



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**Cultivo de girasol, *Helianthus annuus L.*, en tepetate fragmentado  
adicionado con enmiendas orgánicas e inorgánicas.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**B I Ó L O G A**

**P R E S E N T A:**

**CAROLINA AVILÉS JUNCO**



**DIRECTOR DE TESIS:**

**DAVID FLORES ROMÁN**

**2013**



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.

## Hoja de datos del jurado

### 1. Datos del alumno.

Avilés  
Junco  
Carolina  
56 84 59 48  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Biología  
40601634-2

### 2. Datos del tutor

Dr.  
David  
Flores  
Román

### 3. Datos del sinodal 1.

Dra.  
Silke  
Cram  
Heydrich

### 4. Datos del sinodal 2.

Dra.  
Nathalie Roberte  
Chantal  
Cabirol

### 5. Datos del sinodal 3.

Dra.  
Martha Juana  
Martínez  
Gordillo

### 6. Datos del sinodal 4.

Dra.  
Amada Laura  
Reyes  
Ortigoza

### 3. Datos de la tesis.

Cultivo de girasol, *Helianthus annuus L.*, en tepetate fragmentado adicionado con enmiendas orgánicas e inorgánicas.

128 p.  
2013

## AGRADECIMIENTOS

*A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ciencias por haber contribuido de manera tan importante a mi educación y por brindarme un espacio para desarrollar libremente mis capacidades humanas. Sobretudo agradezco al pueblo de México que hace posible el mantenimiento de esta casa de estudios y que con su esfuerzo ha logrado sostener su gratuidad.*

*Al Departamento de Edafología del Instituto de Geología de la UNAM, que gracias a la atención y respaldo otorgado por los investigadores y trabajadores que en él laboran, hizo posible el desarrollo de este trabajo.*

*Al Dr. David Flores por todas sus atenciones, por su disposición a resolver las numerosas dudas que surgieron a lo largo de la elaboración de la tesis, por ser siempre tan accesible y sobre todo por su paciencia al guiar este trabajo.*

*A los miembros del Jurado: Dra. Silke Cram Heydrich, Dra. Nathalie Chantal Cabirol, Dra. Martha Juana Martínez y Dra. Amada Laura Reyes por su dedicación y esfuerzo en la revisión de este trabajo y por la labor formativa que desempeñaron a través de sus sugerencias y observaciones.*

*Al Laboratorio de Fertilidad de Suelos por las facilidades brindadas en la realización de los análisis. Al Biol. Arturo H. Atilano Alvarado “Arturitzin”, laboratorista y amigo, por su compañía, por hacerme reír tanto, por su apoyo y enseñanzas en el trabajo de laboratorio, en la búsqueda de información y por ser siempre un ameno y apasionado interlocutor de discusiones y dudas durante el desarrollo del trabajo escrito.*

*A Iris Suárez Quijada, responsable del Invernadero del Instituto de Geología de la UNAM, por las facilidades otorgadas en el uso de las instalaciones del invernadero y por su amable y pronta atención.*

*A la Dra. Blanca Prado por su gran apoyo y generosidad, por haberme abierto tantas puertas para mi desarrollo profesional y humano, por reafirmar con su alegría la muy necesaria humanidad en el trabajo académico.*

*Al proyecto CONACYT 99964 por el apoyo que me brindó, otorgándome una beca de titulación.*

*A todas y todos mis compañeros y amigos en el Instituto de Geología, sin los que esta tesis no hubiera sido posible: A la Dra. Lucy Mora por estar siempre al tanto de los avances y ofrecer incondicionalmente su apoyo en la resolución de dudas y en la revisión del trabajo, a Daniel Pinales que generosamente me ayudó en la búsqueda de información geográfica, a Mario Cayetano quien siempre me orientó en la resolución de problemas y me animó con su ejemplo a concluir este proceso, a la Dra. Olivia Zamora, a Sandy, a Lucero, a Montse, a las dos Marías, a Narce, a Sara y al “señor” Mario, por su amistad, apoyo y compañía.*

*A mi mamá, mi abuelita, mis tías y tíos, que hicieron posible mis estudios y mi vida con su inmenso cariño y apoyo.*

*A mis compañeras y compañeros, a El pregón y a los Jóvenes Ante la Emergencia, a los que les he aprendido la vida y la esperanza y sin los que este camino hubiera sido muy árido.*

