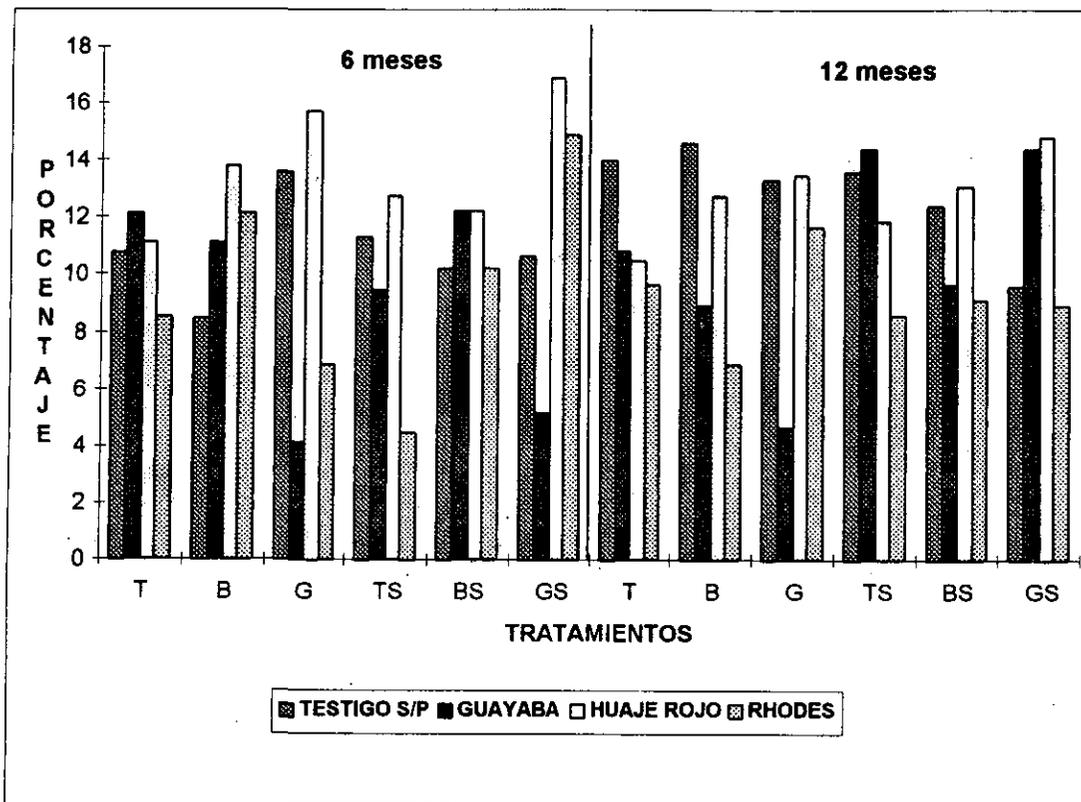


Figura 51. Estabilidad de agregados de 2 - 3 mm en tepetate amarillo.

13b.4. DE 0.25-2.0 mm DE DIÁMETRO

A diferencia de los intervalos anteriores, el pasto Rhodes promovió la formación de agregados estables en húmedo en tepetate blanco cuando se aplicó solución nutritiva en los primeros seis meses, estadísticamente diferente a los demás tratamientos (Tabla 79), sin embargo a doce meses, al adicionar estiércol de gallina mas solución nutritiva aumentó la estabilidad (Figura 51).

En el intervalo de 0.25-0.5 mm de diámetro, no se presentó diferencias significativas entre tratamientos para seis y doce meses en la guayaba (Tabla 75), mientras que el huaje rojo no presentó diferencias estadísticas en el intervalo de 0.25-1.0 mm (Tabla 77).

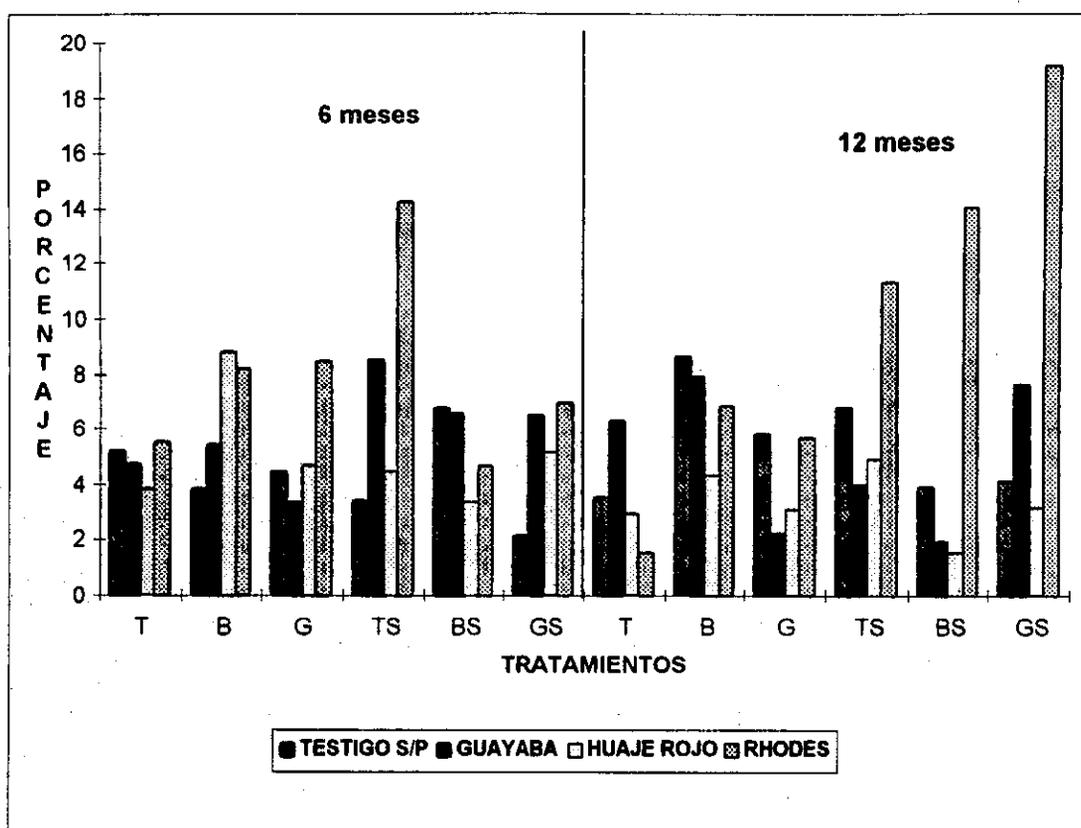


Figura 52. Estabilidad de agregados de 0.25 - 2 mm en tepetate blanco.

La formación de agregados estables en tepetate amarillo se vió favorecida con la guayaba cuando se le adicionó estiércol de gallina a los seis y doce meses (Figura 52, Tabla 76), mientras que, en el huaje rojo, al aplicar solución nutritiva se incremento la estabilidad a doce meses. El pasto Rhodes no presentó diferencias estadísticas los tratamientos a los seis meses, exceptuando cuando se le aplicó estiércol de gallina más solución nutritiva donde se presentó la menor estabilidad, pero a doce meses se incremento la estabilidad al aplicar estiércol de bovino y gallina, ambos con solución nutritiva (Figura 52).

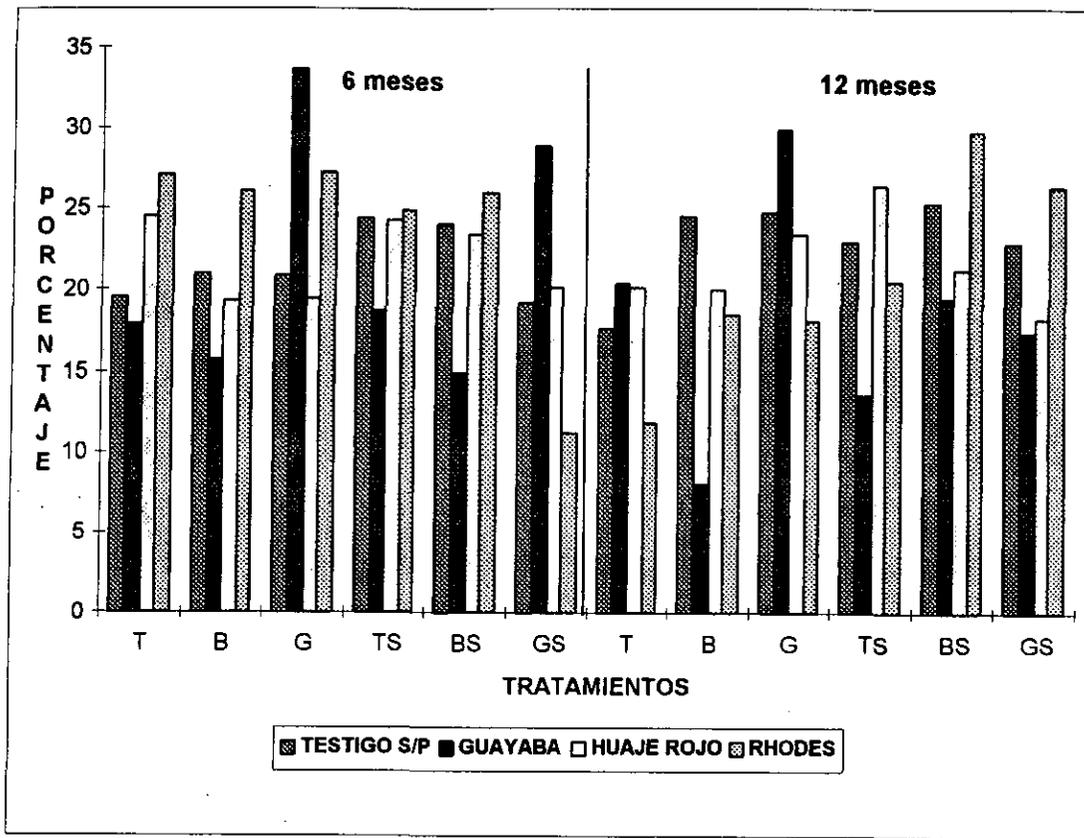
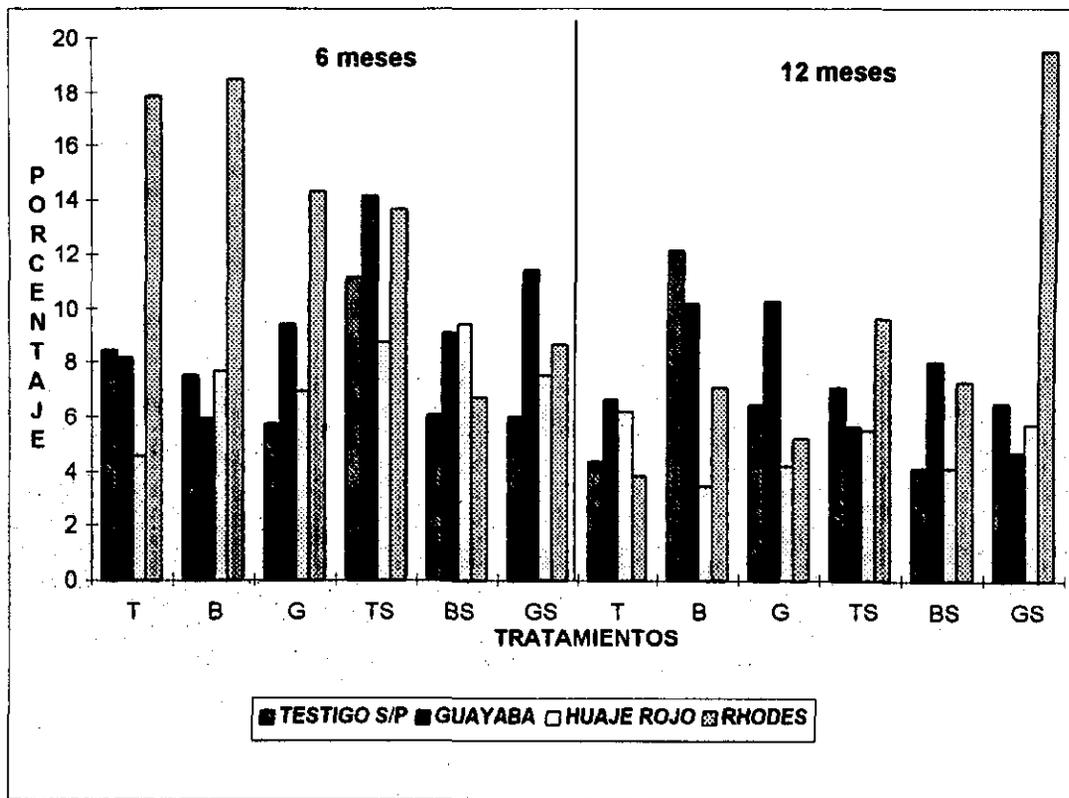


Figura 53. Estabilidad de agregados de 0.25 - 2 mm en tepetate amarillo.

