



00369  
2  
Ti.

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

---

FACULTAD DE CIENCIAS  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

DISGREGACION, ALTERACION Y AGREGACION DE  
DOS NIVELES DE TRITURACION DE TEPETATES  
DEL ESTADO DE MORELOS POR ESPECIES  
VEGETALES PERENNES EN CONDICIONES  
DE INVERNADERO

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE

**MAESTRA EN CIENCIAS (EDAFOLOGIA)**

P R E S E N T A

**BIOL. ALMA SOCORRO VELAZQUEZ RODRIGUEZ**

DIRECTOR DE TESIS: DOCTOR DAVID FLORES ROMAN

MEXICO, D. F.,

1997

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

*A mis padres...*

## AGRADECIMIENTOS

A través de estas líneas deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que hicieron posible la realización del presente estudio:

A la Universidad Nacional Autónoma de México, en particular a la Facultad de Ciencias.

Al Instituto de Geología, Departamento de Edafología, por permitirme disponer de su infraestructura y por fomentar el interés por el estudio de los suelos.

Al Dr. David Flores Román por su invaluable dirección y por compartir conmigo su tiempo y conocimientos.

A los miembros del H. Jurado:

M. en C. Nelly Diego Pérez  
Dra. Norma Eugenia García Calderón  
Dr. David Flores Román  
Dr. Christian Prat  
Dr. Jorge Etchevers Barra  
Dr. José López García  
M. en C. Miguel Ortiz Olguín

Por sus críticos comentarios y relevantes aportaciones.

Al M. en C. Otilio Arturo Acevedo Sandoval, la Ing. Agric. Lucy N. Mora Palomino y la Biól. Sandra M. Morales Mulia por su desinteresada ayuda, apoyo, amistad y cariño.

Al Ing. Rodolfo del Arenal Capetillo, al Dr. Víctor Manuel Malpica Cruz y a Gerardo Zenteno Santiago, por su apoyo, confianza y amistad.

A la Dirección General de asuntos del Personal Académico, por la beca otorgada para la realización de los estudios de Maestría.

A todo el personal académico y administrativo del Departamento de Edafología y muy especialmente a la M. en C. Ernestina Vallejo Gómez, M. en C. Lourdes Flores Delgadillo, Dr. Jorge E. Gama Castro, Jorge René Alcalá Martínez, Silvia Martha Herrera Rodríguez, Biól. Humberto Núñez Cardona, Pedro Avilés Jaimés y Carmen Galindo Velasco, que pusieron a mi disposición su tiempo, conocimientos y esfuerzo para la satisfactoria culminación del presente estudio.

A todos ellos, mi más profunda gratitud.

# CONTENIDO

	<b>Página</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>i</b>
<b>I. INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
<b>II. REVISION DE LITERATURA</b>	<b>3</b>
<b>1. Tepetates</b>	<b>3</b>
A. Origen y Clasificación	3
B. Distribución	7
C. Importancia	9
D. Integración al Proceso Productivo.	10
<b>2. Agregación</b>	<b>13</b>
A. Coloides y Cementantes Inorgánicos	15
B. Ciclos de Humedecimiento y Secado	18
C. Iones Intercambiables	21
D. Coloides y Cementantes Orgánicos	23
E. Hongos y Bacterias	27
F. Especies Vegetales	28
G. Labranza	32
H. Mesofauna	34
I. Procesos Químicos	35
J. Otros Factores	35

<b>3. Especies Vegetales</b>	<b>37</b>
A. Casuarina	37
B. Eucalipto	37
C. Pirúl	38
D. Pasto Rhodes	39
E. Sorgo	40
F. Veza	41
<b>III. OBJETIVOS</b>	<b>43</b>
<b>IV. HIPOTESIS DE TRABAJO</b>	<b>43</b>
<b>V. DIAGNOSIS DEL AREA DE MUESTREO</b>	<b>44</b>
<b>VI. METODOLOGIA</b>	<b>48</b>
<b>1. Planteamiento del Diseño Experimental</b>	<b>48</b>
<b>2. Caracterización del Tepetate</b>	<b>55</b>
<b>3. Fragmentación, Agregación y Disgregación</b>	<b>56</b>

<b>VII. RESULTADOS Y DISCUSION</b>	<b>57</b>
<b>1. Caracterización del Tepetate Utilizado</b>	<b>57</b>
<b>2. Fragmentación, Agregación y Disgregación</b>	<b>60</b>
A. Granulometría de Fragmentos y Agregados	60
B. Potencial Hidrógeno	69
C. Materia Orgánica	73
D. Agregación en Seco	79
E. Estabilidad de Agregados en Húmedo	103
F. Coeficiente de Estructuración	122
G. Producción de Biomasa	127
<b>3. Comentario General</b>	<b>133</b>
<b>VIII. CONCLUSIONES</b>	<b>135</b>
<b>IX. LITERATURA CITADA</b>	<b>136</b>
<b>X. APENDICE</b>	<b>146</b>

## RESUMEN

El afloramiento de capas endurecidas, tepetates, constituye una forma grave de degradación del suelo y limita notablemente el uso agrícola de las zonas en las que se presenta, mismas que se caracterizan por una alta densidad de población campesina. La dureza y casi nula disponibilidad de nitrógeno, fósforo y materia orgánica del tepetate, dificultan su manejo e integración al proceso productivo, dando como resultado grandes extensiones improductivas y fácilmente erosionables. Ante este hecho, la habilitación de dichas zonas se ha convertido en una imperiosa necesidad que debe ser atendida a corto plazo y no sólo a nivel local, sino nacional.

Con base en lo anterior, el presente estudio fue enfocado al análisis de la modificación de las características físicas y químicas del tepetate, mediante la introducción de especies vegetales perennes, con la finalidad de sentar las bases de la dinámica de los procesos de desintegración, alteración, agregación y disgregación indispensables para la formación de suelo, como una alternativa para la habilitación de zonas con tepetate.

Para evaluar y analizar la tendencia de los cambios ocurridos por influencia de las especies vegetales, se estableció un ensayo en invernadero con seis especies vegetales perennes, tres arbóreas y tres herbáceas, en dos niveles de fracturación del tepetate: uno fino constituido por fragmentos menores de 2 mm y uno grueso, formado por fragmentos de 2 a 25 mm, durante tres periodos de observación: seis, doce y dieciocho meses. Los parámetros fisicoquímicos considerados fueron: color, textura, pH, materia orgánica, agregación en seco, estabilidad de agregados en húmedo y producción de biomasa.

Los resultados mostraron la presencia de procesos de alteración en el tepetate, tales como la desintegración y reorganización del material en agregados estables, como consecuencia de fenómenos fisicoquímicos y, principalmente, de la influencia de las especies vegetales. Dicha influencia puede ser resumida como un incremento en el contenido de materia orgánica, el cual permite la existencia de compuestos capaces de actuar como enlace entre las unidades e incrementar su estabilidad y, el efecto mecánico ejercido por el sistema radical sobre el sustrato, que además de ser responsable, en gran parte, de la desintegración de los fragmentos, también mantiene las características del espacio poroso al separar a las unidades existentes y aumentar la cohesión entre aquellas recién formadas impidiendo su disgregación. Así mismo, se observó que en el nivel de fracturación grueso, por poseer características favorables para el desarrollo de las especies vegetales, se incrementó la velocidad de alteración y reorganización de los fragmentos. El nivel óptimo de agregación fue el de 2 a 5 mm, debido a su frecuencia de formación y mayor estabilidad. Las especies con mayor influencia sobre el tepetate fueron las arbóreas y el pasto Rhodes.

En conclusión, por su destacada influencia sobre las características del tepetate fracturado, las especies vegetales pueden ser consideradas como uno de los principales factores de modificación de las capas endurecidas al favorecer la formación de suelo. Esto constituye una importante alternativa para la habilitación de zonas con tepetate y su posterior integración al proceso productivo.

## I. INTRODUCCION.

En México existen capas endurecidas aproximadamente en el 30% de la República, la mayoría de las cuales han aflorado como una forma grave de degradación del suelo. Además provocan problemas agronómicos importantes, limitan el desarrollo y penetración de las raíces, reducen el paso del agua al subsuelo, favorecen el drenaje lateral que conlleva la pérdida de numerosos materiales e incrementan el riesgo de erosión; de tal manera que su incorporación al proceso productivo se ha convertido en una necesidad.

“Tepetate” es el término utilizado por los campesinos mexicanos para designar a los suelos endurecidos que afloran cuando la capa fértil se pierde. Es una palabra de origen náhuatl que significa “petate o cama de piedra” y que, originalmente, involucró materiales compactados o cementados muy diversos.

En función de la composición del cementante, las capas endurecidas han recibido diferentes nombres dentro del ámbito edáfico: duripanes, que son horizontes cementados por sílice; petrocálcicos, cuando el cementante es carbonato de calcio; petrogypsicos cuando es sulfato de calcio; plintitas si el material está cementado por sesquióxidos y fragipanes cuando se presenta una fuerte compactación con escasa o nula cementación. Sin embargo, después de numerosos estudios, actualmente se consideran como tepetates únicamente aquellos horizontes endurecidos derivados de materiales piroclásticos.

Cabe destacar que en el país, desde hace varios años, se han hecho estudios sobre tepetates, cuyas tendencias principales se refieren a la caracterización morfológica, mineralógica y genética, micromorfología e incorporación al proceso productivo. A partir de dichos trabajos, se han propuesto tres procesos para explicar su endurecimiento: (1) consolidación de partículas minerales que provoca compactación, donde además puede existir cierta cementación; (2) endurecimiento y cementación de materiales piroclásticos en el momento de su depósito y (3) procesos pedológicos que favorecen el aporte de cementantes en solución.

El principal problema para la habilitación de los tepetates es su dureza y casi nula disponibilidad de fósforo y nitrógeno, por lo tanto, para la recuperación de estas zonas se ha recurrido a la fracturación del material y a la adición de abonos, después de lo cual es posible establecer especies vegetales. Sin embargo, es necesario también, favorecer la formación de una estructura con agregados estables que permita la creación de una capa porosa que facilite el desarrollo vegetal y la existencia de una biota activa, es decir, favorecer la existencia de un suelo realmente productivo, al mínimo costo y a mediano plazo.

Desde el punto de vista agronómico, la presencia de agregados permite la formación de suelo y determina las principales características de la capa arable, sus propiedades mecánicas, agronómicas y aquellas relacionadas con el espacio poroso. La formación y estabilidad de los agregados depende de las fuerzas de cohesión y demás factores que mantienen unidas a las partículas primarias y a los agregados entre sí. Entre estos factores destacan los coloides orgánicos e inorgánicos; cationes intercambiables como calcio, magnesio y potasio; cementantes inorgánicos; la textura del suelo y los micro y macroorganismos cuyos efectos fisicoquímicos influyen notablemente en las características estructurales.

Las plantas son consideradas como uno de los principales factores en la formación de agregados estables, el sistema radical actúa directamente sobre el sustrato y es el principal responsable de los cambios que ocurren a nivel de la rizósfera. Las raíces ejercen presión sobre las partículas durante su desarrollo, con lo que dan lugar a fenómenos de empaquetamiento y disgregación del material cementado; los exudados radicales y la continua muerte de raicillas promueven la incorporación de cementantes y la formación de complejos húmicos capaces de enlazarse con la fracción mineral del suelo, lo que favorece la agregación y aumenta la estabilidad.

Numerosas especies vegetales han sido cultivadas en capas endurecidas, entre ellas destacan las leguminosas y gramíneas que se han adaptado muy bien a las características de los tepetates. Las especies forestales han sido usadas por la fuerza de penetración radical que poseen y por adaptarse a condiciones edáficas adversas. En general, la influencia de las plantas sobre las características de un suelo puede resumirse como un aumento en los niveles de materia orgánica y formación de agregados estables consecuencia todo ello, de la acumulación de sus restos, del efecto de los exudados radicales y de los fenómenos mecánicos del sistema radical.

## II. REVISION DE LITERATURA.

### 1. Tepetates.

#### A. Origen y Clasificación.

"Tepetate" es el término Náhuatl utilizado por los campesinos mexicanos para designar a las capas endurecidas, tanto de origen volcánico como sedimentario, que se presentan en zonas donde la capa de suelo fértil se ha perdido. Etimológicamente, la palabra significa "petate de piedra" y está formada por los vocablos "tetl", que quiere decir piedra y "petatl", petate o cama (Rojas y Sánchez, 1985).

En México desde la época prehispánica los materiales del suelo fueron clasificados por su color y dureza. El Códice de Vergara, de mediados del siglo XVI, contiene glifos que definen a los tepetates, los cuales se encuentran representados como una capa sobre la que se coloca el símbolo del suelo; esto se refiere a que originalmente existía sobre el tepetate una capa de suelo fértil, la cual se perdió y permitió el afloramiento de la capa dura. Incluso, es posible suponer que ya se relacionaba a los tepetates con un origen volcánico, pues el glifo correspondiente al tepetate arenoso muestra una capa de arena bajo el símbolo del tepetate (Figura 1).

Sin embargo, no sólo en México se encuentran capas endurecidas, sino también en muchos otros países como Colombia, Chile, Perú, Nicaragua, Ecuador, Japón, Estados Unidos, entre otros, en donde coloquialmente se les denomina de diferentes formas, tal como se muestra en la Tabla 1.

La clasificación de las capas endurecidas, desde el punto de vista edáfico, está en función del nivel de compactación y del cementante que presentan, pudiendo ser de cinco tipos: (1) fragipanes, cuando existe una fuerte compactación con cementación escasa o nula, o simplemente un cierto nivel de cementación, (2) duripanes, cuando se presenta una fuerte cementación por sílice, (3) petrocálcicos cuando la cementación es por carbonato de calcio, (4) petrogypsicos cuando el calcio se encuentra en forma de sulfato y (5) plintitas (petroplintitas), cuando son sesquióxidos de hierro y aluminio los que actúan como cementantes (Flach *et al.*, 1969; Grossman y Carlisle, 1969; Guerrero *et al.*, 1992; Soil Survey Staff, 1994).

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

Figura No.1. Glifos de suelos del código Vergara. Medios del siglo XVI (Rojas y Sánchez, 1985).

**Tabla No. 1. Vocablos empleados para denominar a las capas endurecidas**

PAIS O ETNIA	TERMINO
Geólogos internacionalmente	Toba Volcánica
México	
	Náhuatl
	Otomí
	Tarasco
Nicaragua	Tepetate
Antillas	Xiro
Colombia	Shere
Ecuador	Talpetate
Perú	Pan
Chile	Duripán
Japón	Cangahua
E.U.	Hardpan
	Moromoro, Tosca, Fierrillo
	Kora, Masa
	Duripán y Fragipán

Modificado de: Nimlos, 1987.

El fragipán se forma por compactación o acumulación relativa de sílice cementante, presenta textura franca, alta densidad aparente y muy bajo contenido de materia orgánica; es duro a muy duro cuando seco y frágil cuando se humedece (Flores *et al.*, 1992). Los petrocálcicos se originan por precipitación y acumulación de carbonatos, cuyas fuentes principales son rocas carbonatadas, ceniza calcárea y carbonatos autigénicos (Flach *et al.*, 1969). La cementación en los horizontes petrogypsicos se lleva a cabo por la cristalización del sulfato de calcio cuando se alcanza un nivel óptimo de hidratación (Flores *et al.*, 1991).

En el caso de las plintitas, su formación involucra diferentes procesos, de los que destaca, la segregación o adición de hierro en el perfil y la influencia de fluctuaciones hídricas que alternativamente

crean condiciones de oxidación y reducción, al mismo tiempo hay una acumulación y cristalización de los sesquióxidos. Los duripanes, horizontes cementados por sílice, tienen de 50 cm a varios metros de espesor y una estructura masiva, laminar o prismática (Flach *et al.*, 1969; Flores *et al.*, 1991).

Así, dentro del ámbito científico se han utilizado diferentes conceptos para definir a los tepetates, sin embargo, después de numerosos estudios sobre sus características específicas el concepto ha sido modificado. Actualmente se considera "tepetate" a aquellos horizontes endurecidos (aforados o no) que se originaron por procesos geológicos a los cuales se superpusieron procesos edafogénicos y, cuya composición involucra únicamente materiales piroclásticos. De tal manera que por sus características, algunos tepetates pueden ser clasificados como fragipanes y duripanes (Sánchez *et al.*, 1987; Flach *et al.*, 1992; Flores *et al.*, 1991, 1992; Guerrero *et al.*, 1992; Nimlos y Zamora, 1992; Prat y Quantin, 1992; Zebrowski, 1992). De tal manera que algunos horizontes endurecidos clasificados como fragipanes y duripanes, son tepetates.

En la mayoría de los casos es difícil establecer la génesis de los tepetates, ya que involucra fenómenos tanto diagenéticos como edáficos. Sin embargo, se han propuesto tres procesos para tratar de explicar su endurecimiento, que son: la consolidación de partículas minerales por compactación y ligera cementación; el endurecimiento o soldadura de materiales piroclásticos en el momento de su depósito y, procesos pedológicos a través de los cuales hay un aporte de cementantes en solución (Dubroeuck *et al.*, 1989; Flores *et al.*, 1991; Zebrowski, 1992).

La consolidación geológica, de acuerdo con Nimlos (1989), es función directa de la temperatura de los fluidos volcánicos y la compactación durante la depositación de los materiales; de tal manera, que en la parte con mayor temperatura del fluido, al presentarse una compactación fuerte, los minerales silícicos se fusionan y forman una toba.

Sobre el proceso pedogénico, Nimlos y Ortiz (1987) y Nimlos y Hillery (1990) explican que se presenta cuando el vapor de agua emitido durante las erupciones volcánicas se condensa y ocasiona fuertes lluvias sobre los depósitos cineríticos. Dado que en la ceniza volcánica el enfriamiento del material es tan rápido que no permite la cristalización de la sílice, ésta queda como material amorfo altamente

soluble; así, cuando es liberada en la solución del suelo por efecto de la lluvia, puede moverse, depositarse y precipitar en otras partes del perfil dando como resultado su cementación.

Por su parte, Flach y col. (1992) proponen que el tepetate podría ser resultado del prolongado intemperismo de los feldspatos y materiales ferromagnesianos, o bien, del rápido intemperismo del vidrio volcánico y materiales amorfos. Basan sus afirmaciones en que los piroclastos, por ejemplo, liberan fácilmente la sílice en agua, lo que favorece su desplazamiento y acumulación en otras partes del perfil.

Como el proceso pedogénico siempre se presenta sobre una consolidación geológica, es muy difícil diferenciarlas si no se presenta una capa de sílice iluviada. Durante el proceso pedogénico, hay eluviación de la sílice en un horizonte e iluviación en el inferior, de manera que este último se encuentra cementado, sin embargo, la presencia de capas endurecidas a una gran profundidad implica que el transporte de la sílice no pudo haberse llevado a cabo por procesos pedogénicos, por lo que se establece que la capa se originó como resultado de un proceso geológico, aún cuando posteriormente haya habido procesos pedogénicos (Nimlos, 1987).

## **B. Distribución.**

Aún cuando no ha sido cuantificada con exactitud la extensión que ocupan las capas endurecidas a nivel nacional, Flores y col. (1991) mencionan que se localizan aproximadamente en la tercera parte de la República Mexicana: la mayoría en la Altiplanicie, una pequeña parte al norte de la vertiente del Golfo, otra al noroeste de Sonora y una más a lo largo de la península de Baja California (Figura 2). De acuerdo con los estudios realizados por Zebrowski y col. (1992), sólo las capas endurecidas que se encuentran en el Eje Neovolcánico son tepetates y ocupan una superficie aproximada de 30,700 km<sup>2</sup> (el 27% de la superficie total del Eje Neovolcánico).

Dubroeuq y col. (1989), señalan que existe una relación estrecha entre la distribución de los suelos, sus regímenes hídricos y térmicos y la distribución de los tepetates. De acuerdo con sus estudios, en el Valle de México los tepetates con alto contenido de sílice (tipo duripán) se localizan al inicio de la zona climática subárida, abajo de la zona húmeda con Andosoles.

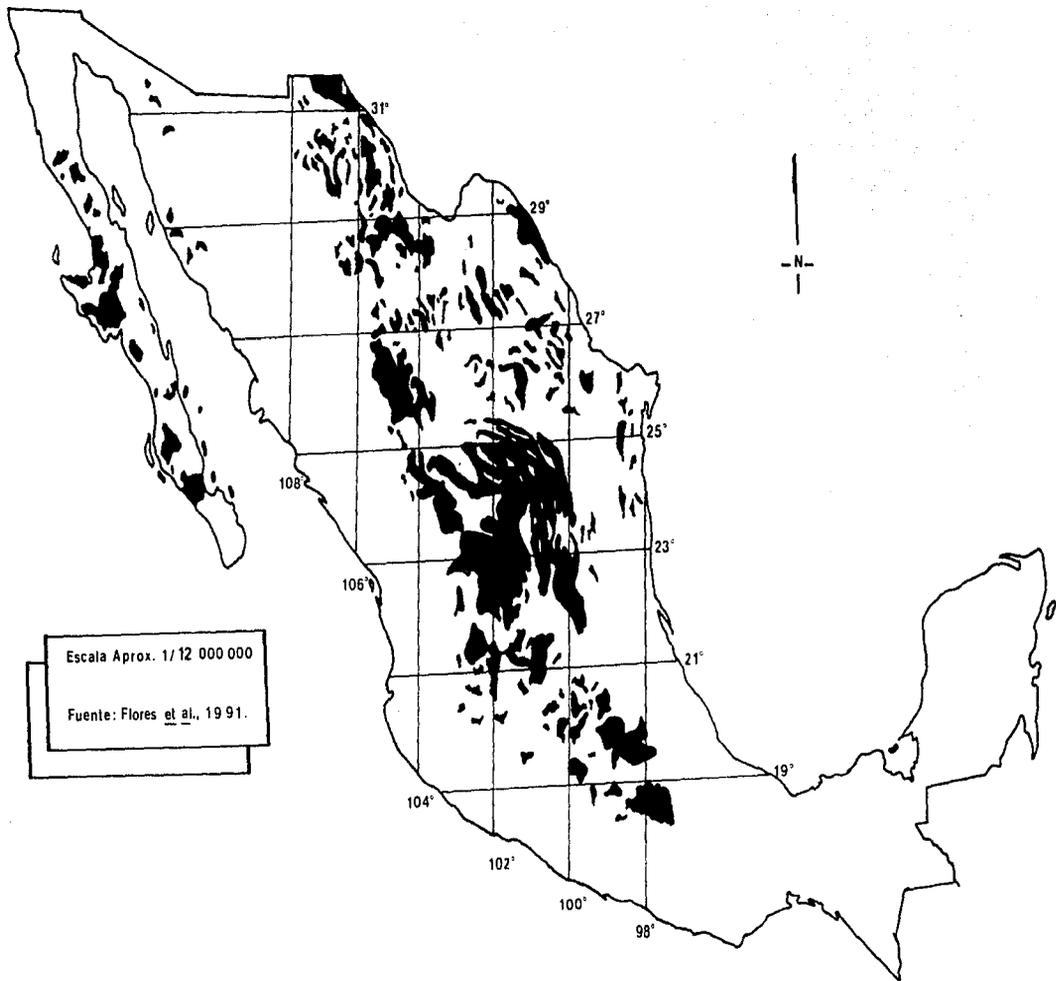


Figura No. 2. Distribución de tepetates en la República Mexicana

Zebrowski (1992) y Peña y Zebrowski (1992), al referirse a la relación entre el clima y la distribución de los tepetates, mencionan que en el altiplano mexicano se encuentran únicamente bajo una pluviometría total anual inferior a los 900 mm. Por su parte, Flores y col. (1991) dicen que los tepetates se distribuyen en climas cálidos, templados y húmedos; en zonas áridas y semiáridas, siempre que la precipitación sea suficiente para disolver los productos del intemperismo, pero sin que haya una fuerte lixiviación

En México se ha reportado la presencia de tepetates en los estados de Tlaxcala, Puebla, Michoacán, Hidalgo, Veracruz, Estado de México, Morelos, Querétaro, Aguascalientes (Flores *et al.*, 1991, 1996; Dubroeuq *et al.*, 1992; Etchevers *et al.*, 1992; Guerrero *et al.*, 1992; Orozco *et al.*, 1992; Peña *et al.*, 1992; Quantín *et al.*, 1992; Rossignol *et al.*, 1992). De igual forma, en otras partes del continente, se ha asociado a los tepetates a zonas climáticas determinadas, presentándose con mayor incidencia en regiones áridas, secas, con baja precipitación pluvial (González y Ringleb, 1992; Luzio y Saavedra, 1992; Nimlos y Zamora, 1992; Prat y Quantín, 1992).

### **C. Importancia.**

Originalmente sobre los tepetates existía una capa de suelo fértil que actualmente se ha perdido como consecuencia, tanto de los procesos erosivos naturales, como del mal manejo agrícola, pecuario y forestal de que ha sido objeto. Por lo tanto, la importancia de estos materiales radica, principalmente, en las repercusiones de su afloramiento y la necesidad de integrarlos al proceso productivo. El tepetate ha sido utilizado en la industria de la construcción por su gran resistencia, sin embargo, desde el punto de vista agronómico, las limitaciones que impone para el establecimiento vegetal y su alta erodabilidad requieren mayor atención.

Por su dureza, el tepetate limita el crecimiento radical, la emergencia de las plántulas y el establecimiento de la biota. Su baja permeabilidad reduce el paso del agua al subsuelo y provoca el drenaje lateral que conlleva la pérdida de materiales y minerales, todo lo cual culmina con su empobrecimiento y erosión. A consecuencia de su compactación o cementación, así como de su

estructura masiva, se presenta una porosidad efectiva baja que limita el paso del agua, la retención de humedad y el intercambio gaseoso. Debido a su mínimo contenido de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, el desarrollo y establecimiento de especies vegetales es limitado, si es que es posible. Estas características dificultan su manejo, lo que provoca el abandono de las zonas y su total exposición a los fenómenos erosivos (Tovar, 1987; Nimlos, 1989; Flores *et al.*, 1991; Arias, 1992; Etchevers *et al.*, 1992a y b; González y Ringleb, 1992; Luzio y Saavedra, 1992; Nava *et al.*, 1992).

Debido a lo anterior, tanto en México como en otros países, se han llevado a cabo estudios sobre tepetates, la mayoría de los cuales, se refieren a la caracterización morfológica, cartográfica y mineralógica (Valdez, 1970; Williams, 1972; Pacheco, 1979; Cervantes, 1983; Flores *et al.*, 1991, 1992; Prat y Quantin, 1992), erodabilidad (Trueba, 1980, Rey, 1987; Arias *et al.*, 1992; Baumann *et al.*, 1992; Prat *et al.*, 1992), Micromorfología (Marin *et al.*, 1971; Flach *et al.*, 1992; Hessmann, 1992; Hidalgo *et al.*, 1992; Peña y Zebrowski, 1992) e integración al proceso productivo en función de la roturación (Camargo y Guido, 1987), adición de fuentes nutrimentales químicas y orgánicas (Arias, 1992) y rotación de cultivos (Márquez *et al.*, 1992, Nava *et al.*, 1992).

#### **D. Integración al Proceso Productivo.**

El principal problema para la integración de los tepetates al proceso productivo es su dureza y baja disponibilidad de materia orgánica, fósforo y nitrógeno, características pese a las cuales, las culturas prehispánicas ya habían intentado la recuperación de estas zonas y establecido las bases para su manejo.

Los Tlaxcaltecas, que fueron uno de los grupos étnicos que más trabajó en el tepetate, lograron adecuarlo para su explotación agrícola desde hace más de 100 años. Sus prácticas de manejo consistían en fracturarlo durante la estación lluviosa, agregar abono de establo y el primer año cultivar abonos verdes como el haba y el ayocote, para en el segundo año, poder sembrar maíz. Con ello, en dos años se lograba la habilitación de zonas con tepetate (Hernández, 1987). Así mismo, Williams (1992) menciona que antes de la conquista, en México se cultivaba en zonas con tepetate habilitándolas a través de la fracturación del material con herramientas comunes y la incorporación de cenizas de hojas de maguey.

Actualmente, en los trabajos sobre incorporación o recuperación de áreas con tepetate, se plantea como indispensable el mismo principio usado por las culturas antiguas: la fracturación del material y la adición de materia orgánica. La diferencia radica en que hoy, en algunas zonas, la fracturación puede llevarse a cabo con maquinaria pesada y la falta de materia orgánica se corrige mediante la adición de abonos y fertilizantes, lo cual facilita y agiliza el proceso de recuperación.

La fracturación del tepetate permite el paso del agua al subsuelo, aumenta su capacidad de retención de humedad, disminuye el potencial de escurrimiento y aumenta la disponibilidad de agua para las plantas. Con ello cambian también las características del espacio poroso y se facilita el intercambio gaseoso, el establecimiento de microorganismos, el crecimiento radical y, por supuesto, se favorece la modificación de la estructura y la formación de suelo (Camargo y Guido, 1987; Peña, 1987; Sánchez *et al.*, 1987; Tovar, 1987; Pimentel, 1992).

Sin embargo, el tamaño óptimo de los fragmentos aún es un aspecto muy discutido; se considera que deben ser suficientemente finos para no dañar el sistema radical, pero suficientemente gruesos para evitar la asfixia. Así como de un tamaño tal que disminuya su susceptibilidad al impacto de la lluvia y el laboreo (Zebrowski, 1992). Se han sugerido como adecuados fragmentos menores de 2 cm (Sánchez, 1981); entre 2 y 8 mm (Dexter *et al.*, citado por Zebrowski, 1992) y de 2 a 4 mm (Martínez *et al.*, 1991). En la mayoría de los casos, el tamaño ha sido definido tomando como base el diámetro óptimo de los agregados de un suelo fértil.

Dadas las características de los tepetates, la fracturación por sí sola no asegura su recuperación, sino que es necesaria la aplicación de abonos. Con la adición de materia orgánica se acelera la formación de suelo, ya que como resultado de su descomposición se sintetizan sustancias orgánicas complejas capaces de unir a las partículas y formar agregados, mismos que proporcionan un estado granular que facilita la circulación del agua y el aire. Por otra parte, la materia orgánica aporta nutrimentos necesarios para el mantenimiento, tanto de las especies vegetales, como de la biota edáfica, aún cuando para ello sea necesario aplicarla en cantidades elevadas (Sánchez, 1981; Tovar, 1987; Márquez *et al.*, 1992).

En los estudios sobre integración de los tepetates al proceso productivo, se han utilizado numerosas especies vegetales para favorecer la formación de suelo e incrementar el contenido de materia orgánica a través de los fenómenos físicos y químicos del sistema radical sobre el sustrato. En dichos estudios se han utilizado principalmente: leguminosas como palo dulce, alfalfa, haba, veza y frijol, que han dado resultados satisfactorios (Camargo y Guido, 1987; Morfin y Camacho, 1987; Peña, 1987; Ruiz, 1987; Zahonero *et al.*, 1991; Arias, 1992; Velázquez, 1994); gramíneas como maíz, cebada, trigo, sorgo y pastos, que se han adaptado muy bien a las condiciones de los tepetates (Camargo y Guido, 1987; Zahonero *et al.*, 1991; Arias, 1992; Delgadillo *et al.*, 1992; Navarro y Zebrowski, 1992; Velázquez, 1994) y especies forestales como eucalipto, pino, casuarina, acacia, abeto y pirúl, con las que se han obtenido los mejores resultados (Pedraza *et al.*, 1987; Arias, 1992; Guerra y Garzón, 1992; Llerena y Sánchez, 1992; Pimentel, 1992; Velázquez, 1994).

Las leguminosas y gramíneas mantienen y mejoran la estructura de un suelo, tanto por el aporte de materia orgánica a través de sus restos, como por las características de su sistema radical. Además, incorporan elementos importantes para el desarrollo vegetal, tal es el caso del nitrógeno aportado por las leguminosas como resultado de su asociación con organismos fijadores (S.E.P., 1982).

Las especies forestales se han usado como parte de programas de reforestación, conservación, recarga de acuíferos y, debido a que los suelos degradados no se consideran aptos para cultivos anuales. Pero también, por su fuerza de penetración radical y porque, en el caso de las especies rústicas como las latifoliadas y coníferas, se adaptan fácilmente a condiciones edáficas adversas (Zebrowski, 1992).

## 2. Agregación.

El término "agregado" ha sido definido por numerosos autores en función de los objetivos de sus investigaciones y por supuesto, desde el punto de vista físico. Sin embargo, todas las definiciones coinciden en que un agregado es un grupo de dos o más partículas primarias que presentan una cohesión mucho más fuerte entre ellas que con las partículas que las rodean (Black *et al.*, 1965; Lal y Greenland, 1979; Primavesi, 1980; Hillel, 1982; Dinel *et al.*, 1991).

Aún cuando no hay un patrón universal para clasificar a los agregados, es posible describirlos con base en tres criterios: (a) el tipo, que describe el aspecto, forma y arreglo de los agregados, (b) la clase, que se refiere al tamaño y (c) el grado o categoría, que representa la estabilidad. Para fines prácticos, generalmente se divide a los agregados en dos grupos: microagregados, que son aquellos cuyo diámetro es inferior a 0.25 mm y macroagregados, que están constituidos por grupos de microagregados y cuyo diámetro es superior a 0.25 mm. Dependiendo de la finalidad de los estudios, se suele agrupar a los agregados en función de sus diferentes diámetros o alguna otra característica ( Wu *et al.*, 1990; Narro, 1994).

En los suelos, la existencia de una estructura formada por agregados estables representa la condición ideal para el establecimiento y mantenimiento, tanto de la biota edáfica, como de las especies vegetales. Dicha estructura permite la creación de una capa ligera y porosa que facilita el movimiento del agua, la retención de humedad, el intercambio gaseoso, el crecimiento radical y la emergencia de las plántulas, pero principalmente influye en la distribución y mantenimiento del espacio poroso, característica que es en realidad la que determina la mayoría de los fenómenos mencionados (Hillel, 1982; Dinel *et al.*, 1991; Tisdall, 1994).

La distribución, tamaño y estabilidad de los agregados del suelo son factores determinantes de la cantidad de poros que persisten después de la lluvia y el laboreo y de su susceptibilidad a la erosión. En el caso de la erosión hídrica, los fluidos en la superficie suministran energía capaz de desprender partículas o grupos de ellas durante su movimiento, lo que crea una fuerza abrasiva que desprende gran cantidad de

materiales. Lo mismo sucede con la erosión eólica cuando el suelo está seco, pero lógicamente, en este caso es el viento el que provoca el desplazamiento de las partículas (Lal y Greenland, 1979).

Además, cuando los agregados se desintegran o dispersan, el movimiento horizontal de las partículas superficiales ocasiona la obstaculización de los poros, lo que afecta todos aquellos fenómenos en los que está involucrado el espacio poroso. La formación de agregados en sí misma no determina la capacidad del suelo para el establecimiento de la biota y especies vegetales, sino que es indispensable, que éstos sean suficientemente estables en seco y en húmedo para mantener las características de los poros aún con los cambios bruscos de humedad y labranza (Black *et al.*, 1965; Lal y Greenland, 1979; Utomo y Dexter, 1982).

Sheffer (citado por Primavesi, 1980) menciona que la proporción óptima de agregados estables en un suelo es del 63% del volumen total y de un diámetro mayor de 0.5 mm. Lal y Greenland (1979) son más específicos y sugieren que los agregados estables de 1 a 5 mm permiten la existencia de poros mayores de 0.05 mm que son los que facilitan el movimiento del agua. De acuerdo con sus estudios, el tamaño óptimo de los agregados para controlar la erosión sin limitar la emergencia de las plántulas es de 10 a 50 mm y hacen énfasis en que los suelos con agregados menores de 2 mm presentan numerosos problemas, por lo que requieren de mayor atención.

El camino por el cual las partículas minerales se organizan en agregados es muy complejo. Todas ellas presentan un cierto grado de cohesión, de tal manera que la formación de agregados en la masa del suelo necesariamente incluye la existencia de fuerzas de disrupción, pero en las unidades que se mantienen como agregados, las fuerzas de cohesión son mayores que las de separación.

Las fuerzas involucradas en el tamaño y estabilidad de los agregados son: de impacto y rompimiento, abrasivas y todas aquellas relacionadas con la entrada del agua al ped, mismas que están en relación directa con el proceso de cultivo y laboreo, fenómenos erosivos y humedecimiento del suelo. Por lo tanto, los factores que incrementan la estabilidad estructural de un suelo son todos aquellos que aumentan la permeabilidad, la cohesión entre partículas y agregados y que moderan la entrada del agua a la unidad (Black *et al.*, 1965; Gaucher, 1971; Narro, 1994).

Aún cuando es imposible atribuir la agregación a un solo factor, los agentes que intervienen en la formación y estabilidad de los agregados pueden agruparse en: (A) coloides y cementantes inorgánicos, (B) ciclos de humedecimiento y secado, (C) iones intercambiables, (D) coloides y cementantes orgánicos, (E) hongos y bacterias, (F) plantas superiores, (G) labranza y (H) mesofauna (Hillel, 1982; Tisdall y Oades, 1982; Fitzpatrick, 1984; Narro, 1994).

#### **A. Coloides y Cementantes Inorgánicos.**

La arcilla ha sido considerada como uno de los coloides a los que se debe gran parte de la agregación en los suelos. Para la formación de agregados estables es necesario que el material coloidal flocule, lo cual está en relación directa con el espesor de la doble capa eléctrica; de tal manera, que los coloides permanecen dispersos en la solución cuando el grosor de la doble capa es tal, que las fuerzas repulsivas forman una barrera que se opone a la unión, sin embargo, si la capa es delgada, aumenta la cohesión y los coloides floculan (Teuscher y Adler, 1979; Bohn *et al.*, 1993). Los electrolitos y algunos iones intercambiables son muy eficientes para modificar la doble capa eléctrica.

Cuando ciertos cationes se introducen en una suspensión coloidal con carga negativa, son atraídos y adsorbidos por los coloides, lo que produce un cambio parcial en su carga y se presenta una atracción que da lugar a la formación de agregados de mayor tamaño. Por otra parte, cuando los coloides están totalmente saturados, adquieren una carga eléctrica igual y se repelen, lo que conlleva una disminución en la agregación. En términos generales, el grado y permanencia de la floculación depende de la naturaleza de los iones presentes: el calcio, el magnesio y los iones tri y tetravalentes tienen un efecto peptizante, pero el potasio y, principalmente el sodio, tienden a deflocular los coloides (Teuscher y Adler, 1979; Primavesi, 1980; Fitzpatrick, 1984).