*A mis amores: Xime, Jime y Pablo.*

**A**

***Mi familia***

***En especial a mi mamá***

## CONTENIDO

1. RESUMEN .....	1
2. INTRODUCCIÓN .....	3
3.1. Tepetates .....	5
3.1.1. Definición y caracterización .....	5
3.1.2. Tipos y génesis .....	5
3.1.3. Distribución .....	8
3.1.4 Limitantes para su uso agrícola y problemática asociada.....	9
3.1.5. Habilitación .....	11
3.2. Calidad del suelo .....	13
3.2.1. Indicadores físicos de la calidad del suelo .....	15
3.2.1.1. Estructura: agregación y estabilidad de agregados.....	15
3.2.2. Indicadores químicos de la calidad del suelo .....	21
3.2.2.1. El pH del suelo .....	21
3.2.2.2. Materia orgánica del suelo.....	22
3. 2.2.3. Capacidad de intercambio catiónico.....	24
3.2.2.4. Bases intercambiables.....	25
3.3. Mejoradores de la calidad del suelo .....	25
3.3.1. Enmiendas orgánicas: El estiércol.....	26
3.3.2. Fertilizantes químicos inorgánicos.....	29
3.4. Especie vegetal: Girasol ( <i>Helianthus annuus L.</i> ) .....	30
3.4.1. Clasificación botánica .....	30
3.4.2. Distribución geográfica .....	31
3.4.3. Morfología y fisiología.....	31
3.4.4. Centro de origen de las variedades domésticas y usos tradicionales.....	32
3.4.5. Ciclo de vida.....	34
3.4.6. Influencia de los factores ambientales en el desarrollo del cultivo .....	35
3.4.7. Cultivo de girasol para uso ornamental .....	37
3.4.8. Consideraciones para la elección del girasol a cultivar .....	38
4. ANTECEDENTES .....	39

5. OBJETIVO .....	41
6. HIPÓTESIS .....	42
7. ÁREA DE ESTUDIO .....	43
8. METODOLOGÍA.....	45
8.1. Diseño experimental .....	45
8.2. Desarrollo del experimento .....	47
8.3. Evaluación de propiedades físicas y químicas del tepetate .....	49
8.4. Evaluación de los componentes del rendimiento de las plantas de girasol .....	51
8.5. Análisis estadístico .....	52
9. DISCUSIÓN Y RESULTADOS .....	54
9.1. Análisis de las propiedades físicas del tepetate .....	54
9.1.1. Agregación o porcentaje de fragmentos por categorías de tamaño. ....	54
9.1.2. Estabilidad de agregados .....	60
9.2. Análisis de las propiedades químicas del tepetate.....	68
9.2.1. Potencial de hidrogeno (pH) en agua .....	68
9.2.2. Materia orgánica y relación C:N .....	72
9.2.3. Capacidad de intercambio catiónico.....	78
9.2.4. Bases intercambiables.....	80
9.2.4.1. Concentración de calcio.....	80
9.2.4.2. Concentración de magnesio.....	82
9.2.4.3. Concentración de sodio .....	84
9.2.4.4. Concentración de potasio .....	86
9.4.4. Porcentaje de saturación de bases.....	89
9.3. Evaluación de los componentes del rendimiento de <i>Helianthus annuus L.</i> .....	90
9.3.1. Diámetro del capítulo .....	91
9.3.2. Longitud promedio y número de flores liguladas por capítulo .....	94
9.3.3. Tiempo de vida en florero .....	97
9.3.4. Número de hojas.....	98
9.3.5. Diámetro del tallo .....	100
9.3.6. Altura de la planta.....	102
9.3.7. Peso seco y peso fresco .....	103

9.3.8. Longitud de raíz pivotante.....	105
9.3.9. Longitud promedio de las raíces secundarias.....	106
10. CONCLUSIONES.....	109
11. RECOMENDACIONES.....	111
12. LITERATURA CITADA.....	112
13. APÉNDICES.....	124

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Composición química de estiércoles.....	27
<b>Tabla 2:</b> Tasa de descomposición de estiércoles usados en la agricultura en México. ....	28
<b>Tabla 3:</b> Tratamientos establecidos.....	46
<b>Tabla 4:</b> Distribución del tamaño de fragmentos para los tratamientos establecidos.....	55
<b>Tabla 5:</b> Porcentaje promedio de fragmentos estables de tepetate por categorías de tamaño en los tratamientos establecidos.....	61
<b>Tabla 6:</b> Valores de pH en agua de los tratamientos establecidos, desviación estándar y significancia del análisis de comparación de medias.....	69
<b>Tabla 7:</b> Contenido de materia orgánica y relación C:N en los tratamientos establecidos.....	73
<b>Tabla 8:</b> Capacidad de intercambio catiónico en los tratamientos establecidos.....	79
<b>Tabla 9:</b> Concentración calcio en los tratamientos establecidos.....	81
<b>Tabla 10:</b> Concentración de magnesio en los tratamientos establecidos.....	83
<b>Tabla 11:</b> Concentración de sodio en los tratamientos establecidos.....	84
<b>Tabla 12:</b> Concentración de potasio en los tratamientos establecidos.....	87
<b>Tablas 13:</b> Promedios de los componentes de rendimiento del girasol, desviación estándar y significancia del análisis estadístico, para los seis tratamientos que involucraron la presencia de planta.....	90
<b>Tabla 14:</b> Promedios de los componentes de rendimiento del girasol, desviación estándar y significancia del análisis estadístico, para los seis tratamientos que involucraron la presencia de planta.....	91