13b.5. MENORES DE 0.25 mm DE DIAMETRO

La guayaba en tepetate blanco promovió la estabilidad de los microagregados al adicionar solución nutritiva a seis meses, pero decrece a doce meses (Figura 53), pero al aplicarle estiércol de bovino o de gallina se incrementa la estabilidad de estos (estadísticamente semejantes, Tabla 75).

Para el caso del huaje rojo, no se dieron diferencias significativas entre tratamientos a doce meses, sin embargo, se observa un decremento en la estabilidad de seis a doce meses, con excepción del testigo con planta que lo incrementó, esto indica, que a los doce meses se presentó un rearrreglo de los microagregados, dando lugar a agregados de diámetro mayor (Tabla 77).



**Figura 54. Estabilidad de agregados < 0.25 mm en tepetate blanco.**

El pasto Rhodes, al adicionarle alguna fuente nutrimental se reduce la estabilidad de los agregados a seis meses, sin embargo, a doce meses se incrementa la estabilidad de los microagregados con la adición de estiércol de gallina mas solución nutritiva (Figura 53, Tabla 79), nuevamente se observo una reducción en la estabilidad de los microagregados de seis a doce meses, con excepción de este último tratamiento.

En el caso del tepetate amarillo (Figura 54), al adicionar estiércol de gallina en la guayaba se promovió la estabilidad de microagregados a seis y doce meses, los cuales son estadísticamente diferente a los demás tratamientos (Tabla 76).

Al adicionar estiércol de bovino o de gallina al huaje rojo se redujo la estabilidad de los microagregados con relación al testigo con planta (Figura 54),

esto indica que ambas fuentes orgánicas promueven la reorganización de los microagregados formándose así agregados mayores de 0.25 mm de diámetro.

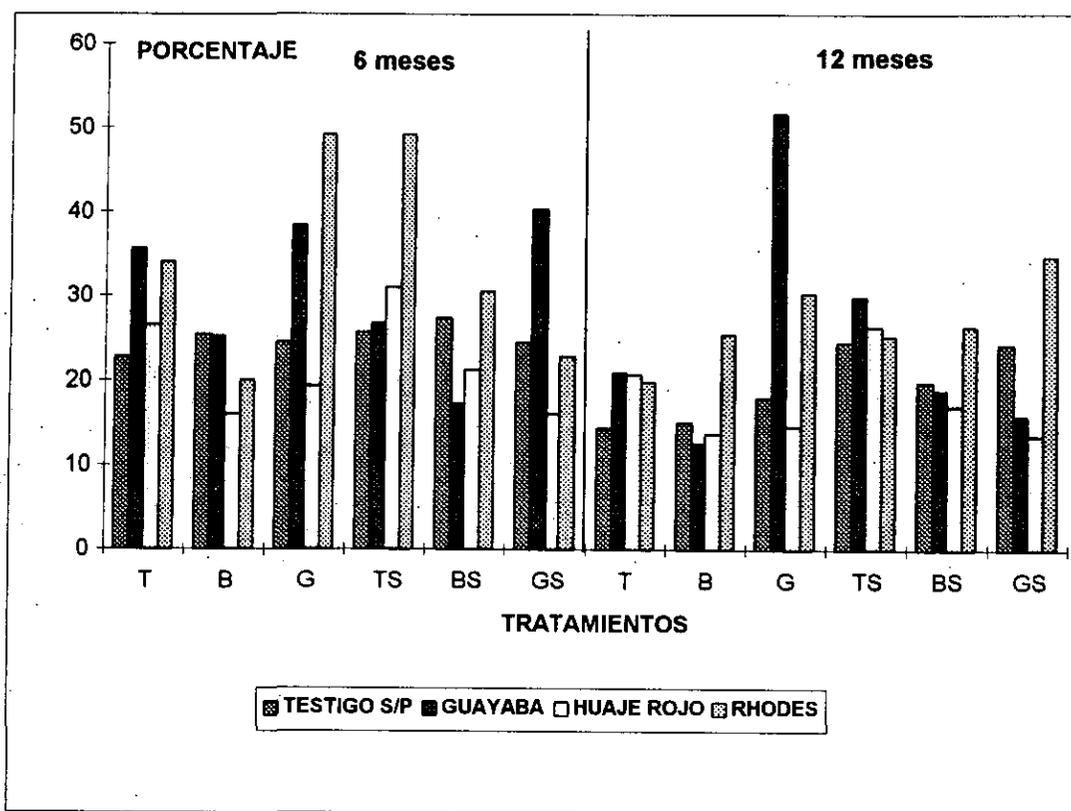


Figura 55. Estabilidad de agregados < 0.25 en tepetate amarillo.

Por otro lado, el pasto Rhodes incrementa la estabilidad de microagregados al adicionarle estiércol de gallina y solución nutritiva a seis meses (Figura 54), estadísticamente iguales, pero diferente a los demás tratamientos (Tabla 80), pero estos disminuyen a doce meses, a excepción del tratamiento con estiércol de gallina mas solución nutritiva, que incremento la estabilidad de los microagregados.

## CAPITULO XIV

### *14. Análisis y conclusiones de la agregación y disgregación.*

#### **14.a. Análisis general en agregados en seco y húmedo.**

En forma general, el tepetate blanco tuvo un incremento en la estabilidad de macroagregados en húmedo ( $> 5.0$  y de  $2.0-3.0$  mm de diámetro), que en el tepetate amarillo, donde se incrementó la microagregación ( $< 0.25$  mm), y agregados de  $0.25-1.0$  mm de diámetro; a la vez también presentó estabilidad de agregados de  $2.0-3.0$  mm, esto se debe en gran parte a la naturaleza mineralógica y grado de alteración del material.

De acuerdo a los resultados, se observa que tanto en el tepetate blanco como el amarillo, se presentaron procesos de fragmentación, agregación y disgregación, donde el primer proceso es un paso indispensable para que se den los otros dos, aunque cabe mencionar que estos procesos se realizan de manera simultánea.

El pasto Rhodes promovió la formación de microagregados estables en tepetate blanco, siguiendo en importancia la guayaba y el huaje rojo, la estabilidad de estos disminuye de seis a doce meses, esto se debe a la reorganización de los microagregados, que a la vez forman agregados estables en húmedo  $> 0.25$  mm, ya sea por empaquetamiento de raíces, o por uniones organo-minerales o por una recementación de la sílice amorfa y/o sesquióxidos; por otro lado, las tres especies vegetales incrementaron la estabilidad de los macroagregados ( $> 5.0$  y de  $2.0-3.0$  mm de diámetro). Con respecto al testigo sin planta y al absoluto, existen diferencias significativas, esto indica que, efectivamente, existe una influencia de las plantas sobre ambos materiales.

El tepetate amarillo en húmedo bajo todos los tratamientos estudiados, los macroagregados estables al agua se concentraron en la fracción con diámetros de 0.25 - 1.0 mm y como microagregados (< 0.25 mm). Los porcentajes de los macroagregados de estos diámetros fueron mas altos en comparación con los obtenidos en el análisis en seco. Esto indica que tuvo macroagregados del tamaño considerados como agronómicamente válidos pero inestables en agua, siendo esta una característica desfavorable.(Oleschko 1997, comunicación personal)

El incremento en el porcentaje de microagregados en el tepetate amarillo en húmedo en comparación con el seco, se puede explicar como un incremento del riesgo de erosión al humedecerse este material. Martínez (1987) citado por Osorio (1995), menciona que los agregados con tamaños de 0.05 a 0.25 mm son los mas expuestos a la erosión hídrica. A diferencia del tepetate amarillo, el blanco presentó una mayor estabilidad de macroagregados y un menor porcentaje de microagregados, similares resultados presentan Carter y Mele (1992), donde muestran una significativa estabilidad de agregados de 2 - 10 mm de diámetro. De acuerdo a los resultados obtenidos por Lal y Greenland (1979), indican que los tamaños que mas problemas presentan son los < 2.0 mm, y que el rango ideal de tamaño de agregado fue de 10-50 mm. Es importante hacer notar, que en el tepetate amarillo aunque se presentó un mayor porcentaje de microagregados, a su vez se produjeron los porcentajes mayores de agregados > 12 mm de diámetro a diferencia del tepetate blanco.

Como se observó cada especie presentó un crecimiento radical característico que favoreció de una u otra forma a la fragmentación, agregación y disgregación de ambos materiales, mejorándose las propiedades físicas (distribución del tamaño de partículas, densidad aparente, estructura, agregación, distribución de poros, aireación, retención de agua, etc.) de los tepetates, Bathke *et al.*, (1992), mencionan

que se ha logrado mejorar suelos con capas duras por la capacidad de penetración de las raíces de especies vegetales principalmente de pastos y plantas perennes. Las raíces ejercieron presión sobre los fragmentos con su crecimiento provocando una presión en cada unidad separándolo, además las raíces al absorber agua, causa una deshidratación diferencial, contracción y abertura de numerosas y pequeñas grietas en los fragmentos, además una reorganización de la arcilla caracterizada por una orientación y compactación de las partículas de arcilla, por lo que las raíces y los organismos asociados a ellas juegan un papel importante en los cambios de agregación y estabilidad de los mismos (Reid y Goss 1981, Dorioz et al., 1993).

La incorporación de materia orgánica favoreció la formación de agregados y la estabilidad de estos en húmedo, tal como lo reportan Dinell *et al.*, (1991); Tisdall y Oades, (1982). El estiércol de gallina promovió en mayor porcentaje la agregación en ambos materiales que el bovino, combinándose con cationes metálicos polivalentes y precipitación de sales (Nadler y Steinberger, 1993), y componentes inorgánicos amorfos (Turchenek y Oades 1978 citados por Reid y Goss 1981). Al respecto Kononova (1982), menciona que los abonos orgánicos que contienen proporciones elevadas de calcio (humatos de calcio) y otros cationes divalentes, como es el caso del estiércol de gallina en este experimento, forma uniones entre ellas y con los componentes minerales de la fase sólida, dando como resultado complejos arcilla-humus, formándose así agregados. Es importante asentar que también con la adición de abonos orgánicos se incremento la actividad microbiana donde varios autores la asocian también como un factor en la estabilidad de agregados y la estructura del suelo. Esta agregación la realizan por mecanismos complejos como la adsorción, por envolturas o enrollamiento físico o por cementación por secreciones de productos mucilaginosos (Beare *et al.*, 1994; Tisdall y Oades, 1982; Rovira y Greacen, 1957; Lynch, 1984 ; Perfect y Kay, 1990; Hillel, 1982).

Por su parte el tepetate amarillo, presentó una mayor fragmentación y disgregación que el tepetate blanco, debido al mayor grado de alteración que presenta, las fracciones menores de 2.0 mm de diámetro se incrementan de 6 a 12 meses. De acuerdo a los resultados obtenidos el pasto Rhodes promovió la mayor formación de agregados en estos materiales, debido a ser mas susceptible a la alteración por las especies vegetales, ya que se trata de un material menos consolidado o es un material mas intemperizado que ha estado expuesto a fuertes procesos de alteración relacionado a factores climáticos actuales (Flores *et al.*, 1996). Lo anterior se apoya, además, en la mineralogía y la determinación de óxidos totales y libres de dichos tepetates, donde la presencia de haloisita domina en el tepetate amarillo como resultado de la alteración del vidrio volcánico y otros minerales silícicos, aspecto que no se observa en el tepetate blanco. Con respecto a los óxidos totales de  $\text{SiO}_2$ , en el tepetate amarillo se registraron valores menores que en el blanco, así mismo, los óxidos libres de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  fueron mayores en el amarillo en relación al blanco. Esto se explica por la mayor liberación de la sílice en el amarillo cuando se dieron los procesos de alteración y por el contrario los procesos de alteración limitada en el blanco, han permitido la presencia de porcentajes altos de óxidos totales de sílice y menores cantidades de óxidos libres.