El efecto agregante de la arcilla se debe a sus características coloidales que la hacen actuar como un cementante, a su unión con moléculas orgánicas y a su capacidad de contracción y expansión. La acción cementante se presenta, principalmente, como resultado de los ciclos de humedecimiento-secado y la cantidad de agua presente en el medio. Cuando el suelo está húmedo, las partículas de arcilla se rodean

de una película de agua, pero a medida que la deshidratación tiene lugar, dicha película se vuelve muy delgada y permite el acercamiento entre partículas hasta que quedan fuertemente unidas por fuerzas cohesivas.

De tal manera que los coloides de arcilla deshidratada ejercen una acción agregante muy fuerte, cuya velocidad de reversibilidad es menor a medida que la cantidad de arcilla se incrementa. Incluso, en muchos casos, la arcilla forma capas que recubren a grupos de partículas manteniéndolas juntas y formando las llamadas cutículas de arcilla, que además de formar agregados, incrementan la estabilidad al regular el paso del agua al interior del ped (Teuscher y Adler, 1979; Tisdall y Oades, 1982; Dinel *et al.*, 1991; Bohn *et al.*, 1993).

Lo anterior no depende sólo de la cantidad de arcilla presente, sino también de su naturaleza mineralógica, ya que las propiedades de cada tipo de arcilla varían en función de su estructura. Por ejemplo, la montmorillonita que es una arcilla de tipo 2:1, tiene una gran afinidad por el agua, lo que le proporciona una alta capacidad de contracción y expansión que resulta en la formación de agregados más estables que en el caso de la caolinita, arcilla del tipo 1:1 que no se expande (Teuscher y Adler, 1979; Fitzpatrick, 1984).

Existen otros compuestos como el magnesio, la sílice amorfa, los carbonatos y sulfatos de calcio, el alófono y los sesquióxidos de hierro y aluminio que son capaces de actuar como cementantes, por lo tanto, influyen también en la formación y estabilidad de los agregados. Estos compuestos, al disolverse y precipitar o alcanzar ciertos grados de hidratación, cementan entre sí grupos pequeños de partículas y microagregados pudiendo en muchos casos, cementar horizontes completos (Flach *et al.*, 1969; Hillel, 1982; Tisdall y Oades, 1982; Churchman y Tate, 1987; Nadler y Steinberger, 1993).

Colombo y Torrent (1991) ratificaron la influencia de los óxidos de hierro y la sílice en la agregación. Al eliminarlos de un suelo, obtuvieron una clara disminución del contenido de arena y limo y un incremento de arcilla, lo que denota la influencia de dichos compuestos en la formación y estabilidad de los agregados, principalmente, en aquellos menores de 0.25 mm, es decir, a nivel de microagregación.

Tisdall y Oades (1982) mencionan, por otra parte, que la agregación por aluminosilicatos presenta una estabilidad en húmedo baja, pero que cuando el cementante está constituido por hidróxidos de hierro y aluminio, la estabilidad se incrementa, especialmente en aquellos suelos en los que los sesquióxidos se encuentran en cantidades superiores al 10%.

Por otro lado, Bartoli y col. (1988) señalan, que los hidróxidos de aluminio pueden ser más efectivos que los de hierro en sistemas con arcilla pura o en suelos con sodio, sobre todo cuando éste se presenta en formas no cristalinas; así como que los policationes de hierro presentan una mayor capacidad de agregación.

Se ha observado también, un aumento en la estabilidad cuando los hidróxidos de hierro y aluminio se encuentran en asociación con calcio y materiales orgánicos de alto peso molecular. Aparentemente en el caso del alófono se requiere de la presencia de cationes para que pueda unirse con otras partículas y formar agregados, cuando esto sucede, los agregados así formados son muy estables (Churchman y Tate, 1987).

Por lo que se refiere a la sílice, se ha observado en el suelo, que con soluciones de 100 a 200 ppm de sílice, los monómeros suelen polimerizar y formar suspensiones coloidales. Esta floculación ocurre en presencia de algunas sales y da como resultado la formación de geles de sílice hidratados altamente solubles, los cuales, al deshidratarse, enlazan o cementan a las partículas y microagregados (Kittrick, 1969; Thiry y Millot, 1987).

Otra característica sobresaliente de los cementantes inorgánicos es la formación de capas que recubren a los agregados existentes, con lo que se incrementa la estabilidad de los mismos al impedir o graduar la entrada de agua al ped, que es, en la mayoría de los casos, el principal factor de desintegración de las unidades (Black *et al.*, 1965; Bartoli *et al.*, 1988; Narro, 1994).

En general, los agentes inorgánicos son considerados como cementantes permanentes de alta estabilidad. Sin embargo, su papel en la agregación es un tanto limitado, ya que de acuerdo con algunos estudios, se presenta principalmente a nivel de microagregación. La combinación de agentes inorgánicos

con compuestos orgánicos es indispensable para lograr una estructuración adecuada y más estable (Utomo y Dexter, 1982; Gupta y Germida, 1988; Rasiah y Kay, 1994; Tisdall, 1994).

### **B. Ciclos de Humedecimiento y Secado.**

Los ciclos de humedecimiento y secado que se presentan en el suelo afectan el proceso de agregación por estar en relación directa con la cohesión, la contracción y expansión de las arcillas, el congelamiento y deshielo del agua y la disolución y precipitación de los agentes cementantes, tanto orgánicos como inorgánicos. Por otra parte, no se descarta el efecto que tienen dichos ciclos sobre el tamaño de las poblaciones, la actividad de la biota y el establecimiento de especies vegetales, lo que también depende del contenido de agua en el suelo (Fitzpatrick, 1984; Perfect *et al.*, 1990; Perfect y Kay, 1990).

La cohesión se ve afectada directamente por los cambios de humedad; se incrementa cuando el suelo está seco y las partículas orientadas y, disminuye en condiciones de hidratación o desorganización del material. Esto es debido a que el agua al rebasar cierto nivel, forma capas muy gruesas entre las partículas, lo que impide su agrupación y también, a que cuando no hay orientación los posibles puntos de contacto disminuyen (Bohn *et al.*, 1993; Dinel *et al.*, 1991).

En algunos suelos, principalmente aquellos con alto contenido de arcillas de relación 2:1, la expansión y contracción se presentan como una consecuencia de las variaciones en la cantidad de agua presente. Durante el período húmedo, las arcillas se hidratan y expanden, lo que ocasiona la desintegración de las unidades del suelo por la presión creada en su interior con la entrada del agua y la salida del aire. En la época seca, las arcillas se deshidratan y la pérdida de agua incrementa la cohesión entre partículas. Dado que se había presentado una disgregación previa durante el período húmedo, hay compactación del suelo y pérdida de la estructura por disminución de los macroporos, quedando el material altamente expuesto a los procesos erosivos, sobre todo cuando la cubierta vegetal es pobre. En muchos casos, se observa un agrietamiento del suelo a causa de los ciclos de humedecimiento y secado (Teuscher y Adler, 1979; Fitzpatrick, 1984).

El efecto del congelamiento y deshielo es función del cambio de volumen que sufre el agua al pasar del estado líquido al sólido. A medida que desciende la temperatura, el agua se comporta en forma normal, pero al llegar a los 0°C y solidificarse, hay un aumento de hasta el 10% del volumen inicial. En el sistema suelo este fenómeno provoca, entre otras cosas, una gran presión cuando el agua contenida en los poros se expande y deja al descongelarse y regresar al estado líquido, un gran número de fragmentos y partículas sueltas que obstruyen los poros y ocasionan compactación cuando el suelo se seca. El grado de disgregación aumenta conforme se incrementa la frecuencia de los ciclos de congelamiento y deshielo (Fitzpatrick, 1984).

En presencia de ciclos de humedecimiento y secado, muchos materiales como los compuestos de hierro y aluminio pueden precipitar y constituir horizontes completos. Durante los períodos de humedad, los materiales más solubles como carbonatos, sulfatos y nitratos suelen formar parte de la solución del suelo y perderse por drenaje o moverse y depositarse en otros sitios. Como resultado de ello hay una transferencia de material y un cambio en la estructura del suelo: muchos agregados son desintegrados al disolverse los compuestos que actúan como cementantes y se incrementa la susceptibilidad a la erosión (Perfect *et al.*, 1990; Perfect y Kay, 1990).

De igual forma, al haber precipitación, existe la posibilidad de que nuevos agregados se formen y se incremente su estabilidad, ya que muchos de los compuestos al precipitar o recristalizar, presentan una disminución en su capacidad de disolución. Sin embargo, cuando el contenido de cementantes es muy alto, se corre el riesgo de que todo el horizonte se cimente, lo que ocasiona numerosos problemas. Por supuesto, todo lo anteriormente descrito está en función de la cantidad de agua presente y de la frecuencia e intensidad de los ciclos de humedecimiento y secado (Fitzpatrick, 1984; Perfect *et al.*, 1990; Perfect y Kay, 1990).

Se ha reportado que los ciclos de humedecimiento y secado provocan una disminución, tanto en el número, como en la estabilidad de los agregados del suelo, principalmente de aquellos mayores de 0.25mm (Perfect *et al.*, 1990; Singer *et al.*, 1992). De acuerdo con los resultados de Utomo y Dexter (1982), en suelos no agregados los ciclos de humedecimiento y secado producen planos de debilitamiento que constituyen la fase inicial de la agregación. En estos casos, la previa desintegración del material es

indispensable para proporcionar partículas y fragmentos susceptibles de ser reorganizados, con lo que, obviamente, mejora su condición.

Los mismos autores mencionan que en aquellos suelos en los que los agregados fueron destruidos a causa del laboreo, los ciclos de humedecimiento y secado favorecen el incremento de la estabilidad hasta un valor máximo, pero que después de dicho valor, la estabilidad comienza a disminuir. Sólo en el caso de suelos con agregados naturales y sin perturbar, la estabilidad disminuye desde el principio, pero en suelos con agregados artificiales, es decir, formados por labranza simulada, la estabilidad se incrementa notablemente.

Singer y col. (1992) observaron también una disminución en la estabilidad en húmedo de agregados sintéticos de arcilla, como consecuencia de los ciclos de humedecimiento y secado, la cual atribuyen a la reorientación de las partículas por el agua. De acuerdo con sus resultados, al incrementarse el contenido de agua predominan las uniones cara-cara cuya estabilidad es muy baja. De tal manera que cuando el suelo se seca, estas uniones son fácilmente separadas. Incluso, son mucho menos resistentes al siguiente ciclo de humedecimiento, aunque esto depende del tipo de arcilla involucrado.

Es necesario destacar, que una consecuencia importante de la reorientación de la arcilla es el aumento en su capacidad de interactuar con las partículas de arena, lo que da lugar a la formación de microagregados sumamente estables, fase fundamental para la macroagregación.

Desde el punto de vista de la biota, dado que las poblaciones presentan fluctuaciones estacionales y su desarrollo depende de la cantidad de agua y aire disponible en el suelo, su influencia en la agregación también se ve afectada por los ciclos de humedecimiento y secado. Principalmente, se presenta un cambio en la cantidad de los compuestos orgánicos que son producidos y transformados por los microorganismos y que constituyen la base de la agregación por su capacidad de enlace con la fracción mineral (Perfect y Kay, 1990).

Por su parte, las plantas superiores al absorber nutrimentos de la solución del suelo, crean condiciones de hidratación y deshidratación, cuyos efectos son los mismos que los ocasionados por los

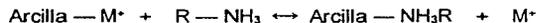
ciclos de humedecimiento y secado, aunque en menor proporción y en un área que se limita a la periferia de la raíz (Tisdall, 1994).

### C. Iones Intercambiables.

Los iones intercambiables también ejercen influencia sobre agregación. Cuando cationes como  $H^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Na^+$  y  $K^+$  se encuentran en una solución coloidal negativa, son atraídos y adsorbidos por los coloides. Esto produce una neutralización parcial de las cargas y los coloides se atraen entre sí formando pequeños grupos amorfos, proceso denominado floculación. Dicho proceso constituye el primer paso para la formación de agregados, sin embargo, cuando los coloides se saturan completamente por cationes como el  $Na^+$  y el  $K^+$ , adquieren una carga eléctrica igual y se repelen, disminuyendo con ello su capacidad de agregación (Teuscher y Adler, 1979).

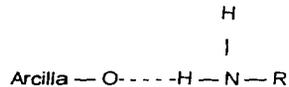
Cabe destacar, que los cationes no sólo contribuyen en la agregación al neutralizar las cargas negativas de los coloides, sino que también sirven de enlace entre la fracción mineral y la fracción orgánica del suelo, lo que permite la formación de complejos órgano-minerales muy estables (Stevenson, 1982). De acuerdo con Teuscher y Adler (1979), Hillel (1982), Stevenson (1982) Tisdall y Oades (1982) y Bohn y col. (1993), los principales mecanismos de adsorción y formación de complejos en los que intervienen los iones son:

(i) **Atracción electrostática**, la cual se lleva a cabo por procesos de intercambio catiónico cuando los cationes orgánicos reemplazan a los inorgánicos en el complejo de cambio.



Este tipo de unión está en función del pH y de las propiedades del catión orgánico. Compuestos ligeramente básicos pueden ser adsorbidos por protonación, proceso en el que la molécula orgánica adquiere una carga positiva aceptando un protón.

(ii) **Puentes de hidrógeno**, que es la unión de dos moléculas mediante un enlace con un protón.



(iii) **Enlaces de coordinación**, en donde un ion metálico sirve de enlace entre la molécula orgánica y otro constituyente del suelo.



(iv) **Uniones directamente a través del catión** entre la fracción mineral y la fracción orgánica, o bien entre dos moléculas minerales o dos orgánicas.

Arcilla — catión — materia orgánica

Arcilla — catión — arcilla

Materia orgánica — catión — materia orgánica

Catión:  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Al}^{+++}$ ,  $\text{Fe}^{+++}$

En la mayoría de los trabajos se menciona que la cantidad de arcilla capaz de dispersarse es función del tipo de arcilla y del contenido de materia orgánica, sin embargo, Dinel y col. (1991) destacan

además, que en muchos casos son los enlaces, incluyendo aniones orgánicos que forman complejos con metales polivalentes, los que aumentan la dispersión por reversión de la carga de la superficie de la arcilla.

Lo anterior es apoyado por los trabajos de Primavesi (1980) y Tisdall y Oades (1982), quienes mencionan que los aniones orgánicos promueven la dispersión al bloquear los sitios positivos de la superficie coloidal. Señalan que los macroagregados (mayores de 0.25 mm) están formados por complejos órgano-minerales, aunque no descartan la presencia de enlaces por puentes de hidrógeno.

Los iones son considerados como agentes de unión y estabilizantes permanentes, de tal manera, que se trata de factores altamente efectivos para favorecer una buena estructuración cuando se conocen sus características y efectos sobre el sustrato.

#### **D. Coloides y Cementantes Orgánicos.**

La materia orgánica, el humus y diversos compuestos mucilaginosos producidos por los microorganismos y plantas, actúan como cementantes entre las partículas minerales del suelo y dan lugar a la formación de agregados estables. Los constituyentes orgánicos influyen en la agregación de dos formas: como agentes cohesivos entre partículas o grupos de ellas y a través de la formación de capas semipermeables que recubren a los agregados existentes (Tisdall, 1994; Perfect y Kay, 1990).

Los restos vegetales y animales de cualquier naturaleza que se depositan en el suelo, constituyen la principal fuente de materia orgánica, sin embargo, existe una parte bastante significativa que está constituida por aquellos compuestos que son secretados por los microorganismos y plantas como resultado de su metabolismo. La descomposición, transformación y reorganización de los compuestos orgánicos finaliza por un lado, con su mineralización y por otro, con la formación de humus, compuesto coloidal por cuyas características es considerado como uno de los principales factores de agregación en los suelos (Bohn *et al.*, 1993).

El humus coloidal presenta un área superficial mayor que la de los coloides minerales ( $900 \times 10^3 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ ) y una gran capacidad de adsorción (capacidad de intercambio catiónico: 1500 a 3000 mmoles/kg) resultado de los grupos activos carboxilos (  $-\text{COOH}$  ), carbonilos (  $-\text{CO}$  ), hidroxilos ( $-\text{OH}$ ), fenólicos (benceno- $\text{OH}$  ) y aminos ( $-\text{NH}_2$ ), presentes en la molécula (Stevenson, 1982; Bohn *et al.*, 1993).

Los principales mecanismos de unión entre las sustancias húmicas y la fracción mineral del suelo para formar agregados son tres: (a) a través de interacciones primarias (ion-dipolo), como los enlaces catiónicos e intercambio aniónico con los grupos carboxilo y algunos grupos polares sin carga como  $\text{NH}_2$  o  $\text{C}=\text{H}$ , (b) interacciones secundarias, como los puentes de hidrógeno con los grupos amino, carboxilo e hidroxilo y fuerzas de Van der Waals en las porciones sin carga de las cadenas poliméricas y (c) por interacciones indirectas, como los efectos de entropía causados por el desplazamiento de las moléculas de agua de la superficie de las arcillas por un polímero de cadena simple (Hillel, 1982; Stevenson, 1982; Tisdall y Oades, 1982; Bohn *et al.*, 1993 ).

De acuerdo con Gupta y Germida (1988), Tisdall (1994) y Hayes y Tapp (1994), la agregación por sustancias húmicas se da principalmente a nivel de microagregados, así como la asociación de silicatos laminares y coloides minerales con el humus vía cationes. El humus constituye un agente de enlace permanente y es más efectivo en la estabilización de agregados que los materiales fibrosos (Dinel *et al.*, 1991). Sin embargo, la materia orgánica del suelo incluye también materiales no humificados, los cuales, tienen una función mucho más amplia en la estructuración, aunque los enlaces que forman son menos estables que en el caso del humus.

Al depositarse el follaje en el suelo, se reduce el impacto de las gotas de lluvia y disminuyen los efectos erosivos, cobertura que evita también la pérdida excesiva de agua por evaporación al regular la frecuencia e intensidad de los ciclos de humedecimiento y secado. posteriormente, a través de la descomposición de los restos, se favorece la humificación y se incrementa el aporte de nutrientes para los microorganismos y especies vegetales.

No obstante, el efecto principal de la materia orgánica es el aporte de compuestos capaces de aglutinar a las partículas minerales y a los agregados existentes, como en el caso de carbohidratos,

azúcares, lípidos, proteínas y aminoácidos. Además, se liberan compuestos como las ligninas, ceras y resinas que funcionan no sólo como agentes de unión, sino en muchos casos, como cementantes (Hillel, 1982; Dinel *et al.*, 1991; Bathke *et al.*, 1992; Tisdall, 1994).

Ciertas sustancias mucilaginosas denominadas poliurónidos (levanas y dextranas) que se originan durante la descomposición de la celulosa y otros carbohidratos, actúan como cementantes muy estables y pueden adsorber aniones y cationes que se enlazan con los coloides minerales (Primavesi, 1980; Perfect y Key, 1990).

El 25% de la materia orgánica del suelo está constituida por carbohidratos que pueden encontrarse como azúcares o hemicelulosa. Los carbohidratos con grupos carboxilos en sus moléculas son más activos que los restantes, lo que resulta de gran importancia ya que los grupos funcionales actúan como sitios de cambio, puentes de unión o ion común (quelatantes), de acuerdo con sus características (Guggenberger y Zech, 1994).

Los polisacáridos pueden enlazarse a la fracción mineral por medio de cationes, puentes de hidrógeno y enlaces de coordinación. Los complejos formados son muy estables debido a que la fracción mineral bloquea los sitios activos de la materia orgánica, con lo que al mismo tiempo, la protege del ataque y degradación por microorganismos y enzimas catalíticas presentes en el suelo. Los agregados pueden permanecer sin alteración por mucho tiempo, más aún, que aquellos formados por cementantes inorgánicos. De igual forma, aunque en menor proporción, los aminoácidos intervienen también en la formación de agregados, tanto por la presencia de grupos activos, como por su acción cementante (Hillel, 1982; Tisdall y Oades, 1982; Dinel *et al.*, 1991; Hayes y Tapp, 1994).

Otra característica de los componentes orgánicos, es su capacidad para formar capas semipermeables que recubren a los agregados e impiden la entrada brusca del agua a la unidad, fenómeno que en condiciones normales constituye una de las principales causas de disgregación y pérdida de la estructura. En este proceso, la propiedad determinante es el carácter hidrofóbico de los compuestos involucrados (polisacáridos, ceras, resinas y gomas) mismos que son producidos por hongos, bacterias y raíces (Stevenson, 1982; Guggenberger y Zech, 1994; Tisdall, 1994; Hayes y Tapp, 1994).

En algunos casos, los agentes orgánicos activos se encuentran formando parte de la solución del suelo y penetran en los agregados; al haber deshidratación, dichos compuestos precipitan y forman cementantes más o menos insolubles. Algunos de estos compuestos son hidrofóbicos o llegan a deshidratarse tanto, que el complejo organo-mineral formado disminuye su afinidad por el agua (Hillel, 1982). Cabe señalar, que en el caso de los polisacáridos, se ha observado que su influencia está asociada a la formación de complejos cuando los polímeros se encuentran cargados y a la de recubrimientos, cuando los polímeros son neutros (Guggenberger y Zech, 1994).

De acuerdo con Tisdall y Oades (1982) y Hayes y Tapp (1994), los materiales orgánicos tienen una influencia diferencial en la formación y estabilización de agregados. Consideran que los polisacáridos actúan como agentes transitorios, las raíces e hifas como agentes de enlace temporales y las sustancias húmicas como agentes de enlace permanentes. Así mismo, atribuyen la formación de macroagregados (>0.25 mm) a fenómenos físicoquímicos de raíces e hifas sobre el material y la de microagregados (<0.25 mm) a la interacción de los coloides minerales con la fracción húmica de la materia orgánica y algunos polisacáridos.

Todo lo anterior, sin descartar que algunos restos orgánicos sin alterar pueden incrustarse en la fracción mineral y dar lugar a la formación de grandes microagregados (0.09 a 0.25 mm), así como que, ocasionalmente, inclusiones de algunos desechos pueden contribuir a la formación de microagregados de 0.02 a 0.09 mm de diámetro.

Esto coincide con lo expuesto por Gupta y Germida (1988) y Dinel y col. (1991), quienes además concluyen que los microagregados contienen materia orgánica mucho más procesada (generalmente humificada) que los macroagregados. Aunque, cuantitativamente, los macroagregados poseen una mayor cantidad de compuestos orgánicos, carbono, nitrógeno y fósforo. De tal modo que a nivel de microagregación, predomina el efecto del humus, de los coloides y de los cementantes inorgánicos. Explican también, que la estabilidad disminuye al incrementarse el tamaño de los agregados, lo cual es debido a que en los macroagregados la materia orgánica presente es menos procesada, más lábil y accesible a la mineralización, por lo que después del laboreo o la lluvia, los que permanecen en el suelo son los microagregados.

## E. Hongos y Bacterias.

Los hongos y las bacterias influyen en la estructuración del suelo a través de mecanismos complejos como la adsorción y la envoltura o enrollamiento físico, pero principalmente, mediante la secreción de compuestos mucilaginosos que permiten la unión de partículas y microagregados en grupos muy estables ( Hillel, 1982; Fitzpatrick, 1984; Narro, 1994).

Los hongos estabilizan agregados mayores de 1 mm (Dinel *et al.*, 1991) y son considerados como agentes de unión transitorios cuando su acción es a través de los productos metabólicos que secretan y como agentes temporales, cuando la agregación es resultado del efecto mecánico de las hifas. Estas últimas, forman en el suelo una red cubierta de polisacáridos extracelulares capaz de unir a grupos de partículas y agregados, tanto por la presión ejercida sobre ellos, como por las características adhesivas de los polisacáridos. El fenómeno mecánico de empaquetamiento da lugar a la formación de macroagregados.

Por otra parte, los polisacáridos secretados actúan a nivel de microagregación y pueden, además, formar capas que recubren a las unidades evitando con ello que se colapsen al entrar en contacto con el agua. Además, las hifas durante su desarrollo separan a los agregados existentes y mantienen las características del espacio poroso (Tisdall y Oades, 1982; Tisdall, 1994; Hayes y Tapp, 1994).

En el caso de las bacterias, su efecto en la agregación está en relación directa con los compuestos que secretan, al igual que los hongos, como parte de su metabolismo. Estos compuestos, en su mayoría polisacáridos y monosacáridos como la manosa, constituyen agentes de unión transitorios y forman agregados muy estables. En algunos casos, las células bacterianas o colonias de ellas, se incrustan en las fracciones minerales y actúan como agentes cohesivos (Tisdall, 1994; Hayes y Tapp, 1994). La estabilización por influencia de bacterias se presenta a nivel de agregados menores de 0.5 mm (Dinel *et al.*, 1991) y, de acuerdo con Primavesi (1980), las más eficientes han sido *Cytophagas* y *Sporocytophagas*, por la gran cantidad de gomas que producen.

En un trabajo realizado por Dorioz y col. (1993) se analizó el efecto de hongos y bacterias en partículas de arcilla. Con los hongos hubo una orientación de las partículas alrededor de las células fúngicas y secreción de polisacáridos extracelulares que permitió el enlazamiento local de las partículas minerales, además de un efecto general de empaquetamiento e incremento en la porosidad de la arcilla. Los hongos abrieron numerosas fisuras, cuyo tamaño se incrementó por efecto de los ciclos de humedecimiento y secado. lo que permitió la desintegración inicial del material para posteriormente formar agregados. Con las bacterias no se presentó una marcada orientación de las partículas, pero el efecto sobresaliente fue la adhesión de la arcilla a las células y una elevada producción de polisacáridos.

De lo anterior, los autores concluyen que tanto los hongos como las bacterias, tienen una gran capacidad para inducir la estructuración en condiciones en las que los mecanismos físicos no son tan efectivos. Tal es el caso de partículas rígidas poco reactivas; partículas del tamaño de la arena y medios con poco contraste de potenciales hídricos.

La estructuración a través de estos organismos, está directamente relacionada con todos aquellos factores, como temperatura, humedad y aireación, que determinan el desarrollo y establecimiento de las poblaciones. Cuando éstas se reducen, la formación de agregados es menor al disminuir los efectos de empaquetamiento y la producción de polisacáridos extracelulares, los cuales constituyen el enlace con la fracción mineral (Gupta y Germida, 1988).

## **F. Especies Vegetales.**

Las plantas superiores están involucradas en la estructuración del suelo, tanto por favorecer la desintegración del material, fase inicial de la agregación (Utomo y Dexter, 1982), como la formación y estabilización de los agregados. Su efecto puede ser de tres tipos: (a) mecánico, resultado de la presión ejercida durante el desarrollo del sistema radical y los fenómenos de empaquetamiento, (b) químico, a través de la producción de exudados y aporte de materia orgánica por transformación de sus restos y (c) físico, al crear ciclos de humedecimiento y secado durante la absorción de nutrientes. Sin descartar aquellos fenómenos que se llevan a cabo en la rizósfera como resultado del metabolismo vegetal y de la

interacción con los microorganismos que ahí se encuentran (Hillel, 1982; Tisdall y Oades, 1982; Easterwood *et al.*, 1991; Tisdall, 1994).

Las plantas están consideradas como el factor principal, ya sea para favorecer la estructuración de suelos no agregados, como para modificar y dirigir la agregación en suelos con una deficiente o inadecuada estructuración. Actúan como agentes de unión temporales cuando la agregación es por empaquetamiento, transitorios cuando se lleva a cabo a través de los mucilagos y permanentes cuando sus restos se humifican y es el humus el enlace con la fracción mineral (Reid y Goss, 1981; Karimian y Razmi, 1990; Ellsworth *et al.*, 1991; Dorioz *et al.*, 1993; Hayes y Tapp, 1995).

Durante el establecimiento de las especies vegetales la raíz ejerce una presión capaz de dispersar a las partículas minerales y separar grupos de agregados. Al mismo tiempo y mediante la absorción de nutrimentos y agua, se crean condiciones de deshidratación en el suelo que, al igual que los ciclos de humedecimiento y secado, afectan la contracción y expansión de arcillas así como la solubilización o precipitación de otros compuestos, lo cual da como resultado cambios en la estabilidad de los componentes y unidades del suelo (Hillel, 1982).

Easterwood y col. (1991) reportan que la introducción de plantas de soja y trigo durante 15 meses en un suelo de minerales basálticos, promovió la alteración del material y la posterior formación de minerales secundarios. Los autores atribuyen estos procesos al incremento de las reacciones hidrolíticas por efecto de las especies vegetales ya que éstas exudan ácidos orgánicos como el oxálico, glicólico, láctico, succínico y fumárico, que aceleran el intemperismo mineral y favorecen, tanto la formación de otros minerales y compuestos, como su posterior asociación.

El efecto de las plantas en la reorganización de las partículas y microagregados para formar macroagregados se atribuye, como se mencionó, a fenómenos mecánicos y químicos. En el primer caso, las raíces durante su crecimiento envuelven y compactan grupos de partículas, agregados y fragmentos, mediante la creación de estructuras reticulares cubiertas de polisacáridos alrededor de ellos. Dicha red, permite que el material se mantenga junto y da lugar a la formación de agregados de mayor tamaño, los

cuales quedan protegidos por los mucilagos de la entrada abrupta del agua, así, además de que se forman agregados, se incrementa su estabilidad.

Sin embargo, los polisacáridos no sólo forman capas semipermeables sobre los agregados, sino que en la mayoría de los casos establecen enlaces con la fracción mineral del suelo y se forman complejos polisacárido-arcilla, que son susceptibles de unirse entre sí y con otras fracciones para dar lugar a la reorganización del material. Incluso, algunos mucilagos radicales son transformados en polisacáridos mediante el metabolismo microbiano, lo que permite la formación de un mucigel que recubre a las unidades y evita su disgregación (Tisdall, 1994).

En el trabajo realizado por Dorioz y col. (1993), se analizó el efecto de raíces de diferentes pastos en un sustrato arcilloso. Se observó una reorganización del material, resultado de los efectos mecánicos de penetración de la raíz, caracterizada por la orientación y compactación de la arcilla, así como un efecto debido a los polisacáridos producidos. Estos compuestos impregnaron un área mayor de 0.05 mm alrededor de las partículas minerales y dieron lugar a la formación de complejos arcilla-polisacárido cuyas propiedades físicas fueron completamente diferentes a las de la arcilla pura.

Otro aspecto importante fue la presencia de microfisuras en el material después de un evento de humedecimiento y secado, las cuales fueron cubiertas de polisacáridos u ocupadas por raicillas. El efecto de empaquetamiento fue mayor con partículas del diámetro de la arena y conjuntos de microagregados, lo cual, apoya lo expuesto por Tisdall y Oades (1982) acerca de que las raíces ejercen influencia mecánica en un macromedio de 0.02 a 1.0 mm. Con los exudados el efecto fue a nivel de micromedios y microagregación.

Así como el suelo puede ser modificado por el crecimiento radical, las características edáficas influyen también en el desarrollo de las raíces. Cada especie vegetal tiene una morfología radical característica, susceptible de ser modificada por el medio. La capacidad de penetración radical varía con la especie y depende de condiciones físicas, químicas y biológicas del perfil, como son la dureza, permeabilidad, cantidad de agentes cementantes, entre otras. El crecimiento radical es inversamente proporcional a los impedimentos mecánicos: una capa dura, por ejemplo, puede impedir la penetración de

la raíz y favorecer una expansión radial cuando el suelo está húmedo, pero no cuando está seco (Bathke *et al.*, 1992).

La compactación altera el tamaño y continuidad de los poros. Muchas raíces tienen 0.25 mm o más de diámetro, de tal manera que cuando el suelo tiene suficientes poros de este tamaño, las raíces pueden proliferar, pero de no ser así, el crecimiento se detiene. Cabe señalar que hay algunas raíces que pueden penetrar en poros más pequeños, pero para ello se requiere de una mayor fuerza de penetración, más producción de compuestos hidrolíticos o de que la fracción mineral contenga materiales fácilmente expandibles o solubles (Lal y Greenland, 1979).

Generalmente, para perforar capas duras se usan plantas con raíces profundas, axonomorfas y con gran fuerza de penetración como las arbóreas. Los pastos tienen también un efecto sobresaliente en este tipo de capas debido a su rápida proliferación radical, a su capacidad para penetrar en poros de menor tamaño que el diámetro mismo de la raíz, a su fácil alargamiento radical y a que por su morfología (raíz fascicular), la producción de polisacáridos es mayor y abarca un área mucho más amplia que las especies con raíces axonomorfas (Bathke *et al.*, 1992).

Las plantas perennes han demostrado, a diferencia de las especies anuales, una mayor influencia sobre la estructura del suelo y gran capacidad para establecerse en condiciones edáficas adversas. Esto se debe, por una parte, al tiempo que permanecen en el sustrato y, por otra, a su morfofisiología. Con las especies anuales, se acelera la pérdida de materia orgánica y la destrucción de los agregados a causa de la frecuencia de labranza (Hillel, 1982; Tisdall, 1994).

Karimian y Razmi (1990) al analizar el efecto de diferentes especies perennes en las características químicas de un suelo, obtuvieron un incremento notable en el porcentaje de materia orgánica (tanto por depositación y descomposición de sus restos, como por producción de mucilagos), así como del contenido de fósforo, potasio, manganeso, zinc y cobre.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Reid y Goss (1981), quienes además destacan la influencia de los cultivos en las características físicas del suelo. Ellos demostraron, que después de cuatro

semanas de crecimiento de un pasto y alfalfa en un suelo areno-limoso, se incrementó notablemente la estabilidad de los agregados, principalmente de aquellos mayores de 0.5 mm, por efecto de las sustancias orgánicas liberadas por la raíz.

Cuando las raíces se asocian con bacterias fijadoras o micorrizas, como en el caso de las leguminosas y muchas arbóreas, producen exudados diferentes de los producidos cuando no lo están, pero el efecto de éstos en la estructura es el mismo. La ventaja de las micorrizas es que se presenta una invasión rápida del suelo ya que las hifas actúan como una extensión de la raíz, en consecuencia, hay mayor producción de polisacáridos extracelulares y los efectos abarcan un mayor volumen (Tisdall, 1994).

Existen algunos trabajos en los que el aumento en la estabilidad de los agregados es atribuido, en gran parte, al efecto de las micorrizas (Reid y Goss, 1981; Tisdall y Oades, 1982). Incluso, Emerson y col. (citados por Tisdall, 1994) sugieren que en suelos forestales, la estabilidad de los macroagregados está fuertemente influenciada por su presencia.

En el caso de la asociación de especies vegetales con bacterias fijadoras, el efecto en la estructuración es básicamente que se presenta una mayor cantidad de polisacáridos: los producidos normalmente por la planta, más aquellos producidos por las bacterias, así como un incremento en el contenido de nitrógeno en el suelo, el cual es importante para las plantas y microorganismos encargados de los procesos de transformación de compuestos orgánicos (Stevenson, 1982).

Para finalizar, es necesario destacar que las algas son los organismos que mayor cantidad de mucilagos producen, por lo que su influencia en la estructura del suelo es también sobresaliente (Stevenson, 1982).

### **G. Labranza.**

La estructura es una propiedad que puede alterarse fácilmente con la labranza. Como resultado del mal manejo, el cambio provocado por el laboreo es, generalmente, de una estructura buena, granular,

a una masiva o de bloques. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, la labranza también puede ser un medio adecuado para mejorar las características estructurales del suelo (Fitzpatrick, 1984; Rasiah y Kay, 1994).

La labranza, que es la modificación de las características físicas del suelo con el fin de incrementar la producción, incluye desde prácticas comunes como la labranza con arado y el volteado de suelo, hasta otras mucho más drásticas como el uso de dinamita para romper duripanes y la mezcla de horizontes para eliminar las capas de fragipanes (Hillel, 1982).

La tendencia en la agricultura hacia el uso de equipo pesado y de comenzar las labores de cultivo cuando el suelo está húmedo puede ocasionar compactación. La repercusión principal es la disminución del espacio poroso y en consecuencia, falta de agua y oxígeno, lo que se traduce en una disminución de la productividad. Sin embargo, la profundidad de labranza, el tipo de suelo y el contenido de humedad, son los factores que determinan las modificaciones que se llevan a cabo con la aplicación de una práctica específica. Por ejemplo, la labranza en algunos suelos con horizontes endurecidos, promueve el desarrollo radical y la penetración de las raíces debajo de la capa dura, permitiendo un buen desarrollo de los cultivos (Bathke *et al.*, 1992).

El laboreo rompe los agregados e, inicialmente, promueve la mineralización e inmovilización de la materia orgánica al incrementar el contenido de oxígeno en el suelo y favorecer el establecimiento de numerosos microorganismos (Dinel *et al.*, 1991). Conforme los cambios estructurales continúan, los sistemas agrícolas afectan la macroporosidad. No sólo disminuye la estabilidad de los agregados, sino que, con la posterior compactación, las poblaciones microbianas y vegetales se reducen, con lo que se limita la transformación de los restos orgánicos y el aporte de polisacáridos (Gupta y Germida, 1988; Dinel *et al.*, 1991, Nadler y Steinberger, 1993; Tisdall, 1994).

Angers y col. (1992) mencionan que la materia orgánica disminuye con la labranza porque se lleva a cabo una dilución de los compuestos al mezclarse horizontes superficiales ricos en materia orgánica, con horizontes pobres. Se acelera la mineralización, se incrementa la susceptibilidad a la erosión y hay una

disminución notable en el contenido de carbono. Todo esto, lógicamente, repercute en la estabilidad de los agregados, tanto en seco, como en húmedo, tal como había sido reportado por Kretinina (1990).

Beare y col. (1994) mencionan, por otra parte, que la labranza mínima mejora notablemente la agregación y los cambios en la distribución y retención de la materia orgánica, en comparación con la labranza tradicional. Destacan el hecho de que después de tres años de reducirse la labranza en un suelo, se presenta un incremento significativo de la estabilidad de los macroagregados. Aparentemente, la labranza mínima favorece, principalmente, los primeros 5 cm del suelo y el efecto es más lento conforme se incrementa la profundidad.

Las prácticas de no labranza o también llamada labranza cero, tienen cierto impacto en las propiedades del suelo y el crecimiento de las plantas. En muchos casos, el crecimiento radical es mayor en un suelo labrado que en uno que no lo está y se ha reportado que existe una fuerte compactación en zonas que han estado sin laboreo por más de siete años (Bathke *et al.*, 1992). Sin embargo y de acuerdo con Kay y col. (citados por Angers *et al.*, 1992), los cambios a nivel estructural difieren con el tipo de suelo, las condiciones climáticas y la naturaleza de sus constituyentes, por lo que no es recomendable hacer generalizaciones.