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Representación cartográfica de la distribución de tepetates en la república mexicana (Flores <i>et al.</i> , 1991). .....	9
<b>Figura 2.</b> Distribución al azar de los 36 tratamientos establecidos en los bloques 1 y 2 del invernadero del Instituto de Geología, UNAM. ....	46
<b>Figura 3. A.</b> Germinación de las semillas de girasol. <b>B.</b> Plántulas con 2 a 3 pares de hojas desarrolladas. ....	48
<b>Figura 4.</b> Distribución porcentual promedio de fragmentos de tepetate por categorías de tamaño. ....	56
<b>Figura 5.</b> Distribución porcentual promedio de fragmentos de tepetate por categorías de tamaño en los tratamientos testigo (sin planta de girasol). ....	56
<b>Figura 6.</b> Distribución porcentual promedio de fragmentos de tepetate por categorías de tamaño en los tratamientos con plata de girasol comparados con el testigo absoluto. ....	57
<b>Figura 7.</b> Distribución porcentual promedio de fragmentos estables de tepetate. ....	62
<b>Figura 8.</b> Distribución porcentual promedio de fragmentos estables en los tratamientos con plata y en el testigo absoluto. ....	62
<b>Figura 9.</b> Distribución porcentual promedio de fragmentos estables en los tratamientos con estiércol y en el testigo absoluto. ....	63
<b>Figura 10.</b> Promedio del valor de pH para las tres repeticiones de cada uno de los 12 tratamientos y desviación estandar asociada. ....	70
<b>Figura 11.</b> Porcentaje de MO para las tres repeticiones de cada uno de los 12 tratamientos y desviación estandar asociada. ....	73
<b>Figura 12.</b> Promedio la relación C:N para las tres repeticiones de cada uno de los 12 tratamientos y desviación estandar asociada. ....	76
<b>Figura 13.</b> Promedio de la capacidad de intercambio catiónico para las tres repeticiones de cada uno de los 12 tratamientos y desviación estándar asociada. ....	80
<b>Figura 14.</b> Promedio de la concentración de calcio para las tres repeticiones de cada uno de los 12 tratamientos y desviación estandar asociada. ....	82

<b>Figura 15.</b> Promedio de la concentración de magnesio para las tres repeticiones de cada uno de los 12 tratamientos y desviación estandar asociada.....	84
<b>Figura 16.</b> Promedio de la concentración de sodio para las tres repeticiones de cada uno de los 12 tratamientos y desviación estandar asociada.....	85
<b>Figura 17.</b> Promedio de la concentración de potasio para las tres repeticiones de cada uno de los 12 tratamientos y desviación estandar asociada.....	89
<b>Figura 18.</b> Promedio del diámetro del capítulo para las tres repeticiones de cada uno de los seis tratamientos que involucraron la presencia de planta y desviación estandar asociada.....	91
<b>Figura 19. A y B.</b> se observan síntomas de deficiencia de fósforo en los tratamientos P-I y P-II respectivamente a los 37 días de la emergencia de las plántulas. C. a manera de contraste, se observa la inflorescencia del tratamiento PEDDA-III, adicionado con estiércol y la dosis alta de fertilización química. ....	93
<b>Figura 20.</b> Longitud promedio de las flores liguladas y desviación estandar asociada.....	94
<b>Figura 21.</b> Número de flores liguladas promedio y desviación estandar asociada.....	95
<b>Figura 22.</b> Promedio del tiempo de vida en florero y desviación estandar asociada.....	97
<b>Figura 23.</b> Promedio del número de hojas y desviación estandar asociada.....	98
<b>Figura 24.</b> Deficiencias nutricionales (clorosis y necrosis de las hojas más viejas) en los tratamientos P-I, P-II y PDB-III respectivamente a los 37 días de la emergencia de las plántulas.....	100
<b>Figura 25.</b> Tejidos necróticos entre las nervaduras mayores, síntomas de deficiencia de fósforo y nitrógeno en los tratamientos P-II y PDA-III respectivamente a los 37 días de la emergencia de las plántulas. ....	100
<b>Figura 26.</b> Promedio del diametro del tallo y desviación estandar asociada.....	100
<b>Figura 27.</b> Promedio de la altura de la planta (cm) y desviación estandar asociada. ....	102
<b>Figura 28.</b> Promedio del peso fresco de la planta (g) y desviación estándar asociada.....	103
<b>Figura 29.</b> Promedio del peso seco de la planta (g) y desviación estándar asociada. ....	103
<b>Figura 30.</b> Promedio de la longitud de la raíz pivotante (cm) y desviación estándar asociada. ....	105
<b>Figura 31</b> Promedio de la longitud de las raíces secundarias (cm) y desviación estándar asociada. ....	106