Quantin *et al.*, 1993, establecen que los fragmentos de 3.4 a 2.4 mm de diámetro constituyen el agregado óptimo, estabilidad del 98% y que una fragmentación mas fina seria peligrosa para la estabilidad de los agregados. Para el presente trabajo los agregados mas estables en húmedo se presentaron en la fracción de 2 a 3 mm, mientras que en seco los óptimos fueron de 5 a 7 mm considerándose estos intervalos como los mejores agronómicamente.

La fragmentación y disgregación del material sufre una reorganización o agrupamiento que da como resultado la formación de micro y macroagregados en todos los intervalos analizados. La influencia de las especies vegetales en la

fragmentación, agregación y disgregación de ambos materiales esta basada principalmente en las características morfofisiológicas del sistema radical y del efecto de los organismos relacionados a ellos. El pasto Rhodes fue la especie que presentó mayor agregación y disgregación, cuyo sistema radical es fascicular y en consecuencia, no solo abarca una área mayor que la raíz axonomorfa de las arbóreas, sino que al ser muy densa, intensifica los efectos de disgregación mecánica por crecimiento radical, agregación física por empaquetamiento y química por producción de sustancias mucilaginosas (Velázquez, 1994, 1997; Acevedo y Flores 1996).

La participación de la biota del suelo es de suma importancia ya que los restos orgánicos como tales no influyen en la agregación, sino que esta se lleva a cabo mediante los productos intermedios del proceso (Primavesi, 1980). De tal manera que, la formación y estabilidad de los agregados depende de la calidad y tipo de compuestos orgánicos presentes, siendo los carbohidratos y el humus los principales promotores de la agregación debido a su alta capacidad de formación de complejos, tanto con otras moléculas orgánicas como con la fracción mineral (Kononova, 1982).

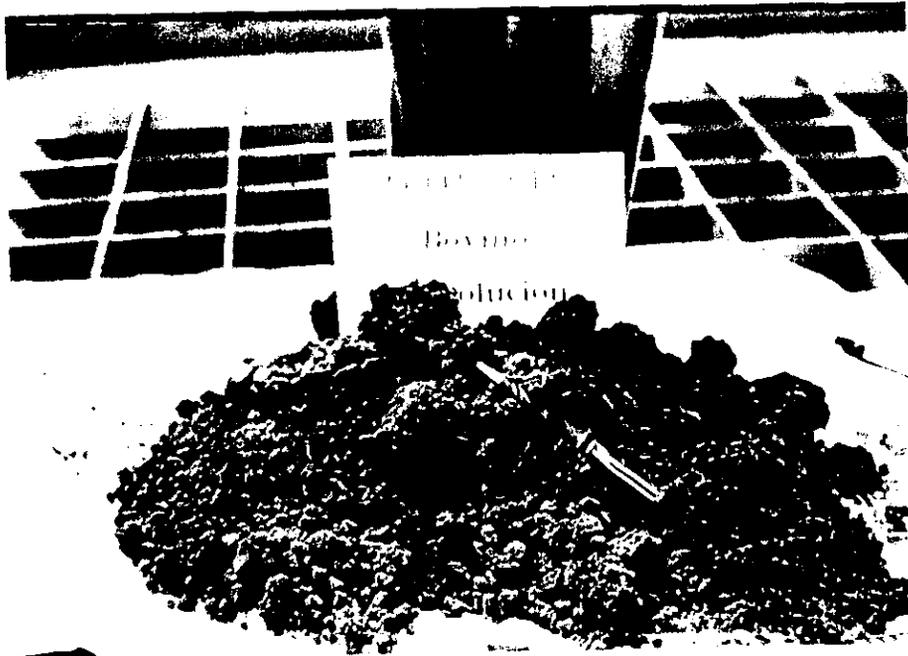
En el presente estudio, en los dos tipos de tepetate, el estiércol de gallina favoreció la mayor agregación que el de bovino, debido principalmente a su composición química. El estiércol de gallina presenta una mayor cantidad de elementos, de los cuales, el calcio y otros divalentes actúan como puentes de unión entre las moléculas minerales y orgánicas, incrementándose así la formación de complejos órgano-minerales que dan como resultado una mayor agregación. El estiércol de bovino también presenta una buena disponibilidad de nutrientes, pero en menor cantidad. Los menores porcentajes de agregación observados en este trabajo, se presentaron en aquellos tratamientos en los que no se le adiciono ninguna fuente de materia orgánica.

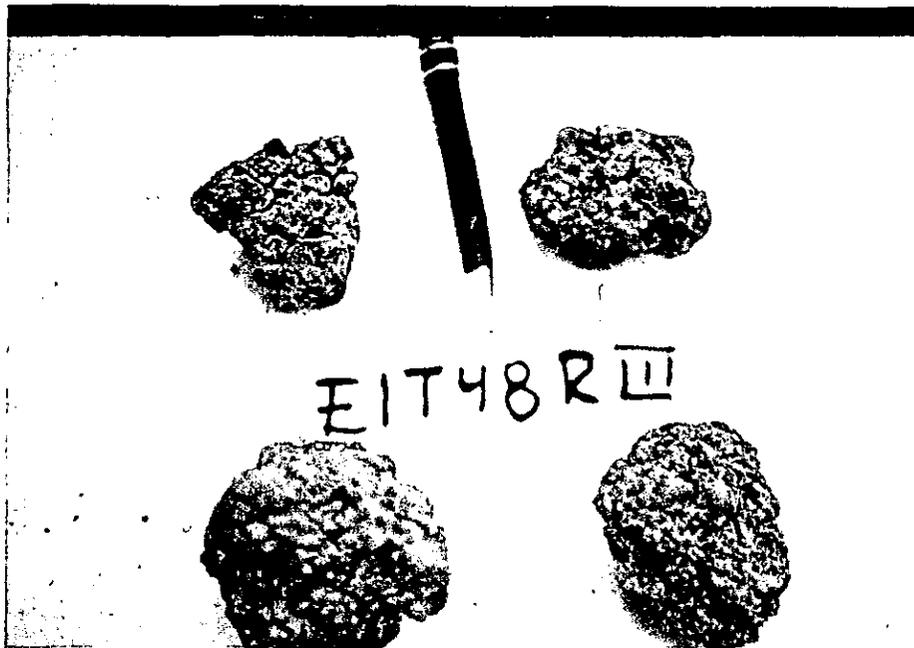
En el caso de la solución nutritiva, su efecto, de acuerdo a los resultados, fue proporcionar nutrimentos a las especies vegetales favoreciendo su desarrollo y con ello su actividad sobre el tepetate, pero no promueve la formación de agregados por su propia composición como tal.

#### 14.b. Conclusiones.

- Las tres especies vegetales juegan un papel predominante en la fragmentación, agregación y disgregación en ambos tepetates.
- Los agregados menores de 2.0 mm son el resultado de las fracciones residuales de los fragmentos mayores y de su reorganización.
- La planta de guayaba se caracterizó por promover la agregación en las primeras etapas.
- Se comprobó que el pasto Rhodes fue la especie que más contribuyó a los procesos de agregación y disgregación en los dos tepetates.
- El huaje rojo presentó un ligero efecto sobre la agregación y disgregación en ambos tepetates.
- El estiércol de gallina promovió una mayor agregación en relación al de bovino.
- No hubo efecto directo de la solución nutritiva en los procesos de agregación-disgregación.
- El tepetate amarillo presentó mayor susceptibilidad a los procesos de agregación y disgregación.
- Los fragmentos más susceptibles a la disgregación y alteración fueron de 7.0 a 12.0 mm.
- Los fragmentos de 3 a 7 mm resultaron ser los mas estables.
- No existe efecto significativo directo de las especies vegetales sobre los agregados menores de 0.5 mm.
- Por la naturaleza de los tepetates se presentan procesos de recementación independientemente de los procesos biológicos, así como la interacción de ambos.

- Se considera que los fragmentos de 3.0 a 7.0 mm son los más indicados en estudios tendientes a la rehabilitación de tepetates.
- Los porcentajes mayores de agregación en seco se obtuvieron en el intervalo de 7.0 a 10.0 mm con guayaba en el TB y con huaje rojo y pasto Rhodes en el TA.
- El efecto combinado de especies vegetales y abonos orgánicos, favoreció la estabilidad en húmedo de los agregados de 2.0 a 5.0 mm y menores de 1.0 mm.
- Los abonos orgánicos incrementaron la estabilidad en húmedo de los agregados menores de 0.25 mm.
- En la agregación en seco, los abonos orgánicos influyeron en los intervalos de 7.0 a 12.0 y de 0.25 a 1.0 mm.
- La mayor estabilidad en húmedo se obtuvo en los agregados mayores de 5.0 mm.





## CAPITULO XV

15. *Literatura citada*

ACEVEDO-SANDOVAL, O.A. 1997. Arcillas alofánicas e imogolita. *In*. Apuntes de curso de Cristalografía de suelos. Sociedad Mexicana de Cristalografía (ed) Adolfo Cordero Borboa. p.79-102

ACEVEDO-SANDOVAL, O.A., D. FLORES-ROMAN. 1997. Determinación de minerales amorfos en la fracción arcilla de capas endurecidas. Primer Congreso Nacional de Cristalografía. San Luis Potosí, Méx. p. 105

ACEVEDO-SANDOVAL, O.A., L. MORA-PALOMINO, D. FLORES-ROMAN. 1997. Caracterización física, química y mineralógica de suelos volcánicos endurecidos de Colombia y México. II Convención sobre la Evolución Geológica de México y Recursos Asociados. Pachuca, Hgo. Méx. p. 1

ACEVEDO-SANDOVAL, O.A., D. FLORES-ROMAN. 1996. Efecto de especies vegetales en la agregación de tepetates fracturados bajo condición de invernadero. III Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. Quito, Ecuador.

ALVAREZ-SOLÍS, J.D., R. FERRERA-CERRATO, C. ZEBROWSKI. 1992. Análisis de la microflora asociada al manejo agroecológico en la recuperación de tepetates. TERRA Vol. 10 No, Esp. Suelos Volcánicos Endurecidos.

ANGERS, D.A., A. PESANT, J. VIGNEUX. 1992, Early cropping-induced changes in soil aggregation, organic matter, and microbial biomass. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:115-119.

ARIAS, R. H. 1992. Rehabilitación de tepetates: una alternativa para la producción agropecuaria y forestal. TERRA 10 No. Esp. Suelos Volcánicos Endurecidos. 309 - 317

ARIAS, R.H., M.M.E. MIRANDA, D. GABRIELS. 1992. Dinámica de la erosión en tepetates roturados. TERRA 10 No. Esp. Suelos Volcánicos Endurecidos. 370-377.

BADGAN, A.V. 1977. Tropical pasture and fodder plants (grasses and legumes) Longman, London 475 p.

BARTOLI, F., R. PHILIPPY., G. BURTIN 1988. Aggregation in soils with small amounts of swelling clays. I. Aggregate stability. *Journal of Soil Science* 39 : 593-616.

- BATHKE, G.R., D.K. CASSEL, W.L. EARGROVE, P.M. PORTER. 1992. Modification of soil physical properties and root growth response. *Soil Science* 154(4) 316-329.
- BAVER, L.D., W.H. GARDNER., W.R. GARDNER. 1973. Física de suelos. UTEHA. México, D. F. 529 p.
- BEARE, M.H., P.F. HENDRIX AND D.C. COLEMAN. 1994. Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional- and no-tillage soils. *Soil Science Soc. Am. J.* 58 : 777-786.
- BENITEZ, M.D. 1995. Rendimiento de maíz, frijol en tepetate, en el segundo año de rehabilitación agrícola. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM. Edo. Méx. (Tesis de Licenciatura)
- BENNIE, A.T.P. 1991. Growth and mechanical impedance. *In. Book in Soil, Plants and the environment. Plant roots. The Hidden Half* edited by Yoav Waisel, Amram Eshel, Uzi Kafkafi p. 393-399.
- BESOAIN, M.E., A. SADZAWKA., G. SEPÚLVEDA. 1992. Génesis de los suelos Ñadis, aquands y duranquands de la región centro sur de Chile. *TERRA* 10 No. Esp. Suelos Volcánicos Endurecidos. p. 74-88
- BICE, D.C. 1980. Tephra strattigraphy and physical aspects of recent volcanism near Managua, Nicaragua. Ph. D. Univ. California, Berkeley. California USA, 420 p.
- BIRKELAND, P.W., M.N. MACHETTEE, K.M. HALLER. 1990. Soils as a tool for applied quaternary geology. *UTAH GEOLOGICAL AND MINERAL SURVEY* p. 7-12
- BLACK, C.A., D.D. EVANS., J.L. WHITE, L.E. ENSMINGER, F.E. CLARK. 1965. *Methods of soil analysis Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling.* Am.Soc of Agronomy, Inc Publisher. Madison, Wisconsin, USA 499-510 p.
- BLANK, R.R., FOSBERG, M.A. 1991. Duripans of Idaho, USA : in situ alteration of eolian dust (loess) to an opal-A/X-ray amorphous phase. *Geoderma*, 48 131-149.
- BLYTH, F.G.H., M.H. de FREITAS. 1995. Geología para ingenieros. Segunda impresión CECSA p. 51-93
- BOWEN, , ROVIRA 1991. The rhizosphere. *In. Book in Soil, Plants and the environment. Plant roots. The Hidden Half* edited by Yoav Waisel, Amram Eshel, Uzi Kafkafi p.