#### **H. Mesofauna.**

Los representantes de la meso y macrofauna, es decir, organismos de 0.1 a 2 mm y de 2 mm a 20 cm, como lombrices, enquitreidos, hormigas, termitas, coleópteros, isópodos, miriápodos y caracoles, tienen una influencia indirecta, pero importante, en la estructuración del suelo. Muchos de ellos, los más grandes, fragmentan los residuos orgánicos mientras que otros degradan celulosa. La mayoría crea galerías que facilitan el paso del agua y el intercambio gaseoso y producen mucosidades que permiten la agregación de pequeñas partículas. Además, todos producen cantidades importantes de desechos fecales, granulares, ovoides o vermiformes, que son depositados en el suelo y constituyen compuestos húmicos y microagregados muy estables (Fitzpatrick, 1984).

## **I. Procesos Químicos.**

Todos los factores de agregación antes descritos involucran una serie de reacciones químicas que son, en gran parte, las responsables de su influencia en la estructura. Aún cuando no es posible aislarlas ya que su acción es simultánea, con fines explicativos se pueden separar en reacciones de: (a) hidratación, (b) hidrólisis, (c) disolución, (d) oxidación y (e) reducción. Como en cada uno de los puntos anteriores ya se destacó su presencia, sólo es necesario reafirmar que su influencia en la estructuración radica en el hecho de que constituyen la base de la alteración y transformación de los materiales, permitiendo la formación de otros compuestos.

## **J. Factores Indirectos.**

También incluidos en los puntos correspondientes se encuentran otro tipo de factores que, indirectamente, influyen en la estructuración y formación de agregados. Su mención aquí es únicamente con la finalidad de no omitirlos, aún cuando una explicación detallada de sus efectos sale sobrando. Entre dichos factores se encuentran: la presión del mismo suelo, el aire, el contenido de agua y la temperatura.

Quando se ejerce una presión sobre el suelo húmedo, las partículas se orientan y permanecen juntas por atracción molecular y por las fuerzas provocadas por la película de agua. La presión puede ser originada por los ciclos de humedecimiento y secado, la expansión y contracción de las arcillas, el congelamiento y deshielo del agua, la maquinaria agrícola y por el peso del mismo suelo. En el caso del aire, al mezclarse el CO<sub>2</sub> con la solución del suelo hay formación de ácido carbónico, el cual, aumenta la solubilización de algunos minerales como el calcio y otros solutos lo que permite su transformación. Además, los componentes del aire son indispensables para el metabolismo de la biota.

El agua, además de intervenir en los dos factores mencionados, mantiene juntas y orientadas a las partículas por tensión superficial, pero su entrada brusca a las unidades estructurales del suelo provoca su estallido y disgregación. La temperatura influye directamente en la velocidad de las reacciones que se

llevan a cabo en el suelo, por lo que constituye un factor determinante en el intemperismo mineral, además de que afecta la fisiología de plantas y animales (Stevenson, 1982; Bohn *et al.*, 1993).

Todos estos factores revisten una gran importancia en la modificación de la estructura, pero dado que están completamente ligados a los fenómenos ya descritos, su importancia resulta obvia.

### 3. Especies Vegetales.

#### A. Casuarina (*Casuarina equisetifolia* L.).

Familia: Casuarinaceae

Género: *Casuarina*

Especie: *C. equisetifolia* L.

(Fuente: Cronquist, 1981)

La casuarina es un árbol nativo de Australia. Se encuentra en zonas con clima tropical y subtropical aunque tiene la capacidad de adaptarse a condiciones tanto climáticas como edáficas muy variadas. Su importancia es principalmente forestal y la familia, desde el punto de vista evolutivo, es considerada muy primitiva (Cronquist, 1981).

Se caracteriza por ser un árbol siempre verde, con ramas y ramillas verticiladas, nudoso-articuladas. Las raíces presentan nódulos por la simbiosis con bacterias fijadoras. Las hojas son escamosas, estriadas, verticiladas y articuladas. Las flores son unisexuales, monoicas o díicas; las flores estaminadas son unibracteadas, se encuentran en amentos y se localizan en ramas laterales; las flores pistiladas son bracteadas y se encuentran en cabezuelas terminales. El estambre es único, central, filiforme, con la base gruesa; el ovario es súpero unilocular, con dos óvulos ascendentes en la base. El fruto es múltiple, formado por cariopsides comprimidos que poseen un ala membranosa y se encuentran protegidas por las brácteas (Sánchez, 1980; Cronquist, 1981).

#### B. Eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labiell.).

Familia: Myrtaceae

Género: *Eucalyptus*

Especie: *E. globulus* Labiell.

(Fuente Cronquist, 1981)

El eucalipto es originario de Australia, aunque actualmente existen representantes cultivados en todo el mundo. Es una especie que se adapta a muy diversas condiciones climáticas, incluso, en la parte meridional de Australia donde la temperatura es muy elevada forma grandes bosques y algunas especies alcanzan a medir más de 100 metros de altura. En muchos países se cultiva por su madera, como planta ornamental y para reforestar debido a su fácil adaptación, sin embargo, por sus efectos alelopáticos, su cultivo ha sido restringido (Cronquist, 1981).

Es un árbol con raíz modificada y ectomicorrizada. Posee hojas opuestas, simples, coriáceas, enteras y casi siempre con venación intramarginal continua. Las flores son inflorescencias comúnmente bibracteoladas, perfectas y algunas veces unisexuales; los pétalos y sépalos son imbricados y en número de tres a seis; el polen es tricolpado (Cronquist, 1981).

### **C. Pirúl (*Schinus molle* L. ).**

Familia: Anacardiaceae

Género: *Schinus*

Especie: *S. molle* L.

(Fuente: Cronquist, 1981)

El pirúl es un árbol originario de Perú y su importancia es principalmente forestal aunque, al igual que al eucalipto, se le han atribuido ciertos efectos alelopáticos por lo que su cultivo es limitado, pero se distribuye en todo el mundo.

Se caracteriza por ser un árbol siempre verde, de 4 a 8 m de altura, con ramas colgantes y hojas alternas, imparipinadas; los folíolos se presentan en número variable de siete a trece, son de forma linear-lanceolada y finamente aserrados. Las flores son paniculadas, pequeñas, de color amarillo verdoso; el fruto es drupáceo e indehisciente (Sánchez, 1980).

#### D. Pasto Rhodes (*Chloris gayana* Kunth.).

Familia: Poaceae

Género: *Chloris*

Especie: *C. gayana* Kunt.

(Fuente: Hitchcock, 1950)

El pasto Rhodes es nativo de África, en donde se encuentra en forma silvestre tanto en áreas tropicales como subtropicales. Prospera en un amplio gradiente de temperaturas, aunque la óptima es de 35°C; requiere de 10 a 14 horas de luz para desarrollarse satisfactoriamente. Es relativamente resistente a la sequía y puede crecer con una precipitación mínima de hasta 600 mm. Tolerancia edáfica muy variada, excepto un pH muy alto; crece bien en suelos alcalinos y ligeros como los formados de cenizas volcánicas. Es muy tolerante al sodio cuando se encuentra en forma de carbonato o sulfato, pero menos tolerante cuando está como cloruro o nitrato; es muy sensible al magnesio pero tolera altas concentraciones de litio. Puede soportar períodos de inundación de 15 días o más (Bogdan, 1977).

Se cultiva en muchos países por su buena producción de semilla, su fácil establecimiento y sus hábitos de crecimiento. No es susceptible al ataque de patógenos, los únicos que suelen dañarlo son *Helminthosporium* y *Fusarium gramineum*, que atacan hojas y espigas. Su vida productiva es de aproximadamente tres años, pero con fertilización nitrogenada puede durar hasta cinco. Este pasto, al igual que muchos otros, es usado para evitar la erosión debido a sus fuertes rizomas que disminuyen el escurrimiento lateral. La parte aérea actúa como barrera en la erosión eólica y es una fuente importante de alimento para el ganado; mantiene y mejora la estabilidad y estructura del suelo (SEP., 1982; Hitchcock, 1950; Bogdan, 1977).

El pasto Rhodes es una gramínea perenne, con raíz fascicular modificada. Posee estolones con tallos rectos o geniculadamente ascendentes y entrenudos comprimidos; las hojas son glabras, de 15 a 50 cm de largo y de 2 a 20 mm de ancho. La panícula es digitada a subdigitada; las espiguillas se encuentran en racimos de 4 a 15 cm de largo; la lemma es hispida en el margen; las espiguillas presentan de tres a cuatro flores. Las flores secundarias son cortas con una pequeña arista masculina; la floración se da a los

15 días de que emerge la panícula; el fruto es un cariósipide de aproximadamente 2 mm de longitud (Hitchcock, 1950; Bogdan, 1977).

### **E. Sorgo (*Sorghum almum* Parodi.).**

Familia: Poaceae

Género: *Sorghum*

Especie: *S. almum* Parodi.

(Fuente: Robles, 1979)

El sorgo se considera originario de África ecuatorial. Tiene aproximadamente 5000 años como especie cultivada y en América se estableció por primera vez en Argentina. Es un cultivo que se adapta a condiciones climáticas y edáficas muy diversas; crece en climas cálidos y secos, pero puede soportar bajas temperaturas; se cultiva desde los 45° de latitud norte, hasta los 35° de latitud sur y de 0 a 100 m.s.n.m. En México crece a 2200 y 2600 m.s.n.m. Generalmente se cultiva en zonas con una precipitación anual de 400 a 750 mm, es resistente a la sequía. Cuando la humedad es elevada se vuelve muy susceptible a patógenos y plagas que ocasionan pérdidas considerables. Crece en diferentes suelos, sobre todo en aquellos de tipo franco arenoso y franco arcilloso. Cuando la cantidad de arcilla es muy elevada se puede dañar el sistema radical a causa del agrietamiento del suelo (Robles, 1979; Rosas, 1987; Bogdan, 1977).

Puede usarse en la alimentación humana, como forraje y grano para la alimentación de animales y para la industrialización. Se considera que podría sustituir al maíz en la mayoría de sus usos, sin embargo, su consumo no se ha generalizado aún. En México se cultiva en Tamaulipas, Guanajuato, Sinaloa, Sonora, Michoacán y Jalisco, donde el uso que se le da es básicamente el de alimento para ganado y aves (Robles, 1979).

Es una especie perenne, hermafrodita, incompleta, perfecta. La raíz es de tipo fascicular, con ramificación profusa, forma rizomas cortos. Los tallos son cilíndricos, rectos y numerosos; las hojas son

alternas, planas, de 30 a 100 cm de longitud y 1.5 a 4.0 cm de ancho. La panícula es laxa, de 20 a 60 cm de largo, compacta, semicompacta o abierta; las espiguillas son sésiles, ovalado-lanceoladas, con o sin arista; las glumas son pardas, duras, ovaladas. El fruto es un cariósipide ovoide; la panícula puede llegar a tener hasta 6000 flores. La fecundación puede ser cruzada, pero generalmente hay autofecundación (Bogdan, 1977, Robles, 1979; Rosas, 1987).

### **F. Veza (*Vicia sativa* L.).**

Familia: Leguminosae

Género: *Vicia*

Especie: *V. sativa* L.

(Fuente: Guerrero, 1984)

De acuerdo con Sánchez (1980), la veza es originaria del Cáucaso o Europa. Crece en climas templados húmedos; es muy sensible a las bajas temperaturas, pero tolera temperaturas elevadas. Requiere de una precipitación mínima de 400 mm y no tolera la sequía; un exceso de humedad la hace susceptible al ataque de hongos, larvas y pulgones. Se adapta a casi todos los tipos de suelo, excepto los salinos, crece en suelos ácidos o ligeramente alcalinos, el pH óptimo es de 6.5; se desarrolla mejor en suelos arcillo calizos o arcillo silíceo-calizos.

Generalmente se siembra en asociación con algún cereal para que éste le sirva de tutor y para disminuir los efectos de la vicina, la cual es tóxica para el ganado. Es un cultivo que mejora la calidad del cereal con el que se asocia, o el siguiente, debido a la alta fijación de nitrógeno por su simbiosis con bacterias, además de que incrementa el contenido de materia orgánica del suelo cuando se deja como abono verde. El forraje que proporciona es de un elevado valor nutritivo, pero es necesario mezclarlo con otro para disminuir los efectos de la vicina. El grano se utiliza para la alimentación de aves (Guerrero, 1984).

La veza es una herbácea perenne, trepadora. Tiene raíz profunda, ramificada, nodulada y tallos trepadores, cuadrangulares o muy angulosos. Las hojas son compuestas, paripinadas, con un número de folíolos variable entre cinco y ocho pares, pubescentes, oblongo-espulados con el ápice hendido y terminadas en un zarcillo ramificado. Las flores son simples, casi sésiles, en grupos de 2 a 4 o solitarias y situadas en las axilas de las hojas; la corola es violácea. Las vainas contienen de 4 a 10 semillas de forma y colorido variable (Sánchez, 1980).

### III. OBJETIVOS.

**Objetivo General:** *Comprender y analizar los cambios químicos y estructurales de los tepetates, favorecidos por la introducción de especies vegetales.*

**Objetivo Específico:** *Determinar el efecto de seis especies vegetales perennes, durante tres períodos de observación, sobre el grado de fragmentación, agregación y disgregación de un tepetate sometido a dos niveles de fracturación.*

### IV. HIPOTESIS DE TRABAJO.

*Los tepetates son capas endurecidas susceptibles de ser incorporadas a la producción mediante su roturación y la introducción de especies vegetales, cuyo sistema radical favorezca los fenómenos de fragmentación, agregación y disgregación, necesarios para la modificación de su estructura.*

## V. DIAGNOSIS DEL AREA DE MUESTREO.

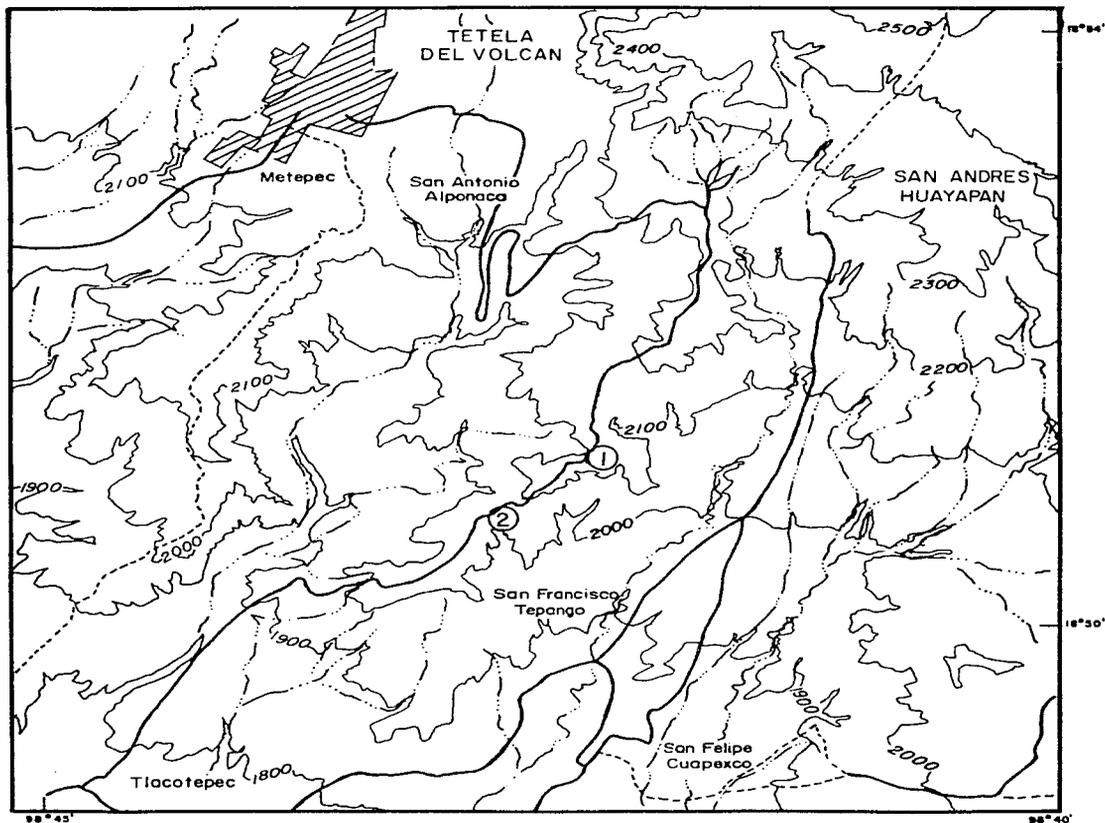
Dado que el presente estudio forma parte de un proyecto institucional sobre capas endurecidas del estado de Morelos, México, la recolección del tepetate se llevó a cabo en el Municipio de Tetela del Volcán, perteneciente a la subprovincia de Lagos y Volcanes del Anáhuac, provincia Eje Neovolcánico.

El sitio de muestreo se ubica en los 18°51'05" de latitud norte y 98°41'40" de longitud oeste, a una altitud de 2000 m.s.n.m. (Figura 3). En el lugar predominan rocas ígneas extrusivas como el basalto, la toba y la brecha volcánica que datan del Cuaternario, así como depósitos clásticos, derrames lávicos y lahares o derrames de lodo. Los suelos son de origen residual y volcánico, principalmente Andosoles y Luvisoles (S.P.P., 1981; Marañón, 1994).

El clima es templado húmedo, Cb(m)(w)ig, el más húmedo de los templados, con lluvias en verano y menos del 5% de lluvias en invierno. La precipitación total anual varía de 1200 a 1800 mm; la mayor incidencia pluvial se presenta en el mes de julio con una precipitación de 330 a 380 mm y la menor en febrero y diciembre con menos de 10 mm. La temperatura media anual oscila entre 14 y 20°C; los meses más cálidos son abril, mayo y junio con temperaturas de 15 a 19°C y el más frío diciembre con una temperatura menor de 10°C (García, 1988).

La vegetación nativa está conformada por bosques de encino, encino-pino y vegetación secundaria. Así mismo, existen áreas eminentemente agrícolas en donde se considera que el 85% del suelo está dedicado a la agricultura de tracción animal y un 15% a la mecanizada. Se cultiva frijol, maíz, jitomate y algunos frutales (S.P.P., 1981; Marañón, 1994).

Por lo que respecta al perfil tipo, se ubica geográficamente a 18°50'38" de latitud norte y 98°42'13" de longitud oeste, aproximadamente a 13 km del poblado de Tetela del Volcán sobre la carretera Tetela del Volcán-Tlacotepec, a una altitud de 1930 m.s.n.m., como se puede observar en la Figura 3.



① Zona de Colecta

② Perfil Tipo

Figura No.3 Ubicación de la zona de colecta de tepetate y localización del perfil tipo.

Fuente: INEGI 1987.

Las características morfológicas, físicas y químicas tal como fueron determinadas por Marañón (1994), se muestran en las Tablas 2, 3 y 4 y corresponden al perfil 13 de dicho estudio.

El perfil muestra un alto grado de perturbación humana y está constituido por dos horizontes. Un horizonte A con sólo 24 cm de espesor, cuyas características indican que corresponde a un Andosol y, un horizonte Cqm que denota la presencia de una capa endurecida que fue clasificada, con base en los análisis pertinentes, como un tepetate tipo duripán (Soil Survey Staff, 1994).

En muchos sitios el tepetate se encuentra expuesto y con severos problemas de erosión. Este tepetate, de acuerdo con Flores y col. (1996), se originó a partir de tobas andesíticas, materiales que se consolidaron desde el momento de su depósito y posteriores aportes silícicos de piroclastos recientes (Flores *et al.*, 1996).

**Tabla No. 2. Características morfológicas del perfil tipo.**

HORIZONTE	PROFUNDIDAD (cm)	CARACTERISTICAS MORFOLOGICAS
A	0 - 24	Separación abrupta, plana; color en seco 10YR5/4, pardo amarillento; color en húmedo 10YR4/3, pardo oscuro; textura franco arenosa; estructura migajosa, fina, débil; porosidad fina, abundante; consistencia en seco, dura; consistencia en húmedo, muy firme; finamente fisurado, ancho; drenado; presencia de raíces finas.
Cqm	24+	Separación abrupta, plana; color en seco 10YR5/4, pardo amarillento; color en húmedo 10YR4/3, pardo oscuro; textura franco arcillo arenosa; estructura masiva, muy fina, débil; porosidad fina, escasa; consistencia en seco, muy dura, consistencia en húmedo, dura; fisurado ancho.

Tabla No. 3. Características físicas del perfil tipo.

Hz	Prof. (cm)	Color		D.A. (g/cm <sup>3</sup> )	D.R. (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidad Total (%)	Textura		
		Seco	Húmedo				Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
A	0-24	10YR5/4 Pardo Amarillento	10YR4/3 Pardo Obscuro	1.1	2.17	49.30	56	28	16
							Franco arenosa		
Cqm	24+	10YR5/4 Pardo Amarillento	10YR4/3 Pardo Obscuro	1.7	2.26	24.77	53	20	27
							Franco arcillo arenosa		

Tabla No. 4. Características químicas del perfil tipo.

Hz	Prof. (cm)	Cationes Intercambiables				C.I.C.T. (cmol*kg)	Sat. Bases (%)	pH H <sub>2</sub> O 1:2.5	M.O. (%)	N Total (%)	C (%)	P Asim. (kg/ha)
		Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>							
A	0-24	5.0	5.0	0.43	0.17	18.2	58.2	6.6	1.75	0.09	1.01	1.0
Cqm	24+	5.0	5.0	0.54	0.42	18.2	59.8	6.5	0.40	0.03	0.23	1.2

## VI. METODOLOGIA.

### 1. Planteamiento del Diseño Experimental.

Durante la etapa de gabinete se revisó y analizó la literatura disponible sobre los diferentes aspectos que comprende el estudio y con base en dicho análisis, se seleccionó el área de recolecta del tepetate, los niveles de fracturación, las especies vegetales, la solución nutritiva, las metodologías específicas para la evaluación de las variables de respuesta y el análisis estadístico adecuado para la interpretación de los resultados.

La recolecta del tepetate se llevó a cabo en la región sureste del municipio de Tetela del Volcán, en el estado de Morelos, debido a que el estudio forma parte de un proyecto de investigación institucional sobre capas endurecidas del Cuaternario, en dicho estado de la República Mexicana. Dicho proyecto está a cargo del Dr. David Flores Román en el Instituto de Geología de la U.N.A.M.

En la zona de recolecta, la capa de suelo fértil ha sido completamente erosionada, lo que provocó el afloramiento del tepetate. De tal forma que para recolectarlo únicamente fue necesario fracturar la capa cementada con herramientas comunes (Figura 4). Los fragmentos así obtenidos fueron colocados en sacos y trasladados al invernadero de dicho Instituto para su posterior tratamiento. En total se recolectaron, aproximadamente, 800 kg de tepetate.

Las características fisicoquímicas del tepetate se determinaron en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos del Instituto de Geología. Dicha caracterización se llevó a cabo mediante los análisis edáficos convencionales, como complemento a los estudios realizados por Marañón (1994) y Flores y col. (1996), sobre la génesis y clasificación de los tepetates de la misma zona.

El tepetate se fracturó en forma manual, habiéndose seleccionado previamente dos niveles: un nivel fino, constituido por fragmentos que pasaron una malla de 2 mm y uno grueso, formado por fragmentos mayores de 2 mm, que fueron todos aquellos que quedaron retenidos en el tamiz (Figura 5).



Figura No. 4. Colecta del tepetate.



Figura No. 5. Fracturación del tepetate.

El tepetate fracturado se colocó en macetas de plástico con capacidad para 6 kg, sin perforaciones, a fin de evitar la pérdida del material. En el caso del material fino, se colocaron 5.5 kg de tepetate por maceta y del grueso 4.1 kg. Cada maceta se rotuló con una leyenda en la que se incluyeron las dos primeras letras del nombre común de cada una de las especies seleccionadas, un número arábigo para indicar la etapa del experimento, la inicial del nivel de fracturación y un número romano correspondiente al número de repetición.

Las especies vegetales perennes utilizadas fueron: tres arbóreas, casuarina (*Casuarina equisetifolia* L.), eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labiell.), pirúl (*Schinus molle* L.) y tres herbáceas, pasto Rhodes (*Chloris gayana* Kunth.), sorgo (*Sorghum almum* Parodi.) y veza (*Vicia sativa* L.). Todas ellas con características adecuadas a los fines de la investigación y probadas en la recuperación de suelos y capas cementadas. Las especies arbóreas fueron seleccionadas, también, por su rusticidad y capacidad para establecerse en medios edáficos adversos (Bodgan, 1977; Reid y Goss, 1981; Sánchez, 1981; Pedraza *et al.*, 1987; Karimian y Razmi, 1990; Arias, 1992; Llerena y Sánchez, 1992; Zebrowski, 1992; Velázquez, 1994).

Para la obtención de las especies herbáceas se establecieron almacigos en vermiculita y el trasplante al tepetate se realizó 15 días después de la emergencia. Las arbóreas fueron obtenidas del vivero de Coyoacán (D.D.F.), cuando contaban con una altura aproximada de 60 cm y cinco meses de edad; antes de ser trasplantadas se mantuvieron durante quince días en el invernadero para su adaptación a las condiciones del mismo. El 13 de Octubre de 1994 las especies fueron trasplantadas en las macetas con el tepetate fracturado y colocadas en el invernadero del Instituto de Geología de la U.N.A.M., el cual contaba con una temperatura diurna promedio de 22°C y una humedad relativa, aproximada, del 60%.

Dada la baja disponibilidad de nitrógeno y fósforo del tepetate, para el mantenimiento de las especies se aplicó la solución nutritiva de Hoagland (Tabla 5), en dosis de 355 ml cada quince días, adicionándose, además, 150 ml de agua cada dos días. Los tratamientos se mantuvieron en el invernadero durante tres etapas de observación previamente definidas: seis, doce y dieciocho meses, después de cada una de las cuales se llevó a cabo la cosecha.

**Tabla No. 5. 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 monocalcico	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
Acido bórico	0.0100

La cosecha consistió en cortar la parte aérea de la planta a nivel del cuello y colocarla en bolsas de papel debidamente etiquetadas. Posteriormente, el contenido de la maceta era colocado sobre papel periódico para separar cuidadosamente las raíces, las cuales, al igual que la parte aérea eran puestas en bolsas de papel con la etiqueta correspondiente (Figuras 6, 7, 8 y 9). Las bolsas con la biomasa fueron secadas en la estufa a 60°C, hasta peso constante, para evaluar el peso seco.

El tepetate se dejó en el invernadero hasta que estuvo completamente seco, después de lo cual, se mezcló perfectamente y se tomó una muestra representativa para los análisis de laboratorio. La cuantificación de la producción de biomasa aérea y radical en cada tratamiento se hizo a través de la determinación del peso seco, únicamente con la finalidad de complementar y apoyar los resultados de los tratamientos aplicados.

El diseño experimental usado fue trifactorial con distribución de los tratamientos completamente al azar y tres repeticiones. En total se establecieron 36 tratamientos y 108 unidades experimentales, además de tres tratamientos adicionales formados por los diferentes testigos: (a) testigo absoluto ,TAb, constituido por el tepetate únicamente fracturado, sin adición de agua ni solución nutritiva (b) testigo sin plantas, Ts/p,

formado por el tepetate expuesto al efecto del agua y la solución nutritiva, pero sin influencia de las especies vegetales y (c) testigo sin solución nutritiva, TCa, TEu, TPi, el cual estuvo bajo la influencia de las especies arbóreas sólo con adición de agua (Tabla 6).

**Tabla No. 6. Tratamientos aplicados.**

ESPECIE	ETAPA	NIVEL DE FRACTURACION	REPETICION	CLAVE
Testigo absoluto	1, 2, 3	FINO	I, II, III	<b>TAb</b>
Testigo absoluto	1, 2, 3	GRUESO	I, II, III	<b>TAb</b>
Testigo sin planta	1, 2, 3	FINO	I, II, III	<b>Ts/p</b>
Testigo sin planta	1, 2, 3	GRUESO	I, II, III	<b>Ts/p</b>
Testigo sin solución - Casuarina	1, 2, 3	FINO	I, II, III	<b>TCa</b>
Testigo sin solución - Casuarina	1, 2, 3	GRUESO	I, II, III	<b>TCa</b>
Testigo sin solución - Eucalipto	1, 2, 3	FINO	I, II, III	<b>TEu</b>
Testigo sin solución - Eucalipto	1, 2, 3	GRUESO	I, II, III	<b>TEu</b>
Testigo sin solución - Pirúl	1, 2, 3	FINO	I, II, III	<b>TPi</b>
Testigo sin solución - Pirúl	1, 2, 3	GRUESO	I, II, III	<b>TPi</b>
Casuarina	1, 2, 3	FINO	I, II, III	<b>Ca</b>
Casuarina	1, 2, 3	GRUESO	I, II, III	<b>Ca</b>
Eucalipto	1, 2, 3	FINO	I, II, III	<b>Eu</b>
Eucalipto	1, 2, 3	GRUESO	I, II, III	<b>Eu</b>
Pirúl	1, 2, 3	FINO	I, II, III	<b>Pi</b>
Pirúl	1, 2, 3	GRUESO	I, II, III	<b>Pi</b>
Pasto Rhodes	1, 2, 3	FINO	I, II, III	<b>Pr</b>
Pasto Rhodes	1, 2, 3	GRUESO	I, II, III	<b>Pr</b>
Sorgo	1, 2, 3	FINO	I, II, III	<b>Sr</b>
Sorgo	1, 2, 3	GRUESO	I, II, III	<b>Sr</b>
Veza	1, 2, 3	FINO	I, II, III	<b>Ve</b>
Veza	1, 2, 3	GRUESO	I, II, III	<b>Ve</b>



Figura No. 6. Arbóreas: Eucalipto, pirúl y casuarina.

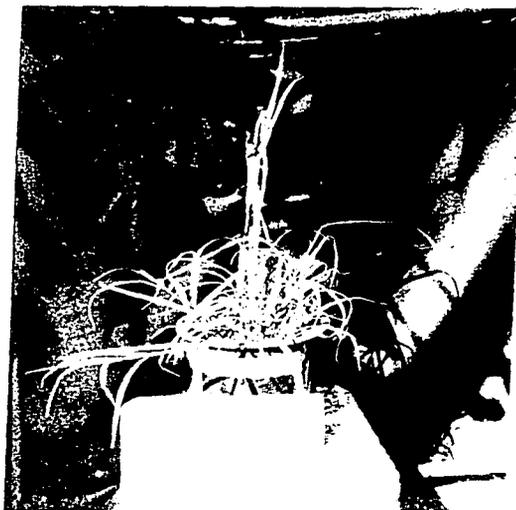
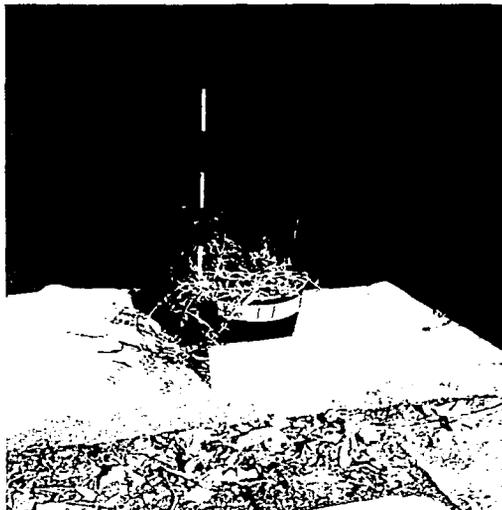


Figura No. 7. Herbácea: Pasto Rhodes.



Figura No. 8. Herbácea: Sorgo (Izq.).

Figura No. 9. Herbácea: Veza (Der.).



Los factores estudiados fueron: a. Especies vegetales perennes (seis), b. Periodos de observación de las especies (seis, doce y dieciocho meses) y c. Fracturación del tepetate (dos niveles). Las unidades experimentales fueron, para las arbóreas, dos plantas por maceta, para el pasto Rhodes cuatro macollos, para sorgo cuatro plantas y para veza, dos plantas.

Los resultados obtenidos se sometieron a un análisis de varianza y a la prueba de comparación de medias de Tukey considerando, en ambos casos, un diseño experimental trifactorial con distribución de los tratamientos completamente al azar y tres repeticiones.

## 2. Caracterización del Tepetate.

Para la caracterización del tepetate, se realizaron los siguientes análisis fisicoquímicos:

- Color en seco y en húmedo, por comparación con las tablas Munsell (1975).
- Densidad aparente, por el método de la probeta (Baver, 1980).
- Densidad real, por el método del picnómetro (Baver, 1980).
- Textura, por el método de Bouyoucus, modificado por Villegas y colaboradores (1978).
- Determinación granulométrica, por el método de la pipeta (Day, citado por Black *et al.*, 1965).
- pH en solución acuosa en proporción 2:1, con un potenciómetro marca Corning modelo 350.
- Materia orgánica, por el método de Walkley y Black, modificado por Walkley (1947).
- Capacidad de intercambio catiónico total, por percolación con acetato de amonio 0.1 N a pH 7 (Peech, 1947).
- Bases intercambiables, por determinación en el extracto obtenido por percolación con acetato de amonio 0.1 N, pH 7. El calcio y el magnesio se determinaron por titulación con EDTA 1 N (Jackson, 1970) y el sodio y el potasio por flamometría con un flamómetro marca Corning modelo 400.

- Relación  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$  totales, por el método de fusión con metaborato de litio en medio ácido (Verbeek *et al.*, 1982).
- Prueba para la identificación de agentes cementantes (Nimlos, 1987; Soil Survey Staff, 1994).
- Mineralogía por difracción de rayos X con un difractómetro SIEMS D5000 de ánodo de Cu-K en condiciones de excitación de 40 kv y 30 mA y un difractómetro PHILIPS PW 1130/96 con ánodo de Cu-K en condiciones de excitación de 30kv y 20 mA.
- Microscopía de barrido en láminas delgadas con un microscopio JAEOL JSM - 35C (Scanning Microscope).
- Análisis de resistencia a compresión no confinada

### 3. Fragmentación, Agregación y Disgregación.

Las variables de respuesta analizadas para la evaluación de los procesos de fragmentación, agregación y disgregación por efecto de las especies vegetales en el tepetate fracturado fueron:

- pH en solución acuosa en proporción 2:1, con un potenciómetro marca Corning modelo 350.
- Materia orgánica, por el método de Walkley y Black, modificado por Walkley (1947).
- Textura, por el método de Bouyoucus, modificado por Villegas y colaboradores (1978).
- Agregación en seco, por el método de Sávinov (citado por Kaurichev *et al.*, 1980).
- Estabilidad de agregados en húmedo, por el método de Klute (citado por Oleshko, 1995).
- Cálculo del índice de estructuración, con base en los resultados del análisis de agregación en seco (Osorio, 1995).

## VII. RESULTADOS Y DISCUSION.

### 1. Caracterización del Tepetate Utilizado.

El material utilizado para el presente estudio, cuyas principales características se muestran en la Tabla 7, corresponde a un tepetate tipo duripán. Es decir, es un material de origen volcánico, soldado desde el momento de su depósito, con influencia posterior de procesos pedogénicos y un alto contenido de sílice.

Se le ubicó de esa manera, después de que al ser sometido a tratamientos con H<sub>2</sub>O, HCL 1N y KOH concentrado, únicamente con el último tratamiento hubo fracturación de material (Dubroeuq *et al.*, 1989; Soil Survey Staff, 1994). Por otro lado, el análisis de microsonda confirmó la presencia de un elevado contenido de sílice (>90%) uniendo a las partículas minerales y al someterlo a la prueba de compresión no confinada, mostró una resistencia de 24 kg/cm<sup>2</sup> con un contenido de humedad del 8% (Nimlos, 1989; Flores *et al.*, 1996).

En las imágenes obtenidas a partir de láminas delgadas, fue posible observar recubrimientos arcillosos en las partículas minerales. Esto denota, de acuerdo con otros estudios, la posible existencia de sílice iluviada (además de aquella resultado de la alteración de los minerales) debida a procesos edafogénicos posteriores al proceso de endurecimiento geológico (Acevedo, 1997). Por último, el análisis mineralógico por difracción de rayos X confirmó la presencia de amorfos (ópalo A), cuya hidrólisis, desilificación y desbasificación, puede justificar la presencia de Cristobalita y Halosita en el material (Williams *et al.*, 1985; Thiry, 1992; Acevedo, 1997).

El color amarillo pardusco en seco y pardo amarillento en húmedo, así como la textura franco arenosa, son típicas de los horizontes cementados de origen volcánico en México (Sánchez, *et al.*, 1987; Flores *et al.*, 1992; Marañón, 1994).

Tabla No. 7. Características físicas y químicas del tepetate utilizado en el experimento.

CARACTERISTICAS FISICAS							
COLOR SECO	COLOR HUMEDO	D. A. (g/cm <sup>3</sup> )	D.R. (g/cm <sup>3</sup> )	TEXTURA (%)			MINERALOGIA DE LA ARCILLA
				ARENA	LIMO	ARCILLA	
10YR6/6 Amarillo Pardusco	10YR5/6 Pardo Amarillento	1.1	2.3	64	31 Franco Arenoso	5	Cristobalita Halosita

CARACTERISTICAS QUIMICAS								
CATIONES INTERCAMBIABLES (meq / 100g)				C.I.C.T. (cmol <sup>+</sup> /Kg)	SATURACION DE BASES (%)	pH H <sub>2</sub> O	MATERIA ORGANICA (%)	SiO <sub>2</sub> / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> TOTALES
Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>					
12.75	1.5	1.02	1.03	61.73	36.7	6.9	0.1	4.92

La densidad aparente es menor a la reportada para otros tepetates, tanto del estado de Morelos, como de México (Nimios, 1989; Peña y Zebrowski, 1992; Campos, 1992; Marañón, 1994). La densidad real es congruente con el tipo de minerales ígneos que lo constituyen, ya que de acuerdo con lo reportado por Flores y col. (1996), el tepetate de esta zona se formó durante el Cuaternario a partir de tobas andesíticas, por cementación de los materiales durante su depósito y posteriores aportes silícicos de piroclastos recientes.

Por lo que se refiere a las características químicas, el pH es casi neutro. La capacidad de intercambio catiónico es alta, debido fundamentalmente a la presencia de sílice amorfa (Flores *et al.*, 1996). Los cationes intercambiables presentan dominio de calcio y su concentración está acorde con la obtenida en otros tepetates (Etchevers *et al.*, 1992c; Flores *et al.*, 1992; Marañón, 1994). La saturación de bases es baja como resultado de los niveles de precipitación de la zona; el contenido de materia orgánica es extremadamente pobre, característica general de los tepetates.

La mineralogía denota la presencia de amorfos, cristobalita y haloisita. La relación  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$  totales es de 4.92, lo que indica que se trata de un material poco alterado en el que aún predomina la sílice sobre el aluminio (Chradwick *et al.*, 1972; Dubroeuq, 1992).