<b>Figura 32.</b> Contraste del sistema radical del girasol en los tratamientos PDA <b>(A)</b> y PEDA <b>(B)</b> .....	108
<b>Figura 33.</b> Repeticiones del tratamiento P.....	127
<b>Figura 34.</b> Repeticiones del tratamiento PDB.....	127
<b>Figura 35.</b> Repeticiones del tratamiento PDA.....	127
<b>Figura 36.</b> Repeticiones del tratamiento PE.....	127
<b>Figura 37.</b> Repeticiones del tratamiento PEDB.....	128
<b>Figura 38.</b> Repeticiones del tratamiento PEDA.....	128

## 1. RESUMEN

En la meseta central mexicana, el manejo inadecuado de los suelos agrícolas en laderas y lomeríos, ha provocado su erosión y el afloramiento de capas endurecidas de origen volcánico denominadas tepetates. Estas capas poseen una estructura masiva y una fertilidad reducida, que impiden el desarrollo de las especies vegetales, limitando el uso agrícola y forestal de los terrenos donde afloran. En México, ésta problemática ha contribuido al abandono de los terrenos agrícolas y a la reducción de la superficie cultivable, lo que resulta preocupante ante la necesidad de satisfacer las necesidades alimentarias de una población creciente, así como de detener y revertir los procesos de degradación del suelo.

Por lo anterior, la habilitación e incorporación de los tepetates al uso agrícola constituye una tarea importante que motiva el presente trabajo. El estudio consistió en la evaluación de los cambios ocurridos en las propiedades físicas (agregación y estabilidad de agregados) y químicas (pH, MO, CIC, bases intercambiables y porcentaje de saturación de bases) de muestras de tepetate fragmentado, por efecto del cultivo de girasol ornamental, *Helianthus annuus L.* y la adición de enmiendas orgánicas (estiércol) e inorgánicas (fertilizante químico). Asimismo se evaluaron los componentes del rendimiento de las plantas de girasol para determinar la viabilidad de su cultivo como flor de corte en tepetate fragmentado.

El tepetate se recolectó en el municipio de Tetela del Volcán, Morelos, se roturó hasta obtener fragmentos de 2 a 10 mm y se colocó en macetas de 5 kg, sin perforaciones. Se realizó un diseño experimental trifactorial 2x2x3, que involucró los factores planta, estiércol, y fertilizante químico en dos dosis. En total se establecieron 12 tratamientos con tres repeticiones cada uno, que se colocaron en las macetas con tepetate, obteniéndose un total de 36 unidades experimentales. El experimento se mantuvo durante 5 meses en el invernadero del Instituto de Geología de la UNAM. Los resultados se analizaron estadísticamente mediante una prueba de comparación de medias ANOVA y su significancia se determinó a través de la prueba de Tukey.

El efecto del sistema radical de *Helianthus annuus* aunado a la influencia de los ciclos de humectación desecación, parece haber promovido la disgregación de los fragmentos de

tepetate en la categoría de 10 a 5 mm y el incremento los porcentajes de agregación en el intervalo de 2 a 0.25 mm, lo que nos habla de una tendencia a la disgregación de los fragmentos de mayor tamaño. Asimismo se observó la formación de agregados mayores a 10 mm probablemente asociada a los efectos de los ciclos de humectación-desección, la planta y el estiércol. Las plantas con sistemas radicales densos parecen haber provocado la desestabilización de los fragmentos mayores a 5 mm y el incremento de los porcentajes de fragmentos estables en el intervalo de 0.5 a 3 mm. El estiércol provocó el incremento del porcentaje de MO promoviendo la fertilidad del tepetate y probablemente favoreció la estabilización de los fragmentos mayores a 5 mm; asimismo tuvo una influencia positiva en el desarrollo de los caracteres reproductivos del girasol para el uso de esta planta con fines ornamentales. La planta contribuyó al incremento de la relación C:N de la MO. El fertilizante produjo una disminución del pH en los tratamientos donde no se adicionó estiércol, sin embargo éste parámetro se mantuvo en un rango adecuado para la nutrición vegetal. La CIC y el contenido de bases intercambiables se mantuvieron en rangos óptimos para la nutrición minera del girasol. El fertilizante químico no produjo efectos directos significativos en los componentes del rendimiento del girasol.