- CAMARGO, R. E., I. GUIDO. 1987. Roturación y trituración de tepetate en el Valle del Mezquital, su efecto en la agricultura bajo condiciones de riego. In. Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. Ruiz Figueroa Editor. UACH: 69-77.
- CAMPOS, C.A. 1992. Los tepetates de la región de Jalapa Ver. (México): estructura de la cubierta pedológica. *Terra* 10 (No. Especial Suelos Volcánicos Endurecidos): 226-232.
- CAMPOS, A., D. DUBROEUCQ. 1990. Formación de tepetates en suelos provenientes de las alteraciones de materiales volcánicos. *TERRA*. Vol. 8 No. 2. p. 137-141.
- CAÑIZARES, Z.J. 1968. La guayaba y otras frutas Myrtáceas. De. Revolucionaria. La Habana, Cuba. Instituto del libro, p. 1-87.
- CARTER, M.R. 1992. Influence of reduced tillage systems on organic matter microbial biomass macro-aggregate distribution and structural stability of the surface soil in a humid climate. *Soil and Tillage Research* 23:4, 361-372.
- CARTER, M.R., P.M. MELE. 1992. Changes in microbial biomass and estructural stability at the surface of a duplex soil under direct drilling and stubble retention in north-eastern. *Australian Journal of Soil Research* 30:4, 493-503.
- CAS, R.A.F., J.V. WRIGHT. \_\_\_\_\_. Classification of modern and ancient volcanoclastic rocks of pyroclastic and epiclastic origins. In *Volcanic successions, modern and ancient*. Ed, Allen and Unwin, London p. 349-361.
- CHADWICK, O.A., W.D. NETTLETON. 1990. Micromorphologic evidence of adhesive and cohesive forces in soil cementation. p. 207-212. In L.A. Douglas, (ed). *Soil micromorphology : A basic and applied science*. Amsterdam, Nederland.
- CHARTRES, C.J., J.M. KIRBY, M. RAUPACH. 1990. Poorly ordered silica and aluminosilicates as temporary cementing agents in Hard-Setting soils. *Soil. Sci. Am. J.* 54: 1060-1067.
- CHARTRES, C.J., J.D. FITZGERALD. 1990. Properties of siliceous cements in some Australian soils and saprolites. p. 199-206. In L.A. Douglas, (ed). *Soil micromorphology : A basic and applied science*. Amsterdam, Nederland.
- CHESWORTH, W. 1977. Weathering stages of the common igneous rocks, index minerals and mineral assemblages at the surface of the earth. *Journal of Soil Science*, 28, 490-497.

- CHURCHMAN, G.J., TATE, K.R. 1987. Stability of aggregates of different size grades in allophanic soils from volcanic ash in New Zealand. *Journal of Soil Science*, 38,19-27.
- COLEMAN, D.C., J.M. OADES., G. UEHARA. 1989. Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems. University of Hawaii Press. Department of Agronomy and Soil Science, p. 39, 181-186.
- COLOMBO, C., J. TORRENT. 1991. Relationships between aggregation and iron oxides in Terra Rossa soils from southern Italy. *Catena*. 18: 1, 51-59.
- CREUTZBERG, D., J.H. KAUFFMAN, E.M. BRIDGES, G. del POSSO. 1990. Micromorphology of "Cangahua" a cement subsurface horizon in soils from Ecuador. p. 367- 372 *In* L.A. Douglas, (ed). *Soil micromorphology: A basic and applied science*. Amsterdam, Nederland.
- CRONQUIST, A. 1981. An integrated system of classification of flowering plants. The New York Botanical Garden. Columbia University Press New York p. 592-595.
- CRUZ-CISNEROS, R., D. FLORES-ROMAN., S. SÁNCHEZ-COLÓN. 1993 (1994). Forage production with non-conventional species in shallow, stony soils. Effect of fertilization and cutting on yield and raw protein content of three leguminous species. *An. Esc. Nac. Cienc. Biol. Méx.*, 38:17-36.
- CRUZ, D.J., L.J. CAJUSTE, W.J. BERG. 1990. Evaluación de materiales amorfos y su importancia como cementantes en algunos tepetates de San Dieguito Xochimancan, Texcoco. Instituto de Geología UNAM. Depto. de Edafología. Primer Simposio Nacional de Degradación de Suelos. p. 60-61.
- CRUVINEL, P.E., R.G. FLOCCHINI, S. CRESTANA, J.R. MORALES, J. MIRANDA, B.H. KUSKO, D.R. NIELSEN. 1993. Studying the influence of the aggregate sizes on some elements of an oxisol with pixe. *Soil Science*. Vol. 155 No. 2 p. 100-104.
- DE CSERNA, Z., DE LA FUENTE-DUCH, M., PALACIOS, N.M., TRIAY, L., MITRE-SALAZAR, L.M., MOTA-PALOMINO, R. 1987 (1988). Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México. Instituto de Geología, UNAM 71 p.
- DELEENHEER, L. 1964. Presentation of soil structure on mechanized farm in Belgium. *Trans. 8<sup>th</sup> Cong. Soil Sci*, p. 561-570.
- DEMOLON, A. 1966. Principios de agronomía. 2. Crecimiento de los vegetales cultivados. Ed. Omega, Barcelona. p. 108-112.

DINEL, H., G.R. MEHUIYS, M. LÉVESQUE. 1991. Influence of humic and fibric materials on the aggregation and aggregate stability of a lacustrine silty clay. *Soil Science*. Vol. 151, No 2, p. 146-158.

DINEL, H., P.E.M. LÉVESQUE, P. JAMBU, D. RIGHI. 1992. Microbial activity and long-chain aliphatics in the formation of stable soil aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56 :1455-1463.

DORIOZ, J.M., M. ROBERT, C. CHENU. 1993. The role of roots, fungi and bacteria on clay particle organization. An experimental approach. *Geoderma*, 56 p. 179-194.

DUBROEUCQ, D., P. QUANTIN, C. ZEBROWSKI. 1989. Los tepetates de origen volcánico en México. Esquema preliminar de clasificación. *TERRA*. Vol. 7: 3-12.

DUBROEUCQ, D. 1992. Los tepetates de la región Xalapa, Veracruz (México): un endurecimiento de origen pedológico. *TERRA* 10 No. Esp. Suelos Volcánicos Endurecidos. 233-240.

DUCHAUFOUR, P. 1984. Edafología; parte 1, Edafogénesis y clasificación. Barcelona, Masson, 443 p.

DUKE, J.A. 1981. Handbook of legumes of world economic importance. Plenum Press. New York and London p. 120-122.

EASTERWOOD, G.W., J.J. STREET, W.G. HARRIS, P.W. WEIBLEN, H.A. ROBITAILLE. 1991. Plant-induced smectite neogenesis from the mineral component of a simulated lunar soil. *Geoderma* 48:107-112.

ELLIES, A. 1990. Efecto de enmiendas sobre la generación de la estructura en un suelo arcilloso. *Turrialba*, Vol. 40, No. 3 p. 374-381.

ELLSWORTH, T.R., C.E. CLAPP, G.R. BLAKE. 1991. Temporal variations in soil structural properties under corn and soybean cropping. *Soil Science* Vol. 151 No. 6 p. 405-416.

ETCHEVERS, B.J., H. L. CRUZ., A.J. MARES., C. ZEBROWSKI. 1992. Fertilidad de los tepetates I. Fertilidad actual y potencial de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada (México). *Terra* 10; Esp. suelos volcánicos endurecidos: 379 - 384.

ETCHEVERS, B.J., R.R. LOPEZ, C. ZEBROWSKI, H.D. PEÑA. 1992. Características químicas de tepetates de referencia de los Estados de México y Tlaxcala. *TERRA* 10 No. Esp. Suelos Volcánicos Endurecidos. 171-177.

- FLACH, K.W., W.D. NETTLETON, L.H. GILE, J.G. CADY. 1969. Pedocementation : induration by silica, carbonates and sesquioxides in the quaternary. *Soil Science*. Vol. 107 No. 6 p. 442-453.
- FLACH, K.W., W.D. NETTLETON, O.A. CHADWICK. 1992. The criteria of duripans in the U. S. soil taxonomy and the contribution of micromorphology to characterize silica indurated soils. *TERRA* 10 No. Esp. Suelos Volcánicos Endurecidos. 34-35.
- FLORES, R.D., A. GONZALEZ, J.R. ALCALA, J.E. GAMA. 1991. Los tepetates. *Revista de Geografía* 3(4) : 37-41.
- FLORES, R.,D., J.R. ALCALA, A. GONZALEZ, J.E. GAMA. 1992 (1993). Suelos con fragipan de origen volcánico en clima semicalido y subhmedo. El caso del noreste del estado de Morelos, México. UNAM. Instituto de Geología. *Revista*, Vol. 10 No. 2 p. 151-163.
- FLORES, R.,D., J.R. ALCALA, A. GONZALEZ, J.E. GAMA. 1996 (1997). Duripans in semiwarm and temperate subhumid climate in the transmexican volcanic belt- the case of the north of the state of Morelos, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 13(2) :228-239.
- FONSECA, M., W. GANDOY. 1985. Estabilidad de los agregados, ecuaciones de predicción para el área de Chapingo. *TERRA*. Vol. 3, No. 2, p. 126-131.
- FORSTER, S.M. 1990. The role of microorganisms in aggregate formation and soil stabilization: types of aggregation. *Arid Soil Research and Rehabilitation* 4: 2,85-98.
- GROSSMAN, R.B., M.G. CLINE. 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
- GRÜNBERG, I.P., E. SARTORI. 1968. El arte de criar e injertar frutales. *Manuales EUDEBA* Argentina p. 202.
- GUERRERO, G.E., M.J.L. LUNA, D.E. CABALLERO. 1992. Distribución de los tepetates de la República Mexicana Escala 1 : 4 000 000. *Terra* 10 (No. Especial Suelos Volcánicos Endurecidos): 131-136
- GUTIERREZ, C.M.C. 1988. Estudio micromorfológico de los cementantes de algunos tepetates del Valle de México y Tlaxcala. Tesis Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados.
- HASHIMOTO, I., M.L. JACKSON. 1960. Rapid dissolution of allophane and kaolinite-halloysite after dehydration; Nueva York, Pergamon Press, p. 102-113.

HAYES, H.B.M., H. TAPP. 1994. Interactions of humic substances and polysaccharides with soil mineral components. Transaction 15<sup>th</sup> World Congress of Soil Science 3A:14

HERNÁNDEZ, X.E. 1987. Etnobotánica de Tlaxcala. In. Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. UACH. Chapingo, Méx. p. 1-18.

HIDALGO, C., P. QUANTIN, C. ZEBROWSKI. 1992. La cementación del tepetate: estudio de la silicificación. Terra 10 (No. Especial Suelos Volcánicos Endurecidos):192-201

HILLEL, D. 1982. Introduction to soil physics. Academic Press, Inc. San Diego New York 40-52 p

JACKSON, M.L. 1970. Análisis químico de suelos. 2a. de. Barcelona. Ed. Omega 662 p.

JOHNSON, W.M., J.E. McCLELLAND, S.B. McCALEB, R. ULRICH, W.G. HARPER, T.B. HUTCHINGS. 1959. Classification and description of soil pores.p 319-321.

KACHINSKY, N.A. 1965. Física de Suelos. Ed. Escuela Superior, Moscú

KASSIM, G.M., M.M. AL-ANI. 1990. The relative contribution of some genera of bacteria and fungi to aggregate formation in calcareous soil. Agrokhemia es Talajtan 39 : 3-4, 451-454.