En general, las diferencias observadas con respecto a la capa endurecida del perfil tipo, podrían atribuirse a la heterogeneidad normal del material, pero principalmente al efecto diferencial de los procesos de intemperismo sobre el tepetate. Esto, debido a que la capa endurecida del perfil, aún se encuentra cubierta por una capa de suelo de 24 cm de grosor, sin embargo, en la zona de recolecta el tepetate se encuentra completamente expuesto. De tal manera que el grado y dirección de la alteración son diferentes, básicamente, en intensidad.

## **2. Fragmentación, Agregación y Disgregación.**

### **A. Granulometría de Fragmentos y Agregados.**

Después de someter el tepetate de cada uno de los tratamientos a la metodología de Bouyoucos para el cálculo de la textura, se obtuvieron los valores de la Tabla 8. Es necesario señalar que los datos no reflejan, necesariamente, el porcentaje de partículas elementales del tepetate (textura) ya que se trata de un material que por sus características fisicoquímicas presenta problemas de dispersión. Problemas que hasta el momento no han sido satisfactoriamente resueltos por ninguna metodología (J. Etchevers y C. Prat, 1997. Comunicación personal).

Sin embargo, considerando que se siguió el mismo procedimiento bajo las mismas condiciones, para el análisis del tepetate de todos los tratamientos, el grueso del error metodológico puede considerarse equivalente y constante, de tal manera que quede implícito en los resultados. Así, las variaciones obtenidas en los valores, pueden considerarse consecuencia de los tratamientos aplicados, sin descartar que, lógicamente, muestran también la influencia de factores que no son controlables en su totalidad, tales como la heterogeneidad del material y algunos problemas inherentes a la metodología.

Por lo tanto, debido al ya mencionado problema de dispersión y tomando como base que el porcentaje de partículas elementales de un suelo no es una característica que pueda cambiar en 18 meses, al hablar en el presente estudio de arcilla, limo y arena, es necesario tener en cuenta que se trata de fragmentos y agregados cuyo diámetro corresponde al de dichas partículas.

#### **Nivel de Fracturación Fino y Grueso.**

En el nivel de fracturación fino, durante la primera etapa, con respecto al testigo absoluto (TAb), se presentó una disminución significativa en el porcentaje de unidades de diámetro menor de 0.002 mm (arcilla). El testigo sin planta (Ts/p) conservó el mismo porcentaje que el TAb y sólo con el tratamiento de casuarina sin adición de solución nutritiva (TCa) el porcentaje se incrementó.

Tabla No.8. Fragmentos y agregados del diámetro de la arcilla, limo y arena, después de seis, doce y dieciocho meses de observación. Comparación de medias (Tukey)<sup>1</sup>.

TRATAM. <sup>2</sup>	% ARCILLA (>0.002 mm)			% LIMO (0.002 - 0.05 mm)			% ARENA (0.05 - 2.0 mm)		
	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3
<b>NIVEL DE FRACTURACION FINO</b>									
TAb	5.00ab	5.00a	5.00ab	31.00b	31.00ab	31.00b	64.00c	64.00bc	64.00bc
Ts/p	5.00ab	3.33bc	5.33a	29.67bc	32.67ab	31.33b	65.33bc	64.00bc	63.33bc
TCa	5.50a	4.00ab	4.50ab	44.00a	33.00ab	41.50a	50.50d	63.00c	54.00c
TEu	2.50c	3.00bc	4.50ab	28.50bc	34.00ab	29.50b	69.00bc	63.00c	66.00bc
TPi	2.50c	4.00ab	4.50ab	31.50b	35.50a	35.50ab	66.00bc	60.50c	60.00c
Ca	2.83c	1.83c	1.83c	24.83c	22.67c	23.33c	72.33ab	75.50ab	74.83a
Eu	4.50ab	2.50c	4.33ab	29.50bc	30.83ab	31.50b	66.00bc	66.67bc	64.17bc
Pi	3.17bc	2.17c	4.00b	26.33bc	21.00c	27.50bc	70.50bc	76.83a	68.50ab
Pr	4.00b	3.83b	4.00b	24.83c	31.83ab	29.17b	71.17b	64.33bc	66.83b
Sr	2.33c	3.67b	4.00b	23.83c	26.50bc	27.67bc	73.83ab	69.83b	68.33ab
Ve	2.50c	3.83b	3.00b	19.67c	29.67b	30.83b	77.83a	66.50bc	66.17bc
<b>NIVEL DE FRACTURACION GRUESO</b>									
TAb	5.00a	5.00a	5.00a	31.00a	31.00ab	31.00ab	64.00c	64.00bc	64.00b
Ts/p	2.83b	3.17b	3.67b	22.00bc	22.33c	23.50b	75.17ab	74.50a	72.83a
TCa	2.50b	3.00b	3.00b	33.50a	34.00ab	27.50b	64.00c	63.00bc	69.50ab
TEu	2.50b	4.00a	4.50ab	32.50a	35.50a	34.50a	65.00c	59.50c	61.00b
TPi	4.00a	3.00b	4.50ab	32.50a	32.50ab	26.50b	63.50c	64.50bc	67.00ab
Ca	2.50b	3.67b	3.50b	24.33b	30.00ab	30.67ab	73.17b	66.33b	65.83b
Eu	4.33a	4.67ab	3.83b	32.00a	31.83ab	28.33b	63.67c	63.50bc	67.83ab
Pi	3.17b	3.33b	4.33ab	25.17b	26.50bc	29.33ab	71.67b	70.17ab	66.33ab
Pr	2.83b	3.67b	3.67b	21.67bc	29.33b	25.83b	75.50ab	67.00b	70.50ab
Sr	1.00c	4.33ab	3.83b	17.50c	29.17b	26.67b	81.50a	66.50b	69.50ab
Ve	2.50b	3.00b	4.17ab	22.67bc	27.83bc	28.00b	74.83b	69.17ab	67.83ab

<sup>1</sup> Las letras ubicadas después de los valores, corresponden a la significancia estadística por columna.

Letras iguales denotan valores estadísticamente equivalentes.

<sup>2</sup> TAb: Testigo absoluto  
Ts/p: Testigo sin planta

TCa, TEu, TPi: Testigos sin solución  
Ca: Casuarina

Eu: Eucalipto  
Pi: Pirul

Pr: Pasto Rhodes  
Sr: Sorgo

Ve: Veza

El porcentaje de unidades de 0.002 a 0.05 mm (limo) disminuyó en todos los tratamientos con respecto al TAb y únicamente en el TCa se incrementó significativamente. En el caso de la fracción de 0.05 a 2.00 mm (arena) el efecto fue contrario: hubo un incremento significativo con todos los tratamientos, sin embargo en el TCa, el porcentaje disminuyó.

Después de doce y dieciocho meses, el comportamiento descrito para la primera etapa se repite en los tratamientos con solución nutritiva: hubo disminución de arcilla con respecto al TAb; disminución significativa de limo, con algunos tratamientos e incremento significativo de arena. En las dos etapas el Ts/p conservó porcentajes equivalentes a los del TAb. Entre especies los porcentajes fueron estadísticamente equivalentes.

En el nivel de fracturación grueso se observó el mismo comportamiento general que en el nivel fino, la única diferencia fue que la variación en los porcentajes de las diferentes fracciones con respecto al TAb, no fue tan grande. Las especies vegetales no mostraron un efecto diferencial, pero los tratamientos con mayor disminución de fragmentos de diámetro de arcilla y limo fueron los que tuvieron los porcentajes más altos en la fracción arena.

La disminución de fragmentos del diámetro de la arcilla y el limo pudo ser resultado de un proceso de microagregación en el material, debido tanto a fenómenos fisicoquímicos como biológicos. Durante éste, la unión de dichos fragmentos pudo dar lugar a la formación de agregados del diámetro mayor, lo que explicaría el incremento de unidades del tamaño de la arena (Williams *et al.*, 1985; Colombo y Torrent, 1991; Angers *et al.*, 1992).

El hecho de que haya habido cambios con los tratamientos sin influencia de especies vegetales implica que en éstos, la agregación fue principalmente fisicoquímica, aún cuando no se puede descartar la influencia de microorganismos cuya presencia no fue evaluada. Como en el estudio se utilizaron macetas sin perforaciones, es lógico pensar que los productos de la alteración del tepetate se concentraron en la solución del suelo.

Así, la sílice, que se presenta en cantidades considerables y en forma altamente soluble (Disolución del ópalo A: 65 mg/l a 25°C) en este tepetate, al entrar en contacto con el agua pudo hidrolizarse y dar lugar a la formación de compuestos que al precipitar durante los períodos de desecación pudieron actuar como cementantes entre los fragmentos (Chradwick *et al.*, 1972; Stein, 1982; Williams *et al.*, 1985; Thiry y Millot, 1987; Quiñones, 1987; Miehllich, 1992).



Además, dicho efecto pudo verse incrementado por el peso del propio tepetate y las variaciones hídricas que pudieron provocar cierta compactación al aumentar la cohesión entre los fragmentos de menor tamaño y facilitar la acción de los cementantes inorgánicos (Dinel *et al.*, 1991; Bohn *et al.*, 1993).

Sin embargo, el incremento de arena fue superior en los tratamientos con influencia de especies vegetales, hecho que denota la existencia de agregación biológica. Este es un proceso que se presenta generalmente como resultado de la presencia de compuestos orgánicos capaces de enlazarse químicamente a la fracción mineral, o bien, de actuar como cementantes entre las partículas y fragmentos.

Sobre todo cuando los compuestos se encuentran en forma coloidal (humus), su eficiencia como agregantes se incrementa notablemente. Aunque los polisacáridos tal como son producidos por las plantas y microorganismos, tienen una acción cementante casi inmediata y forman agregados tan estables como aquellos formados por compuestos inorgánicos (Dorioz *et al.*, 1993; Tisdall, 1994).

En general, se ha mencionado que la agregación por cementantes inorgánicos se presenta básicamente a nivel de microagregados, lo que concuerda con lo descrito hasta el momento ya que hubo un efecto significativo ajeno al de las plantas, sobre la variación en los porcentajes.

Sin embargo, no se puede omitir la posibilidad de agregación por compuestos orgánicos, sobre todo si se considera que el incremento de arena con respecto al TAB y a los Ts/p fue mayor con los tratamientos con especies vegetales. Además de que esa fracción incluye partículas y agregados mayores de 0.25 mm, en los cuales, de acuerdo con los estudios realizados por algunos autores, la que predomina es la cementación y unión por compuestos orgánicos (Utomo y Dexter, 1982; Gupta y Germida, 1988; Dinel *et al.*, 1991; Rasiah y Kay, 1994).

Por otro lado, al analizar el efecto de cada uno de los tratamientos en función del tiempo, Figuras 10 a 15, se observó que en los dos niveles de fracturación la fracción menor de 0.002 mm se incrementó ligeramente, aunque sólo en el caso de los testigos con eucalipto y pirúl y algunos de los tratamientos con solución nutritiva como el sorgo y la veza, las diferencias fueron significativas.

Los porcentajes en la fracción de 0.002 a 0.05 mm mostraron cierta estabilidad con respecto al tiempo de observación, principalmente los testigos, que no presentaron diferencias significativas entre etapas. En los tratamientos con solución nutritiva esta fracción se incrementó significativamente sólo con pasto Rhodes y veza en el nivel fino y con casuarina, sorgo y veza en el grueso.

La fracción de 0.05 a 2.00 mm disminuyó en los tratamientos con solución nutritiva, pero dicha disminución sólo fue significativa con pirúl y veza, en el nivel de fracturación fino y con sorgo en el grueso. En esta fracción los Ts/p tuvieron porcentajes estadísticamente equivalentes y los testigos sin solución mostraron un incremento, aunque no estadísticamente significativo.

El comportamiento descrito con respecto al tiempo de permanencia de las especies vegetales sobre el tepetate, refleja la presencia de otros procesos además de la agregación. Por una parte, el incremento de arcilla pudo ser resultado de la alteración del material parental, o bien, de la desintegración de fragmentos y/o agregados de mayor tamaño.

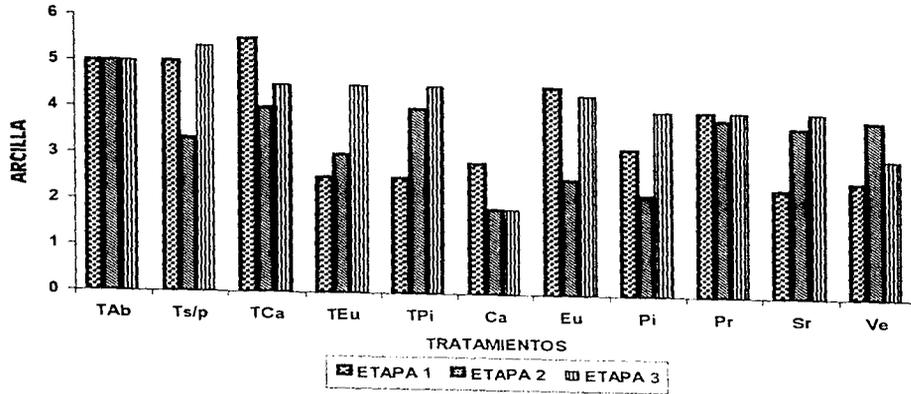


Figura No. 10. Porcentaje de arcilla en el nivel de fracturación fino.

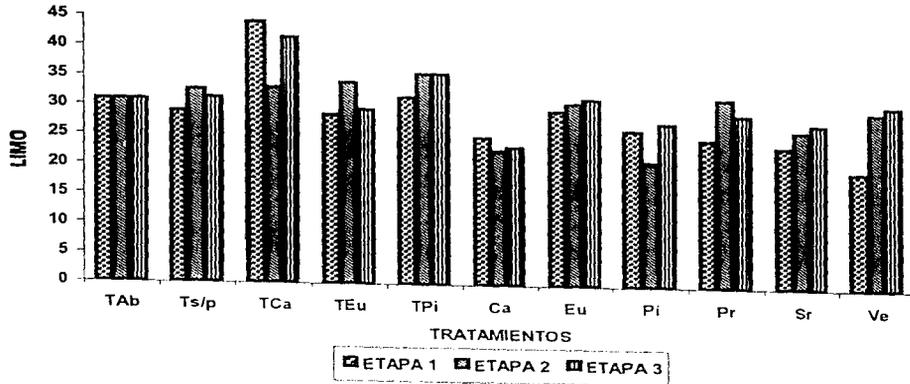


Figura No. 11. Porcentaje de limo en el nivel de fracturación fino.

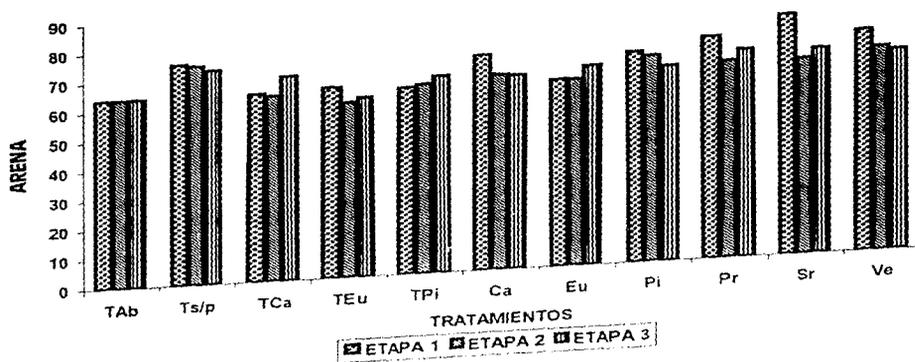


Figura No. 12. Porcentaje de arena en el nivel de fracturación fino.

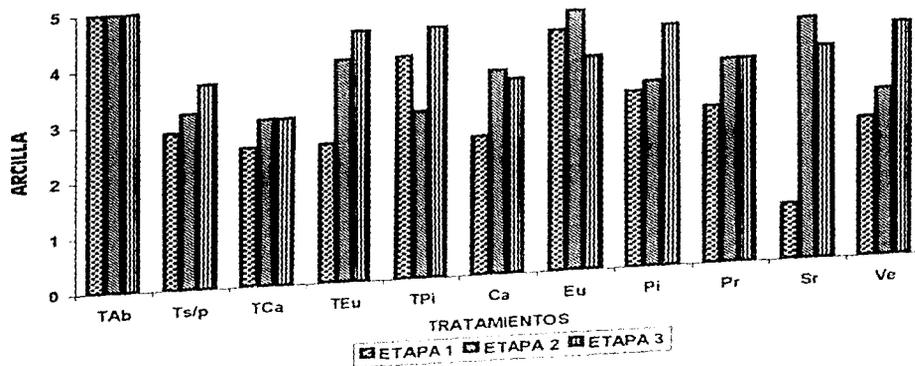


Figura No. 13. Porcentaje de arcilla en el nivel de fracturación grueso.

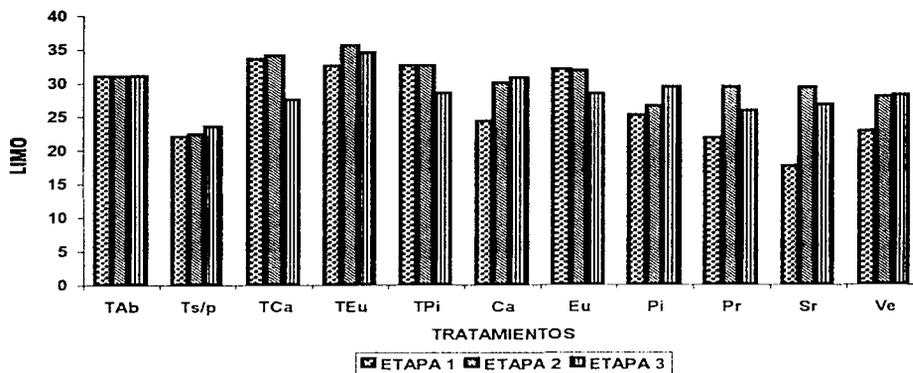


Figura No.14. Porcentaje de limo en el nivel de fracturación grueso.

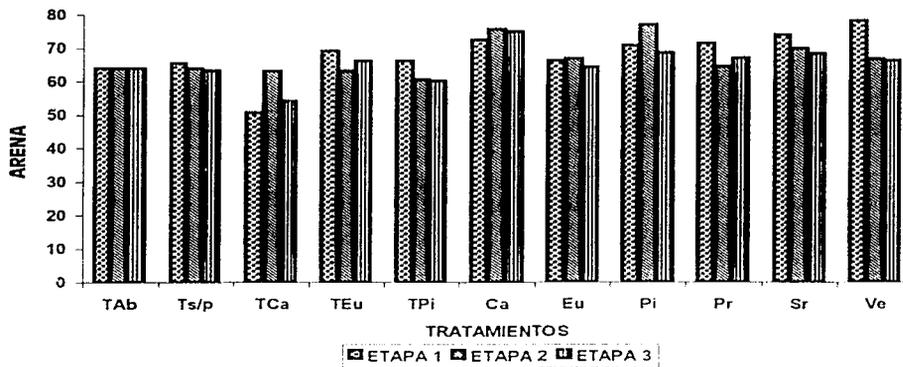


Figura No. 15. Porcentaje de arena en el nivel de fracturación grueso.

El primero es un proceso que se lleva a cabo a largo plazo, de tal manera que, de presentarse, pudo ser en aquellos tratamientos en los que la alteración del material fue más intensa y mayor el tiempo de observación. Sin embargo, debido a que los cambios se observaron desde la primera etapa, es más probable que el incremento de arcilla haya sido debido a que las plantas aceleraron la alteración de los minerales para la obtención de nutrimentos. Esto puede explicar también, que el efecto haya sido mayor en los testigos sin solución que en los que sí se aplicó, ya que la alteración no se presenta con la misma intensidad cuando los nutrimentos se encuentran fácilmente disponibles (Easterwood *et al.*, 1991; Karimian y Razmi, 1990).

Por otro lado, la disminución significativa de la fracción mayor de 0.05 mm con respecto al tiempo de observación, posiblemente fue resultado de la fragmentación y disgregación de las unidades de mayor tamaño. Se sabe que las plantas y los ciclos de humedecimiento-secado, entre otros factores, crean planos de debilitamiento en el material que provocan su desintegración y disgregación (Teuscher y Adler, 1979; Singer *et al.*, 1992; Piccolo y Mbagwu, 1994).

Este hecho puede explicar al mismo tiempo el incremento de las fracciones menores. Además, no se descarta la idea de que las variaciones pudieran tener su origen en la desintegración de los fragmentos del tamaño de la arena, como consecuencia de la disolución del cementante, fenómeno observado y descrito detalladamente por Colombo y Torrent (1991) y apoyado por las observaciones de Acevedo (1997) en tepetates con y sin influencia de especies vegetales en un sistema con drenaje confinado.

Con base en los resultados descritos y de acuerdo con el análisis de varianza realizado (ver Apéndice Tabla 17), sólo las especies vegetales y el tiempo de observación influyeron en el porcentaje de fragmentos y agregados del diámetro de la arena, el limo y la arcilla. El nivel de fracturación no influyó.

Como se mencionó al inicio, los resultados deben ser tomados con ciertas limitaciones debido a los problemas metodológicos planteados, cuya influencia en el estudio pudo ser determinante. Por tal razón, no es posible asegurar la presencia ni el grado de influencia de los factores descritos, sino que es necesario utilizar metodologías y análisis específicos que complementen lo observado. Mientras tanto, lo aquí descrito sólo se plantea como una hipótesis para ser comprobada en estudios posteriores.

## B. Potencial Hidrógeno (pH).

### Nivel de Fracturación Fino y Grueso.

El efecto de los tratamientos en el pH para los dos niveles de fracturación del tepetate, se muestra en la Tabla 9. El análisis de varianza de los resultados mostró que el nivel de fracturación no afectó el pH del tepetate, sin embargo, las especies vegetales y el tiempo de medición tuvieron una influencia altamente significativa. De igual forma, hubo interacción especies-tiempo, tiempo-nivel de fracturación y, en consecuencia, entre los tres factores considerados (ver Apéndice Tabla 17).

En el nivel de fracturación fino, durante la primera etapa hubo una ligera acidificación del tepetate con respecto al TAB, por efecto de los tratamientos. En la mayoría de los casos la diferencia no fue estadísticamente significativa, a excepción del Ts/p y del tratamiento con eucalipto sin aporte de solución nutritiva. La única especie cuyo efecto fue contrario al descrito fue el pasto Rhodes, con el cual, el pH aumentó.

Después de doce meses, se conservó el valor de pH del tepetate sometido a los tratamientos con especies vegetales y solución nutritiva, pero en los testigos el pH pasó de neutro a ligeramente básico; en ambos casos, las diferencias fueron estadísticamente significativas con respecto al TAB. Por lo que se refiere a la tercera etapa (18 meses), hubo una alcalinización altamente significativa con todos los tratamientos; sólo en el Ts/p el pH disminuyó ligeramente con respecto al TAB, pero las diferencias con respecto a éste no fueron significativas.

Al analizar las variaciones de pH en el nivel fino, con respecto al tiempo, Figura 16, se observa que el efecto general de los tratamientos fue hacia una neutralización y ligera alcalinización del material, a excepción del Ts/p en el cual, el pH fue estadísticamente equivalente al del TAB en los tres períodos de observación. El pasto Rhodes fue la especie con la que se obtuvo el valor de pH más alto, incluso, estadísticamente diferente al resto de los tratamientos y testigos.

En el nivel de fracturación grueso, Tabla 9, se presentó el mismo efecto descrito para el nivel fino. Hubo una tendencia hacia la alcalinización del tepetate con respecto al tiempo, Figura 17, y el pasto Rhodes y el sorgo fueron las especies que promovieron los valores de pH más altos. En los testigos sin solución nutritiva la alcalinización se presentó desde los primeros doce meses de observación, sin embargo, en los tratamientos con adición de solución se presentó hasta los 18 meses. Únicamente en el Ts/p el pH fue estadísticamente equivalente al del TAb en las tres etapas.

**Tabla No. 9. Valor de pH en los dos niveles de fracturación del tepetate, después de seis, doce y dieciocho meses de observación.**

TRATAMIENTOS <sup>1</sup>	FINO			GRUESO		
	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3
TAb	6.90ab <sup>2</sup>	6.90bc	6.90d	6.90b	6.90c	6.90d
Ts/p	6.57c	7.00b	6.80d	6.57d	6.90c	6.73e
TCa	6.60bc	7.30a	7.50c	6.50de	7.40b	7.60b
TEu	6.40d	7.40a	7.60bc	6.40e	7.60a	7.60b
TPi	6.60bc	7.40a	7.60bc	6.60cd	7.70a	7.50b
Ca	6.60bc	6.83c	7.67b	6.70cd	6.83cd	7.27c
Eu	6.73b	6.87bc	7.73b	6.73c	6.87c	7.60b
Pi	6.73b	6.63d	7.73b	6.70cd	6.63d	7.57b
Pr	7.03a	6.43e	8.10a	7.07a	6.70d	7.73ab
Sr	6.73b	6.70cd	7.63bc	6.80bc	6.67d	7.80a
Ve	6.67bc	6.73cd	7.73b	6.70cd	6.67d	7.63b

<sup>1</sup>] TAb: Testigo Absoluto Ts/p: Testigo sin planta TCa, TEu, TPi: Testigo sin solución nutritiva

Ca: Casuarina Eu: Eucalipto Pi: Pirúl Pr: Pasto Rhodes Sr: Sorgo Ve: Veza

<sup>2</sup>] Las letras corresponden a la significancia estadística (p 0.01) por columna.

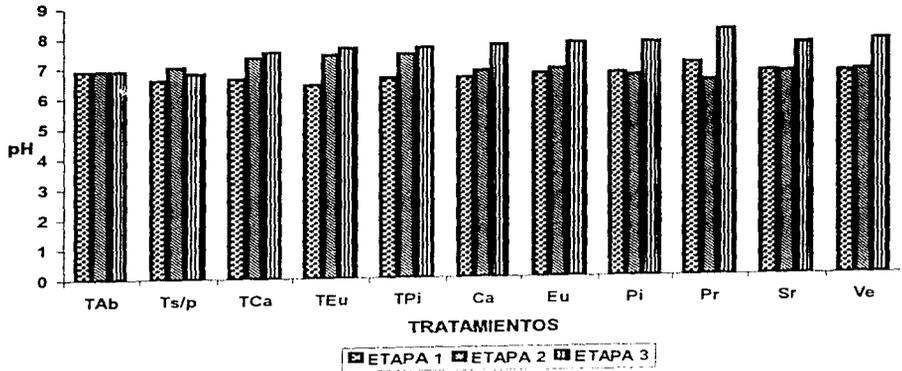


Figura No. 16. pH del tepetate en el nivel de fracturación fino.

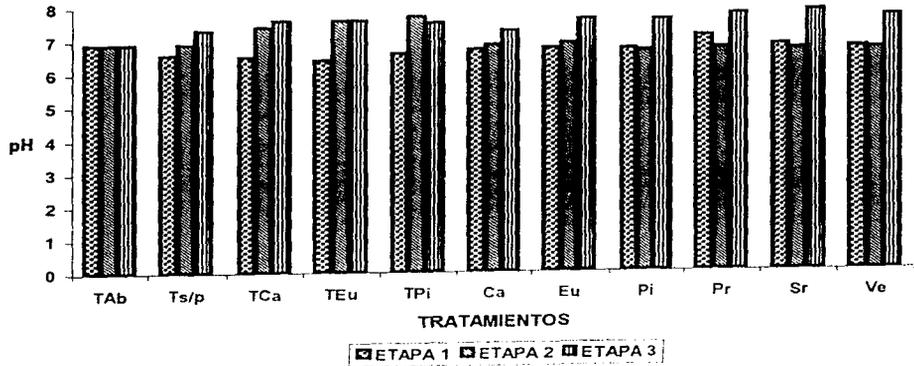


Figura No. 17. pH del tepetate en el nivel de fracturación grueso.

Cabe destacar, que el nivel de fracturación no tuvo influencia sobre el pH, pero tal como se mencionó en el análisis de varianza, su interacción con el tiempo sí fue significativa, de tal manera, que se pueden observar ciertas variaciones en los valores de pH entre los niveles de fracturación a lo largo de las tres etapas. En el nivel de fracturación fino se presentó alcalinización del tepetate con la mayoría de los tratamientos desde los primeros seis meses de observación y también en él se obtuvieron los valores más altos al finalizar el estudio (18 meses).

Dado que en el Ts/p no se presentó variación significativa del pH con respecto al TAb, los cambios no pueden adjudicarse al efecto del agua y la solución nutritiva, sino que fueron resultado de la presencia de las especies vegetales. Estas, ya sea por los compuestos que exudan y que directamente son depositados en el suelo, como por la transformación de la materia orgánica en general, modifican el pH. Además del efecto químico que tienen sobre el sustrato durante su desarrollo (Stevenson, 1982; Weinberger y Yee, 1984; Karimian y Razmi, 1990; Bohn *et al.*, 1993).

La materia orgánica humificada tiene un comportamiento amortiguador en el suelo, sin embargo, muchas especies vegetales exudan ácidos orgánicos que pueden incrementar la acidez (Easterwood *et al.*, 1991). Además, la descomposición del follaje da lugar a la formación de compuestos capaces de modificar el pH del sustrato y, en las condiciones de un sistema cerrado como el constituido por las macetas (en el que hay una mayor acumulación de compuestos y pérdida mínima), los procesos mencionados pueden acentuarse.

La causa principal de alcalinización pudo ser el drenaje confinado que presenta el modelo experimental, ya que una de sus principales características es la alcalinización paulatina del material (Seymour y Balluff, 1989; J. E. Gama Castro, 1996. Comunicación personal). Sin embargo, sobre ésta, lógicamente también actuaron las especies vegetales, ya que la mayor alcalinización se presentó en los tratamientos que las contenían. La influencia de las especies pudo ser también resultado del crecimiento radical, ya que cuando el espacio llega a ser limitado, hay un efecto de empaquetamiento del material por la raíz, que ocasiona compactación y dificulta aún más el drenaje acentuando el proceso de alcalinización.

El hecho de que la alcalinización se haya presentado primero en los tratamientos sin solución nutritiva pudo deberse a que al no haber nutrimentos disponibles, las plantas los extrajeron a partir de la alteración del material. Durante ésta se liberan numerosos compuestos básicos de los cuales, sólo algunos son asimilados por las plantas mientras que el resto permanecen en la solución del suelo pudiendo provocar cambios en el pH.

Aún cuando las plantas liberan protones durante la absorción de nutrimentos, su concentración en el sustrato es menor comparada con la de las bases y demás compuestos liberados durante la alteración del material. En el caso de los tratamientos con solución nutritiva, por estar disponibles todos los elementos para la nutrición vegetal, la alteración y liberación de bases es menor y, en consecuencia, su acumulación más lenta.

Así, las condiciones de drenaje confinado, las características de baja infiltración propias del tepetate y el crecimiento radical, pudieron favorecer la alcalinización del material por acumulación de bases, cationes, óxidos e hidróxidos de aluminio, aluminatos y amorfos, principalmente estos últimos, que se encuentran en cantidades importantes en el tepetate (Bohn *et al.*, 1993; Flores *et al.*, 1996).

### **C. Materia Orgánica.**

#### **Nivel de Fracturación Fino y Grueso.**

La Tabla 10, muestra los porcentajes de materia orgánica (M.O.) presentes en el tepetate de los dos niveles de fracturación. En el nivel fino, durante la primera etapa hubo un incremento de materia orgánica con todos los tratamientos con respecto al TAB; dicho incremento sin embargo, sólo fue estadísticamente significativo con las herbáceas y el pirúl. Después de doce meses, el porcentaje de materia orgánica fue mayor tanto con respecto al TAB, como al observado en la primera etapa; en este caso únicamente el Ts/p presentó valores estadísticamente equivalentes al TAB. El valor más alto correspondió al pirúl y los testigos sin solución tuvieron los menores porcentajes.

En la tercera etapa, aumentó nuevamente el porcentaje de materia orgánica con todos los tratamientos, a excepción del Ts/p y las diferencias fueron estadísticamente significativas en todos los casos. Los mayores porcentajes se obtuvieron con pirúl, casuarina y pasto Rhodes. Los testigos sin solución presentaron porcentajes mayores al TAb y al Ts/p, pero menores que el resto de los tratamientos.

**Tabla No. 10. Porcentaje de materia orgánica en los dos niveles de fracturación del tepetate, después de seis, doce y dieciocho meses de observación.**

TRATAMIENTOS <sup>1</sup>	FINO			GRUESO		
	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA1	ETAPA 2	ETAPA 3
TAb	0.10c <sup>2</sup>	0.10d	0.10f	0.10c	0.10d	0.10e
Ts/p	0.17bc	0.13d	0.13e	0.17c	0.13d	0.17d
TCa	0.20bc	0.30c	0.35d	0.20c	0.30c	0.35c
TEu	0.20bc	0.30c	0.35d	0.20c	0.30c	0.29c
TPI	0.30ab	0.40c	0.22e	0.10c	0.30c	0.22d
Ca	0.16bc	0.43bc	0.83a	0.14c	0.47b	0.90a
Eu	0.20bc	0.50bc	0.47c	0.18c	0.43b	0.90a
Pi	0.27b	0.87a	0.77a	0.25bc	0.73a	0.93a
Pr	0.41a	0.53b	0.60b	0.45a	0.47b	0.70b
Sr	0.34ab	0.53b	0.40c	0.32b	0.53b	0.63b
Ve	0.34ab	0.40c	0.43c	0.40ab	0.43b	0.63b

<sup>1</sup>] TAb: Testigo Absoluto    Ts/p: Testigo sin planta    TCa, TEu, TPI: Testigo sin solución nutritiva  
Ca: Casuarina    Eu: Eucalipto    Pi: Pirúl    Pr: Pasto Rhodes    Sr: Sorgo    Ve: Zeza

<sup>2</sup>] Las letras corresponden a la significancia estadística (p 0.01) por columna.

En el nivel de fracturación grueso, hubo un incremento significativo en el porcentaje de materia orgánica con respecto al TAb durante la primera etapa, pero sólo con las herbáceas, en donde el mayor porcentaje correspondió al pasto Rhodes, con un valor cuatro veces más alto. En la segunda etapa, el Ts/p

fue el único cuyo porcentaje fue equivalente al del TAb, con los otros tratamientos el incremento fue altamente significativo tanto con respecto al TAb, como a la primera etapa.

Los valores de los testigos con arbóreas sin solución fueron inferiores a los de los tratamientos con adición de solución nutritiva, en este caso, el porcentaje más alto se obtuvo con el pirúl. A los 18 meses, el porcentaje de materia orgánica de los testigos se mantuvo igual al de la segunda etapa, pero el de los tratamientos con solución se incrementó de manera significativa en la mayoría de los casos. Las arbóreas y el pasto Rhodes fueron las especies que mayor cantidad de materia orgánica aportaron al tepetate.

El comportamiento general con respecto al tiempo en los dos niveles de fracturación, Figuras 18 y 19, muestra que con todos los tratamientos, excepto el Ts/p, hubo un incremento en el porcentaje de materia orgánica. Dicho incremento fue mayor después de 18 meses de permanencia de las especies vegetales en el tepetate. Los testigos sin adición de solución nutritiva presentaron también un aumento en el porcentaje de materia orgánica, pero fue menor, comparado con el observado en los tratamientos con solución.

Dado que los Ts/p no presentaron incremento en el porcentaje de materia orgánica, es posible afirmar que los cambios en los porcentajes con los otros tratamientos fueron debidos al efecto de las plantas. Esta información coincide con los estudios realizados por Karimian y Razmi (1990) quienes, al determinar la influencia de diferentes especies perennes en las características de un suelo, observaron una acumulación de materia orgánica superior al 7% en suelos con menos del 1%. En el caso del tepetate, al inicio contenía 0.1% de materia orgánica y al finalizar el estudio, se encontró una cantidad superior al 0.9% bajo la influencia de las especies arbóreas y de 0.7% con las herbáceas.

La acumulación de materia orgánica fue resultado tanto de la descomposición de follaje, raíces y raicillas, como de los compuestos secretados por el sistema radical como parte de su metabolismo (Reid y Goss, 1981; Hillel, 1982; Stevenson, 1982; Tisdall, 1994), lo cual es probable ya que la técnica de cuantificación de materia orgánica incluye compuestos humificados y no humificados (Stevenson, 1982). De tal manera que independientemente del grado de transformación, el contenido de materia orgánica total en el tepetate se incrementó.

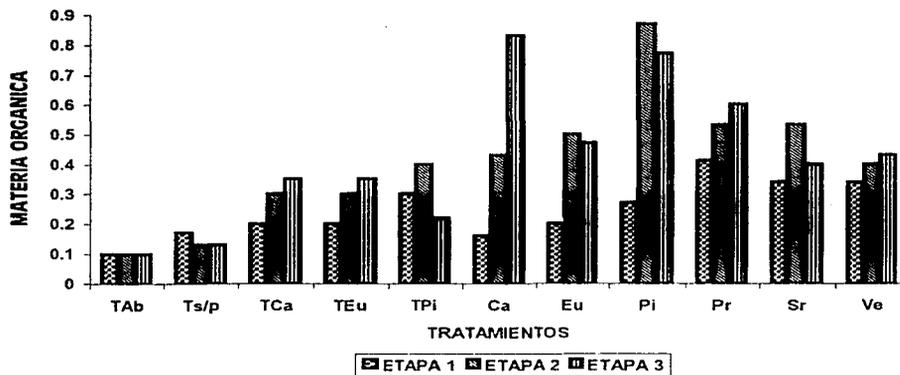


Figura No. 18. Porcentaje de materia orgánica (M.O.) en el nivel de fracturación fino.

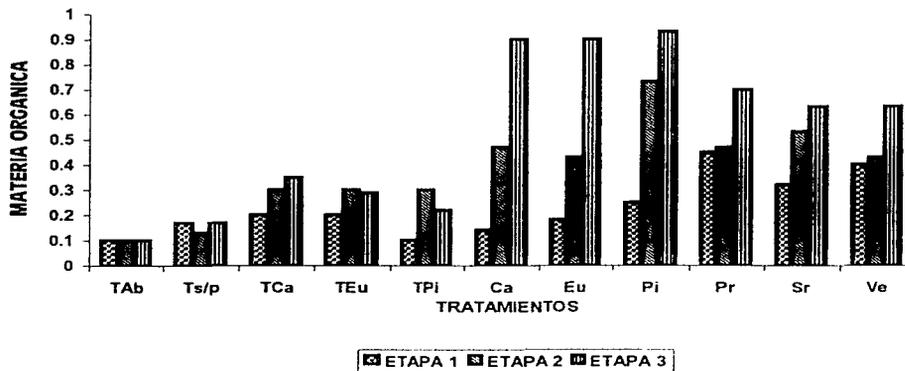


Figura No. 19. Porcentaje de materia orgánica (M.O.) en el nivel de fracturación grueso.