En conclusión, las condiciones de manejo implementadas resultaron óptimas para el cultivo de girasol ornamental en tepetate fragmentado. No se observaron cambios significativos en las propiedades físicas del tepetate ya que éstos requieren de periodos de tiempo más prolongados para ocurrir. En cuanto a las propiedades químicas, la adición de estiércol produjo un efecto sustancial en la mejora de la fertilidad del tepetate.

## 2. INTRODUCCIÓN

En la meseta central mexicana, la presión urbana sobre suelos agrícolas ha provocado el desplazamiento de las actividades agropecuarias a zonas de lomeríos y terrenos en ladera, ubicadas en piedemontes volcánicos. El inadecuado manejo de estos terrenos, asociado a la deforestación, el pastoreo y el laboreo intensivo, ha propiciado la erosión del suelo superficial y el afloramiento de tepetates (Arias, 1992; Pimentel, 1992).

Los tepetates son capas u horizontes endurecidos por compactación ó cementación que se forman por la interacción de procesos geológicos y pedogenéticos a partir de materiales de origen volcánico. Su alta densidad, baja conductividad hidráulica, baja retención de humedad y baja fertilidad constituyen limitantes para el desarrollo de la vegetación natural y cultivada. Por ello su presencia y afloramiento representan un grave problema, ya que restringen la capacidad natural del suelo para funcionar dentro de los límites del ecosistema, así como su potencial productivo en el uso agrícola y forestal (Zebrowski, 1992; Arias, 1992; Flores, 1991).

La problemática de afloramiento de los tepetates, se enmarca en un fenómeno mundial de deterioro de los suelos, que incluye procesos como la erosión eólica e hídrica, la acidificación, la pérdida de materia orgánica, la salinización, la urbanización y la contaminación. Dicho deterioro amenaza con reducir sus imprescindibles funciones en el mantenimiento de los ecosistemas, afectando de manera permanente el presente y futuro de las poblaciones humanas (rurales y urbanas) y su capacidad para producir alimentos (Etchevers, 1999).

En México, la presencia de tepetates, entre otros procesos de deterioro y degradación de los suelos, han llevado a que solo una cuarta parte del territorio nacional pueda ser utilizado para la agricultura y la ganadería (Gama, 2007). A esto se suman los abusos cometidos por la agricultura empresarial, que provocan la pérdida de aproximadamente 15 kg de suelo por cada kg de alimento producido, por lo que se estima que para el periodo que va del año 2014 al 2021 la presión humana sobre la superficie cultivable será de 1500 m<sup>2</sup> por habitante (Etchevers, 1999).

Lo anterior resulta preocupante ante la creciente población y dependencia del país en materia alimentaria; por lo que la habilitación e incorporación de los tepetates al uso agrícola y forestal constituyen tareas prioritarias (Arias, 1992). En este sentido se han realizado numerosos esfuerzos, principalmente en los estados de Tlaxcala, Morelos y Estado de México, mediante la implementación de prácticas de roturación, la construcción de terrazas, zanjas y bordos, la aplicación de enmiendas orgánicas e inorgánicas y el establecimiento de especies vegetales. Esto con la finalidad de modificar y mejorar las propiedades físicas y químicas del tepetate, principalmente su estructura masiva y su baja fertilidad (Flores, 2011; Velázquez, 2002; Hidalgo, 1999; Pimentel, 1992).

El presente trabajo pretende ser una contribución a esta ardua tarea, empleando un cultivar criollo de girasol ornamental, *Helianthus annuus L.*, así como la aplicación de enmiendas orgánicas e inorgánicas, para modificar las propiedades físicas y químicas de tepetate fragmentado, de modo que sea posible cumplir con dos objetivos; el análisis de las transformaciones ocurridas en el tepetate por efecto de la adición de enmiendas y la siembra de una planta de ciclo de vida corto, en un periodo de 5 meses, como una propuesta de habilitación para su uso productivo, y la evaluación del crecimiento y desarrollo de las plantas de girasol sembradas en tepetate, para la obtención de flor de corte.

Tomando en cuenta que la estructura masiva y la infertilidad de los tepetates, son las principales limitantes para su uso agrícola, se emplearán diversos indicadores de calidad, para identificar los cambios ocurridos en dichas propiedades al término del experimento.

El interés de utilizar una planta ornamental, como el girasol, parte del potencial de la actividad hortícola ornamental en México, además de que la mayor producción nacional de flores se concentra en el centro del país, del mismo modo que ocurre con las zonas erosionadas con afloramiento de tepetates.