KAÚRICHEV, I.S., N.P. PANOV., M.U.STRATONÓVICH., I.P. GRECHIN. 1980. Prácticas de Edafología. Ed. Mir, Moscú p. 94-95.

KAY, B.D. 1990. Rates of change of soil structure under different cropping systems In. Advances in soil science, B.A. Steward (ed).

KITTRICK, J.A. 1969. Soils minerals in the  $Al_2O_3$ - $SiO_2$ - $H_2O$  system and theory of their formation. Clays and clay minerals. 17: 157-166.

KOOREVAAR, P., G. MENELIK, C. DIRKSEN. 1983. Elements of soil physics. Department of soil science and plant nutrition. Agricultural University of Wageningen, The Netherlands, Amsterdam Oxford N. York p. 20-25

KRETININA, T.A. 1990. Effect of long-term application of fertilizers on the agrophysical properties of an irrigated Light-Chestnut soil. Soviet Soil Science 22 :4, 50-58

KONONOVA, M.M. 1982. Materia orgánica del suelo, su naturaleza, propiedades y métodos de investigación Traducción al Castellano Enriqueta Burdas. OIKOS-TAU, S.A. Ediciones Barcelona, España.

LAL, R., D. J. GREENLAND, 1979. Soil physical properties and crop production in the tropics. John Wiley and Sons, New York: 47-93.

LÓPEZ, R.M. 1976 Geología general. México p. 86-95.

LUZIO, W.L., M.N. SAAVEDRA. 1992. Los suelos volcánicos endurecidos de Chile. Terra 10 (No. Especial suelos Volcánicos Endurecidos):60-66

LYNCH, J.M. 1984. Interactions between biological processes, cultivation and soil structure. Plant Soil 76 :307-318.

MARSCHNE, 1991. Root exudates. In. Book in soils, plants and the environment plants roots. The Hidden Half edited by Yoav Waisel, Amram Eshel, New York

MARQUEZ, R. A., C. ZEBROWSKI., G.H. NAVARRO. 1992. Alternativas agronómicas para la recuperación de tepetates . TERRA. Vol.10. No. Esp. Suelos Volcánicos Endurecidos. p. 465 - 473.

MATIAS, C.J. 1990. *Azolla caroliniana* como biofertilizante en *Eysenhardtia polystachya* inoculada con micorrizas vesiculo-arbuscular en tepetates. Tesis de Licenciatura. UACH. Chapingo, Méx.

MATIAS, C.J., C.G. GOMEZ, R. FERRERA CERRATO, L.R. QUINTERO, R.J. SANTIZO. 1992. *Azolla caroliniana* como biofertilizante nitrogenado sobre el desarrollo de *Eysenhardtia polystachya* en tepetate. TERRA. Vol 10. No. Esp. Suelos Volcánicos Endurecidos. p. 415-424.

MATHUR, S.P., M. LÉVESQUE, R.B. SANDERSON. 1989 The influence of soil properties, total cooper, iron, manganese and zinc on the yield of oats, carrots, onions and lettuce. Comm Plant Soil Anal 20 :1809-1820.

MEHRA, O.P., M.L. JACKSON. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrato system buffered by sodium bicarbonate, in Proceedings, 7th National Conference on Clays and Clay Minerals (de. A. Swineford), National Academy of Science, Natural Research Council Publication, pp 317-327.

MIEHLICH, G. 1992. Formation and properties of tepetate in the central highlands of México. TERRA Vol. 10 No. Esp. Suelos Volcánicos Endurecidos. p. 137-144.

- MONGER, C.H., L.A. DAUGHERTY. 1991. Pressure solution: Possible mechanism for silicate grain dissolution in a petrocalcic horizon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55 :1625-1629.
- MUNSELL. 1975. *Soil Color Chart* de Munsell Color Company Inc. Maryland, U.S.A.
- NADLER, A., Y. STEINBERGER. 1993. Trends in structure, plant growth, and microorganism interrelations in the soil. *Soil Science* Vol. 155, No.2 p. 114-122
- NAKAI, M., T. OTA, Y. AMANO, A. ISHIHARA. 1990. Clay mineralogy of Andosols with different drainage. *Pedologist.* 34, 147-160.
- NARRO, F.E. 1994. *Física de suelos con enfoque agrícola*. Editorial Trillas 33-57 p
- NAVA, R.V., J. SÁNCHEZ, O.V. OLVERA, A.R. LEYTE. 1992 Rehabilitación del tepetate mediante el manejo tradicional, en Tlaxcala, Méx. *TERRA* Vol. 1o No. Esp. Suelos Volcánicos Endurecidos.p. 460-464.
- NAVARRO, G.H., C. ZEBROWSKI. 1992. Aspectos sociales y económicos relacionados con tepetates recuperados. *TERRA*. Vol. 10. No. Esp. Suelos Volcánicos Endurecidos. p. 451-459.
- NIMLOS, T.J. 1987. La nomenclatura de horizontes endurecidos en suelos de cenizas volcánicas. *In.* J.F. Ruiz (ed) *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*. Universidad Autonoma Chapingo. Chapingo Méx. p. 10-16
- NIMLOS, T.J. 1989. The density and strength of mexican tepetate (duric materials). *Soil Science* Vol. 147 No. 2. p. 23-27.
- NIMLOS, T.J., P.A. HILLERY. 1990. The strength/moisture relations and hydraulic conductivity of Mexican tepetate. *Soil Science* 150 :425-430
- NIMLOS, T.J., C. ORTIZ-SOLORIO. 1987. Tepetate, the rock mat. *Journal of Soil and Water Conservation*. Vol. 42 No. 2 p. 83-86.
- NORFLEET, M.L., A.D. KARATHANASIS. 1996. Some physical and chemical factors contributing to fragipan strength in Kentucky soils. *Geoderma* 71. p. 289-301.
- OLESCHKO, L.K. 1985. *Microestructura del suelo*. *In.* *Determinación de las principales propiedades físicas de los suelos agrícolas*. Ed. Figueroa, S.B., A. Núñez. Simposio Nacional. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. San Luis Potosí.
- OLESCHKO, L.K. 1993. *Apuntes de física de suelos*. Facultad de Ciencias UNAM (Sin publicar)

- ORTIZ, S.M., G.M. ANAYA. 1992. Aspectos sociales y económicos relacionados con tepetates recuperados. *TERRA*, Vol. 10 No. Esp. Suelos Volcánicos Endurecidos. p. 534-538.
- ORTIZ, S.M., G.M. ANAYA. 1992. Rendimiento de maíz en tepetates roturados. *TERRA*, Vol. 10. No. 1 p. 94-105.
- OSORIO, J.L.A. 1995. Rasgos pedalógicos de un vertisol pélico como indicadores de su manejo eficiente. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. Maestro en Ciencias Especialista en Edafología.
- PACHECO, L.M.C. 1979. Cartografía y caracterización mineralógica de los tepetates del oriente del Valle de México. Tesis Licenciatura. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo Méx. 90 p.
- PACHECO, L.M., ESTRADA, B.W.J. 1987. Cartografía y caracterización mineralógica de los tepetates del oriente del Valle de México. *In* Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. Edi. Ruiz Figueroa. UACH. Departamento de suelos. Chapingo Méx. p. 31-37.
- PARFITT, R.L., R.J. FURKERT, T. HENMI. 1980. Identification and structure of two types of allophane from volcanic ash soils and tephra. *Clays Clay Miner* 28:328-334.
- PAYTON, R.W. 1993. Fragipan formation in argillic brown earths (Fragiudalfs) of the Milfield Plain, north-east England. II. Post Devensian developmental processes and the origin of fragipan consistence. *Journal of Soil Science*. 44, 703-723.
- PEECH, M. 1947. Methods of soil analysis for soil fertility investigation. U.S. Dep. Agr. Sci. 757 p.
- PERFECT, E., B.D. KAY. 1990. Relations between aggregate stability and organic components for a silt loom soil. *Canadian Journal of Soil Science* 70: 4, 731-735.
- PERFECT, E., B.D. KAY, W.K.P. VAN LOON, R.W.SHEARD, T. POJASOK. 1990. Factors influencing soil structural stability within a growing season. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54 :173 -179
- PEÑA, H.D., C. ZEBROWSKI. 1992. Estudio de los suelos volcánicos endurecidos (tepetates) de las cuencas de México y Tlaxcala (Méx.). Informe del mapa morfopedológico de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. ORSTOM-CP Montecillo-UA de Tlaxcala. 72 p.

- PICCOLO, A. J.S.C. MBAGWU. 1994. Humic substances and surfactants effects on the stability of two tropical soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58 :950-955.
- PIERSON, F.B., D.J. MULLA. 1990. Aggregate stability in the Palouse Region of Washington: Effect of landscape position. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:1407-1412.
- PIMENTEL, B.L. 1992. Como hacer productivo a los tepetates en México. *TERRA Vol. 10 No. Esp. Suelos Volcánicos Endurecidos.* p. 293-301.
- POWERS, M.C. 1953. A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology.* Vol. 23, No. 2, p. 117-119.
- PRAT, C. 1991. Etude du talpetate, horizon volcanique induré de la région Centre-Pacifique du Nicaragua. Genese, caractérisation morphologique, physico-chimique et hydro-dynamique, son role dans l'érosion des sols. These de Doctoral, Univ. Paris 6, Paris, France. 350 p.
- PRIMAVESI, A 1980. Manejo ecológico del suelo. La agricultura en regiones tropicales. Librería El Ateneo Buenos Aires p. 183-227.
- QUANTIN, P., ARIAS, A., ETCHEVERS, J., FERRERA, R., OLESCHKO, K., NAVARRO, A., WERNER, G., ZEBROWSKI, C. 1993. Tepetates de México: caracterización y habilitación para la agricultura (informe científico final del proyecto TS2-A 212-C CEE/ORSTOM). *TERRA. No. Especial Vol. 11 p.* 3-69.
- QUANTIN, P., C. ZEBROWSKI, M. DELOUNE, M.C. HIDALGO. 1992. El material original de los tepetates T2 y T3 de la región de Texcoco (México). ¿Loess o cineritas? *TERRA. Vol. 10 No. Esp. Suelos Volcánicos Endurecidos p.* 178-182.
- QUINONES, G.H. 1987. La química del silicio. In. *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural UACH. Chapingo, Méx.* p. 19-28.
- RASIAH, V., B.D. KAY. 1994. Characterizing changes in aggregates stability subsequent to introduction of forages. *Soil Science Society American Journal* 58:935-942
- REID, J.B., M.J. GOSS. 1981. Effect of living roots of different plant species on the aggregate stability of two arable soils. *Journal of Soil Science* 32 : 521-541.
- RENNINGSFELD, F., P. KURZMANN. 1983. Cultivos hidropónicos y en turba. *Mundi-Prensa. Méx.* p.49-57.

- ROBERSON, E.B., S. SARIG, M.K. FIRESTONE. 1991. Cover crop management of polysaccharide-mediated aggregation in an Orchard soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55 :734-739.
- ROJAS, R.T., W.T. SÁNCHEZ. 1985. Historia de la agricultura en época prehispanica. Siglo XVI. Colección Biblioteca de INAH. Instituto Nacional de Antropología e Historia. Méx. D.F. p. 1-49
- ROVIRA, A.D., E.L. GREACEN. 1957. The effect of aggregate description on the activity of microorganisms in the soil. *Aust. J. Agric. Res.* 8: 659-673.
- SANCHEZ, J.M. 1981. Comportamiento de dos tipos de tepetates bajo la adición de abonos orgánicos y abonos verdes en condiciones de invernadero. Tesis Ingeniero Agrónomo. UACH. Chapingo, Méx.
- SANCHEZ, J.M., F.J.F. RUIZ, F.E. CAUTLE. 1987. Comportamiento de dos tipos de tepetates bajo la adición de abonos orgánicos y abonos verdes en condiciones de invernadero. *In.* J.F. Ruiz (ed) *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural.* Universidad Autonoma de Chapingo. Chapingo Méx. p 58-68
- SÁNCHEZ, R.R. 1992. Guía para cultivar *Leucaena* como recurso forrajero en la planicie costera de Nayarit. SARH-Centro de Investigación Pacifica Centro. Campo Experimental "El Macho" 20 p.
- SCHNITZER, M., J.A. RIPMEESTER, H. KODAMA. 1988. Characterization of the organic matter associated with a soil clay. *Soil Science Vol.* 145. No. 6 p. 448-454.
- SHOJI, S., M. NANZYO, R.A.DAHLGREN. 1993. Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization. Ed. ELSEVIER. 288 p.
- SINGER, M.J., R.J. SOUTHARD, D.N. WARRINGTON, P. JANITZKY. 1992. Stability of synthetic sand-clay aggregates after wetting and drying cycles. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:1843-1848.
- SOIL SURVEY STAFF. 1994. Claves para la taxonomia de suelos. Traducción de Carlos A. Ortiz Solorio, Ma. del Carmen Gutierrez Castorena y José Luis Garcia Rodriguez. 1<sup>er</sup> Edición en Español 1995. Publicación especial 3. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo (SMCS). Chapingo, México 306 p.
- SOIL SURVEY STAFF. 1984. Procedures for collecting soil samples and methods of analysis for soil survey. Washington, D.C. Soil Survey Investigations Report No. 1.
- SPARLING, G.P., T.G. SHEPHERD, H.A. KETTLES. 1992. Changes in soil organic C, microbial C and aggregate stability under continuous maize and cereal cropping and

after restoration to pasture in soils from the Manawatu region New Zealand. *Soil and Tillage Research* 24 :3,225-241.