Como el Ts/p no presentó ninguna diferencia con respecto al TAb, es posible afirmar que la solución nutritiva no influyó en el contenido de materia orgánica del sustrato. Sin embargo, el hecho de que el porcentaje de ésta en los testigos sin solución haya sido menor que el de los tratamientos en los que sí se aplicó, implica que la solución influyó pero de manera indirecta.

La influencia de la solución pudo ser al favorecer el desarrollo de las especies vegetales, lo que da como resultado un incremento en la cantidad de biomasa y compuestos orgánicos producidos por el sistema radical. Al favorecerse el desarrollo de raíces se incrementa también el metabolismo y en consecuencia hay un aumento en el aporte de materia orgánica al sustrato (Kenyon, 1982; Renningsfeld y Kurzmann, 1983). Además, la planta asimila los nutrientes necesarios de la solución nutritiva, sin necesidad de obtenerlos a partir de los compuestos orgánicos presentes, lo que facilita su acumulación.

Como tanto morfológica como fisiológicamente, las especies herbáceas presentan un sistema radical y hábitos de crecimiento diferentes a los de las arbóreas, la comparación entre ambas no resulta del todo válida. No obstante, se puede decir que las arbóreas aportaron mayor cantidad de materia orgánica al final del estudio.

Lo anterior pudo deberse a que por ser mayor el volumen radical, hubo más secreción de mucilagos y más restos susceptibles de ser descompuestos. Aunado a ello, está el hecho de que las tres especies probadas presentan asociaciones micorrícicas, lo cual, como es sabido, no sólo incrementa el área de la rizósfera, sino que los hongos aportan también cantidades importantes de polisacáridos que influyen en el contenido total de materia orgánica (Gupta y Germida, 1988; Diné *et al.*, 1991; Tisdall, 1994; Hayes y Tapp, 1994).

En el caso de las herbáceas, el aporte de materia orgánica también fue altamente significativo, lo cual es función, principalmente, del tipo de sistema radical que presentan. La raíz fascicular al ser más densa y ramificada que la típica, posee mayor número de ápices, los cuales son fisiológicamente más activos que el resto de la raíz y producen abundantes mucilagos (Dorioz *et al.*, 1993).

Este hecho concuerda con los resultados, ya que durante los primeros seis meses, fueron las herbáceas las que dieron porcentajes de materia orgánica más altos, mientras que hubo que esperar 18 meses en el caso de las arbóreas, para obtener un incremento similar. Además de lo ya señalado, pudo ser debido a que el hábito de crecimiento radical de las arbóreas es lento comparado con el de las herbáceas (Pritchett, 1986). Además, algunas arbóreas como el eucalipto, presentan en su composición grupos fenólicos y compuestos asimilables sólo por microorganismos muy específicos, lo que retarda la descomposición de sus restos (Guggenberger y Zech, 1994).

Así, las herbáceas después de seis meses presentan un sistema radical totalmente desarrollado capaz de producir cantidades importantes de mucilagos, sin embargo, en el caso de las arbóreas, es hasta que la raíz alcanza un cierto grado de desarrollo que se incrementa la producción de compuestos orgánicos.

El pasto Rhodes fue la herbácea que produjo el porcentaje más alto de materia orgánica, lo cual pudo deberse a que posee un sistema radical más ramificado que el de las otras dos especies y a que aportó gran cantidad de follaje al sustrato, además, se adaptó fácilmente a las condiciones del tepetate. Sin embargo, las otras especies también dieron resultados satisfactorios en los dos niveles de fracturación. Entre las arbóreas no se presentaron diferencias significativas.

La acumulación de materia orgánica es un resultado muy importante de la introducción de especies vegetales en capas endurecidas fracturadas. Además de suplir deficiencias nutrimentales, la materia orgánica influye en la otra limitante que presentan los tepetates para poder integrarlos al proceso productivo: su dureza. Ya que se ha observado que el contenido de materia orgánica es inversamente proporcional a la dureza de un suelo (Bathke *et al.*, 1992), al aumentar su contenido en los tepetates podría disminuir su dureza y favorecer todos aquellos procesos involucrados en la formación de suelo (Sánchez, 1981; Tovar, 1987; Márquez *et al.*, 1992).

Todo lo anterior, aunado al destacado efecto de la materia orgánica en la formación de agregados estables, constituye la base de la conservación de las características del espacio poroso y, en consecuencia, de la formación de suelo. Es necesario tener presente, sin embargo, que las macetas

constituyen sólo un modelo cuyas características difieren de las condiciones reales y que, por lo tanto, pudo haber mayor acumulación de materia orgánica y menor pérdida o uso de la misma por las especies vegetales y la biota, lo que en condiciones de campo sería variable.

#### **D. Agregación en Seco.**

Antes de iniciar el análisis y discusión de los resultados sobre agregación, es necesario aclarar, que el TAb estuvo constituido por fragmentos de tepetate creados artificialmente y que, por efecto de los tratamientos, el material transformado y reorganizado constituyó agregados, de tal manera que a partir de este punto, con esa terminología se hará referencia a las diferentes condiciones estructurales del material.

##### **Nivel de Fracturación Fino.**

Los porcentajes de agregados en seco (**AS**) obtenidos como resultado de los tratamientos aplicados en el nivel de fracturación fino del duripán, se muestran en la Tabla 11. Al comparar los porcentajes de los tratamientos sin especies vegetales (Ts/p) con los fragmentos del TAb, se observó que hubo una disminución significativa de los fragmentos menores de 0.25 mm y formación de agregados de 2 a 5 y de 7 a 10 mm. La mayor disminución se presentó en la segunda etapa y los porcentajes más altos de agregación, en la tercera.

Dicha disminución, puede ser interpretada como una reorganización del material, ya que por tratarse de macetas sin perforaciones, no pudo haber pérdida de partículas o fracciones. Esta reorganización, de acuerdo con los resultados, dio lugar a la formación de agregados de 2 a 10 mm, los cuales no se encontraban presentes en el material original, mismo que estuvo constituido únicamente por fragmentos menores de 2 mm (Figura 20).

Tabla No.11. Porcentaje de agregados en seco (AS) en el nivel de fracturación fino del tepetate después de seis, doce y dieciocho meses de observación. Comparación de medias (Tukey)<sup>1</sup>.

TRAT. <sup>2</sup>	>20mm			20.0-15.0			15.0-10.0			10.0-7.0			7.0-5.0		
	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3
TAb	0.00d	0.00d	0.00d	0.00c	0.00b	0.00c	0.00b	0.00b	0.00b	0.00c	0.00b	0.00b	0.00c	0.00a	0.00a
Ts/p	0.00d	0.00d	0.00d	0.50c	0.00b	0.10c	0.13b	0.40b	0.90ab	8.73a	3.00ab	4.50a	0.50bc	1.20a	1.10a
TCa	25.76b	11.50c	2.40cd	7.30a	1.20b	2.90b	3.80ab	1.10b	1.30ab	9.60a	3.80ab	3.90a	1.90b	0.60a	1.10a
TEu	7.90cd	22.60b	9.50c	1.10c	1.80b	3.60b	3.60ab	1.70b	2.50a	3.30bc	2.10b	4.40a	1.20bc	0.60a	0.40a
TPi	7.00cd	20.60b	5.60cd	1.50c	3.40ab	1.50bc	2.60ab	4.60a	1.30ab	4.80b	4.60ab	4.20a	1.00bc	1.30a	1.00a
Ca	41.30a	26.93b	31.33b	7.77a	3.13ab	3.50b	4.40a	1.60b	2.23a	4.43b	4.13ab	4.73a	0.40bc	0.47a	0.50a
Eu	31.87b	31.30ab	33.40ab	2.43bc	3.57ab	6.03a	3.23ab	1.90b	2.37a	4.73b	4.87ab	6.67a	0.47bc	0.43a	0.57a
Pi	35.47ab	20.33b	33.20ab	5.60ab	4.33a	3.07b	3.20ab	1.93b	2.47a	4.13b	4.77ab	4.60a	0.47bc	0.67a	0.63a
Pr	13.93c	20.77b	27.90b	3.67bc	4.13ab	6.27a	3.53ab	2.57ab	1.77ab	7.50ab	6.43a	6.07a	1.80b	0.93a	0.47a
Sr	8.40cd	20.93b	33.93ab	2.40bc	3.47ab	4.33ab	2.17b	1.33b	2.57a	6.27ab	4.83ab	4.83a	1.10bc	0.47a	0.70a
Ve	14.10c	38.47a	41.73a	3.93b	2.50ab	3.27b	1.80b	2.67ab	1.97ab	6.13ab	4.83ab	3.23ab	6.67a	0.43a	0.30a

5.0-3.0			3.0-2.0			2.0-1.0			1.0-0.5			0.5-0.25			<0.25mm		
ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3
0.00b	0.00b	0.00b	0.00c	0.00b	0.00b	29.27ab	29.27a	29.27a	24.97ab	24.97ab	24.97ab	11.80a	11.80a	11.80b	33.77a	33.77a	33.77a
3.00ab	4.47a	3.77a	4.13bc	8.83a	9.07a	26.43b	29.37a	27.73ab	26.53a	28.90a	25.80a	8.87b	10.23ab	10.57b	21.17b	13.60c	16.47b
5.20a	2.00a	3.80a	8.60ab	8.10ab	8.20ab	8.60f	19.30cd	22.10bc	12.30d	21.70bc	26.20a	6.70c	11.40a	13.10b	10.30de	19.30b	15.00c
2.90ab	1.80b	2.30a	4.20bc	4.90ab	6.30ab	26.70b	20.30c	25.30b	24.10ab	17.90c	21.10b	8.60b	8.00b	9.70b	16.40c	18.30b	14.90c
2.30b	3.60a	2.20a	5.60b	6.10ab	8.50ab	31.40a	25.20b	25.50b	22.00b	18.00c	24.50ab	8.40b	5.10c	14.90a	13.20d	7.50d	10.80d
2.23b	1.67b	2.13a	4.13bc	3.23b	4.40b	13.57e	19.63c	15.53d	10.70d	19.67bc	18.57bc	4.00d	7.30bc	6.83c	7.07ef	12.23cd	10.23d
3.20ab	1.97a	2.53a	7.73ab	2.70b	4.37b	17.40d	16.23d	15.93cd	14.20cd	18.43c	15.13c	4.70d	7.07bc	5.20cd	10.03e	11.33cd	7.60d
1.93b	2.03a	1.57a	3.30bc	4.37b	3.53b	15.63d	20.23c	18.93c	14.07cd	16.40c	16.60c	5.07cd	5.50c	6.37cd	11.17de	8.03d	8.07d
4.50ab	2.73a	1.40a	10.77a	7.00ab	3.67b	26.20b	20.43c	19.20c	18.80bc	19.20bc	17.47bc	3.57d	6.93bc	6.57cd	5.73f	8.87d	9.23d
2.47b	2.27a	1.80a	6.00b	4.27b	5.17ab	22.63c	21.03c	18.97c	24.73ab	23.57b	14.60c	9.30b	8.07b	5.13cd	14.53cd	9.77d	7.97d
3.57ab	1.67b	1.63a	6.20b	2.50b	2.47b	21.73c	15.20d	18.30cd	17.30c	16.60c	14.70c	6.40cd	6.23c	4.93d	12.17de	8.90d	7.47d

<sup>1</sup> Las letras ubicadas después de los valores, corresponden a la significancia estadística por columna.

<sup>2</sup> TAb: Testigo absoluto  
Ts/p: Testigo sin planta

TCa, TEu, TPI: Testigos sin solución  
Ca: Casuarina

Eu: Eucalipto  
Pi: Pirúl

Pr: Pasto Rhodes  
Sr: Sorgo

Ve: Veza

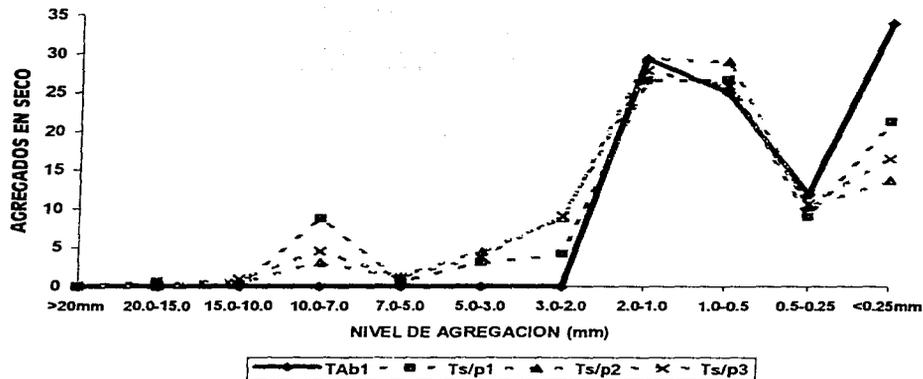


Figura No. 20. Porcentaje de agregados en seco (AS) con los tratamientos testigo, en el nivel de fracturación fino del tepetate.

NOTA: En todas las gráficas de agregación en seco, los números que se encuentran después de la clave de los tratamientos corresponden a la etapa de observación (1: seis meses, 2: doce meses y 3: dieciocho meses).

Las claves de los tratamientos son:

TA**b**: Testigo absoluto  
 Ts/p: Testigo sin planta  
 Ca: Casuarina  
 Eu: Eucalipto  
 Pi: Pirúl

Pr: Pasto Rhodes  
 Sr: Sorgo  
 Ve: Veza

TCa, TEu, TPI: Testigos sin solución

En estos tratamientos, debido a que el factor biológico considerado no se encontraba presente, la agregación o reorganización del material pudo estar más influenciada por factores abióticos que bióticos, aunque como no se evaluó la presencia de microorganismos, su efecto no puede descartarse del todo.

De acuerdo con los resultados de microagregación obtenidos indirectamente por la metodología de Bouyoucos y con base en las hipótesis planteadas para su explicación, los resultados aquí observados pueden tener una explicación similar. Primero, dado que el material reorganizado es menor de 0.25 mm, pudo presentarse una cementación inorgánica favorecida por las condiciones de drenaje confinado del modelo experimental, o bien, una compactación por el peso del tepetate y el incremento de la cohesión durante los períodos de desecación (Williams *et al.*, 1985; Thiry y Millot, 1987; Colombo y Torrent, 1991; Angers *et al.*, 1992; Miehlich, 1992; Flores *et al.*, 1996).

Por otra parte, también hubo formación de agregados de macroagregados, en los cuales, de acuerdo con la literatura, la que predomina es la agregación por compuestos orgánicos. Esto implica que aún cuando no se evaluó, pudo existir influencia de factores bióticos relacionados con la presencia de microorganismos y algas. Incluso, en muchos tratamientos se observaron algunas colonias en la superficie del material (Hayes y Tapp, 1994; Tisdall, 1994).

Sin embargo, dado que los macroagregados presentaron una estabilidad baja (como se verá en el capítulo siguiente), lo más factible es que el origen de la unión haya sido principalmente fisicoquímico y se trate de una compactación con incipientes procesos de cementación inorgánica y orgánica.

Al hacer un análisis del efecto de las especies vegetales con respecto tanto al TAb como a los Ts/p, se observó un comportamiento similar durante las tres etapas. Con todas las especies probadas hubo disminución estadísticamente significativa de los fragmentos menores de 2 mm e incremento en el porcentaje de AS mayores de 2 mm, en relación al TAb. Con respecto a los Ts/p, el comportamiento general fue el mismo, pero en los tratamientos con especies vegetales la disminución y el incremento en el porcentaje de agregación fueron mayores. Lo que indica que las plantas tuvieron mayor influencia sobre la estructuración del tepetate que los procesos fisicoquímicos.

Por lo que se refiere a las especies vegetales, entre las arbóreas no se presentaron diferencias significativas en los porcentajes de agregación y desintegración obtenidos con cada una de ellas, Figuras 21, 22 y 23. Únicamente en los niveles de agregación mayores de 15 mm la casuarina y el pirúl tuvieron un efecto sobresaliente; es necesario señalar, que con estas especies se obtuvieron también los porcentajes de materia orgánica más altos.

Estos resultados sugieren que el aporte de materia orgánica por cada especie fue equivalente, así como la intensidad de los efectos mecánicos del sistema radical sobre el tepetate. Por otra parte, las tres especies presentan asociaciones micorrízicas, de tal manera que los hongos influyeron también en el proceso de agregación a través de los polisacáridos que secretan (Stevenson, 1982; Hayes y Tapp, 1994; Tisdall, 1994).

Al comparar el efecto de las arbóreas con y sin adición de solución nutritiva, Figuras 24, 25 y 26, se observó que los porcentajes de agregación del tepetate fueron menores en los tratamientos sin solución. Incluso, en los niveles menores de 0.25, de 1 a 2 y mayores de 20 mm, las diferencias fueron estadísticamente significativas. Esto implica que la influencia de las especies vegetales sobre el tepetate se acentuó con la adición de solución nutritiva, lo cual pudo ser debido a que ésta favorece el desarrollo vegetal y con ello se incrementan algunos procesos como la producción de mucilagos (Kenyon, 1982; Renningsfeld y Kurzmann, 1983). Los testigos sin solución tuvieron porcentajes de materia orgánica menores que los obtenidos en los tratamientos en los que sí se aplicó, hecho que apoya lo mencionado.

En el caso de las herbáceas, Figuras 27, 28 y 29, en la mayoría de los intervalos de agregación los porcentajes fueron estadísticamente equivalentes. No obstante, sobresalió el efecto del pasto Rhodes y el sorgo, que fueron las especies con porcentajes de materia orgánica más altos.

El hecho de que los valores de agregación hayan sido equivalentes, puede estar relacionado con que las dos especies poseen un mismo tipo de sistema radical (fascicular). En el caso de la veza, aún cuando su desarrollo radical fue mucho menor que el de las gramíneas, la asociación con bacterias fijadoras pudo influir en la producción de compuestos orgánicos y favorecer porcentajes de agregación similares a los obtenidos con las otras especies (Dorioz *et al.*, 1993; Tisdall, 1994).

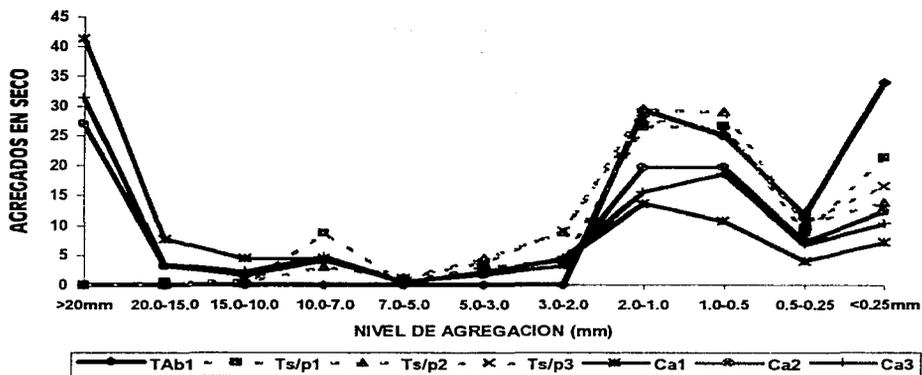


Figura No. 21. Efecto de la casuarina sobre el porcentaje de agregados (AS) en el nivel de fracturación fino del tepetate.

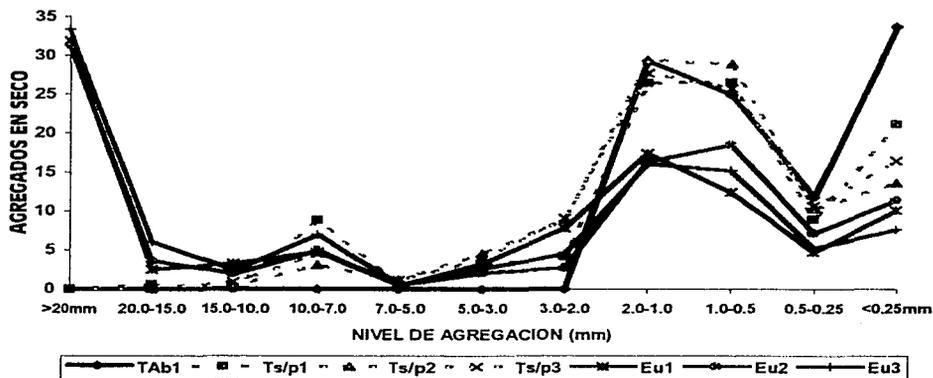


Figura No. 22. Efecto del eucalypto sobre el porcentaje de agregados (AS) en el nivel de fracturación fino del tepetate.

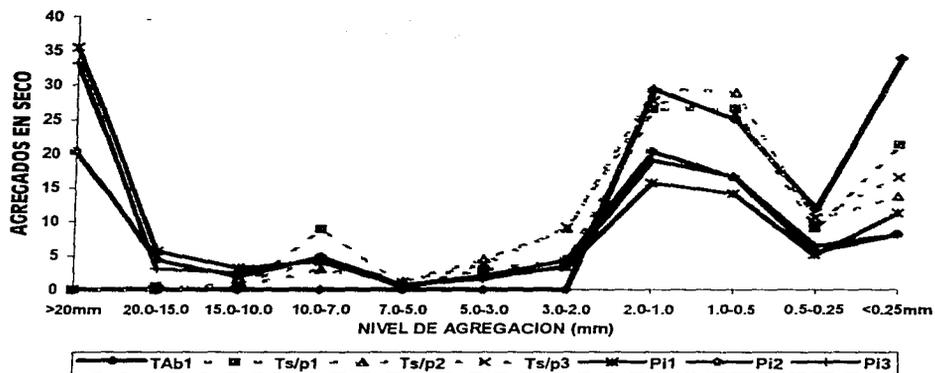


Figura No. 23. Efecto del pirul sobre el porcentaje de agregados (AS) en el nivel de fracturación fino del tepalcate.

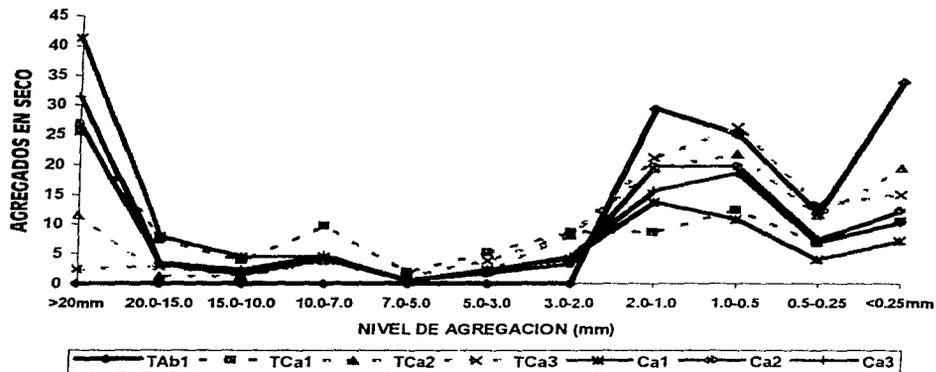


Figura No. 24. Efecto de la casahuate con y sin solución nutritiva sobre el porcentaje de agregados (AS) en el nivel de fracturación fino del tepalcate.

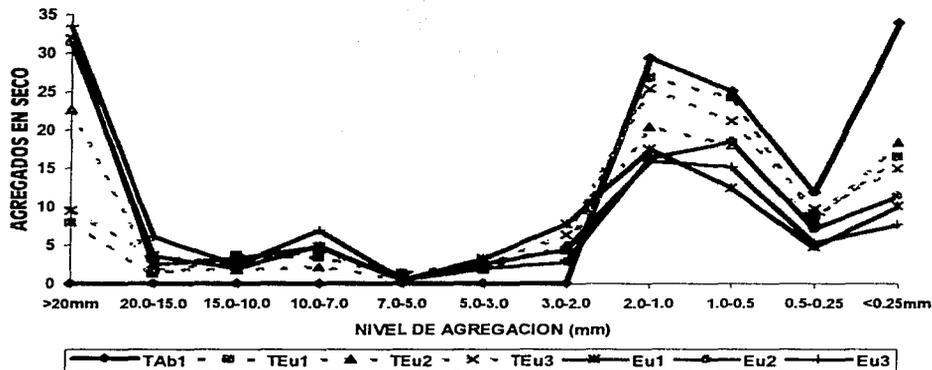


Figura No. 25. Efecto del eucalipto con y sin solución nutritiva sobre el porcentaje de agregados (AS) en el nivel de fracturación fino del tepetate.

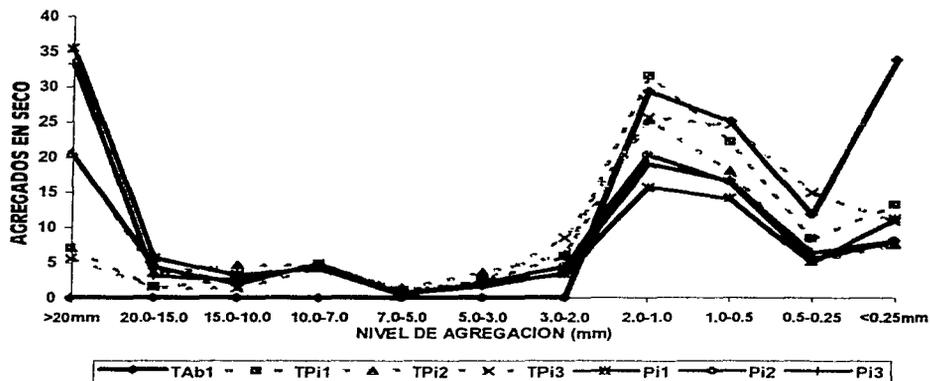


Figura No. 26. Efecto del pirul con y sin solución nutritiva sobre el porcentaje de agregados (AS) en el nivel de fracturación fino del tepetate.

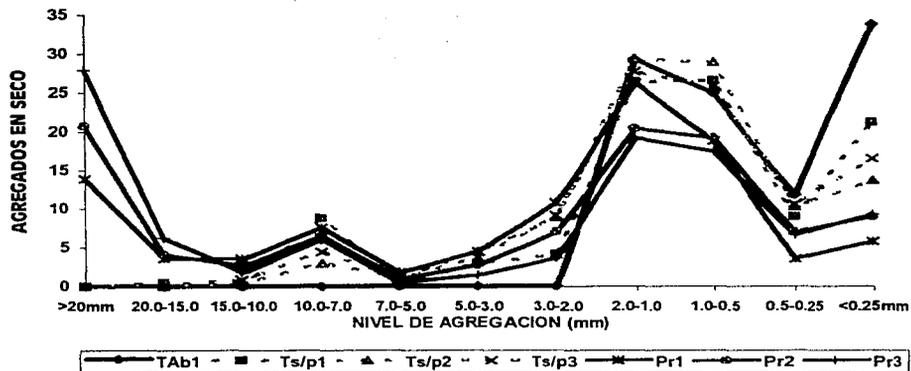


Figura No. 27. Efecto del pasto Rhodes sobre el porcentaje de agregados (AS) en el nivel de fracturación fino del tepetate.

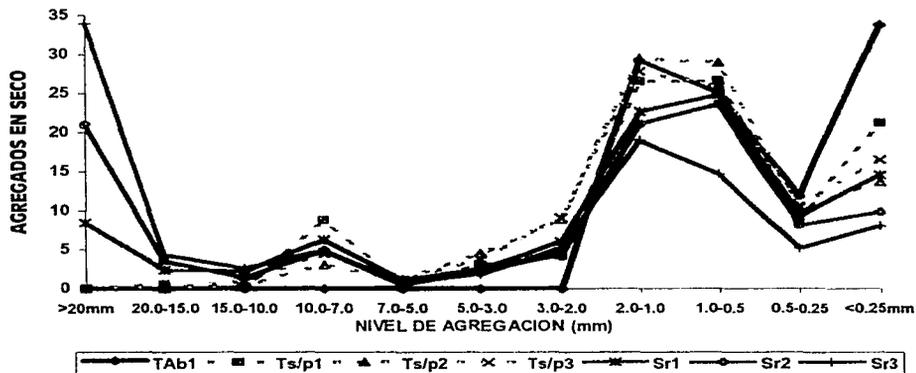


Figura No. 28. Efecto del sorgo sobre el porcentaje de agregados (AS) en el nivel de fracturación fino del tepetate.

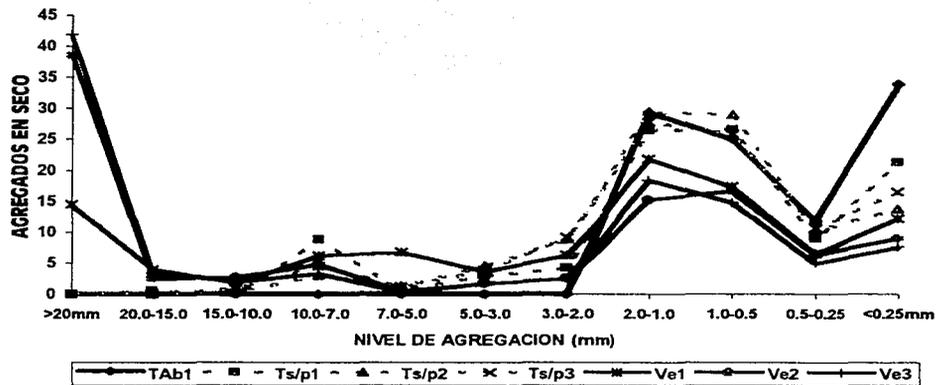


Figura No. 29. Efecto de la veza sobre el porcentaje de agregados (AS) en el nivel de fracturación fino del tepetate.

De acuerdo con los resultados, tanto en la disminución de fragmentos, como en la formación de agregados, estuvieron involucrados dos tipos de procesos: la desintegración de los fragmentos y la reorganización del material.

La desintegración y disgregación (en el caso de los agregados) pudieron ser resultado de los ciclos de humedecimiento y secado que ocasionan cambios en la contracción y expansión de las arcillas, separación de las unidades por la entrada brusca de agua y salida del aire contenido en las mismas, disolución o hidrólisis de los agentes de unión inorgánicos e intemperización química de los minerales. Todos ellos, factores que aumentan la presencia de planos de debilitamiento en el material (Bartoli *et al.*, 1988; Perfect *et al.*, 1990; Dinel *et al.*, 1991; Singer *et al.*, 1992; Piccolo y Mbagwu, 1994).

Los ciclos de humedecimiento y secado no sólo se presentan en función de la frecuencia de riego y los periodos de desecación normales a los que está sujeto el sustrato, sino que también pueden ser provocados por las plantas a través de la absorción de agua y nutrientes. Cuando esto se lleva a cabo, cambia la orientación de las partículas y agregados cercanos a la raíz, lo que crea fisuras y planos de debilitamiento que permiten la separación del material. Además, durante la extracción de iones, se puede presentar inestabilidad de la estructura de los minerales y provocarse el rompimiento de las unidades (Primavesi, 1980; Bohn *et al.*, 1993; Tisdall, 1994).

Desde el punto de vista mecánico, la presión ejercida durante el crecimiento radical también es capaz de separar partículas o grupos de ellas. Sin embargo, éste es un fenómeno que se lleva a cabo principalmente en fragmentos y agregados de un tamaño tal, que permita la existencia de poros o fisuras en las que las raíces pueden penetrar poco a poco. Con base en lo anterior y dado que las diferencias entre los Ts/p y los tratamientos con especies vegetales no fueron altamente significativas, puede considerarse que la desintegración del tepetate, en este nivel de fracturación, estuvo más influenciada por los ciclos de humedecimiento y secado que por el efecto mecánico del sistema radical.

En la reorganización del material también pudieron intervenir factores abióticos tales como la compactación y cementación inorgánica, presentes en los Ts/p. Sin embargo, al ser mayor la agregación en los tratamientos con especies vegetales, resulta evidente que hubo una influencia significativa de todos

aquellos factores relacionados con su introducción. Entre éstos destacan: el empaquetamiento y compactación de grupos de partículas y/o agregados por enrollamiento radical y la agregación orgánica a través de los compuestos producidos como parte de su metabolismo.

El efecto de empaquetamiento radical fue muy notorio con todas las especies (Figura 30) y se presentó como consecuencia del crecimiento y expansión normales de la raíz. Sin embargo, pudo verse incrementado por la disponibilidad de espacio, el cual resultó insuficiente para algunas especies después de doce meses de establecidas. Al retirar la raíz del sustrato, gran parte del material se dispersaba nuevamente quedando agregados de diferentes diámetros entre los que predominaban los mayores de 20 mm, muchos de los cuales, se encontraban unidos por pequeños fragmentos de raíz o restos de follaje sin alterar (Figura 31), mismos que fueron retirados del material antes del análisis de agregación.

Los compuestos mucilaginosos, en su mayoría polisacáridos complejos, influyen de diferente manera en la agregación. Pueden actuar como cementantes uniendo a las partículas y fragmentos entre sí y ocupando los espacios entre ellas, recubren a los agregados ya formados disminuyendo su disgregación e incrementando su estabilidad y sirven de enlace con la fracción mineral a través de sus numerosos grupos activos que permiten la formación de complejos organo-minerales muy estables (Stevenson, 1982; Dinell *et al.*, 1991; Bathke *et al.*, 1992; Dorioz *et al.*, 1993; Hayes y Tapp, 1994; Tisdall, 1994).

Estas uniones no se presentan únicamente a través de los mucilagos producidos, sino también con muchos de los compuestos resultado de la descomposición del follaje, o bien, de aquellos sintetizados a partir de estos últimos, como en el caso del humus, que es considerado un agente de unión permanente y cuya capacidad de agregación es muy alta dadas sus características coloidales (Hayes y Tapp, 1994).

Tisdall y Oades (1982) y Hayes y Tapp (1995) reportan que las raíces constituyen agentes de unión temporales que actúan principalmente a nivel de macroagregados. Destacan que muchos restos vegetales se incrustan en la fracción mineral y forman grandes microagregados, pero al ser destruidas esas uniones, la estabilidad del agregado disminuye notablemente, sobre todo cuando los agentes de enlace transitorios y permanentes son también escasos.



Figura No. 30. Efecto de "empaquetamiento" radical en el nivel de fracturación fino del tepetate.

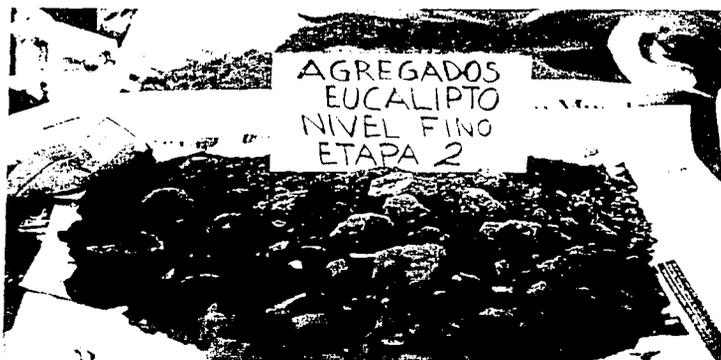


Figura No. 31. Agregados formados por efecto de las especies vegetales.

Este pudo ser el caso de muchos de los grandes agregados formados durante la primera etapa de observación, en la cual, por ser tan reducido el tiempo de permanencia de las especies en el sustrato, la presencia de agentes transitorios y permanentes era escasa. Sin embargo, después de 18 meses es muy probable que la cantidad de agentes transitorios y permanentes se haya incrementado, de tal manera que muchos de los agregados pudieron estar ya unidos por estos compuestos, lo que aumentó significativamente su resistencia.

La segunda etapa no presentó un comportamiento uniforme, sino que difiere de la tendencia general en muchos de los intervalos de agregación. Este comportamiento inesperado pudo ser debido a que probablemente se trata de un período de transición durante el cual, la intensidad de los fenómenos de fragmentación y agregación es muy variable.

Como se observó, se trata de una etapa en la que la formación de microagregados (base de la macroagregación), el pH, el aporte de materia orgánica y posiblemente su transformación aun varían mucho, hecho que debe repercutir en el proceso general de reorganización del material. La posterior estabilización de los fenómenos, durante la tercera etapa, puede apoyar lo dicho, sin embargo, es necesario llevar a cabo estudios detallados y específicos para su comprobación.

#### B. Nivel de Fracturación Grueso.

En la Tabla 12, se observan los porcentajes de agregados en seco (AS) en el nivel de fracturación grueso del tepetate. La Figura 32, en la que se comparan los resultados obtenidos en los tratamientos sin influencia de especies vegetales (Ts/p) con el TAb, muestra que hubo disminución de fragmentos de 7 a 20 mm e incremento del porcentaje de AES menores de 7 mm. Este comportamiento fue común a todos los tratamientos y se traduce, en una desintegración de los de mayor diámetro y reorganización del material resultante en agregados de diferentes tamaños. En el caso de los Ts/p, ya que no hubo influencia de factores bióticos, tanto la desintegración como la agregación, pueden atribuirse, principalmente, a procesos fisicoquímicos.

Tabla No.12. Porcentaje de agregados en seco (AS) en el nivel de fracturación grueso del tepetate después de seis, doce y dieciocho meses de observación. Comparación de medias (Tukey)<sup>1</sup>.