### 3. REVISIÓN DE LITERATURA

#### 3.1. Tepetates

##### 3.1.1. Definición y caracterización

En México la palabra tepetate se deriva del náhuatl tepélatl ó “petate de piedra”, de las raíces tetl, que significa piedra y pétatl que significa petate ó cama. El término se refiere a los horizontes ó capas endurecidas por compactación ó cementación, que se forman por procesos geológicos y pedogenéticos a partir de materiales piroclásticos (de origen volcánico) depositados en forma de lluvias o flujos (Gama *et al.*, 2007; Arias, 1992; Zebrowski, 1992; Flores *et al.*, 1991).

Los tepetates son duros cuando están húmedos, y muy duros cuando están secos, presentan una densidad aparente elevada (de 1.7 a 1.9 Mg m<sup>-3</sup>) debida a su alto grado de compactación ó cementación. Los tepetates de tipo fragipán tienen una dureza menor a 10 kg/cm<sup>2</sup> (Gama *et al.*, 2007; Flores *et al.*, 1992) y los de tipo duripán mayor a 25 kg/cm<sup>2</sup>, (Flores *et al.*, 1996). Presentan baja porosidad (de 13 a 24%) y baja conductividad hidráulica (5.4 x10<sup>-4</sup> hasta 130 x 10<sup>-4</sup> cm/h) (Gama *et al.*, 2007).

Sus diferentes variantes poseen una matriz compuesta por arena, limo y contenidos variables de arcilla, su composición mineralógica puede ser rica en cationes intercambiables. Sin embargo poseen bajas concentraciones de nitrógeno, fósforo y materia orgánica (MO), lo que les confiere una fertilidad natural reducida (Gama *et al.*, 2007; Arias, 1992; Zembrowski, 1992; Flores *et al.*, 1991).

##### 3.1.2. Tipos y génesis

De acuerdo al grado de cementación y al tipo de agente cementante, se asignan a las capas endurecidas diferentes nombres en México:

Cuando son cementadas por SiO<sub>2</sub> se conocen como duripanes; presentan coloraciones claras, blancas o grises, su estructura puede ser masiva, laminar o prismática gruesa, mantienen su

estabilidad estructural al contacto prolongado con agua, presentan baja porosidad, pueden tener poros de diámetro reducido, discontinuos y parcialmente cerrados, que impiden la penetración de raíces (Gama *et al.*, 2007; Flores *et al.*, 1996, 1991).

Cuando los cementantes son carbonatos y sulfatos de calcio, se denominan respectivamente petrocálcicos y petrogípsicos, ambos presentan colores blancos. Los sulfatos y carbonatos se acumulan en los horizontes en proceso de cementación como cubiertas delgadas sobre la superficie de los agregados y como nódulos ó cristales (Flores *et al.*, 1991).

Cuando los cementantes son sesquióxidos de aluminio y fierro se denominan petroplintitas y muestran coloraciones de amarillo muy claro a rojo intenso; se forman por la segregación de fierro dentro del perfil de suelo, la cual está asociada a la presencia de condiciones alternantes de oxido-reducción, producidas por la presencia de una lámina de agua fluctuante (Flores *et al.*, 1991).

Cuando son cementadas por diversas sales se llaman petrosálicos (Flores *et al.*, 1991).

Por último, los fragipanes son capas compactadas y frágiles que presentan una alta densidad aparente y se encuentran cementadas débilmente, razón por la cual colapsan su estructura al contacto prolongado con el agua (Gama *et al.*, 2007; Flores *et al.*, 1996, 1991).

Actualmente, en México, y con base en el III Simposio Internacional sobre suelos volcánicos endurecidos que se realizó en Quito, Ecuador en 1996, se llaman tepetates únicamente a las capas endurecidas cementadas o compactadas de origen volcánico (fragipanes y duripanes). Es decir, se excluyen del término las de origen sedimentario y aquellas formadas en climas cálidos húmedos de la zona tropical.

Aunque los tepetates en la zona central de México, son variados en cuanto a coloración, grosor, estructura y dureza, tienen en común los factores formadores que interactúan en su génesis. Su material parental lo constituyen los sedimentos de toba volcánica de composición andesítica depositados en el pleistoceno (Miehlich, 1992). Se forman en

climas principalmente de tipo semiárido y húmedo (este último con régimen de humedad y temperatura ústico/isomésico, con 6 a 7 meses de humedad y ústico/isomésico a isofrígido) en el que tienden a formar suelos después de un proceso de intemperismo (Gama *et al.*, 2007; Miehllich, 1992). En general se localizan en altitudes comprendidas entre 1800 y 2800 msnm y en piedemontes susceptibles a la erosión, ya sea aflorando en la superficie, cubiertos por pedisumentos ó cubiertos por una capa de suelo bien desarrollado (Gama *et al.*, 2007).