STEIN, C.L. 1982. Silica recrystallizations in petrified wood. *Journal of Sedimentary Petrology* 52(4):1277-1282.

SWIFT, R.S. 1991. Effects of humic substances and polysaccharides on soil aggregation. *Advances in soil organic matter research. Symposium Colchester, 3-4 september. Cambridge, UK Royal Society of Chemistry.* p. 153-162.

TAMHANE, R.V., D.P. MOTIRAMANI., Y.P. BALI., R.L. DONAHUE. 1986. Suelos, su química y fertilidad en zonas tropicales, Editorial Diana México, p. 46, 82-86, 104-110, 231-247.

THIRY, M., G. MILLOT.1986. Mineralogical forms of silica and their sequence of formation in silcretes. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 57 No. 2 p. 343-352.

THIRY, M. 1992. Pedogenic silifications: structures, micromorfology, mineralogy and their interpretation. *Terra* 10 (No. Especial Suelos Volcánicos Endurecidos): 46-59.

TISDALL, J.M. 1994. Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils. *Plant and Soil* 159 : 115-121.

TISDALL, J.M., J.M. OADES. 1982 Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33: 141-163.

USDA. 1988. *Soil Taxonomy*: Washington, D.C., U.S. Department of agriculture, Soil Conservation Service, Handbook 436, U.S. Government Printing Office. 754 p.

UTOMO, W.H., A.R. DEXTER. 1982.Changes in soil aggregate water stability induced by wetting and drying cycles in mon-saturated soil. *Journal of Soil Science* 33:623-637.

VALDEZ, M.L.A. 1970. Caracterización morfológicas y mineralógicas de los suelos de tepetates de la cuenca de México. Tesis M :C : especialista en suelos. ENA-CP.

VELÁZQUEZ, R.A.S. 1994. Efecto de diferentes cultivos sobre la disgregación y alteración de tepetates del estado de Morelos en condiciones de invernadero. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias UNAM 125 p.

VELÁZQUEZ, R.A.S. 1997. Disgregación, alteración y agregación de dos niveles de trituración de tepetates del estado de Morelos por especies vegetales perennes en condiciones de invernadero. Tesis M. en C. Edafología, Facultad de Ciencias UNAM, 147 p.

- VAN, W.A. 1992. Soils of the tropics. Properties and appraisal. Ed. McGraw-Hill Inc. p. 97-114
- VELDE, B. 1995. Origin and mineralogy of clays. Clays and the environment. Springer, Verlag Berlin. Printed in Germany
- VERA, R., R. LOPEZ. 1992. Tipología de la Cangahua. TERRA Vol. 10 Número Especial. Suelos Volcánicos Endurecidos. Primer Simposio Internacional Méx. 20-26 octubre de 1991 p. 113-119
- VERBEEK, A.A., M.C. MITCHELL, A.M. URE. 1982. The analysis of small samples of rock and soil by atomic absorption and emission spectrometry after a lithium metaborate fusion/nitric acid dissolution procedure. Analytica Chimica Acta 135, 215-228
- VILLARROEL, A.J. 1979. Respuesta de maíz y frijol a la aplicación de gallinaza, estiércol vacuno, zinc, manganeso y hierro en suelos de Cd. Serdán, Puebla, bajo condiciones de campo e invernadero. Tesis. M.C : especialista en suelos. Colegio de Postgraduados, Montecillos, Méx. pp. 220
- WADA, K. 1985. The distinctive properties of Andosol. Springer Verlag New York, Inc. Advances in Soil Science. Vol. 2 p. 173-222
- WAKATSUKI, T., A. RASYIDIN. 1992. Rates of weathering and soil formation. Geoderma, 52 : 251-263.
- WALKLEY, A. 1947. Critical examination for determining organic carbon in soils. Soil Science 63:251-264.
- WERNER, G. 1992. Suelos volcánicos endurecidos (tepetates), en el estado de Tlaxcala : distribución, rehabilitación, manejo y conservación. TERRA Vol. 10 No. Esp. Suelos Volcánicos Endurecidos. p. 318-331.
- WILSON, M.J. 1994. Clay Mineralogy: spectroscopic and chemical determinative methods. Chapman & Hall London p. 334-357.
- WILLIAMS, B.J. 1972. Tepetate in the Valley of México. Ann. Assoc. Am. Geogr. 62 :618-623.
- WILLIAMS, L.A., G.A. PARKS, D.A. CRERAR. 1985. Silica diagenesis, I. Solubility controls. Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 55 No. 3, p. 301-311.

WHITE, G.N., L.W.ZELAZNY. 1990. Charge properties of soil colloids. *In* Soil Physical Chemistry. Editor Donald L. Sparks. CRC Press Boca Raton Florida p. 40-77

ZEBROWSKY, C. 1992. Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina *In* Suelos Volcánicos Endurecidos. Colegio de Postgraduados, Montecillo Mex. p. 1-4.

# ANEXOS

## ANEXO I

*Análisis de varianza de agregados en seco y húmedo.*

En las Tablas 83 y 84 se presenta el análisis de varianza de los agregados en seco y la estabilidad de estos en húmedo de cada uno de los factores estudiados y sus respectivas interacciones.

Lo que sobresale en la Tabla 83, es la alta significancia estadística que se presenta entre las especies vegetales (Factor A), en la formación de agregados en seco de diámetro mayores de 0.5 mm, no reportándose diferencias en los agregados de diámetro menores de 0.5 mm; mientras que ambos materiales (Factor B), existen marcados efectos estadísticos en todos los rangos evaluados, es decir, la formación de agregados en seco que se da en cada uno de los materiales difiere de uno a otro, sin embargo, al interactuar especies vegetales y el tipo de material (Factor AB), únicamente se presenta alta diferencia estadística en agregados de diámetro mayores de 5.0 mm; por lo que, las especies vegetales y el tipo de material incide directamente en la formación de agregados > 5.0 mm.

En relación al factor (C) solución nutritiva solamente presenta efecto significativo ( $P = 0.05$ ), en los agregados de diámetro de 2.0 a 5.0 mm, no es representativo su efecto en los demás intervalos, al interactuar éste con los factores A y AB no se presentaron efectos significativos, mientras que, en la interacción BC únicamente muestra un alto efecto significativo en el intervalo de 5.0 a 7.0 mm de diámetro.

Tabla 83. Análisis factorial de agregados en seco.

FACTORES	>12	12 - 10	10 - 7	7 - 5	5 - 3	3 - 2	2 - 1	1 - 0.5	0.5 - 0.25	< 0.25
A	18.78 **	30.46 **	11.69 **	4.43 **	9.37 **	27.74 **	41.09 **	14.02 **	1.86	1.69
B	50.36 **	93.60 **	135.73 **	111.76 **	201.57 **	68.85 **	68.13 **	301.44 **	220.84 **	61.72 **
AB	14.44 **	6.38 **	8.62 **	4.26 **	2.12	2.4	2	0.81	0.22	0.24
C	1.11	0.11	0.32	0.1	3.84 *	4.72 *	1.71	0.68	0.01	1.42
AC	0.10	0.6	0.3	0.75	0.75	0.24	0.54	0.85	0.35	1.02
BC	0.04	0.04	3.52	10.31 **	0	1	2.93	0.49	0.48	0.01
ABC	0.00	1.43	0.74	1.17	0.35	0.93	0.93	0.51	0.06	0.8
D	0.34	4.59 **	4.48 *	0.44	0.89	1.16	1.32	6.65 **	4.15 *	2.11
AD	1.81	2.88 **	1.47	3.23 **	1.22	0.64	0.43	0.52	0.57	0.78
BD	1.32	3.83 *	5.36	0.44	0.41	0.98	4.43 *	6.62 **	4.18 *	0.56
ABD	1.21	3.35 **	0.47	0.6	2.47 *	2.33 *	1.19	2.32 *	0.91	1.83
CD	3.54 *	1.27	0.44	0.2	0.26	0.54	5.13 **	9.20 **	2.02	0.69
ACD	1.89	1.57	1.22	1.31	0.27	0.99	3.05 **	2.78 *	2	1.24
BCD	2.04	0.98	1.94	2.6	3.07 *	0.84	2.27	9.45 **	4.75 **	2.68
ABCD	1.82	0.63	0.1	0.87	0.35	0.72	1.74	2.36 *	1.39	1.07
E	1.41	57.45 **	41.70 **	95.76 **	40.60 **	19.68 **	102.91 **	85.28 **	35.49 **	3.54
AE	1.73	6.87 **	1.29	5.15 **	7.76 **	5.34 **	3.30 *	4.85 **	2.91 *	2.1
BE	4.79 *	0.01	2.72	0.03	0.14	0.31	3.06	1.12	4.40 *	1.1
ABE	1.87	9.21 **	1.5	0.44	3.25 *	1.71	0.84	1.06	0.35	1.07
BCE	1.19	0.38	0.09	0.14	0.75	1.21	0.71	0.63	1.98	1.71
ABCE	1.52	0.75	0.3	2.25	0.44	0.08	1.34	0.99	0.42	0.86
CE	0.35	1.12	0.55	0.07	0.05	0.96	0.19	0.01	0.33	1.07
ACE	1.79	1.05	0.43	0.59	0.74	0.52	0.8	0.08	0.36	0.77
CDE	4.20 *	0.33	0.9	1.24	2.09	0.15	1.96	5.43 **	5.00 **	4.37 *
ABDE	2.45 *	1.16	0.66	1.35	1.41	2.40 *	2.83 **	2.45 *	0.84	1.49
DE	2.4	0.71	0.75	0.38	0.01	0.06	1.04	1.96	2.09	0.02
ADE	2.43 *	0.82	2.19 *	0.65	1.37	2.38 *	2.67 *	0.8	0.61	0.66
BDE	6.74 **	0.23	0.96	5.12 **	0.6	2.36	0.5	1.42	1.21	0.82
ACDE	4.59 **	0.7	3.26 **	0.84	1.33	1.08	0.78	1.5	1.44	0.48
BCDE	5.77 **	0.24	0.08	0.25	0.24	0.76	1.57	2.6	0.93	1.68
ABCDE	3.87 **	3.35 **	2.94 **	0.62	1.03	1.9	3.04 **	2.91 **	2.31 *	1.68
C. V. %	76.44	25.39	19.88	25.31	19.36	27.18	33.13	45.48	62.25	98.47

Factor A: Especies vegetales; B: Tepetate blanco y amarillo; C: Solución nutritiva; D: Abonos orgánicos y E: Períodos  
 C:V: Coeficiente de variación; \* Significancia al 0.05. \*\*Significancia al 0.01.

Altas diferencias significativas se presentaron entre los dos abonos adicionados (D), en los intervalos de 10.0-12.0 y 0.5-1.0 mm, al relacionarse este factor con las especies vegetales, influyen en la formación de agregados de los intervalos de 5.0-7.0 y 10.0-12.0 mm; no presentándose diferencias estadísticas en los demás intervalos. Sin embargo, la interacción BD sobresale el intervalo de 0.25 a 2.0 y de 10.0 a 12.0 mm. Al relacionarse los factores ABD se manifiestan efectos estadísticos en los intervalos de 10.0-12.0, 2.0-5.0 y 0.5-1.0 mm de diámetro. Estos resultados concuerda con los obtenidos por Tisdall y Oades (1982), donde mencionan el papel que juega la materia orgánica en la agregación.