TRAT. <sup>2</sup>	>20mm			20.0-15.0			15.0-10.0			10.0-7.0			7.0-5.0		
	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3
Tab	9.33ab	9.33ab	9.33ab	10.13b	10.13c	10.13a	13.23a	13.23b	13.23a	42.90a	42.90a	42.90a	2.83b	2.83a	2.83a
Ts/p	1.70b	2.37b	3.07b	6.83cd	10.43c	6.77c	11.00b	11.47b	6.50c	36.30b	25.37bc	29.00c	5.07ab	3.70a	4.13a
TCa	7.10ab	8.30ab	2.30b	7.10c	23.30a	12.10a	7.70c	11.60b	5.80c	26.70d	27.20b	38.50b	5.00ab	2.90a	3.70a
TEu	5.00b	0.00b	11.70ab	11.00b	10.50c	9.40b	4.60d	12.20b	7.10c	31.20c	28.70b	32.10c	5.90a	3.20a	3.10a
TPI	7.90ab	9.00ab	3.90b	17.20a	19.00b	10.60a	14.40a	20.90a	10.00b	33.30b	22.10c	30.10c	3.30b	1.60b	3.60a
Ca	13.77a	11.87a	8.40ab	3.73d	4.83e	3.80c	4.37d	8.23c	5.80c	15.13f	21.70c	17.27e	2.67b	3.67a	2.40a
Eu	10.47ab	6.27ab	4.40b	5.07cd	5.73de	5.57c	6.73cd	5.97d	6.70c	15.40f	12.97e	18.40de	2.07b	3.20a	3.77a
Pi	10.30ab	6.77ab	8.67ab	6.17cd	4.23e	2.80c	5.00cd	4.33d	6.77c	16.53f	17.03d	19.80de	2.20b	3.73a	4.07a
Pr	7.07ab	1.80b	2.43b	6.07cd	5.70de	3.53c	2.97d	5.33d	5.43c	23.67de	17.37d	21.60d	4.70ab	2.47a	3.20a
Sr	6.93ab	0.17b	0.47b	3.27d	3.90e	5.90c	4.07d	5.77d	10.70b	22.57e	11.93e	28.67c	4.70ab	3.13a	3.80a
Ve	0.93b	5.23ab	15.27a	4.60d	7.40d	3.13c	3.23d	7.40cd	5.23c	21.73e	20.60cd	19.57de	3.80b	3.13a	3.70a

ETAPA 1	5.0-3.0		3.0-2.0		2.0-1.0		1.0-0.5		0.5-0.25		<0.25mm			
	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3
10.47de	10.47c	10.47d	11.10c	11.10c	11.10c	0.00d	0.00e	0.00d	0.00b	0.00c	0.00b	0.00c	0.00b	0.00c
15.10c	17.73a	20.20a	17.30b	21.63ab	18.47b	3.47c	4.00d	5.53c	1.63b	2.03bc	3.57bc	0.40b	0.47b	1.03bc
21.60a	7.90c	17.10b	19.60b	9.20c	15.50bc	4.20c	4.20d	2.90cd	0.50b	3.00bc	1.10bc	0.10b	0.80b	0.30bc
13.89cd	13.00b	12.20cd	15.50bc	10.90c	10.20c	6.20bc	6.20cd	4.80c	3.20b	5.60b	3.60bc	1.20b	3.10ab	1.70bc
8.80e	10.30c	13.50c	9.80c	8.70c	13.20c	3.10cd	3.20de	5.80bc	1.00b	1.80bc	4.20bc	0.30b	0.90b	1.80b
13.67cd	12.73b	11.80cd	18.70b	16.63b	18.77b	11.97a	8.20c	11.77ab	9.33a	3.90bc	10.27a	2.70ab	2.67ab	4.07a
12.90cd	11.60b	15.40bc	19.40b	19.17b	15.83bc	11.50ab	13.33b	13.20a	8.70a	12.37a	9.67a	2.60ab	3.97a	3.00ab
12.43d	13.30b	13.97c	17.27b	19.57ab	19.03b	11.83ab	15.13b	10.37ab	9.87a	9.30ab	7.73ab	2.97a	2.67ab	2.67ab
17.07b	11.83b	16.00bc	23.03ab	19.43ab	23.57a	7.63b	14.23b	10.00ab	4.17b	11.47a	6.87ab	1.27ab	4.20a	2.70ab
18.30b	15.40a	15.17bc	25.17a	23.80a	19.83ab	8.50b	18.83a	7.17bc	3.67b	11.03a	4.50b	0.97b	2.63ab	1.43bc
16.70bc	16.33a	13.00cd	24.47a	21.33ab	16.83bc	11.53ab	8.63c	9.10b	7.23ab	5.77b	7.77ab	2.07ab	1.50b	2.77ab

<sup>1</sup> Las letras ubicadas después de los valores, corresponden a la significancia estadística por columna.

<sup>2</sup> Tab: Testigo absoluto      TCa, TEu, TPI: Testigos sin solución      Eu: Eucalipto      Pr: Pasto Rhodes      Ve: Veza  
 Ts/p: Testigo sin planta      Ca: Casuarina      Pi: Pirul      Sr: Sorgo

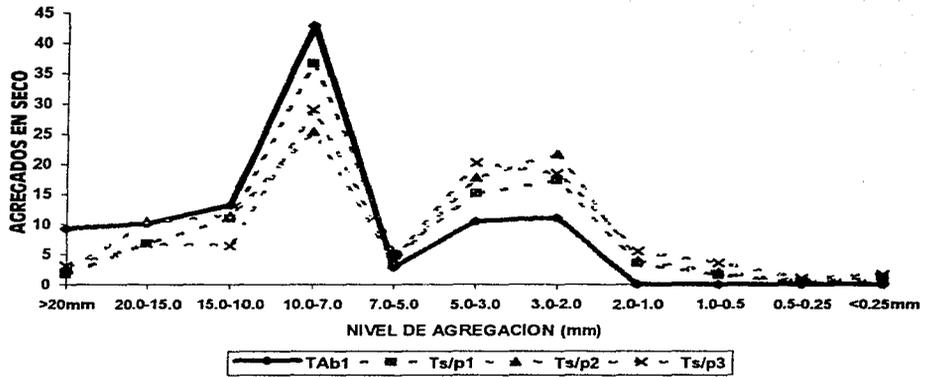


Figura No. 32. Porcentaje de agregados en seco (AS) con los tratamientos testigo en el nivel de fracturación grueso del tepetate.

Dado que este nivel de fracturación originalmente no contenía fragmentos menores de 2 mm, la presencia de agregados de dicho diámetro puede atribuirse a la desintegración e intemperismo de los fragmentos mayores. En el nivel de 2 a 5 mm no se presentó alteración significativa del material, sino que la tendencia fue hacia la formación de agregados de dicho diámetro, es decir, que gran parte del material resultado de la alteración de los fragmentos mayores de 7 mm quedó comprendido en este intervalo.

Este comportamiento denota que se trata de un nivel de agregación poco alterable y por lo tanto estable, lo cual es importante ya que dicho nivel queda comprendido en el reportado por Lal y Greenland (1979), Primavesi (1980), Dexter (citado por Zebrowski, 1991) y Martínez y col. (1991), como óptimo para el control de la erosión y adecuado establecimiento vegetal.

La tendencia general descrita, fue la misma con todos los tratamientos. Sin embargo, en aquellos con influencia de especies vegetales, los porcentajes de desintegración y la reorganización del material fueron estadísticamente mayores, lo que demuestra la destacada influencia de las plantas.

Los procesos involucrados en la reorganización de los fragmentos de tepetate, son los mismos descritos para el nivel fino: desintegración y agregación. La desintegración, al igual que en dicho nivel, pudo deberse a que, aunado al intemperismo fisicoquímico del tepetate hubo un efecto de rompimiento y fragmentación resultado de la fuerza de penetración radical y de los planos de debilitamiento creados durante la absorción de nutrimentos (Utomo y Dexter, 1982; Easterwood *et al.*, 1991).

En la agregación, por otra parte, no sólo influyeron procesos fisicoquímicos sino también el efecto de empaquetamiento por el sistema radical de las especies y el aporte de materia orgánica, cuyo porcentaje con respecto al TAB, se incrementó significativamente con los tratamientos (Dorioz *et al.*, 1993; Hayes y Tapp, 1994; Tisdall, 1994).

En los porcentajes de agregados en seco menores de 0.5 mm, no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos con especies vegetales y los Ts/p, lo que implica, que la influencia de las plantas fue mayor que la de los factores fisicoquímicos en la formación de microagregados; resultados que coinciden con lo descrito por algunos autores, quienes mencionan que en la microagregación

predomina la agregación inorgánica sobre la orgánica (Gupta y Germida, 1988; Singer *et al.*, 1992, Dorioz *et al.*, 1993; Rasiah y Kay, 1994).

En las Figuras 33, 34 y 35, se muestra el efecto de las especies arbóreas sobre el porcentaje de agregados en seco. En general, entre especies no se presentaron diferencias estadísticamente significativas, únicamente en el intervalo de agregados de 0.5 a 1 y mayores de 20 mm, la casuarina y el pirúl favorecieron porcentajes mayores, lo cual coincide con la cantidad de materia orgánica aportada por cada especie.

En el nivel de 2 a 5 mm, las diferencias entre los tratamientos con arbóreas y los Ts/p no fueron significativas en todos los casos, lo que implica que en la formación de unidades en este nivel, intervienen casi con la misma intensidad tanto los factores fisicoquímicos como los biológicos. La desintegración estuvo más influenciada por los fenómenos fisico-químicos presentes en los Ts/p, que por las especies vegetales. A diferencia del caso anterior, en los agregados de 0.25 a 2 mm los porcentajes obtenidos fueron mayores en los tratamientos con influencia de las especies, lo que indica el predominio de procesos de agregación orgánica.

Con la casuarina hubo formación de agregados mayores de 20 mm y su porcentaje fue mayor que el de los fragmentos de dicho diámetro del TAb. Esto implica que la reorganización del material por efecto de las plantas dio lugar a la formación de macroagregados y que no sólo hubo desintegración de los fragmentos de mayor tamaño, sino que también fueron agregados y formaron unidades estables en seco.

Las Figuras 36, 37 y 38, muestran que al igual que en el nivel de fracturación fino, cuando se adiciona solución nutritiva, el efecto de las especies sobre el tepetate se incrementa significativamente, sobre todo en los niveles de 0.25 a 3 y de 7 a 15 mm. Sin embargo, a diferencia de lo ocurrido en dicho nivel, en el grueso hubo formación de agregados de 15 a 20 mm con casuarina y pirúl después de doce meses sin adición de solución, aún cuando los porcentajes de materia orgánica fueron menores a los obtenidos en los tratamientos en los que sí se aplicó. No obstante, en la tercera etapa, el comportamiento se ajusta a lo esperado, presentándose una desintegración menor que la observada en los tratamientos con solución.

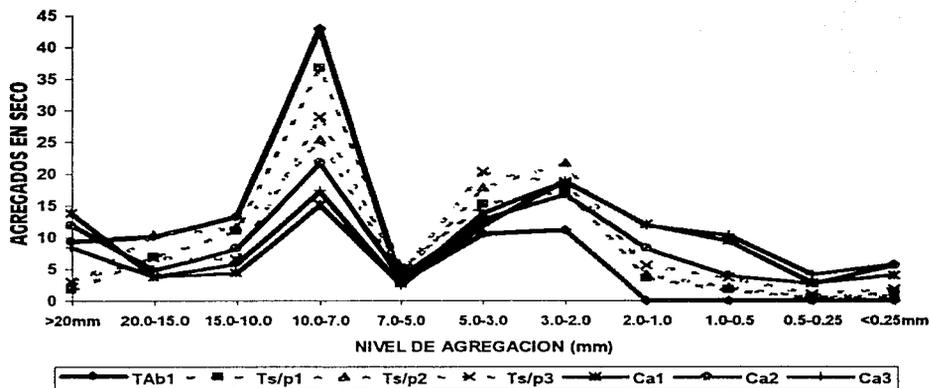


Figura No. 33. Efecto de la casuarina sobre el porcentaje de agregados (AS) en el nivel de fracturación grueso del tepetate.

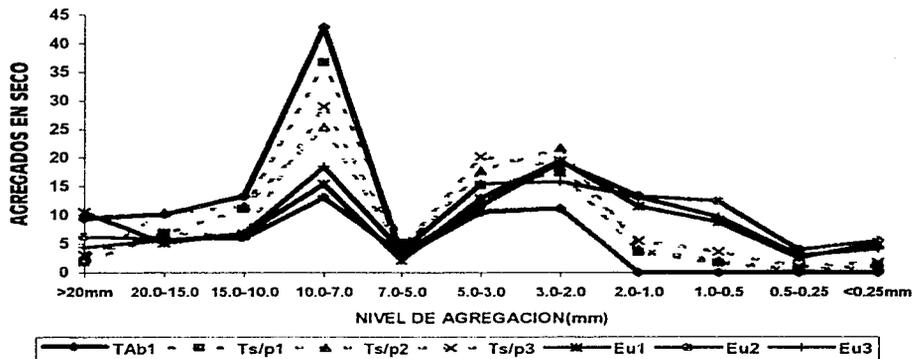


Figura No. 34. Efecto del eucalypto sobre el porcentaje de agregados (AS) en el nivel de fracturación grueso del tepetate.

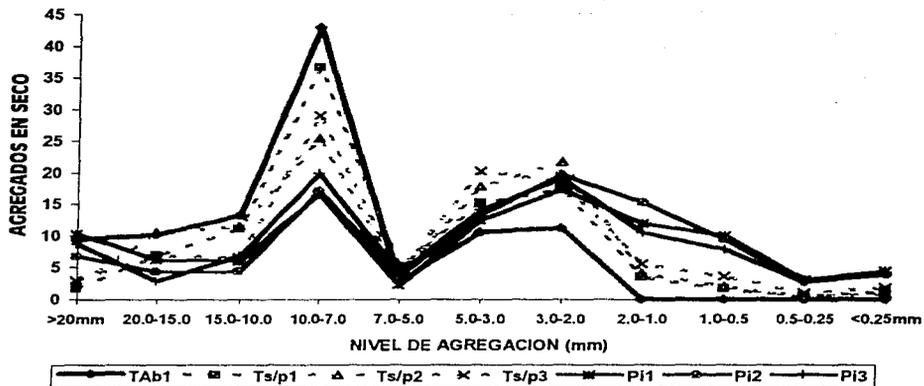


Figura No. 35. Efecto del pirul sobre el porcentaje de agregados (AS) en el nivel de fracturación grueso del tepetate.

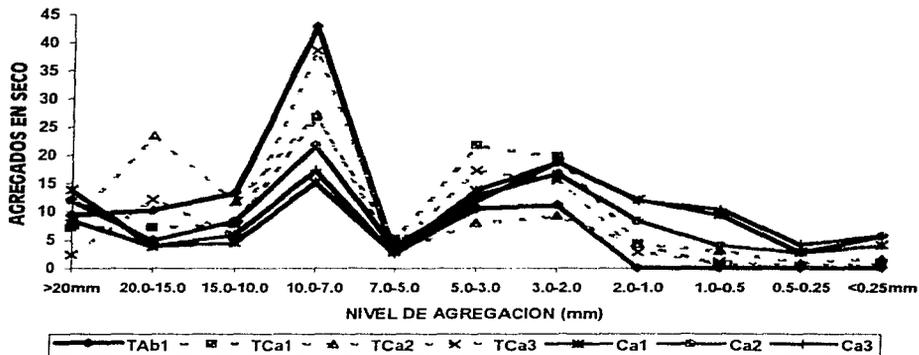


Figura No. 36. Efecto de la casahuate con y sin solución nutritiva sobre el porcentaje de agregados (AS) en el nivel de fracturación grueso del tepetate.

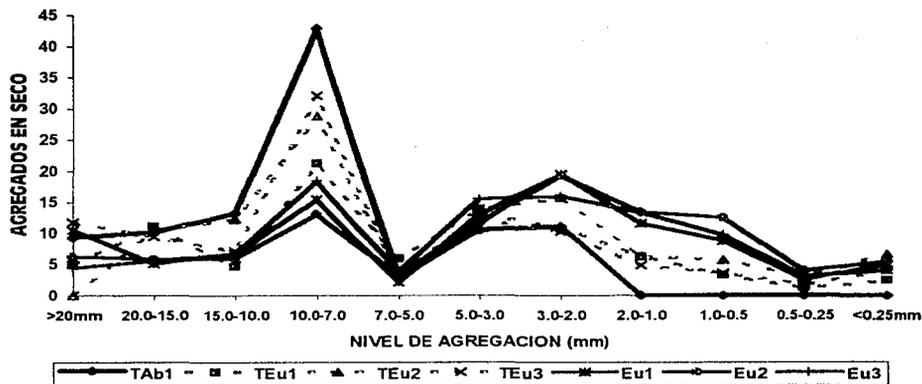


Figura No. 37. Efecto del eucalipto con y sin solución nutritiva sobre el porcentaje de agregados (AS) en el nivel de fracturación grueso del tepetate.

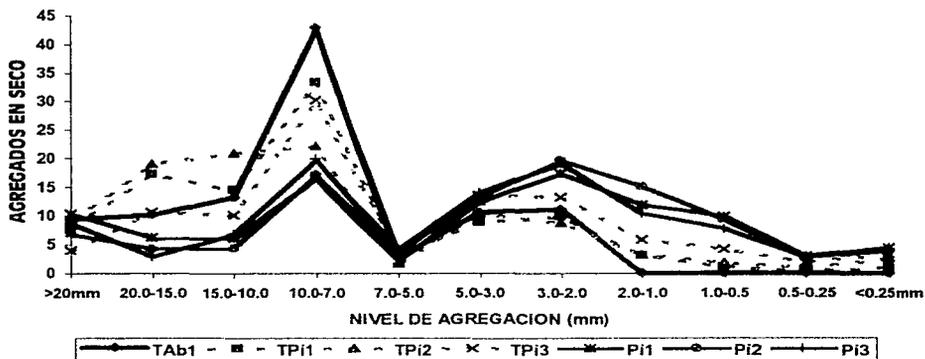


Figura No. 38. Efecto del pirul con y sin solución nutritiva sobre el porcentaje de agregados (AS) en el nivel de fracturación grueso del tepetate.

El comportamiento descrito pudo deberse a que, durante las etapas iniciales, las plantas agregaron por presión los fragmentos de mayor tamaño formando así agregados de más de 15 mm de diámetro, pero dado que no hubo un aporte considerable de materia orgánica, la estabilidad de dichas unidades fue baja y al transcurrir el tiempo, los fragmentos se separaron y alteraron al igual que el resto del material, motivo por el cual, en la tercera etapa hubo desintegración y disgregación (Gupta y Germida, 1988; Rasiah y Kay, 1994; Tisdall, 1994).

Por lo que respecta a las herbáceas, Figuras 39, 40 y 41, únicamente con veza hubo formación de agregados mayores de 20 mm. En los niveles de agregación restantes, el comportamiento fue similar al ya descrito y no se presentaron diferencias significativas entre especies. Esto coincide con el hecho de que tampoco hubo un aporte diferencial de materia orgánica por las tres especies y explica que los porcentajes de agregados en seco hayan sido estadísticamente equivalentes, ya que es la materia orgánica la que, principalmente, favorece los procesos de agregación. Claro está que de ninguna manera es posible descartar el efecto mecánico del sistema radical, el cual, en el caso de las herbáceas por ser morfológicamente del mismo tipo, permite suponer que influyó con la misma intensidad en los tres casos.

El efecto de los tratamientos en función del tiempo de observación, fue común a los dos niveles de fracturación del tepetate: la mayor alteración y los porcentajes más altos de agregación se observaron en la tercera etapa y, en la mayoría de los casos, no se presentaron diferencias significativas entre etapas consecutivas, pero al comparar los resultados de la primera con los de la tercera, las diferencias fueron altamente significativas. La segunda etapa puede seguir considerándose como de transición, de acuerdo con lo mencionado para el nivel de fracturación fino.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por otros autores y resultan lógicos, ya que al aumentar el tiempo de permanencia de las especies vegetales en el sustrato, se incrementa su efecto sobre el mismo: hay mayor acumulación de materia orgánica, desarrollo radical, depositación e integración de raicillas y follaje, alteración mineral, acumulación de cementantes orgánicos y variaciones en la frecuencia de los ciclos de humedecimiento-secado (Dinel *et al.*, 1991; Ellsworth *et al.*, 1991; Rasiah y Kay, 1994; Tisdall, 1994).

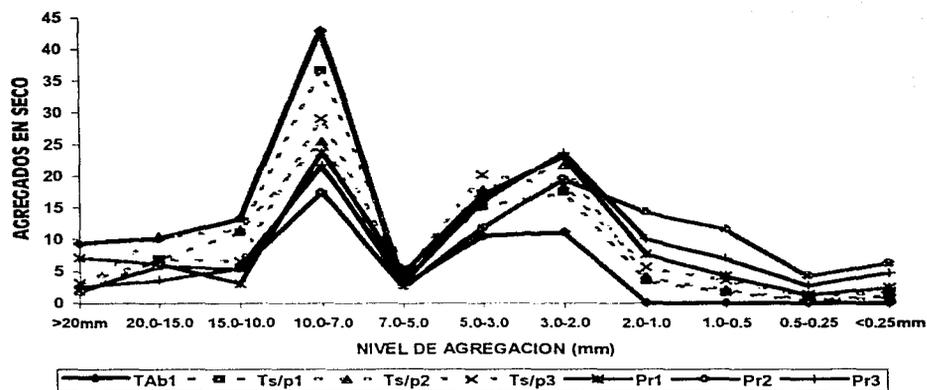


Figura No. 39. Efecto del pasto Rhodes sobre el porcentaje de agregados (AS) en el nivel de fracturación grueso del tepetate.

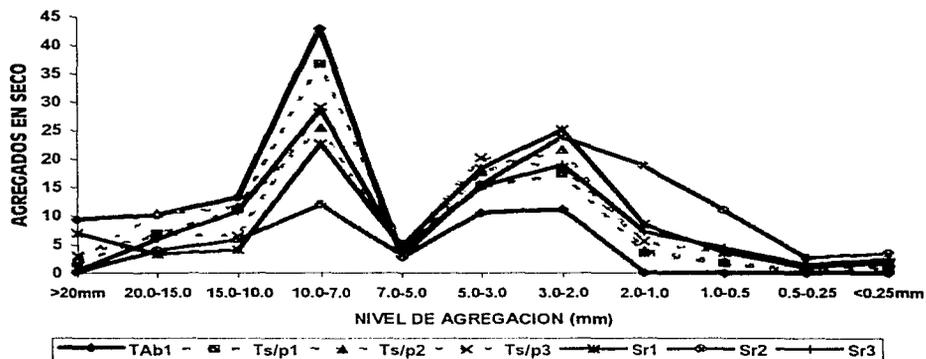


Figura No. 40. Efecto del sorgo sobre el porcentaje de agregados (AS) en el nivel de fracturación grueso del tepetate.

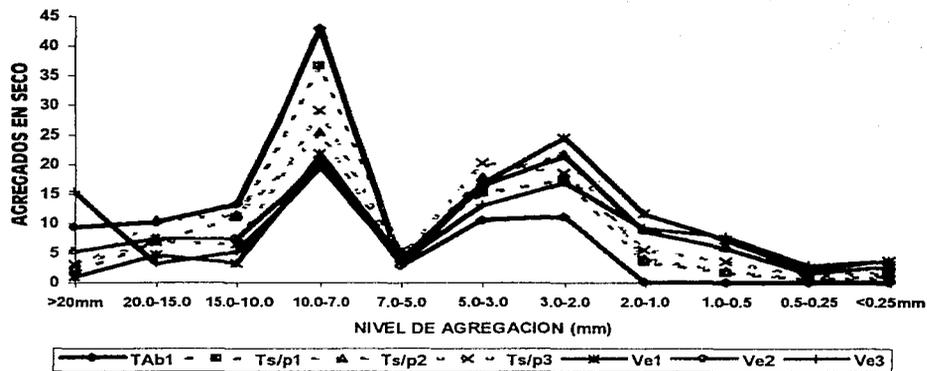


Figura No. 41. Efecto de la veza sobre el porcentaje de agregados (AS) en el nivel de fracturación grueso del tepetate.

## E. Estabilidad de Agregados en Húmedo.

### Nivel de Fracturación Fino.

La Tabla 13, muestra los resultados del análisis de estabilidad de agregados en húmedo (AEH), en el nivel de fracturación fino del tepetate. Al comparar los porcentajes de fragmentos del TAb con los Ts/p de las tres etapas de observación, Figura 42, se observa una disminución significativa de los fragmentos menores de 0.25 mm con respecto al TAb e incremento en el nivel de 0.25 a 2 mm.

Este comportamiento, coincide con lo observado en el análisis de agregación en seco y refleja, por lo tanto, la presencia de fenómenos de agregación por efectos fisicoquímicos. Además, indica que los agregados formados son estables no sólo en seco, sino también en húmedo, lo cual es esencial para la formación y mantenimiento del espacio poroso y la estructura.

Por otro lado, y desde el punto de vista únicamente de estabilidad en húmedo, la gráfica correspondiente indica que en el nivel de agregación menor de 0.25 mm, el mayor porcentaje de AEH corresponde al TAb, lo cual se debe a que éste estaba constituido por fragmentos y no por agregados. De tal manera, que al entrar en contacto con el agua, los fragmentos resisten más que los agregados recién formados en los que las uniones son menos estables que cuando el material está soldado desde el momento de su depósito.

La influencia de las especies vegetales sobre la estabilidad en húmedo del tepetate, con respecto al TAb y a los Ts/p (Figuras 43 a 48), mostró un mismo comportamiento general: disminución del porcentaje de AEH menores de 0.25 mm e incremento de los mayores de 0.25 mm. Comportamiento que en todos los casos coincide con los resultados del análisis de estabilidad en seco y confirma la presencia de procesos de agregación y reorganización del material. Sin embargo, a diferencia del análisis en seco, los Ts/p presentaron porcentajes mayores de AEH que los tratamientos bajo la influencia de las especies vegetales.



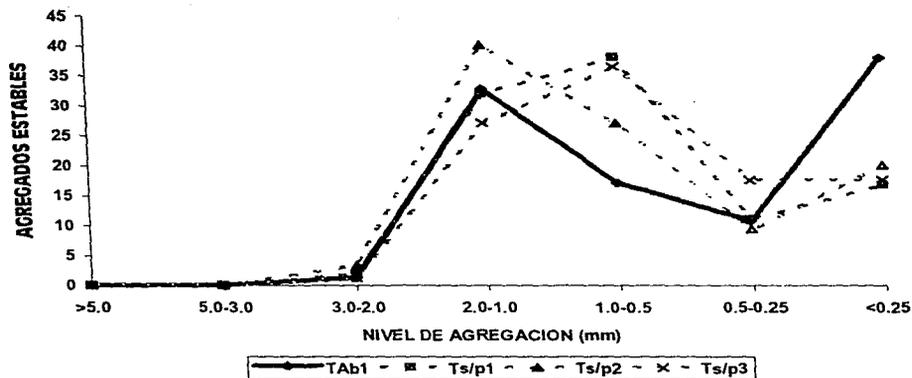


Figura No. 42. Porcentaje de agregados estables en húmedo (AEH) con los tratamientos testigo en el nivel de fracturación fino del tepetate.

NOTA: En todas las gráficas de estabilidad de agregados en húmedo, los números que se encuentran después de la clave de los tratamientos corresponden a la etapa de observación (1: seis meses, 2: doce meses y 3: dieciocho meses).

Las claves de los tratamientos son:

TAB: Testigo absoluto	Pr: Pasto Rhodes
Ts/p: Testigo sin planta	Sr: Sorgo
Ca: Casuarina	Ve: Veza
Eu: Eucalipto	
Pi: Pirúl	
TCa, TEu, TPI: Testigos sin solución	

Lo anterior se debió a que en los Ts/p los procesos de fragmentación y agregación fueron resultado, principalmente, de factores fisicoquímicos. Comparativamente, la cantidad de fragmentos en los tratamientos con especies vegetales es mucho menor, ya que la velocidad de los procesos se acentúa por la introducción del factor biológico y existe, por lo tanto, una mayor cantidad de agregados.

Los agregados, debido al tipo de uniones que presentan, son menos resistentes que los fragmentos, todo lo cual se manifiesta como una disminución en la estabilidad por efecto de los tratamientos. El cambio o reorganización del material se manifiesta claramente en los resultados del análisis de agregación en seco, en los que como se observó, los tratamientos con especies vegetales presentaron un porcentaje mayor de agregados que los tratamientos testigo.

Las especies arbóreas, Figuras 43, 44 y 45, mostraron una misma tendencia general sobre los porcentajes de agregados estables en húmedo y no se presentaron diferencias significativas entre especies ni entre etapas. En algunos casos, como en el nivel de 0.5 a 1 mm, el mayor porcentaje se presentó a los 18 meses, lo que constituye un indicio de que la estabilidad puede incrementarse a largo plazo. En el nivel de agregados mayores de 2 mm, todos los tratamientos tuvieron porcentajes más altos que el TAb, pero estadísticamente equivalentes entre sí. Comportamiento que denota la presencia de procesos de agregación que se llevaron a cabo en el tepetate tanto por efectos fisicoquímicos como biológicos. Principalmente los últimos, ya que los porcentajes más altos se obtuvieron en los tratamientos con plantas.

Con respecto a la influencia de la solución nutritiva, Figuras 46, 47 y 48, se observa que cuando no se adicionó, los porcentajes de agregados estables en húmedo fueron mayores, aún cuando sólo en algunos niveles de agregación las diferencias fueron estadísticamente significativas. Este comportamiento se presentó durante los primeros 12 meses, sin embargo, en la tercera etapa el porcentaje fue mayor en los tratamientos con solución.

Dicho comportamiento puede atribuirse al ya mencionado efecto de la solución nutritiva sobre el desarrollo, de tal manera que al ser mayor, hay más producción de materia orgánica y en consecuencia un incremento en la estabilidad de los agregados formados.

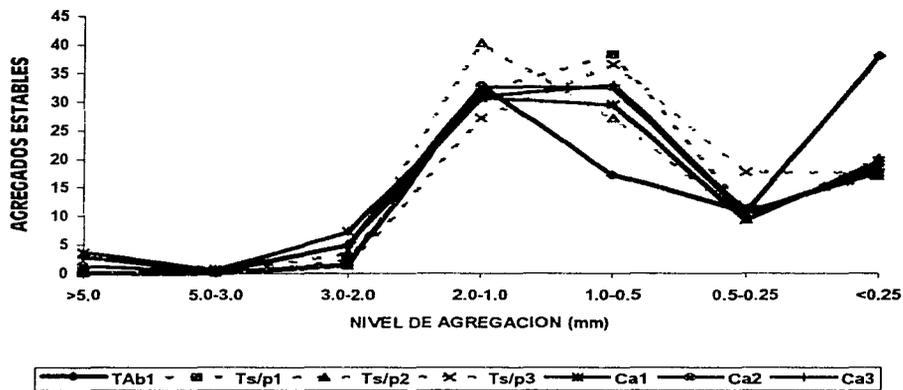


Figura No. 43. Efecto de la casuarina sobre el porcentaje de agregados estables en húmedo (AEH) en el nivel de fracturación fino del tepalcate.

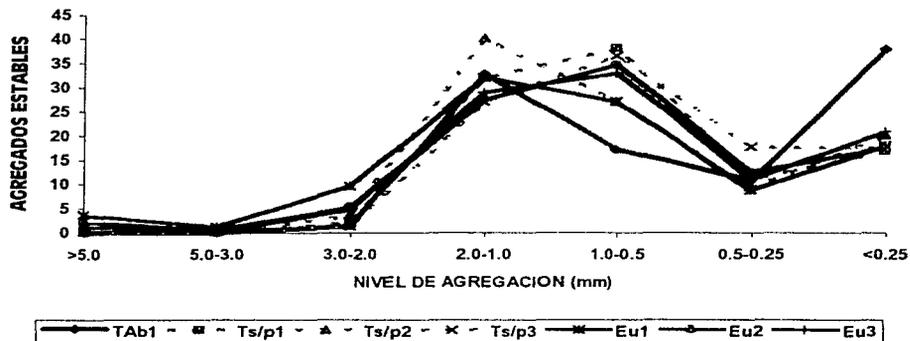


Figura No. 44. Efecto del eucalipto sobre el porcentaje de agregados estables en húmedo (AEH) en el nivel de fracturación fino del tepalcate.

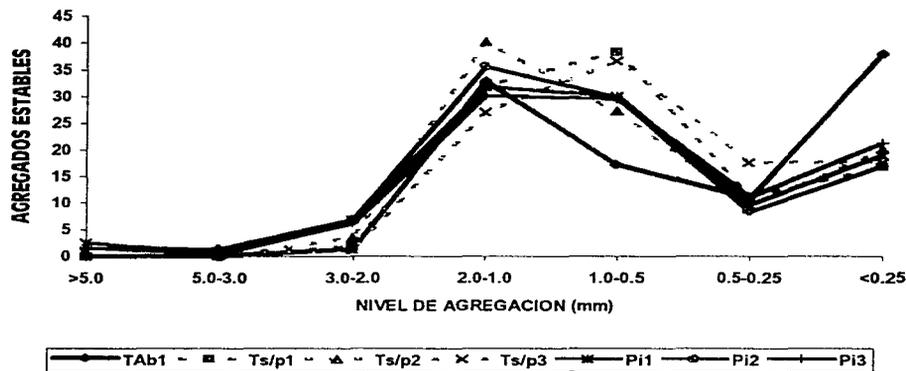


Figura No. 45. Efecto del pirúl sobre el porcentaje de agregados estables en húmedo (AEH) en el nivel de fracturación fino del tepetate.

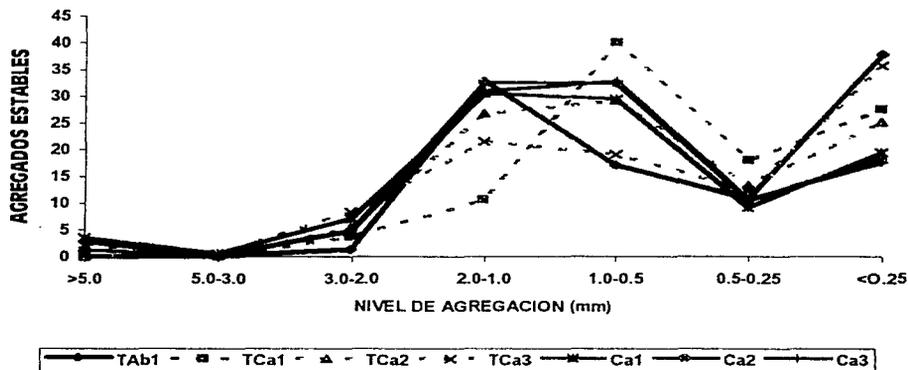


Figura No. 46. Efecto de la casuarina con y sin solución nutritiva sobre el porcentaje de agregados estables en húmedo (AEH) en el nivel de fracturación fino del tepetate.

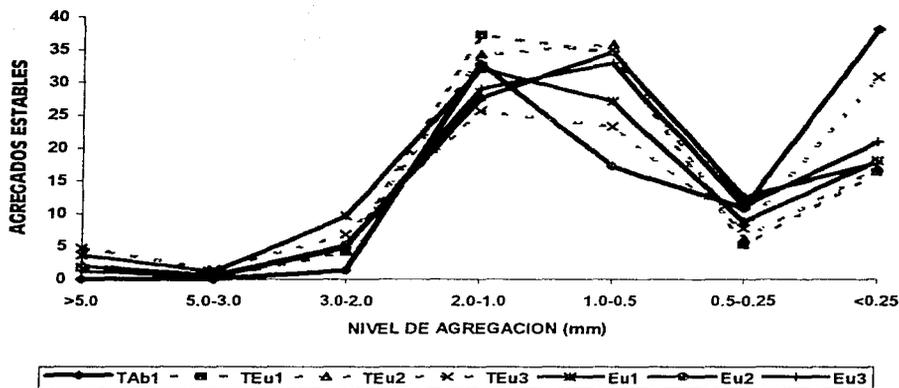


Figura No. 47. Efecto del eucalipto con y sin solución nutritiva sobre el porcentaje de agregados estables en húmedo (AEH) en el nivel de fracturación fino del tepetate.

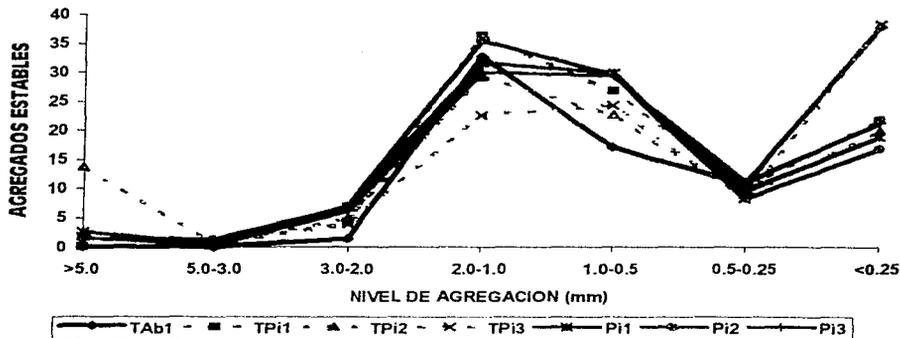


Figura No. 48. Efecto del pirul con y sin solución nutritiva sobre el porcentaje de agregados estables en húmedo (AEH) en el nivel de fracturación fino del tepetate.

Las especies herbáceas, Figuras 49, 50 y 51, presentaron el mismo comportamiento general descrito para las arbóreas. La disminución en el porcentaje de agregados estables en húmedo de 0.25 mm con respecto al TAb fue estadísticamente equivalente entre tratamientos y los porcentajes más altos se presentaron a los 12 meses. Sólo en el caso del sorgo el mayor porcentaje se presentó en la tercera etapa.

Los Ts/p tuvieron porcentajes mayores que los tratamientos con especies vegetales durante la primera etapa, pero a los 12 y 18 meses, los resultados se invirtieron, hecho que denota el incremento de la estabilidad con respecto al tiempo y al desarrollo de las plantas, tal como señalan los resultados del análisis de varianza ( ver Apéndice, Tabla 17).

En el nivel de 0.25 a 2.0 mm, hubo un aumento en el porcentaje de AEH con las tres especies, pero los Ts/p tuvieron porcentajes más altos. En el nivel de 1 a 2 mm, aunque hubo variaciones, no se presentaron cambios significativos en los porcentajes con respecto al TAb, a excepción del pasto Rhodes, con el que se obtuvieron los porcentajes más altos durante la primera etapa y los más bajos en la tercera. Los porcentajes más altos en el nivel de agregados mayores de 2 mm, se obtuvieron con el pasto Rhodes durante la segunda etapa y con sorgo en la tercera. Cabe destacar, que con ninguna de las especies hubo cambio en el porcentaje de fragmentos de 3.0 a 5.0 mm, lo que denota su estabilidad.

Con la veza no se presentaron diferencias entre etapas y no se favoreció la formación de agregados estables en húmedo mayores de 2 mm, su efecto sólo se manifestó en el nivel de 2 a 3 mm durante los primeros seis meses. Esta especie fue la que mostró la menor capacidad de adaptación a las condiciones del tepetate, lo que explica su limitada influencia sobre las características del mismo, tal como puede constatare en los resultados de los análisis previamente descritos y en la parte correspondiente a la producción de biomasa.

El pasto Rhodes fue la especie que tuvo mayor efecto sobre la formación de agregados estables en húmedo, hecho que coincide con los resultados del análisis de agregación en seco, de producción de materia orgánica y de granulometría. en los que resultó evidente su mayor influencia sobre las características del tepetate.