El proceso de génesis de estas capas endurecidas, es aún motivo de polémicas discusiones entre los investigadores que las estudian; algunos explican su formación como resultado de procesos geológicos, mientras que otros la atribuyen a procesos pedológicos o a una combinación de ambos.

Los procesos geológicos se resumen en dos mecanismos principales: a) la deposición de materiales piroclásticos en forma de flujos (cineritas, tobas y brechas), que se endurecen por enfriamiento al momento del depósito y b) la deposición de materiales piroclásticos en forma de lluvias aéreas (tefras) que se endurecen con posterioridad a causa de procesos diagenéticos, como son la consolidación-compactación simple y la hidroconsolidación (Gama *et al.*, 2007; Acevedo, 1998; Zembrowski, 1992).

Los procesos pedogenéticos consisten en la cementación y endurecimiento gradual de los materiales piroclásticos por efecto de agentes cementantes amorfos, como óxidos de silicio, aluminio y fierro, y en menor grado arcillas, como la caolinita y la montmorillonita, enriquecidas con ópalo-A; todos ellos producto del intemperismo secundario de cenizas y materiales volcánicos, ricos en feldespato y mica, que sobreyacen a horizontes endurecidos en formación (Gama *et al.*, 2007; Flores *et al.*, 1992). El fenómeno de lixiviación y acumulación de sílice amorfa en los intersticios de horizontes endurecidos en formación, ocurre principalmente en zonas templadas y semiáridas con periodos de lluvia alternantes (Flores *et al.*, 1992).

Los procesos de génesis combinados, diagenéticos-pedológicos, implican la formación de tepetate a partir de cenizas volcánicas depositadas *in situ* o retrabajadas que se consolidan por procesos geológicos como la hidroconsolidación, y pedogenéticos como la argilización y la silificación (Gama *et al.*, 2007).

Flores y colaboradores (1992) plantean una hipótesis de formación de tepetates tipo fragipan en el estado de Morelos, a partir de la compactación de una toba formada en suelos de origen volcánico, por el peso de la nieve depositada en un evento catastrófico (la glaciación Wisconsiniana). Los autores suponen que antes de su compactación, la toba se habría formado por la consolidación y cementación de depósitos clásticos de material volcánico; procesos promovidos por la presencia de sílice, derivada de la meteorización lenta y prolongada de feldespatos y minerales ferromagnesianos y la meteorización rápida de vidrio volcánico y materiales amorfos. Asimismo, mencionan que la compactación pudo haberse visto afectada o potenciada por procesos de expansión y contracción de arcillas, principalmente montmorillonita.

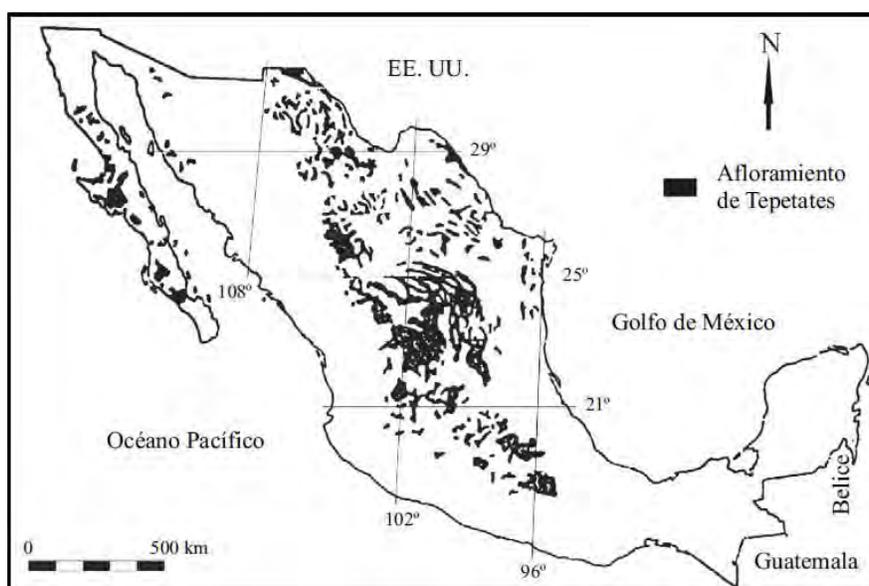
Los mismos autores, en 1996, proponen una hipótesis de formación de tepetates tipo duripán en el estado de Morelos: parten de la existencia de un depósito de toba andesítica, cubierta por un suelo enriquecido con piroclastos procedentes de erupciones volcánicas subsecuentes. Los compuestos de sílice derivados del intemperismo de los piroclastos y arcillas finas se habrían lixiviado, transportándose hacia el fondo del perfil, en los periodos de lluvia, alcanzando el depósito de toba. Al finalizar las lluvias, la sílice se habría precipitado entre las partículas piroclásticas, actuando como un cementante y posteriormente se habría enriquecido con arcillas de neoformación e iluviación.