La doble adición de fuentes nutrimentales presentó efectos estadísticos significativos en agregados mayores de 12.0 y de 0.5 a 2.0 mm, mientras que al relacionarse ACD y BCD ocasionan diferencias significativas entre ellos en los intervalos de 0.5-2.0 y 0.25-1.0 respectivamente; sin embargo, al interactuarse los factores ABCD no presentan diferencias a excepción del intervalo 0.5-1.0 ( $P=0.05$ ).

Por lo que se refiere a las dos épocas de corte (E) se observa claramente que se presentan efectos estadísticos en la agregación de una etapa a otra en el intervalo de 0.25 a 12.0 mm de diámetro, y al relacionarse ésta con las especies vegetales (A), no se presentan diferencias significativas en los agregados mayores de 12.0 y menores de 0.25 mm de diámetro; por lo que las especies vegetales y la época de cosecha inciden en el intervalo de 0.25 a 12.0 mm. Similares resultados obtuvo Velázquez (1994), al manejar especies vegetales anuales en tepetate fracturado bajo condiciones de invernadero.

**Tabla 84. Análisis factorial de estabilidad de agregados en humedo.**

FACTORES	> 5	5 - 3	3 - 2	2 - 1	1 - 0.5	0.5 - 0.25	< 0.25
A	5.22 **	2.53	7.53 **	3.58 *	2.45	2.62 *	11.86 **
B	231.77 **	163.48 **	146.56 **	40.82 **	455.70 **	446.79 **	268.63 **
AB	0.62	1.62	4.21 **	11.07 **	2.45	0.52	2.12
C	1.62	0.3	2.39	2.05	2.59	0.03	0.15
AC	1.24	1.51	2.49	2.41	1.34	1.22	1.11
BC	0.13	0.32	0.51	1.11	0.02	0.2	0.03
ABC	1.6	0.81	1.4	2.03	0.57	1.21	1.35
D	2.37	0.05	0.87	0.3	0.19	1.34	5.08 **
AD	1.55	3.15 **	2.63 *	1.38	2.21 *	3.01 **	2.31 *
BD	2.27	0.15	0.38	0.51	0.15	1.31	3.95 *
ABD	1.95	1.2	0.77	0.99	2.76 *	3.17 **	1.9
CD	3.63 *	0.08	0.95	1.28	1.83	2.65	3.40 *
ACD	0.18	1.51	1.66	1.12	0.22	0.96	0.57
BCD	4.80 **	3.38 *	0.62	3.25 *	3.45 *	4.24 *	3.86 *
ABCD	0.68	0.42	0.48	0.38	0.31	0.96	0.7
E	8.65 **	0.32	0.01	1.32	0.02	6.54 *	15.80 **
AE	0.99	0.22	0.6	2.1	0.47	0.83	0.39
BE	1.18	1.95	0.71	1.02	0.19	5.58 *	2.4
ABE	0.26	0.48	0.53	1.05	0.4	0.94	0.12
BCE	1.38	0.01	0.05	1.09	1.75	2.26	0.47
ABCE	3.32 *	1.71	1.38	6.02 **	4.22 **	1.72	1.83
CE	0.38	0.38	0.59	0.03	0.17	1.15	0.08
ACE	0.97	0.03	2.02	1.24	0.55	1.06	0.91
CDE	1.36	0.64	0.23	0.59	2.01	0.58	1.68
ABDE	0.62	0.89	0.89	0.56	1.15	1.23	0.91
DE	0.02	0.52	0.41	0.16	0.35	0.33	0.05
ADE	0.29	0.56	0.84	0.78	0.44	0.48	0.7
BDE	0.32	0.3	0.9	0.22	0.04	0.49	0.04
ACDE	1.19	2.01	2.74 *	0.84	1.51	0.77	3.06 **
BCDE	1.42	1.15	0.83	1.47	0.53	0.01	0.27
ABCDE	1.34	0.97	0.41	0.56	1	0.45	1.96
C. V. %	25.53	33.31	33.02	44.31	54.08	67.27	52.32

Factor A: Especies vegetales; B: Tepetate blanco y amarillo; C: Solución nutritiva; D: Abonos orgánicos y E: Periodos, C:V: Coeficiente de variación; \* Significancia al 0.05. \*\*Significancia al 0.01.

Efectos significativos se tienen en agregados mayores de 12.0 y en el intervalo de 0.25-0.5 mm al relacionarse los factores BE, es decir, la época de corte actúa en ambos materiales, mientras que, los factores ABE, son distintos estadísticamente en los diámetros de 10.0-12.0 y de 3.0-5.0 mm. Sin embargo, no se presentaron efectos significativos al relacionarse los factores BCE, ABCE, CE y DE.

La formación de macroagregados de diámetro mayor de 12.0 mm se favorece cuando se relacionan los factores BDE, ACDE, BCDE Y ABCDE, los cuales manifiestan efecto altamente significativo. Al vincularse los cinco factores de estudio, efectos significativos se presentan en los intervalos de 0.25-2.0 y de 7.0 a mayores de 12.0 mm, es decir, que cada uno de los parámetros de estudios inciden distintamente en la agregación.

Por último, el coeficiente de variación que se obtuvo fluctuó de 19.0 a 98.0%, este amplio intervalo que se tiene se debe a que el proceso de agregación es dinámico, donde participan procesos físicos, químicos y biológicos, que promueven tanto la agregación y disgregación de ambos materiales empleados e incrementan la variabilidad (Oleschko, 1997 comunicación personal)

En la Tabla 84 se presenta el análisis de varianza de la estabilidad de los agregados en húmedo; el factor A presentó un efecto altamente estadístico en los intervalos mayores de 5.0, 2.0-3.0 y menores de 0.25 mm de diámetro, no se mostró efecto significativo en los demás intervalos, por lo que se infiere que cada una de las especies vegetales promueven la estabilidad en húmedo de los agregados, por otro lado, el factor B, exhibió un efecto significativo en todos los intervalos, es decir, existen diferencias en la estabilidad de los agregados de

un material a otro, sin embargo, al asociarse estos factores (AB), promueven la estabilidad en el intervalo de 1.0-3.0 mm de diámetro. Datos similares a estos no han sido reportados en la literatura especializada.

En lo que se refiere a la adición de la solución nutritiva, ésta no propicio la estabilidad de los agregados en ningún intervalo, ni cuando se le relaciono con los otros factores, AC, BC y ABC, esto sugiere fuertemente que la solución nutritiva no es un factor que intervenga de forma directa en la estabilidad de los agregados.

Efecto significativo se dio en la estabilidad de los agregados menores de 0.25 mm de diámetro cuando se aplicaron los abonos orgánicos (D), este es un factor que promueve la microagregación, además de proporcionarle estabilidad a la microagregación en húmedo, no manifestándose este efecto en los demás intervalos, sin embargo, al asociar los factores AD, favoreció la estabilidad en los intervalos menores de 0.25-1.0 y de 2.0-5.0 mm de diámetro, las especies vegetales y abonos orgánicos proporcionan la estabilidad en húmedo de micro y macroagregados; por otro lado los factores BD, no exhibieron efecto estadístico con excepción de los agregados menores de 0.25 mm, es decir, los substratos empleados y los abonos orgánicos difieren en la estabilidad de los microagregados. Esto concuerda con lo que señala Primavesi (1980) y Kononova (1982), donde mencionan que las fuentes orgánicas que presentan mayor cantidad de cationes divalentes promueven la mayor agregación y estabilidad de éstos.

La relación de las especies vegetales con ambos tepetates y las dos fuentes de abonos orgánicos promovieron la estabilidad en húmedo de los agregados de 0.25-1.0 mm de diámetro, además se presentó un efecto

significativo cuando se adicionan ambas fuentes nutrimentales (CD), en los macroagregados mayores de 5.0 mm y en microagregados (menores de 0.25 mm de diámetro), es decir, hay diferencias entre una fuente y otra en la estabilidad de estos agregados; por otra parte, no se presentaron resultados positivos al relacionarse los factores ACD, mientras que BCD, induce significativamente la estabilidad en húmedo de los intervalos 3.0 - >5.0 y <0.25 - 2.0 mm de diámetro, estos factores interactúan indistintamente promoviendo la estabilidad de macro y microagregados, sin embargo, al asociarse los factores ABCD, no presentó efecto estadístico en ningún intervalo.

La estabilidad de agregados en húmedo se ve influida por la época de corte (E), los agregados mayores de 5.0 y < 0.25 - 0.5 mm de diámetro, pero al relacionarse éste con el factor A, no se manifestó ningún efecto estadístico, de la misma manera se dio en ABE, BCE, CE, ACE, CDE, ABDE, DE, ADE, BDE, BCDE y ABCDE.

Favorable efecto estadístico se mostró al relacionar los factores ABCE en la estabilidad en húmedo de los agregados de 0.5-2.0 y > 5.0 mm de diámetro, mientras que, las especies vegetales, así como las dos fuentes nutrimentales y la época de corte (ACDE), aumentó la estabilidad de los microagregados (<0.25 mm), y de 2.0-3.0 mm, esto indica que al tener una buena estabilidad estos microagregados, es factible que se de una mayor estabilidad en húmedo de macroagregados.

La amplitud en el coeficiente de variación (25 a 67%), se debe a la misma dinámica de los factores físicos, químicos y biológicos que influyen de forma directa en la estabilidad en húmedo de los agregados, además del método utilizado.

## ANEXO II

*Especies utilizadas*a. GUAYABA (*Psidium guajava* L.)

La guayaba es originaria de América Tropical, Alfonso de Candelle ubica su centro de origen en un punto situado entre México y Perú, basado en que la mayor ocurrencia de formas se encuentra precisamente en las áreas cálidas de esta vasta región (Cañizares, 1968). Los Aztecas la conocían desde tiempos remotos y la llamaban xalxocotl o sea ciruela de arena.



Figura 56. Plantas de guayaba preparadas para la plantación en invernadero.

Esta planta pertenece a la familia de las Mirtaceas, al genero *Psidium*, especie *P. guajava*, es un árbol bajo o arbusto arborescente, de 3-10 m de altura, la corteza de color café rojizo oscuro, ramas bajas, de 10-30 cm de grueso. La ramas jóvenes portan alas angostas en los cuatro lados al principio, convirtiéndose mas tarde en tetragonales cubiertas densamente con pelos finos, lenticelas diseminadas y la corteza desprendiéndose en escamas delgadas.

Las hojas de 7.5-15.0 cm de longitud, son de color verde claro, finamente pubescentes y con nervaduras visibles, sus flores son hermafroditas, con un diámetro aproximado de 3.8 cm. Los frutos son globosos, globosos-ovoides o piriformes, ligera y obtusamente con 5 a 10 lados o con 5 a 10 surcos longitudinales poco profundos, 5-12 cm de largo y 5-7 cm de ancho. La pulpa es jugosa, de color blanco-amarillento, rosado o rojo subido. Las semillas son numerosas y pequeñas de 0.3-0.5 cm de largo y 0.2-0.3 cm de ancho (Henry, 1962, Cañizares 1968, Grunberg y Sartori, 1968, Ochse *et al.*, 1980).

Es una planta que se adapta a distintas condiciones climáticas, pese a su origen netamente tropical. Sin embargo, se puede situar su área ecológica entre el paralelo 30 de cada hemisferio. Soporta altas temperaturas como las que se presentan en los trópicos, no soporta temperaturas inferiores a 0°C. Se le puede encontrar a elevaciones hasta de 1200 msnm, siempre que ha esa altura no sean frecuentes las heladas y las temperaturas menores a 0°C por tiempos prolongados. En cuanto a precipitación pluvial puede desarrollarse entre 1000 y 3700 mm anuales.

Es una especie poco exigente en cuanto a condiciones de suelo, se le puede encontrar en suelos de textura arenosa hasta arcillosa, en Calvillo, Aguascalientes se desarrolla favorablemente en laderas de cerros erosionados

donde en ocasiones aflora el tepetate, esta zona es la principal productora de guayaba en toda la República. En relación a pH del suelo, es capaz de vivir entre los límites de 5.5-8.0, y en cuanto a salinidad, se reporta que en vivero se ha aplicado riegos con concentraciones salinas de 800 ppm, sin que las plantas dieran muestras ostensibles de intolerancia.