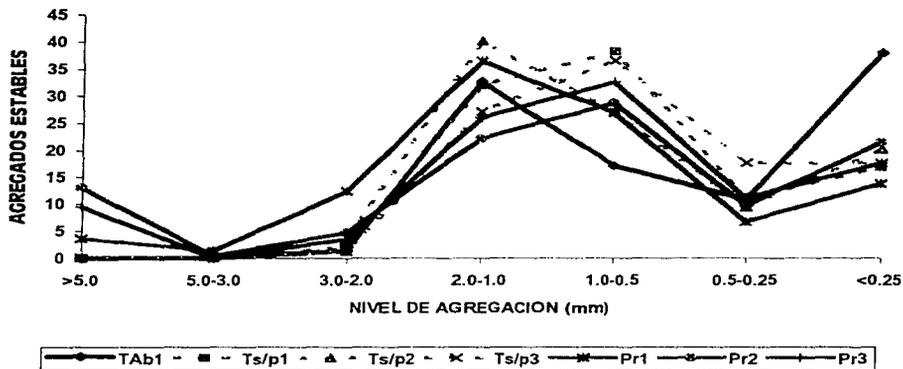


Figura No. 49. Efecto del pasto Rhodes sobre el porcentaje de agregados estables en húmedo (AEH) en el nivel de fracturación fino del tepetate.

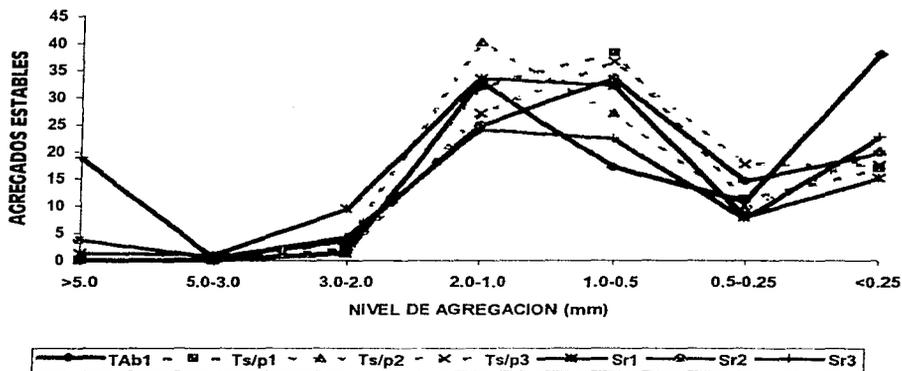


Figura No. 50. Efecto del sorgo sobre el porcentaje de agregados estables en húmedo (AEH) en el nivel de fracturación fino del tepetate.

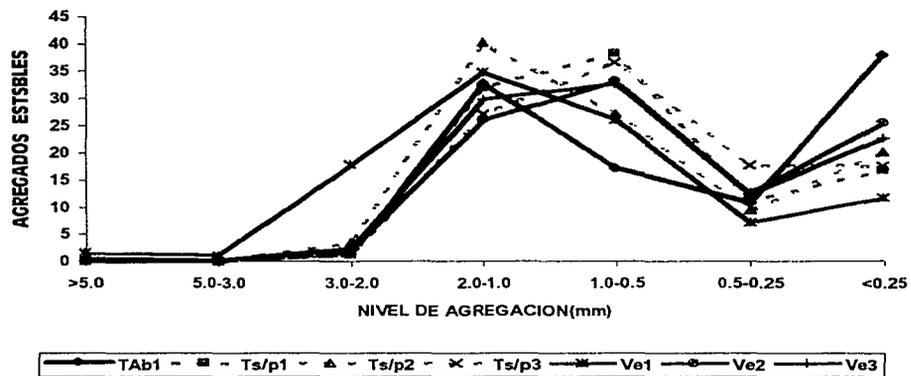


Figura No. 51. Efecto de la veza sobre el porcentaje de agregados estables en húmedo (AEH) en el nivel de fracturación fino del tepetate.

En general, con todos los tratamientos con especies vegetales, las fracciones de 0.5 a 1 y de 2 a 5 mm fueron las que presentaron mayor estabilidad, resultado que coincide con el obtenido del análisis de agregación en seco. Estos resultados implican que la tendencia durante la reorganización del material fue hacia la formación de agregados, principalmente de 2 a 5 mm de diámetro, cuya estabilidad tanto en seco como en húmedo fue alta por lo que representa un nivel de agregación agronómicamente importante.

#### Nivel de Fracturación Grueso.

El porcentaje de agregados estables en húmedo en el nivel de fracturación grueso del tepetate, se muestran en la Tabla 14. Al comparar los resultados obtenidos en los Ts/p con el TAb, Figura 52, se observa una disminución de los porcentajes en los niveles de agregación mayores de 5 mm e incremento en los niveles inferiores. Esto coincide con los resultados del análisis de agregación en seco y confirma que hubo desintegración de los fragmentos mayores y reorganización del material en agregados menores de 2 mm, mismos que no se encontraban presentes en el tepetate roturado original.

Las especies arbóreas, Figuras 53, 54 y 55, favorecieron un incremento en el porcentaje de agregados estables en húmedo menores de 0.25 mm con respecto al TAb, pero con respecto a los Ts/p las diferencias no fueron significativas. En el nivel de 0.25 a 3.0 mm el porcentaje de agregados estables con las tres especies aumentó, tanto con respecto al TAb como a los del Ts/p, desde la primera etapa. El efecto fue contrario con casuarina durante los primeros 12 meses. Con ninguno de los tratamientos se presentó alteración en los fragmentos de 3.0 a 5.0 mm. En el nivel de agregados mayores de 5 mm hubo disminución de los porcentajes con respecto al TAb; los valores más altos se obtuvieron en los Ts/p y los menores, en la tercera etapa, con casuarina y eucalipto.

Al comparar los tratamientos con adición de solución nutritiva con aquellos en los que no se aplicó, Figuras 56, 57 y 58, se observa que en los niveles de agregación menores de 0.25 y de 0.25 a 3 mm, los tratamientos sin aporte de solución presentaron porcentajes mayores que los Ts/p, pero menores que los tratamientos con solución. Sólo en el caso del pirúl, el tratamiento sin solución tuvo porcentajes mayores desde la segunda etapa. A diferencia de lo anterior, los porcentajes de agregados mayores de 5 mm fueron superiores en los tratamientos sin solución.



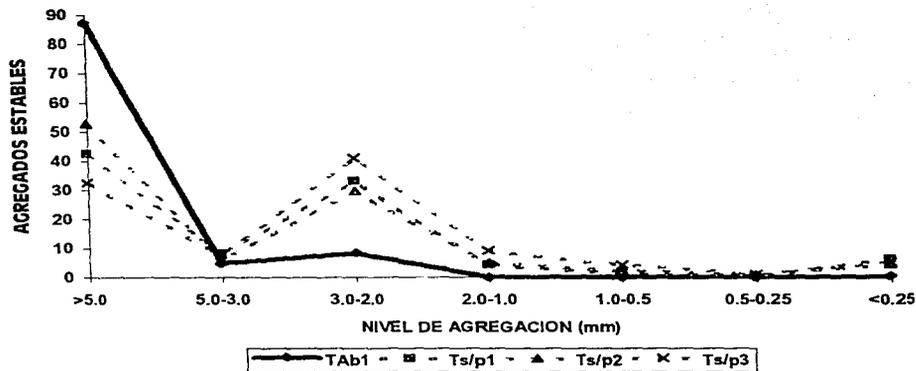


Figura No. 52. Porcentaje de agregados estables en húmedo (AEH) con los tratamientos testigo en el nivel de fracturación grueso del tepetate.

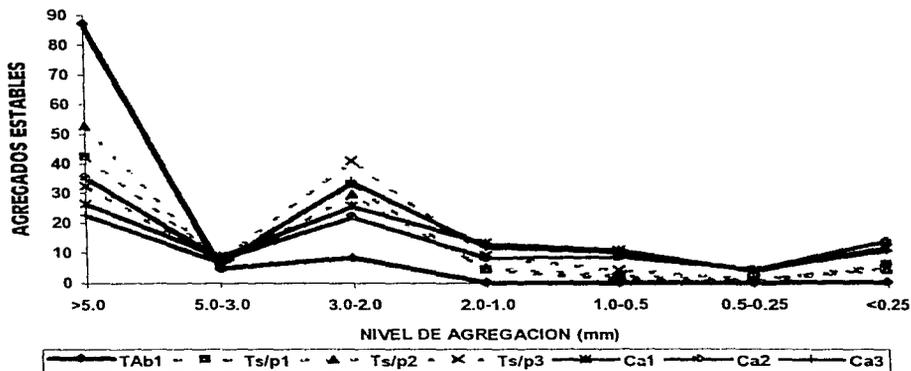


Figura No. 53. Efecto de la casuarina sobre el porcentaje de agregados estables en húmedo (AEH) en el nivel de fracturación grueso del tepetate

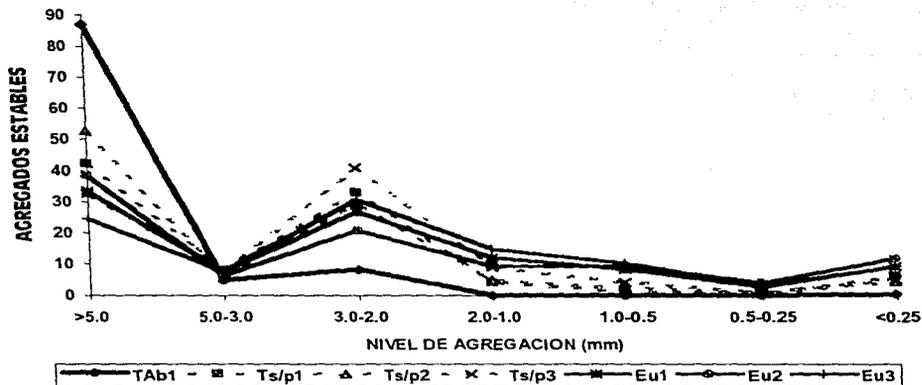


Figura No. 54. Efecto del eucalipto sobre el porcentaje de agregados estables en húmedo (AEH) en el nivel de fracturación grueso del tepetate.

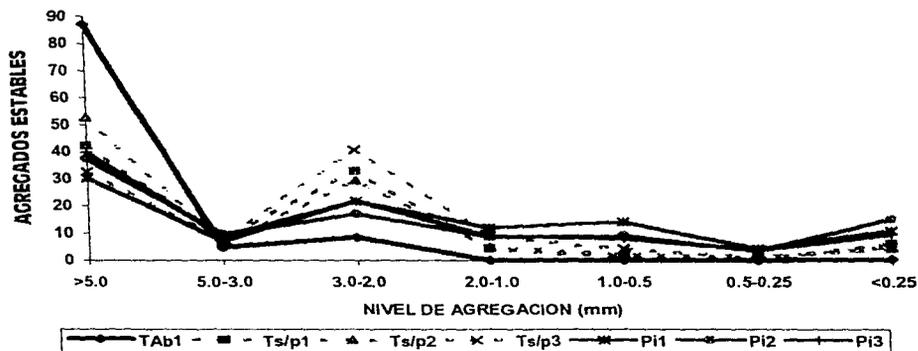


Figura No. 55. Efecto del pirúl sobre el porcentaje de agregados estables en húmedo (AEH) en el nivel de fracturación grueso del tepetate.

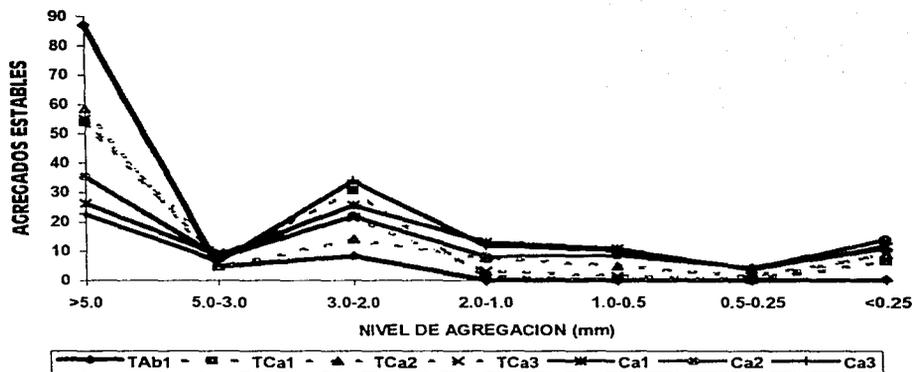


Figura No. 56. Efecto de la casuarina con y sin solución nutritiva sobre el porcentaje de agregados estables en húmedo (AEH) en el nivel de fracturación grueso.

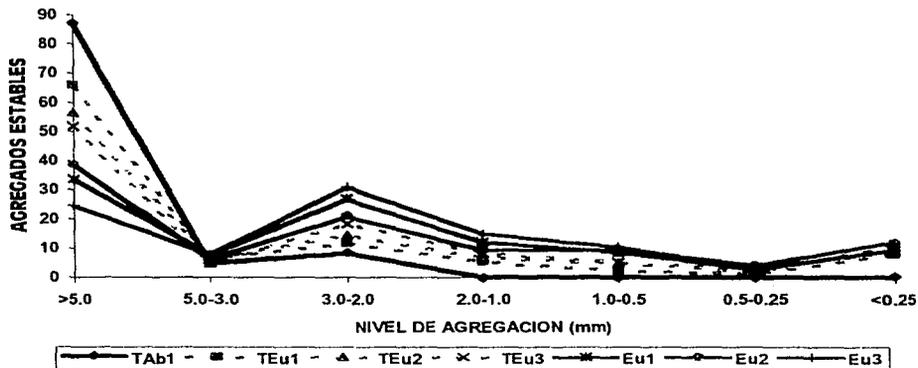


Figura No. 57. Efecto del eucalipto con y sin solución nutritiva sobre el porcentaje de agregados estables en húmedo (AEH) en el nivel de fracturación grueso.

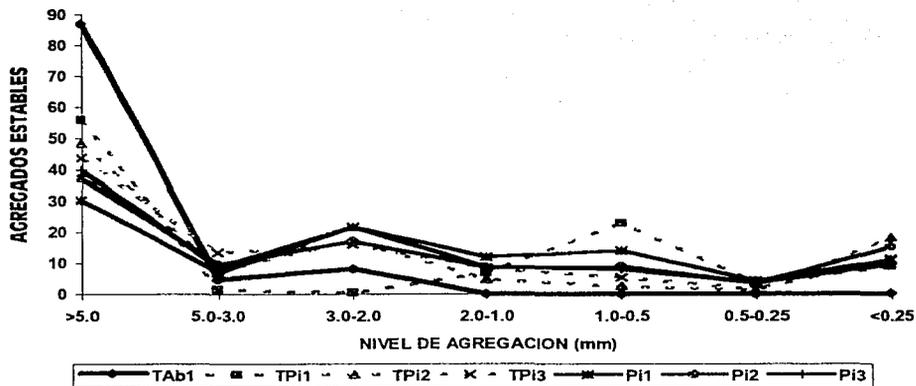


Figura No. 58. Efecto del pirul con y sin solución nutritiva sobre el porcentaje de agregados estables en húmedo (AEH) en el nivel de fracturación grueso.

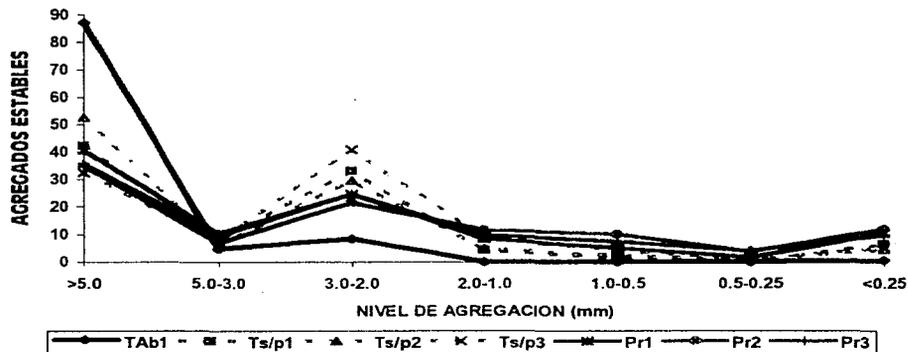


Figura No. 59. Efecto del pasto Rhodes sobre el porcentaje de agregados estables en húmedo (AEH) en el nivel de fracturación grueso del tepetate.

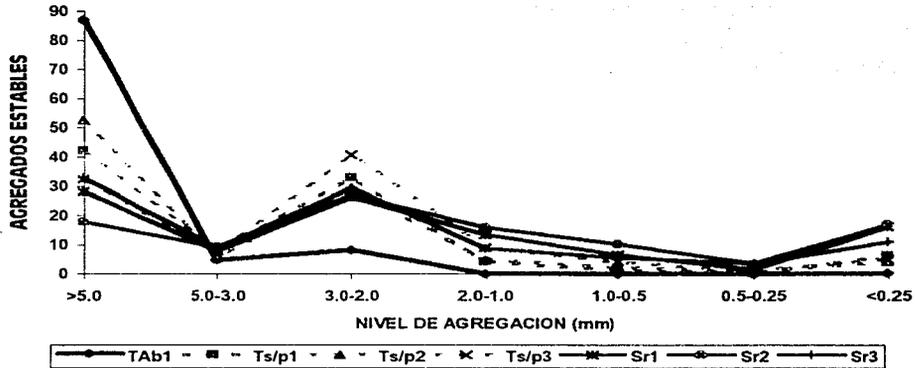


Figura No. 60. Efecto del sorgo sobre el porcentaje de agregados estables en húmedo (AEH) en el nivel de fracturación grueso del tepetate.

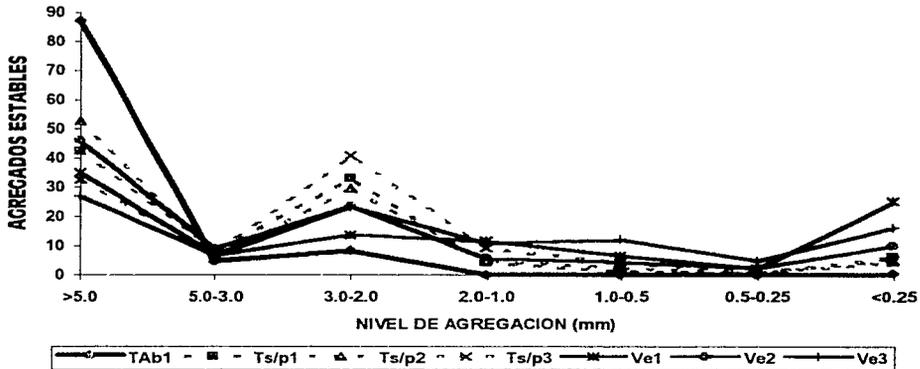


Figura No. 61. Efecto de la veza sobre el porcentaje de agregados estables en húmedo (AEH) en el nivel de fracturación grueso del tepetate.

Las herbáceas, Figuras 59, 60 y 61 (páginas anteriores), al igual que las arbóreas, mostraron un incremento en los porcentajes de AEH menores de 0.25 mm; aumento en el nivel de 0.25 a 3.0 mm; estabilidad de la fracción de 3 a 5 mm y disminución significativa de agregados mayores de 5 mm, con respecto al TAb. En los niveles menores de 2 mm, los porcentajes más altos correspondieron a los tratamientos con planta y en los niveles superiores a los Ts/p. En ningún caso las diferencias fueron estadísticamente significativas, ni entre especies ni entre etapas.

A semejanza de lo observado en el nivel de fracturación fino, con las seis especies la fracción de fragmentos y agregados que mostró mayor estabilidad fue la correspondiente al nivel de 2 a 5 mm.

El comportamiento observado en los dos niveles de fracturación del tepetate difiere con el descrito en otros trabajos, debido a que se trata de una capa endurecida con estructura masiva, lo que le confiere características diferentes a las de un suelo. Además, es necesario considerar que el material antes de los tratamientos estaba constituido por fragmentos resultado de la roturación y no por agregados, de tal manera que los resultados deben ser interpretados en función de tal característica.

La disminución de agregados menores de 0.25 y de 1.0 a 2.0 mm en fino y mayores de 5 mm en grueso con respecto al TAb, pudo ser debida a que los fragmentos, por estar soldados presentaron mayor estabilidad que las unidades existentes en los tratamientos. En el testigo sin planta, la agregación y disgregación se debieron, principalmente, a los factores fisicoquímicos descritos con anterioridad (Utomo y Dexter, 1982; Singer *et al.*, 1992). Sin embargo, en ellos aun predominan los fragmentos, lo que explica la mayor estabilidad del material con respecto a los tratamientos con especies vegetales. En estos últimos, además del fisicoquímico, existe un efecto biológico por lo que presentan más agregados unidos por compuestos orgánicos que fragmentos.

Los mayores porcentajes de AEH obtenidos en los tratamientos con arbóreas sin aporte de solución, con respecto a los tratamientos en los que sí se aplicó, pudieron deberse a que la cantidad de agregados formados es menor. La solución favorece el desarrollo y la actividad fisiológica de la planta, con lo que se acentúan la producción de cementantes orgánicos, el aporte de materia orgánica y los efectos de agregación y disgregación mecánica por crecimiento radical y empaquetamiento. De tal manera que el

número de agregados en los tratamientos sin solución es menor, habiendo cierto predominio de fragmentos.

Los agregados son menos estables que los fragmentos como resultado de sus características. Los fragmentos se encuentran fuertemente soldados debido a la génesis del material, además, su baja permeabilidad limita la circulación de líquidos y gases, disminuyendo la velocidad de alteración. En consecuencia, dicha alteración es reducida (Nimlos, 1989; Flach *et al.*, 1992; Prat y Quantín, 1992; Zebrowski, 1992).

Sin embargo, los agregados son partículas o fracciones unidas por fuerzas fisicoquímicas y cementantes orgánicos secretados por raíces, bacterias y hongos, o bien, resultado de la descomposición y resíntesis de otros compuestos (Reid y Goss, 1981; Ellsworth *et al.*, 1991; Dorioz *et al.*, 1993; Hayes y Tapp, 1994; Tisdall, 1994). De tal manera que la resistencia de los enlaces es menor que la de los fragmentos, por tratarse de compuestos susceptibles de ser transformados, asimilados y descompuestos por la biota edáfica, sobre todo durante las primeras etapas de formación.

De acuerdo con lo anterior, la menor cantidad de AEH del tepetate sometido al efecto de las especies vegetales, en comparación con los testigos, no indica que las plantas tengan un efecto poco favorable sobre el material, sino que confirma la existencia de procesos de estructuración a largo plazo. Hecho que es apoyado por los resultados obtenidos en los niveles de agregados mayores de 0.5 mm (fino) y menores de 5 mm (grueso), en donde con los tratamientos se incrementaron los porcentajes de AEH con respecto al Tab y los valores más altos se presentaron a los 18 meses.

El que no existan cambios en la fracción de 3.0 a 5.0 mm y que la mayor estabilidad corresponda a los agregados de 2 a 3 mm, indica que se trata de fragmentos y agregados muy estables no sólo en húmedo sino también en seco, como se determinó con dicho análisis. Esto coincide además, como ya se mencionó, con lo obtenido en otros trabajos, para suelo (Lal y Greenland, 1979; Primavesi, 1980), para capas endurecidas (Martínez *et al.*, 1991; Velázquez, 1994) y resulta importante por tratarse de un nivel que permitiría un buen intercambio gaseoso, filtración y retención de agua, menor compactación y buen establecimiento de la biota edáfica y desarrollo vegetal.

## F. Coeficiente de Estructuración.

El coeficiente de estructuración (**E**) es la relación entre el porcentaje de agregados estables en seco de 0.25 a 10 mm, que es la fracción considerada como agronómicamente importante, y la suma de aquellos mayores de 10 mm y menores de 0.25 mm (microagregados). Para su obtención, se utiliza la fórmula siguiente:

$$E = A / B$$

donde: **A** = suma de macroagregados de 0.25 a 10 mm.  
**B** = suma de agregados menores de 0.25 mm y mayores de 10 mm.

Mientras mayor sea el valor del coeficiente, mejor será la estructuración del suelo.

### Nivel de Fracturación Fino.

La tabla 15, muestra los valores de E obtenidos con cada uno de los tratamientos en los dos niveles de fracturación del tepetate. En el nivel de fracturación fino, Figura 62, los coeficientes de estructuración más altos, en las tres etapas de observación, correspondieron a los Ts/p sin que exista una tendencia definida con respecto al tiempo. Este comportamiento, que difiere notablemente de lo observado en algunos suelos (Osorio, 1995), está en función de las características inherentes al tepetate y a la dinámica de los procesos de fragmentación, agregación y disgregación que se llevaron a cabo en el mismo.

El incremento de E en el Ts/p con respecto al TAb, puede ser explicado si se tiene presente que en este último, la fracción menor de 0.25 era superior al 30%, mientras que aproximadamente el 70% estaba formado por fragmentos de 0.25 a 2 mm, lo que da como resultado un E con un valor alrededor de 2. En los tratamientos sin especies vegetales, la fracción menor de 0.25 mm disminuyó casi hasta la mitad (quedando en 15 %) y se incrementó la fracción de 0.25 a 10 mm hasta constituir el 80% del material.

Tabla No. 15. Coeficiente de estructuración (E) del tepetate después de seis, doce y dieciocho meses de observación.

TIEMPO <sup>2</sup>	TRATAMIENTOS <sup>1</sup>										
	TAb	Ts/p	TCa	TEu	TPI	Ca	Eu	Pi	Pr	Sr	Ve
					NIVEL	FINO					
Etapa 1	1.96	3.59	1.12	2.45	3.11	0.65	1.1	0.8	2.72	2.64	2.12
Etapa 2	1.96	6.14	2.02	1.25	1.77	1.28	1.07	1.62	1.75	1.82	0.9
Etapa 3	1.96	4.72	3.63	2.28	4.21	1.11	1.02	1.11	1.21	1.05	0.84
					NIVEL	GRUESO					
Etapa 1	2.06	3.82	3.48	3.35	1.47	2.87	2.67	2.72	4.41	5.2	7.02
Etapa 2	2.06	2.99	1.23	2.41	1.06	2.28	3.27	4.21	4.26	6.55	3.4
Etapa 3	2.06	4.53	3.78	2.1	2.6	3.22	3.82	3.47	5.23	4.14	2.67
<sup>1</sup> TAb: Testigo absoluto Ts/p: Testigo sin planta			TCa, TEu, TPI: Testigos sin solución Ca: Casuarina			Eu: Eucalipto Pi: Pirúl		Pr: Pasto Rhodes Sr: Sorgo		Ve: Veza	

<sup>2</sup> Etapa 1: Seis meses      Etapa 2: Doce meses      Etapa 3: Dieciocho meses.

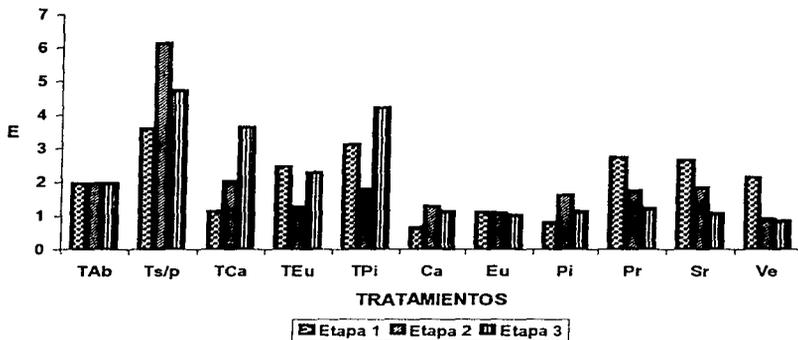


Figura No. 62. coeficiente de estructuración (E) en el nivel de fracturación fino del tepetate.

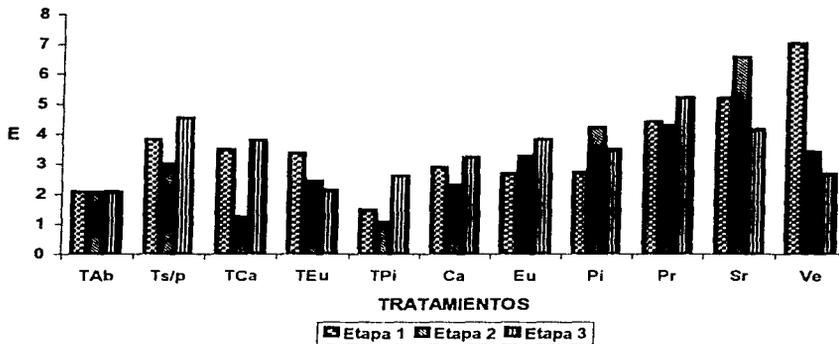


Figura No. 63. Coeficiente de estructuración (E) en el nivel de fracturación grueso del tepetate.

Asimismo, hubo formación de agregados de 2 a 10 mm y un pequeño porcentaje de agregados mayores de 10 mm (menos del 5%), todo lo cual aumenta significativamente el valor de E. Como puede ser corroborado con el análisis de agregación en seco, este comportamiento denota la existencia de procesos de agregación orgánica e inorgánica en el tepetate.

En el caso de los tratamientos con influencia de especies vegetales, los procesos de reorganización del material fueron más intensos debido a la presencia del factor biológico. En éstos, hubo una mayor disminución del porcentaje de microagregados (se conservó menos del 10%) y disminuyó la fracción de 0.25 a 2 mm del 30% a menos de 20%. Hubo formación de agregados de 2 a 10 mm en porcentajes equivalentes a los del Ts/p, pero un incremento altamente significativo de agregados mayores de 10 mm (más del 30%). Todo ello, dio valores de E menores que en el TAb y los Ts/p.

Al comparar los valores de E de los tratamientos sin adición de solución nutritiva con aquellos en los que sí se aplicó, se observa que son mucho más altos en los primeros. Esto se debió, como se ha mencionado, a que la solución favorece el desarrollo de las especies vegetales e incrementa con ello su efecto sobre la agregación. El porcentaje de agregados mayores de 10 mm fue más alto en los tratamientos con solución y hubo menor cantidad de microagregados, así como diferentes fluctuaciones en la fracción de 0.25 a 10 mm. Lo que explica que en aquellos tratamientos en los que la reorganización del material fue más lenta se presentarían coeficientes de estructuración superiores.

#### Nivel de Fracturación Grueso.

En el nivel de fracturación grueso, Figura 63 (página anterior), tampoco hubo una tendencia definida del coeficiente de estructuración con respecto al tiempo de observación y, a semejanza del caso anterior, sus variaciones fueron resultado de la presencia e intensidad de los procesos de fragmentación, agregación y disgregación del tepetate.

El TAb, con un coeficiente de estructuración de 2, estuvo constituido por fragmentos mayores de 2 mm en los que la fracción de 2 a 10 mm ocupaba un 65% y la mayor de 10 mm un 35%,

aproximadamente. En el Ts/p, una vez que el material fue alterado y reorganizado, se presentaron coeficientes mayores a los del TAb debido a las variaciones en los porcentajes; la fracción mayor de 10 mm disminuyó por desintegración hasta 15 o 20%; hubo una pequeña fracción de material de diámetro menor de 0.25 mm (menos del 5%) y la de 2 a 10 mm tuvo porcentajes de 75 a 80%.

Esto último como resultado tanto de la desintegración de los fragmentos mayores de 7 mm, como de la formación de agregados menores de 5 mm. Incluso, hubo agregación aún en aquellos intervalos que no se encontraban presentes en el TAb, como la fracción menor de 2 mm.

Sin embargo, aún cuando el E del Ts/p fue mayor que el del TAb, a diferencia del nivel de fracturación fino, dicho valor fue menor que el obtenido en los tratamientos con especies vegetales. En estos, los coeficientes fueron altos debido al incremento significativo de agregados de 0.25 a 10 mm, los cuales en algunos casos, constituyeron hasta un 90% del total del material quedando sólo un 10% de microagregados y agregados mayores de 10 mm. En el caso de los tratamientos con y sin adición de solución nutritiva, el valor de E fue mayor en los primeros, debido al efecto que la solución tiene sobre el crecimiento vegetal.

Como se mencionó, en ninguno de los dos niveles de fracturación del tepetate hubo una tendencia definida del coeficiente de estructuración con respecto al tiempo, de tal manera que, a diferencia de un suelo, en el tepetate no es posible afirmar que al aumentar el tiempo de permanencia de las especies mejora la estructuración.

Lo anterior pudo deberse a que la estructura de un suelo normalmente está constituida por partículas y agregados formados naturalmente. Sin embargo, en el presente estudio el sustrato estuvo conformado por fragmentos de tepetate soldados y creados de manera artificial mediante su fracturación. Motivo por el cual los procesos tanto de desintegración, como de agregación, no se presentaron con la misma intensidad ni siguiendo el mismo patrón que en el suelo.

En general, es posible decir que las variaciones en el coeficiente de estructuración del tepetate sometido a los diferentes tratamientos, fueron consecuencia directa de las fluctuaciones en los porcentajes

de fragmentos y agregados. Las cuales al mismo tiempo son el reflejo de la dinámica de todos aquellos procesos que se llevan a cabo en el medio constituido por el tepetate.

### **G. Producción de Biomasa.**

Nivel de Fracturación Fino.

En la Tabla 16, se presentan los valores de peso seco radical (**PSR**) y peso seco aéreo (**PSA**) para los tratamientos del nivel de fracturación fino del tepetate. El PSR (Figura 64) se incrementó significativamente al aumentar el tiempo de permanencia de las especies en el sustrato, obteniéndose los valores más altos a los 18 meses de observación. En el caso del TEu y el tratamiento con Sr, el mayor desarrollo radical se presentó a los 12 meses, después de lo cual hubo una disminución o se detuvo el crecimiento como resultado, posiblemente, de lo limitado del espacio en la maceta.

Las herbáceas no presentaron diferencias significativas entre especies, a excepción de la veza que fue la especie que menor desarrollo radical presentó y el pasto Rhodes que a partir de la segunda etapa tuvo los valores más altos de peso seco radical. En el caso de las arbóreas, los valores fueron estadísticamente equivalentes entre especies y entre tratamientos, lo que implica que la solución nutritiva no influyó en forma definitiva en el crecimiento radical.

Por lo que respecta al PSA (Figura 65) hubo un incremento significativo del mismo, en función del tiempo, con todos los tratamientos. Las especies arbóreas sin adición de solución nutritiva y la veza, no registraron dicho incremento después de 12 meses.

En el caso de las herbáceas, las diferencias entre especies fueron estadísticamente significativas, obteniéndose los valores más altos con pasto Rhodes y los más bajos con veza. Entre las arbóreas no se presentaron diferencias significativas. Al comparar el PSA de los tratamientos con solución, con aquellos en los que no se aplicó, se observó que los valores fueron ligeramente mayores en los tratamientos en los que sí se adicionó, pero sólo en algunos casos las diferencias fueron altamente significativas.

**Tabla No.16. Producción de biomasa después de seis, doce y diecicho meses de observación.**

TRATAM. <sup>1</sup>	PESO SECO RADICAL (g)			PESO SECO AEREO (g)		
	Etapas 1	Etapas 2	Etapas 3	Etapas 1	Etapas 2	Etapas 3
<b>NIVEL FINO</b>						
TA <sub>b</sub>	0.00b	0.00d	0.00d	0.00c	0.00f	0.00f
Ts/p	0.00b	0.00d	0.00d	0.00c	0.00f	0.00f
TC <sub>a</sub>	8.00b	25.50c	55.00b	23.00ab	41.80d	55.90c
TE <sub>u</sub>	32.80a	68.70a	54.50b	30.10a	44.30cd	44.00d
TP <sub>i</sub>	26.73ab	33.60bc	57.40b	26.17ab	39.90d	41.70d
Ca	7.20b	34.17bc	56.77b	18.37b	53.57c	85.80b
Eu	7.67b	30.30bc	60.27b	17.07b	46.83cd	74.80b
Pi	12.67b	31.67c	50.10b	22.77ab	33.33de	51.50cd
Pr	7.60b	59.87ab	98.17b	32.47a	84.00a	123.83a
Sr	20.57ab	50.60b	27.47c	21.30ab	70.33b	59.73c
Ve	5.57b	2.10d	0.80d	11.77b	25.63e	25.20e
<b>NIVEL GRUESO</b>						
TA <sub>b</sub>	0.00b	0.00d	0.00d	0.00b	0.00e	0.00f
Ts/p	0.00b	0.00d	0.00d	0.00b	0.00e	0.00f
TC <sub>a</sub>	16.80ab	32.33c	38.90c	23.60a	42.80c	32.60e
TE <sub>u</sub>	17.40a	52.30bc	44.30c	21.50a	42.40c	60.20c
TP <sub>i</sub>	13.73ab	22.60c	47.40bc	20.10ab	20.10d	32.80e
Ca	10.07ab	34.33c	82.97a	21.90a	38.67cd	65.60e
Eu	8.17ab	58.60b	77.63ab	22.03a	49.60c	61.53c
Pi	10.00ab	35.80c	62.57b	20.97a	30.77d	47.40d
Pr	12.23ab	77.50a	75.40ab	24.53a	86.77a	116.60a
Sr	13.30ab	62.47ab	66.97ab	23.50a	64.87b	82.13b
Ve	5.73ab	3.57d	2.30d	9.13b	23.00d	25.67e
<sup>1</sup> TA <sub>b</sub> : Testigo absoluto			Ca: Casuarina		Pr: Pasto Rhodes	
Ts/p: Testigo sin planta			Eu: Eucalipto		Sr: Sorgo	
TC <sub>a</sub> , TE <sub>u</sub> , TP <sub>i</sub> : Testigos sin solución			Pi: Pirúl		Ve: Veza	

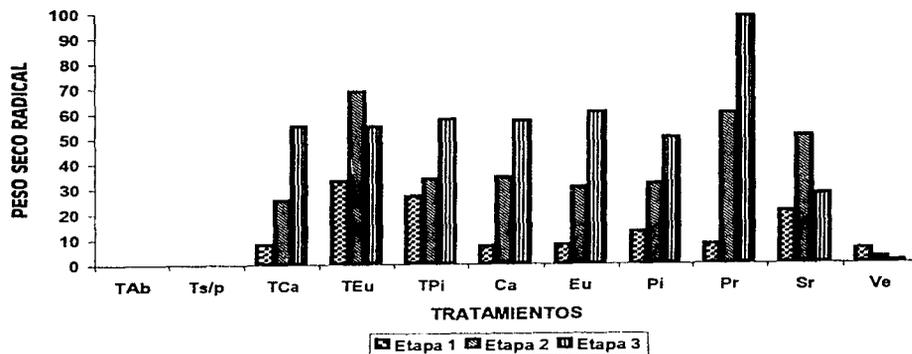


Figura No. 64. Gramos de biomasa seca radical (PSR) en el nivel de fracturación fino del tepetate.

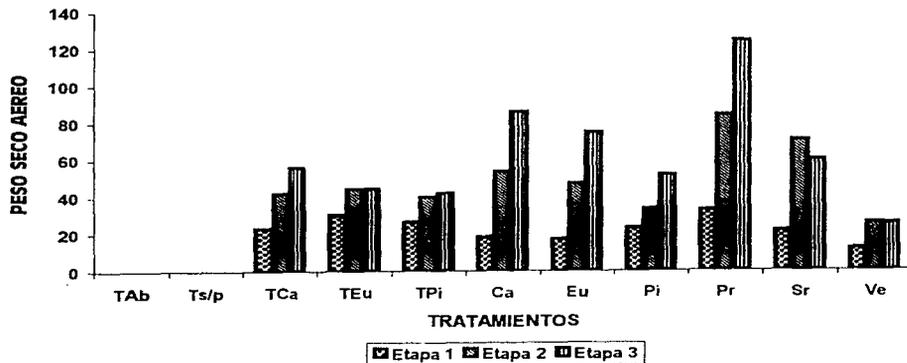


Figura No. 65. Gramos de biomasa seca aérea (PSA) en el nivel de fracturación fino del tepetate.

### Nivel de Fracturación Grueso.

En el nivel de fracturación grueso, cuyos resultados se muestran también en la Tabla 16, se observó que el desarrollo radical (Figura 66) siguió el mismo comportamiento descrito para el nivel fino. Los valores más altos se obtuvieron en la tercera etapa con todos los tratamientos, a excepción del TEu, en el que el máximo desarrollo se presentó a los 12 meses.

En el caso de las herbáceas, el pasto Rhodes fue el que tuvo mayor peso seco radical y la veza el menor. Con las arbóreas no se presentaron diferencias significativas entre especies, así como tampoco entre tratamientos con adición de solución nutritiva y sin ella, pero sólo durante los 12 primeros meses, ya que en la tercera etapa, los tratamientos con solución mostraron un desarrollo radical significativamente mayor.

El PSA (Figura 67) se incrementó significativamente en función del tiempo de permanencia de las especies en el sustrato. Los tratamientos con casuarina sin adición de solución nutritiva (TCa) y con veza alcanzaron el mayor PSA durante la segunda etapa, observándose una disminución posterior. El pasto Rhodes fue la herbácea con más PSA desde la primera etapa y de las arbóreas, el eucalipto. Al comparar los tratamientos con solución nutritiva con los testigos sin adición de la misma, se observó que los valores fueron estadísticamente equivalentes.

En general, la producción de biomasa fue mayor en el nivel de fracturación grueso, comportamiento que se ajusta a lo esperado ya que se trata de un tamaño de fragmentos que presenta menos limitantes para el desarrollo radical de las especies vegetales. Por sus características, permite la existencia de mayor espacio poroso que facilita el intercambio de gases, el paso del agua, el crecimiento radical y favorece el desarrollo vegetal (Drew, 1992). Además, aumenta las posibilidades de establecimiento de una biota activa, característica que se manifiesta como un incremento en la velocidad de descomposición de la materia orgánica y todo lo que este hecho conlleva.

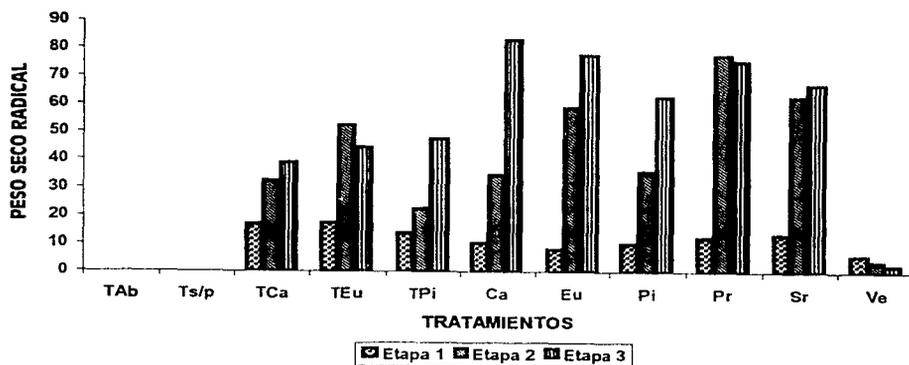


Figura No. 66. Gramos de biomasa seca radical (PSR) en el nivel de fracturación grueso del tepetate.

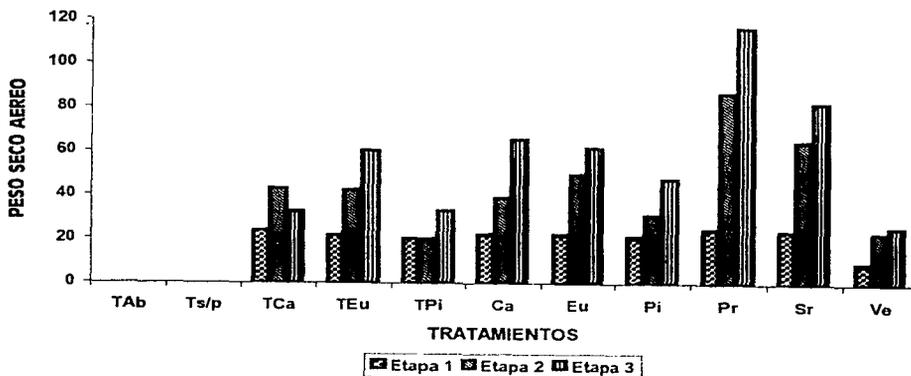


Figura No. 67. Gramos de biomasa seca aérea (PSA) en el nivel de fracturación grueso del tepetate.

Las especies que produjeron mayor cantidad de biomasa (pasto Rhodes, eucalipto y sorgo) fueron también las que aportaron más materia orgánica al sustrato y favorecieron porcentajes más altos de agregados estables.

La solución nutritiva, de acuerdo con lo descrito, y aún cuando no con todas las especies se obtuvieron los mismos resultados, incrementó la producción de biomasa tanto aérea como radical facilitando el establecimiento y mantenimiento de las especies en el tepetate, comportamiento que fue más evidente en el nivel de fracturación grueso del material.

Por lo que respecta a las diferentes especies utilizadas, de las arbóreas, el eucalipto fue la que mostró un mayor desarrollo, información que apoya los resultados de otros trabajos (Sánchez, 1981; Pedraza *et al.*, 1987; De Noni *et al.*, 1992; Llerena y Sánchez, 1992) en los que se hace referencia a su gran adaptabilidad a las características de las capas endurecidas.

En el caso de las herbáceas, se corroboró la mejor adaptación de las gramíneas a condiciones edáficas adversas (Bodgan, 1977; Reid y Goss, 1981; Hillel, 1982; Arias, 1992; Bathke *et al.*, 1992), mismas que presentaron una producción de biomasa superior a la de la leguminosa, cuyo desarrollo en el presente estudio fue deficiente, aunque no necesariamente por efecto de las características del tepetate, sino por ser muy susceptible al exceso de humedad.

### 3. Comentario General.

Todas las especies vegetales provocaron cambios importantes en la estructura del tepetate. Por un lado, favorecieron la fragmentación, fase inicial indispensable para la integración de las capas cementadas al proceso productivo y, por otra, permitieron la reorganización de los fragmentos, en agregados de diferentes diámetros a través de compuestos orgánicos, los cuales no sólo constituyen enlaces muy estables sino que también disminuyen el riesgo de compactación.

Esto es importante, ya que como se ha mencionado, los agregados son la base de la formación de suelo y representan la condición estructural ideal para el establecimiento y desarrollo de especies vegetales y de una biota activa, sin olvidar que esto no sólo depende de su formación, sino también de su estabilidad tanto en seco, como en húmedo, que es lo que realmente determina la permanencia y características del espacio poroso.

Aún cuando los resultados mostraron porcentajes significativos de agregados estables con todas las especies, los efectos pudieron incrementarse debido a las características del modelo experimental, es decir, a las condiciones de drenaje confinado, al número de especies por maceta, la frecuencia de riego, entre otras, lo que plantea condiciones muy diferentes a las que existen en el campo. De tal manera que no se pretende con este estudio analogar los resultados a lo que sucede en condiciones reales, sino que, únicamente se desea sentar las bases para el análisis del efecto de las especies vegetales en la formación de suelos y recuperación de zonas con tepetate. Así como establecer un tamaño de agregados adecuado para el mantenimiento y buen desarrollo de especies de importancia económica, que de acuerdo con los resultados de los dos análisis, correspondió a la fracción con diámetro de 2 a 5 mm.

Las especies arbóreas mostraron una alta capacidad de adaptación y modificación del tepetate, así como el pasto Rhodes, cuyo efecto sobre la fragmentación, acumulación de materia orgánica y formación de agregados estables fue superior, incluso, al observado con las primeras. Esto muestra que se trata de especies altamente favorables para la habilitación de capas endurecidas. No obstante, es necesario tener presente que el establecimiento de especies vegetales debe estar enfocado no sólo a su

grado de efectividad sobre el sustrato, sino también a la satisfacción de las principales necesidades de los pobladores y a su cultura.

Si la zona y las condiciones socioeconómicas son adecuadas para el pastoreo, el pasto Rhodes constituye una buena alternativa. Si la finalidad es reforestar, dependiendo de las características del sitio, se puede optar por algunas de las especies aquí probadas, cuyo efecto sobre las características del sustrato fue favorable. Pero cuando las necesidades son otras, es necesario considerar especies de importancia económica y alimenticia, que además de habilitar las capas cementadas para su uso agrícola, también puedan ser aprovechadas y redituables.

De tal manera, que esta temática plantea la necesidad de un mayor número de estudios enfocados al efecto de otras especies sobre las características de los tepetates, para poder contar con una amplia gama de posibilidades para la habilitación y aprovechamiento de estas zonas que, en la mayoría de los casos, se encuentran abandonadas y expuestas a los fenómenos erosivos, incrementándose día con día su extensión y problemática. Dichos estudios constituyen la base para que, ensayos posteriores en campo, permitan el análisis detallado y manejo dirigido de la modificación de las características de los tepetates y, a largo plazo, sea posible favorecer e incrementar la formación de suelo.

## VIII. CONCLUSIONES.

- La posible unión fisicoquímica y biológica de los fragmentos menores de 0.05 mm, permitió la formación de agregados de 0.05 a 2.0 mm de diámetro.
- Las condiciones de drenaje confinado, el crecimiento radical y la alteración del tepetate por efecto de los tratamientos, provocaron una ligera alcalinización del tepetate.
- Por sus características morfológicas y hábitos de crecimiento, las especies arbóreas y el pasto Rhodes fueron las que aportaron mayor cantidad de materia orgánica al tepetate.
- Los ciclos de humedecimiento-secado y el crecimiento radical, fueron factores determinantes en la desintegración y disgregación del tepetate.
- Los hábitos de crecimiento y el aporte de materia orgánica de las especies vegetales, determinaron la intensidad de la agregación en el tepetate. Las arbóreas y el pasto Rhodes favorecieron los mayores porcentajes de agregación.
- La materia orgánica aportada por las especies, incrementó la estabilidad en húmedo de los agregados formados.
- Por su frecuencia de formación y mayor estabilidad, los fragmentos y agregados de 2 a 5 mm pueden ser considerados como un nivel agronómicamente importante para el manejo del tepetate.
- La proporción de fragmentos y agregados determinó el valor del coeficiente de estructuración. Su comportamiento en el tepetate fue opuesto al observado en suelo.
- Por sus características, en el nivel de fracturación grueso se presentó la mayor producción de biomasa. En consecuencia, la influencia de las especies vegetales sobre el tepetate se incrementó.
- Al incrementarse la modificación del tepetate conforme aumenta el tiempo de permanencia de las especies vegetales, la formación de suelo a partir de este material constituye un proceso posible a mediano y largo plazo.
- La modificación de las características del tepetate mediante la introducción de especies vegetales perennes constituye una alternativa para su habilitación e integración al proceso productivo.

## IX. LITERATURA CITADA.

- \* **Acevedo, S. O. A.** 1997. Morfogénesis de suelos con tepetate de una área del Estado de México y su incorporación al proceso productivo. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. En proceso.
- \* **Angers, D.A., Pesant, A. and Vigneur, J.** 1992. Early cropping-induced changes in soil aggregation, organic matter and microbial biomass. *Soil Science American Journal* 56: 115-119.
- \* **Arias, R.H.M.** 1992. Rehabilitación de tepetates: una alternativa para la producción agropecuaria y forestal. *Terra* 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 309-317.
- \* **Arias, R.H.M., Miranda, M.M.E. y Gabriels, D.** 1992. Dinámica de la erosión en tepetates roturados. *Terra* 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 370-373.
- \* **Bartoli, F., Philippy and Burtin, G.** 1988. Aggregation in soils with small amounts of swelling clays I. Aggregate stability. *Journal of Soil Science* 39: 593-616.
- \* **Bathke, G.R., Cassel, D.K., Eargrove, W.L. and Porter, P.M.** 1992. Modification of soil physical properties and root growth response. *Soil Science* 154: 316-329.
- \* **Baumann, J., Werner, G. Muñoz, N.H., Vera, R.A. y Flores, F.G.** 1992. Mediciones preliminares de la erosión hídrica en el bloque de Tlaxcala, México. *Terra* 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 347-354.
- \* **Baver, L.A. y Gardner, W.R.** 1980. Física de suelos. U.T.E.H.A., México, D.F. 529 p.
- \* **Beare, M.H., Hendrix, P.F. and Coleman, D.C.** 1994. Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional and no-tillage soils. *Soil Science American Journal* 58: 777-786.
- \* **Black, C.A., Evans, D.D., White, J.L., Ensminger, L.E. and Clark, F.E.** 1965. Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. American Society of Agronomy. Inc. Publisher, Madison, Wisconsin. 770 p.
- \* **Bogdan, A.V.** 1977. Tropical pasture and fodder plants (grasses and legumes). Longman, London, U.K. 475 p.
- \* **Bohn, H.L., McNeal, B.L. y O'Connor, G.A.** 1993. Química del suelo. Limusa, México, D.F. 370 p.
- \* **Camargo, R.E.O. y Guido, A.I.** 1987. Roturación y trituración de tepetate en el Valle del Mezquital, su efecto en la agricultura bajo condiciones de riego. *In: J.F. Ruiz F. (de.)* Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. p. 69-77.

- \* **Campos, C.A.** 1992. Los tepetates de la región de Jalapa, Veracruz (México): estructura de la cubierta pedológica. *Terra* 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 226-232.
- \* **Cervantes, B.J.F.** 1983. Génesis, morfología y clasificación de los suelos de la cuenca de México. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 441 p.
- \* **Churchman, G.J. and 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.
- \* **Colombo, C. and Torrent, J.** 1991. Relationships between aggregation and iron oxides in Terra Rossa soils from southern Italy. *Catena* 18: 51-59.
- \* **Chradwick, P.D.G., Farmer, V.C., Russel, J.D., Masson, C.R., Wada, K. and Yoshinaga, N.** 1972. Imogolite, a hydrated aluminum silicate of tubular structure. *Nature (London) Physical Science* 240: 187-189.
- \* **Cronquist, A.** 1981. An integrated system of classification of flowering plants. Columbia University Press, New York. 1262 p.
- \* **Delgadillo, P.M.E., Miranda, M.M.E. y Ruiz, H.B.R.** 1992. Prácticas de manejo realizadas por los campesinos de Santa Catarina del Monte (Estado de México, México) para incorporar el tepetate a la producción. *Terra* 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 545-549.
- \* **De Noni, G., Trujillo, G. y Viennot, M.** 1992. Análisis histórico, social y económico de la cangahua en Ecuador. *Terra* 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 503-514.
- \* **Dinel, H. Mehuyus, G.R. and Lévesque, M.** 1991. Influence of humic and fibrics materials on the aggregation and aggregate stability of a lacustrine silty clay. *Soil Science* 151: 146-158.
- \* **Dorjoo, J.M., Robert, M. and Chenu, C.** 1993. The role of roots, fungi and bacteria on clay particle organization. An experimental approach. *Geoderma* 56: 179-194.
- \* **Drew, C.M.** 1992. Soil aeration and plant root metabolism. *Soil Science* 154: 259-268.
- \* **Dubroeuq, D.** 1992. Los tepetates de la región de Xalapa, Veracruz (México): un endurecimiento de origen pedológico. *Terra* 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 233-240.
- \* **Dubroeuq, D., Quantín, P. y Zebrowski, C.** 1989. Los tepetates de origen volcánico en México. Esquema preliminar de clasificación. *Terra* 7: 3-12.
- \* **Easterwood, G.W., Street, J.J., Harris, W.G., Weiblen, P.W. and Robitaille, H.A.** 1991. Plant-induced smectite neogenesis from the mineral component of a simulated lunar soil. *Geoderma* 48: 107-112.

- \* **Ellsworth, T.R., Clapp, C.E. and Blake, G.R.** 1991. Temporal variations in soil structural properties under corn and soybean cropping. *Soil Science* 151: 405-416.
- \* **Etchevers, B.J.D., Cruz, H.L., Mares, A.J. y Zebrowski, C.** 1992 (a). Fertilidad de los tepetates: I. Fertilidad actual y potencial de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada (México). *Terra 10* (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 379-384.
- \* **Etchevers, B.J.D., Zebrowski, C., Hidalgo, M.C. y Quantín, P.** 1992 (b). Fertilidad de los tepetates: II. Situación del fósforo y el potasio en tepetates de los estados de México y Tlaxcala (México). *Terra 10* (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 385-391.
- \* **Etchevers, B.J.D., López, R.R.M., Zebrowski, C. y Peña, H.D.** 1992 (c). Características químicas de tepetates de referencia de los estados de México y Tlaxcala, México. *Terra 10* (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 171-177.
- \* **Fitzpatrick, E.A.** 1984. Suelos. Su formación, clasificación y distribución. C.E.C.S.A. México, D.F. 430p.
- \* **Flach, K.W., Nettleton, W.D., Gile, L.H. and Cady, J.G.** 1969. Pedocementation: induration by silica, carbonates and sesquioxides in the Cuaternary. *Soil Science* 107: 442-453.
- \* **Flach, K.W., Nettleton, W.D. and Chadwick, O.A.** 1992. The criteria of duripans in the U.S. soil taxonomy and the contribution of micromorphology to characterize silica indurated soils. *Terra 10* (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 34-45.
- \* **Flores, R.D., González, V.A., Alcalá, M.J.R. y Gama, C.J.E.** 1991. Los Tepetates. *Geografía: Revista del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI)* 3 (4): 37-42.
- \* **Flores, R.D., Alcalá, M.J.R., González, V.A. y Gama, C.J.E.** 1992. Suelos con fragipán de origen volcánico en clima semicálido y subhúmedo -el caso del noreste del estado de Morelos, México. *Revista del Instituto de Geología. Universidad Nacional Autónoma de México.* 10 (2): 151-163.
- \* **Flores, R.D., Alcalá, M.J.R., González, V.A. and Gama, C.J.E.** 1996 (1997). Duripans in semiwarm and tempered 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.
- \* **García, E.** 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlas a las condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. 246 p.
- \* **Gaucher, G.** 1971. Tratado de pedología agrícola. El suelo y sus características agronómicas. Omega, Barcelona, España. 647 p.
- \* **Guerra, C.V. y Garzón, C.C.E.** 1992. Crecimiento de cinco especies forestales y su relación con la recuperación de suelos en Tlaxcala, México. *Terra 10* (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 444-450.

- \* **Guerrero, A.** 1984. Cultivos herbáceos extensivos. Mundi-Prensa, Barcelona, España. 743 p.
- \* **Guerrero, G.E., Luna, M.J.L. y Caballero, O.E.** 1992. Distribución de los tepetates de la República Mexicana escala 1:4,000,000. Terra 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 131-136.
- \* **González, A.A. y Ringleb, R.V.** 1992. Características espectrales de la cangahua expuesta en el Ecuador. Terra 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 120-127.
- \* **Grossman, R.B. and Carlisle, F.J.** 1969. Fragipan soils of the eastern United States. Advance of Agronomy 21: 237-279.
- \* **Guggenberger, G. and Zech, W.** 1994. Composition and dynamics of dissolved carbohydrates and lignin-degradation products in two coniferous forest, N.E. Bavaria, Germany. Soil Biology Biochemistry 26:19-27.
- \* **Gupta, U.S. and Germida, J.J.** 1988. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. Soil Biol. Biochem. 20: 777-786.
- \* **Hayes, H.B.M. and Tapp, H.** 1994. Interactions of humic substances and polysaccharides with soil mineral components. Transaction 15 \* World Congress of Soil Science 3A:14.
- \* **Hernández, X.E.** 1987. Etnobotánica de Tlaxcala. In: F.J. Ruiz F. (ed.) Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo, México. p. 1-7
- \* **Hessmann, R.** 1992. Micromorphological investigations on "tepetate" formation in the "toba" sediments of the State of Tlaxcala (México). Terra 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 145-150.
- \* **Hidalgo, C., Quantín, P. y Zebrowski, C.** 1992. La cementación de tepetates: estudio de la silificación. Terra 10 (Núm. especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 192-201.
- \* **Hillel, D.** 1982. Introduction to soil physics. Academic Press, Inc. New York., N.Y. p. 41-53
- \* **Hitchcock, A.S.** 1950. Manual of the grasses of the United States. U.S. Dep. Of Agriculture, Washington, D.C. 1051 p.
- \* **Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.** 1987. Carta topográfica. Hoja Cuautla E14B51 esc. 1:50,000.
- \* **Jackson, M.L.** 1970. Análisis químico de suelos. Omega, Barcelona, España. 662 p.
- \* **Johnson, H.** 1980. Hydroponics: A guide to soilless culture system. Division of Agricultural Sciences, University of California. 14 p.

- \* **Karimian, N. and Razmi, K.** 1990. Influence of perennial plants on chemical properties of arid calcareous soils in Iran. *Soil Science* 150: 717-721.
- \* **Kaúrichev, I.S., Panov, N.P., Stratonóvich, M.V. y Grechin, I.P.** 1980. *Prácticas de edafología*. Mir, Moscú. 276 p.
- \* **Kenyon, S.** 1982. *Hydroponics for the home gardener*. Van Nostrand Reinhold Ltd., Toronto, Canada. 146 p.
- \* **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.
- \* **Kretinina, T.A.** 1990. Effect of long-term application of fertilizers on the aerophysical properties of an irrigated Light-Chestnut soil. *Soviet Soil Science* 22(4): 50-58.
- \* **Lal, R. and Greenland, D.J.** 1979. *Soil physical properties and crop production in the tropics*. John Wiley and Sons, New York. p. 47-93.
- \* **Llerena, V.F.A. y Sánchez, B.B.** 1992. Recuperación de tepetates en la vertiente oriental del Valle de México. *Terra* 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 302-308.
- \* **Luzio, W.L. y Saavedra, M.N.** 1992. Los suelos volcánicos endurecidos de Chile. *Terra* Vol. 10 Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos. p. 60-66.
- \* **Marañón, G.G.** 1994. Caracterización de suelos con tepetates y su relación con la vegetación en el Municipio de Tetela del Volcán, estado de Morelos. Tesis Licenciatura. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Nacional Autónoma de México. 90 p.
- \* **Marín, C.E., Ubeda, G.E. y Viramonte, O.J.** 1971. Contribución al conocimiento de la génesis del talpetate. *Catastro e Inventario de Rec. Nat., Managua, D.N. Nicaragua*. p. 1-31.
- \* **Márquez, A., Zebrowski, C. y Navarro, H.** 1992. Alternativas agronómicas para la recuperación de tepetates. *Terra* 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 465-473.
- \* **Martínez, T.M., Oleshko, K. y Arias, R.H.** 1991. Estimación del estado óptimo del tepetate en el proceso de su recuperación. *In: Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos*. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. Memoria p. 56.
- \* **Miehlich, G.** 1992. Formation and properties of tepetate in the central highlands of México. *Terra* 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 137-144.
- \* **Morfín, L.L. y Camacho, M.F.** 1987. El palo dulce *Eysenhardtia polystachya*, (Ortega)Sarg., una alternativa para la explotación forragera de áreas tepetatosas. *In J.F.Ruiz F. (ed.) Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*. Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo, México. pp. 192-198.

- \* **Munsell**, 1975. Soil color chart. De. Munsell Color Company, Inc. Maryland, U.S.A.
- \* **Nadler, A. and Steinberger, Y.** 1993. Trends in structure, plant growth and microorganism interrelations in the soil. *Soil Science* 155: 114-122.
- \* **Narro, F.E.** 1994. Física de suelos con enfoque agrícola. Trillas, México. D.F. pp. 36-44.
- \* **Nava, V.R., Sánchez, J., Olvera, O.Y. y Leyte, A.R.** 1992. Rehabilitación del tepetate mediante el manejo tradicional en Tlaxcala-México. *Terra* 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 460-464.
- \* **Navarro, G.H. y Zebrowski, C.** 1992. Análisis agronómico comparativo en tepetate. *Terra* 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 450-459.
- \* **Nimlos, T.J.** 1987. La nomenclatura de horizontes endurecidos en suelos de cenizas volcánicas. *In:* J.F. Ruiz, F. (ed.) *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. p. 10-16.
- \* **Nimlos, T.J.** 1989. The density and strength of mexican tepetate (Duric materials). *Soil Science* 14: 23-27.
- \* **Nimlos, T.J. and Hillery, A.P.** 1990. The strength/moisture relations and hydraulic conductivity of mexican tepetate. *Soil Science* 50: 425-430.
- \* **Nimlos, T.J. and Ortíz, S.C.** 1987. Tepetate. The rock mat. *Journal of Soil and Water Conservation* 42(2): 83-86.
- \* **Nimlos, T.J. y Zamora, C.** 1992. Los suelos volcánicos endurecidos de Perú. *Terra* 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 283-289.
- \* **Oleshko, L.K.** 1995. Prácticas de física de suelos. Apuntes. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 110 p.
- \* **Orozco, Ch.F., Olescko, K., Alfaro, S.G., Caballero, O.E. y Rodríguez, M.P.** 1992. Fábrica de algunos tepetates del estado de Aguascalientes. *Terra* 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 248-252.
- \* **Osorio, J.L.A.** 1995. Rasgos pedológicos de un vertisol pélico como indicadores de un manejo eficiente. Tesis Maestría en Ciencias Agrícolas. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 83 p.
- \* **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, México. 90 p.
- \* **Pedraza, C.E., Rodríguez, F.C. y Fierros, G.A.M.** 1987. Establecimiento de cinco especies forestales en tres tipos de tepetates de la zona Tequesquihuac a Coatepec, Edo. de México. *In:* J.F.Ruiz F.

(ed.) *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. pp. 128-140.

- \* **Peech, M.** 1947. *Methods of soil analysis for soil fertility investigation*. U.S. Dep. Agr. Sci. 757 p.
- \* **Peña, B.V.** 1987. *Importancia de la micorriza en el establecimiento de plantaciones forestales en tepetates*. In: J.F. Ruiz F. (ed.) *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. p. 119-125.
- \* **Peña, D.H. y Zebrowski, C.** 1992. *Los suelos y tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada*. Terra 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 151-155.
- \* **Peña, D.H. y Zebrowski, C.** 1992. *Caracterización física y mineralógica de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada*. Terra 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 156-163.
- \* **Perfect, E. and Kay, B.D.** 1990. *Relations between aggregate stability and organic components for a silt loam soil*. Canadian Journal of Soil Science 70(4): 731-735.
- \* **Perfect, E., Kay, B.D., Van Loon, W.K.P., Sheard, R.W. and Pojasok, T.** 1990. *Factors influencing soil structural stability within a growing season*. Soil Science Society American Journal 54: 173-179.
- \* **Piccolo, A. and Mbagwu.** 1994. *Humic substances and surfactants effects on the stability of two tropical soils*. Soil Science Society American Journal 58: 950-955.
- \* **Pimentel, L.B.** 1992. *Cómo hacer productivos a los tepetates en México*. Terra 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 293-301.
- \* **Prat, C. y Quantin, P.** 1992. *Horizonte endurecido de suelos volcánicos de la región Centro-Pacífico de Nicaragua*. Terra 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 267-282.
- \* **Prat, C., Blandon, S.E., Martínez, O.J.M. y Herrera, M.** 1992. *Agua y talpetate-toba palagonitizada de Masaya*. Terra 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos endurecidos): 355-369.
- \* **Primavesi, A.** 1980. *Manejo ecológico del suelo. La agricultura en regiones tropicales*. El Ateneo, Buenos Aires. p. 183-227.
- \* **Pritchett, W.L.** 1986. *Suelos Forestales*. Limusa, México, D.F. 634 p.
- \* **Quiñones, G.H.** 1987. *La química del silicio* In: J.F. Ruiz F. (ed.) *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. p. 19-28.
- \* **Quantin, P., Zebrowski, C. y Hidalgo, C.** 1992. *El material original de los tepetates  $t_2$  y  $t_3$  de la región de Texcoco (México): Loess o cineritas?* Terra 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos endurecidos): 178-182.

- \* **Rasiah, V. and Kay, B.D.** 1994. Characterizing changes in aggregate stability subsequent to introduction of forages. *Soil Science Society American Journal* 58: 935-942.
- \* **Reid, J.B. and Goss, M.J.** 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. and Kurzmann, P.** 1983. Cultivos hidropónicos y en turba. Mundi-Prensa, México, D.F. p. 49-57.
- \* **Resh, M.H.** 1978. Hydroponic food production. Wood bridge Press Publishing Company. U.S.A. 287p.
- \* **Rey, C.J.A.** 1987. Evaluación de la construcción de zanjas trincheras para el control de la erosión en la zona de tepetates de la zona de San Pablo Ixayoc, Edo. de México. *In: J.F. Ruiz F. (ed.) Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural.* Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. p. 180-181.
- \* **Robles, S.R.** 1979. Producción de granos y forrajes. Limusa, México, D.F. 591 p.
- \* **Rojas, R.T. y Sánchez, W.T.** 1985. Historia de la agricultura en época prehispánica. Siglo XVI. Colección Biblioteca del INAH, Instituto Nacional de Antropología e Historia. México, D.F.
- \* **Rosas, P.A.C.** 1987. Contenido y rendimiento de proteína cruda de la asociación *Sorghum almum*/Macropitilium atropurpureum bajo dos métodos de siembra y cinco niveles de fertilización en el ejido de Tepetzingo, Morelos. Tesis Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 101 p.
- \* **Rosignol, J.P., Campos, C.A. y Quantin, P.** 1992. las condiciones regionales de desarrollo de los tepetates de la zona Xalapa-Coatepec, Veracruz, México. *Terra* 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos endurecidos): 210-220.
- \* **Ruiz, F.J.F.** 1987. Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. 222 p.
- \* **Sánchez, J.M.** 1981. Comportamiento de dos tipos de tepetates bajo la adición de abonos orgánicos y abonos verdes en condiciones de invernadero. Tesis Licenciatura. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. 119 p.
- \* **Sánchez, J.M., Ruiz, F.J.F. y Cautle, F.E.** 1987. Comportamiento de dos tipos de tepetates bajo la adición de abonos orgánicos y abonos verdes en condiciones de invernadero. *In: J.F. Ruiz F. (ed.) Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural.* Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. p. 58-68.
- \* **Sánchez, S.O.** 1980. La flora del Valle de México. Herrero, México, D.F. 519 p.

- \* **Secretaría de Educación Pública.** 1982. Cultivos forrajeros. Manuales para la educación técnica agropecuaria. Trillas, México, D.F. 80 p.
- \* **Secretaría de Programación y Presupuesto.** 1981. Síntesis geográfica del estado de Morelos. INEGI, México, D.F.
- \* **Seymour, F.D. and Balluff, F.M.** 1989. Soil. Morphology, Genesis and Classification. John Wiley and Sons Inc. New York, N.Y. 395 p.
- \* **Singer, M.J., Southard, R.J., Warrington, D.N. and Janitzky, P.** 1992. Stability of synthetic sand-clay aggregates after wetting and drying cycles. *Soil Science Society American Journal* 56: 1843-1848.
- \* **Soil Survey Staff.** 1994. Claves para la taxonomía de suelos. Traducción de Carlos A. Ortiz Solorio, Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena y Jorge Luis García Rodríguez. Primera edición en español 1995. Publicación especial 3. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo (SMCS). Chapingo, México. 306 p.
- \* **Stein, C.L.** 1982. Silica recrystallizations in petrified wood. *Journal of Sedimentary Petrology* 52(4): 1277-1282.
- \* **Stevenson, F.J.** 1982. Humus chemistry. Genesis, composition, reactions. John Wiley and Sons, Inc. New York, N.Y. 443 p.
- \* **Teuscher, H. y Adler, R.** 1979. El suelo y su fertilidad. C.E.C.S.A., México, D.F. 509 p.
- \* **Thyri, M.** 1992. Pedogenic Silifications: structures, micromorphology, mineralogy and their interpretation. *Terra* 10 (Número Especial: Suelos Volcánicos endurecidos): 46-59.
- \* **Thiry, M. and Millot, G.** 1987. Mineralogical forms of silica and their sequence of formation in silcretes. *Journal of Sedimentary Petrology* 57(2): 343-352.
- \* **Tisdall, J.M.** 1994. Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils. *Plant and Soil* 159: 115-121.
- \* **Tisdall, J.M. and Oades, J.M.** 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science* 33: 141-163.
- \* **Tovar, T.A.** 1987. Determinación del efecto de la aplicación de estiércol de bovino semiseco y fresco sobre el rendimiento de cebada en suelos erosionados. *In* J.F. Riu F. (ed.) *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural.* Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. pp. 157-170.
- \* **Trueba, C.A.** 1980. Tepetate and soil erosion in the Valley of Mexico. A Paper to be Submitted to the *Journal of Soil and Water Conservation.* 10 p.
- \* **Utomo, W.H. and Dexter, A.R.** 1982. Changes in soil aggregate water stability induced by wetting and drying cycles in non-saturated soil. *Journal of Soil Science* 33: 623-637.

- \* **Valdez, M.L.A.** 1970. Características morfológicas y mineralógicas de los suelos de tepetate de la cuenca de México. Tesis Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 190 p.
- \* **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 Licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 125p.
- \* **Verbeek, A.A., Mitchell, M.C. and Ure, A.M.** 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.
- \* **Villegas, S.M., Aguilera, H.N. y Flores, D.L.** 1978. Método simplificado de análisis para la clasificación granulométrica de los minerales del suelo. *Revista del Instituto de Geología. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.* 2(2): 188-193.
- \* **Wakatsuki, T. and Rasyidin, A.** 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.
- \* **Weinberger, P. and Yee, D.** 1984. The influence of nitrogen sources on root-mediated changes in substrate pH. *Canadian Journal Botany* 62: 161-162.
- \* **Williams, B.J.** 1972. Tepetate in Valley of Mexico. *Annals of the assn. of American Geography* 62(3): 618-623.
- \* **Williams, B.J.** 1992. "Tepetate" in 16th century and contemporary folk terminology, valley of Mexico. *Terra* 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos endurecidos): 483-493.
- \* **Williams, L.A., Parks, G.A. and Crerar, D.A.** 1985. Silica diagenesis I. Solubility controls. *Journal of Sedimentary Petrology* 55(3): 0301-0311.
- \* **Williams, L.A. and Crerar, D.A.** 1985. Silica diagenesis II. General mechanisms. *Journal of Sedimentary Petrology* 55: 312-321.
- \* **Wu, L., Vomocil, J.A. and Childs, S.W.** 1990. Pore size, particle size, aggregate size and water retention. *Soil Science Society American Journal*. 54: 952-956.
- \* **Zahonero, P., Navarro, H. y Toledo, A.** 1991. Análisis comparativo de cultivos en tepetate y en suelos no endurecidos. *In: Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.* pp. 119-121.
- \* **Zebrowski, C.** 1992. Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina. *Terra* 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 15-23.

## X. APENDICE

Tabla No. 17. Análisis de varianza para los tratamientos estudiados (Valores de F).

VARIABLES DE RESPUESTA		FACTORES <sup>1</sup>						C.V. (%)	
		A	B	AB	C	AC	BC		ABC
pH		38.22**	1248.07**	73.86**	0.46	1.8	11.98**	3.42**	1.34
MATERIA ORGANICA		71.33**	140.39**	15.58**	3.1	2.25*	12.95**	1.85*	22.74
GRANULOM.	Arcilla	8.47**	12.29**	2.60**	0.98	4.31**	4.91**	1.59*	23.72
DE FRAG. Y	Limo	12.16**	5.66**	1.84*	4.54*	4.40**	1.43	1.13	14.62
AGREGADOS	Arena	10.69**	6.24**	1.82*	3.8	4.61**	1.85	1.02	7.40
<20		19.97**	0.44	3.98**	182.76**	14.61**	2.3	2.92**	51.01
15-20		18.95**	6.44**	3.54**	369.46**	36.52**	18.22**	6.40**	33.04
10-15		15.33**	7.79**	4.65**	656.09**	23.78**	16.91**	3.18**	32.79
7-10		26.60**	15.57**	3.22**	482.22**	47.25**	8.54**	2.96**	19.59
AGREGADOS	5-7	2.24*	6.11**	1.91**	186.08**	1.18	0.63	1.54	60.92
EN	3-5	11.18**	7.18**	4.26**	827.23**	3.69**	3.65*	2.11**	23.31
SECO	2-3	11.43**	2.96	1.72*	651.35**	8.45**	0.66	1.11	29.80
1-2		8.41**	1.35	3.72**	463.30**	50.74**	2.26	4.78**	17.31
0.5-1		1.87*	3.39*	2.46**	963.11**	19.50**	0.01	2.51**	26.23
0.25-0.5		4.20**	13.42**	4.96**	1101.30**	30.43**	2.71	3.75**	26.74
<0.25		32.52**	1.32	2.98**	1020.33**	62.57**	3.29*	1.70*	28.13
>5		27.83**	2.46	2.05**	1699.16**	42.85**	24.63**	8.32**	28.02
3-5		2.16*	1.13	2.16**	502.66**	9.56**	2.56	4.72**	49.48
AGREGADOS	2-3	17.46**	6.17**	2.12**	662.18**	19.60**	5.36**	4.77**	31.66
ESTABLES	1-2	7.68**	3.77**	2.97**	1259.54**	9.20**	15.94**	6.26**	21.93
EN HUMEDO	0.5-1	8.71**	1.63	3.13**	981.63**	11.33**	6.83**	3.88**	27.11
0.25-0.5		3.60**	4.51*	2.87**	646.19**	11.34**	0.72	3.96**	33.45
<0.25		4.39**	4.01*	1.08	212.40**	20.73**	0.62	4.60**	31.47
BIOMASA									
Aérea		39.76**	111.05**	8.21**	0.73	2.14*	0.91	1.31	44.43
Radical		124.30**	226.40**	16.31**	5.39*	1.69	0.34	1.79*	24.7

<sup>1</sup> Factor A: Especies      Factor B: Tiempo      Factor C: Nivel de fracturación del tepetate

<sup>2</sup> \*Significativo al 0.05

\*\*Significativo al 0.01