La guayaba es un fruto cuyo cultivo no ha tenido gran importancia, no obstante las propiedades alimenticias que tiene, en ciertas regiones de México se le ha dado más atención, donde se ha incrementado las áreas sembradas, principalmente en los estados de Aguascalientes, Zacatecas, Guerrero y Oaxaca entre las más importantes, pero se le puede encontrar desde Baja California hasta Yucatán, su capacidad de adaptación es amplia debido a su rusticidad.

El fruto presenta un alto valor dietético entre otras cosas por su alto contenido de ácido ascórbico o sea vitamina C que en ocasiones sobrepasa los 400 mg en 100 g de pulpa fresca, carbohidratos 275% y sales minerales. Su empleo es múltiple, se consume como fruta fresca y se industrializa para la elaboración de jaleas, mermeladas, jugos, etc.

#### **b. HUAJE ROJO (*Leucaena esculenta* M. et S. ex A. DC. Benth)**

El huaje rojo pertenece a la familia de las leguminosas, al género *Leucaena* y a la especie *L. esculenta*, probablemente es nativa de México y la parte norte de América central; de las doce especies del género de *Leucaena* once son de México localizándose en los estados de Chiapas, Guerrero, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nuevo León, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Tamaulipas, Tlaxcala y Veracruz. El hábitat propicio de la especie es la selva baja caducifolia, en zonas ecotonales entre esta

comunidad y el bosque de pino-encino. Es un árbol no espinoso, el cual puede comportarse en forma de arbusto cuando se le aplican podas, llegando a medir de 1-18 m, tronco de 10-25 cm de diámetro, con hojas pequeñas y abundantes alternantes de 10-25 cm de longitud bipinadas de 3-10 pares, cada una de estas con 10-20 pares de hojas sesiles estrechamente oblongas lanceoladas de color gris verdoso, hojillas de 1-2 cm de longitud y menos de 0.3 cm de ancho, con gran número de flores axilares sobre largos tallos, blancas de 1-2 cm, el fruto es una vaina con bordes lisos y delgados de color pardo oscuro cuando maduras y duras, de 10-20 cm de longitud y de 1.6-2.5 cm de ancho, dehiscente en ambas suturas, producción copiosa de semillas de 15-30 por vaina, ovales, lisas, de color pardo brillante, sus sistema radical es axonomorfo profundo y es resistente a la sequía (Duke,1981 ; Cruz *et al.*,1993).

En cuanto a requerimientos ecológicos, la planta es principalmente tolerante a la sequía, desarrollándose en zonas que presentan precipitaciones de 180-4,100 mm anuales, se presenta en altitudes que van desde 500-1,200 msnm, aunque en Indonesia se desarrolla en 1,350 msnm pero su desarrollo es lento en estas altitudes, para un buen desarrollo se estima un crecimiento de 10 cm por mes. El huaje crece en un amplio rango de suelos, pero se recomienda profundos suelos arcillosos que sean fértiles y húmedos, presenta un óptimo desarrollo sobre suelos neutros o alcalinos, en suelos ácidos disminuye notablemente su productividad, no tolera suelos anegados. El vigoroso y agresivo crecimiento de la raíz le permite prosperar en suelos duros e impermeables.

Dentro de los usos del huaje rojo, es apreciada como una excelente fuente de proteína (25-30%), para el ganado, el valor nutritivo (descontando su toxicidad), es igual o superior a la alfalfa, además se ha utilizado en

programas de reforestación y mejoramiento de suelos (Cruz et al., 1993 ; Duke, 1981) y en ocasiones como abono verde y de sombra para los cultivos de la vainilla, café, cacao y pimienta negra. En el mejor de los casos una hectárea con buenas condiciones de fertilidad llega a producir 15 toneladas de forraje seco al año, que equivale a 4.5 t de proteína (Sánchez, 1992).

### c. PASTO RHODES (*Chloris gayana* Kunth.)

Esta planta pertenece a la familia botánica de las gramíneas, al género *Chloris* y a la especie *gayana*. Esta familia es sumamente importante por la gran cantidad de plantas forrajeras que a ella pertenecen, pues se considera que hay más de sesenta especies que pertenecen solamente al género *Chloris*.

De manera natural el pasto Rhodes se desarrolla en áreas tropicales y subtropicales de África, introducida en 1895 por Cecil Rhodes a Sudafrica, donde se distribuyó a otros países, se le cultiva como forrajera en regiones de clima cálido como Guatemala y Salvador; en México la explotación que se hace de esta planta es muy pequeña.

Esta planta alcanza una altura de un metro, su caña es aplastada y débil, sus hojas glabras de 4-8 mm de ancho y de 15-50 cm de largo, panícula digitada o subdigitada de 3 a 20, racimos de espiguilla de 4-15 cm de largo. Las espiguillas tienen 3-4 flores, las flores más bajas son fértiles de 2.5 mm de largo.

Prospera en un amplio rango de temperaturas, considerándose la óptima de 35°C, es de fotoperíodo intermedio, crece en diversos niveles de precipitación y es relativamente resistente a la sequía, no se desarrolla en

suelos de textura arcillosa, ni tolera pH alcalinos, se desarrolla en suelos francos, no tolera los niveles relativamente altos de Mg y  $MgCl_2$ , soporta períodos de inundación hasta 15 días o mas (Bogdan, 1977).

El uso que de esta planta se hace es como forrajera, ya sea que se corte y henifique su pastura o bien que se introduzca el ganado a los agostaderos en el que el zacate se cultiva, no sufre mucho con el constante pisoteo.



Análisis del clima por el Sistema Thornthwaite.

ESTACION METEREOLÓGICA LA CONCEPCIÓN

MUNICIPIO DE NICOLAS ROMERO

Julio 1986 - abril 1996

LATITUD 19° 42'

LONGITUD 99° 17'

ELEVACION 2300 m.s.n.m.

ANEXO III

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGOS	SEP	OCT	NOV	DIC	valores medios anuales	
Temperatura media mensual. (Te) °C	11.7	12.7	14	15.7	17.2	17.4	14.6	14.6	14.1	12.7	11.8	10.5		
Precipitación media mensual (PR) cm	1.25	1.55	1.16	2.36	3.98	11.02	10.82	11.48	7.92	7.21	1.57	3.8	64.12	
Índice de Calor (ICM)	3.62	4.10	4.75	5.65	6.49	6.61	5.07	5.07	4.80	4.10	3.67	3.07	57.01	ICA
Exp	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39		
Evapotranspiración potencial sc (EV) cm	4.34	4.87	5.57	6.53	7.41	7.53	5.90	5.90	5.63	4.87	4.39	3.74		
Factor corrección FC	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.94		
Evapotranspiración Potencial cr (EP) cm	4.12	4.38	5.74	6.86	8.38	8.36	6.73	6.55	5.74	4.87	4.09	3.51	69.32	EPa
Movimiento de humedad en el suelo (MHS) cm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.66	7.34	0.00	0.00	0.00	-2.52	0.29		
Humedad almacenada en el suelo (HA) cm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.66	10.00	10.00	10.00	10.00	7.48	7.77		
Demasia de agua (DA) cm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.93	2.18	2.34	0.00	0.00	9.45	DAa
Evapotranspiración Real (ER) cm	1.25	1.55	1.16	2.36	3.98	8.36	6.73	6.55	5.74	4.87	4.09	3.51		
Deficiencia de agua (DE) cm	2.87	2.83	4.58	4.50	4.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.17	DEa
Escurrimiento (ES) cm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.47	2.32	1.72	0.59	0.00		
Relación pluvial (RP)	-0.70	-0.65	-0.80	-0.66	-0.52	0.32	0.61	0.75	0.38	0.48	-0.62	0.08		

Índice de Aridez (IA) % 27.66

Índice de humedad (IH) % 13.64

Índice pluvial (Ip) % -2.96

Concentración térmica en el verano (CT) % 34.04

FORMULA DEL CLIMA

Categoría de humedad

Régimen de humedad

Categoría de temperatura

Régimen de temperatura

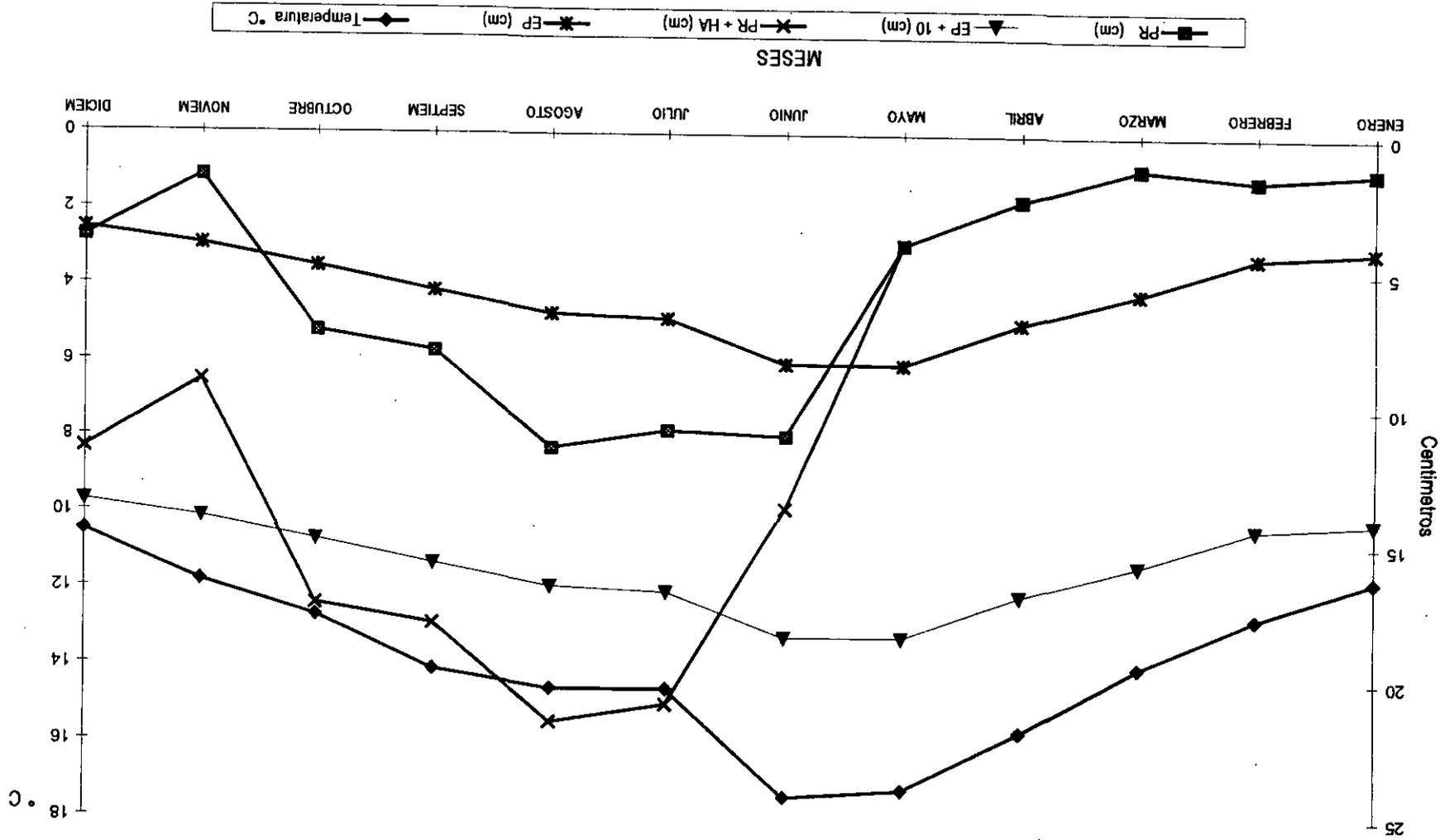
PG: Semiseco

SB: Moderada demasia de agua

TE: Semi - Frío

VA: Verano Cálido, con baja concentración de calor

Climograma. Sistema Thornthwaite. Estación La Concepción. Altura 2300 m.s.n.m. Período 1986-1996; Precipitación promedio anual 60,48 cm, temperatura media anual 13,9 °C



## ANEXO IV

COMPOSICIÓN DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA DE HOAGLAND, DE ACUERDO CON RENNINGSFELD Y KURZMANN (1983)

COMPUESTO	g/l
Nitrato de potasio	0.5400
Nitrato de calcio	0.0900
Fosfato monoácálcico	0.1400
Sulfato de magnesio	0.1300
Sulfato de zinc	0.0008
Sulfato de cobre	0.0006
Sulfato de hierro	0.0140
Sulfato de manganeso	0.0020
Ácido bórico	0.0100

ANEXO V