### **3.1.3. Distribución**

En México, las capas endurecidas cubren un área equivalente al 30% del territorio nacional; la mayoría se localizan en el altiplano, entre los 1,800 y 2,900 msnm., en regiones de clima subhúmedo y semiárido, con una estación invernal seca, un régimen de humedad ústico-údic y una pluviometría anual inferior a los 800-900 mm; las capas endurecidas, ricas en carbonato de calcio, se localizan en zonas con precipitación inferior a 650-700 mm. Debido

a que las condiciones climáticas en la altiplanicie mexicana son predominantemente áridas y semiáridas, las capas más abundantes son las petrocálcicas y petrogípsicas (cementadas con  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{CaSO}_4$ ) seguidas de los duripanes (cementados con  $\text{SiO}_4$ ) (Acevedo, 1998; Zebrowski 1992; Flores *et al.*, 1991).

Los tepetates cubren el 27% de la superficie del Eje Neovolcánico Transmexicano, que abarca los Estados de Jalisco, Nayarit, Colima, Michoacán, Estado de México, Distrito Federal, Hidalgo, Querétaro, Puebla, Veracruz y Morelos, lo que corresponde a un área total de  $30,700 \text{ km}^2$  (Zebrowski, 1992), donde también se concentra la mayor parte de la población y el uso agrícola predominante es la agricultura temporal (INF, 2000; Arias, 1992).



**Figura 1.** Representación cartográfica de la distribución de tepetates en la república mexicana (Flores *et al.*, 1991).

### 3.1.4 Limitantes para su uso agrícola y problemática asociada

Debido a sus características físicas y químicas, los tepetates muestran una serie de limitantes para el desarrollo agrícola y forestal, las de mayor importancia son: su dureza, que impide el desarrollo del sistema radical de las plantas, limitando su potencial de crecimiento, además de dificultar las labores agrícolas y su mecanización; su escasa

porosidad y baja conductividad hidráulica, debidas a su alta densidad, lo que involucra una baja disponibilidad de agua para las plantas, así como un alto potencial de escurrimiento; su infertilidad, debida a la ausencia de MO, fósforo y nitrógeno, y por último su susceptibilidad a la erosión hídrica, asociada a su escasa porosidad (Arias, 1992).

La presión urbana sobre suelos cultivados en la altiplanicie mexicana, ha desplazado las actividades agrícolas a terrenos con suelos someros y susceptibles a erosionarse (Arias, 1992; Pimentel, 1992). Prácticas como la deforestación, el pastoreo y el laboreo intensivo, además de fenómenos naturales tales como incendios forestales y lluvias torrenciales, han provocado el aceleramiento de los procesos erosivos en estos terrenos, la pérdida de la capa arable y el afloramiento de los tepetates. En estas condiciones, la vegetación natural y cultivada encuentran condiciones difíciles para prosperar, lo que deriva en una baja productividad agrícola y en el abandono de los terrenos (Pimentel, 1992; Navarro *et al.*, 1998).

El afloramiento de tepetates es una forma de degradación física de los suelos, inducida por la erosión. Así mismo la formación de las capas endurecidas es indicativa de la degradación física del suelo, entendiéndose por ésta a todos aquellos procesos que provocan efectos adversos en las propiedades físicas del mismo, como la reducción de la porosidad y el deterioro de las relaciones aire-agua. Entre dichos procesos se encuentran: la compactación, el sellado y encostramiento, la consolidación, el exceso de humedad y la anaerobiosis (López, 2002).

De acuerdo con FAO-PNUMA (1980) citado por Gama y colaboradores (2007), los factores que provocan la degradación física de los suelos y la formación posterior de tepetates pueden ser naturales (escasez ó torrencialidad de las lluvias, consolidación, compactación y cementación de los suelos que propician alteraciones en la cubierta vegetal y en la dinámica de la biota del suelo) y antrópicos o tecnogénicos (como la deforestación, la sobreexplotación de la vegetación, el sobrepastoreo que genera compactación del suelo por carga confinada y las actividades industriales y urbanizadoras).

Los eventos de degradación que conducen a la formación de tepetates en los suelos, se pueden resumir en los siguientes: deterioro y pérdida del horizonte superficial a causa de la erosión; exposición de horizontes subyacentes, que por procesos de humectación y desecación reiterados se consolidan ó compactan, lo que disminuye su porosidad e incrementa su densidad y dureza; y finalmente la cementación de los horizontes compactados por la precipitación de lixiviados que contienen materiales cementantes (Gama *et al.*, 2007).

Lo anterior hace notar que las medidas tomadas para resolver la problemática asociada a las capas endurecidas deben darse en dos sentidos; la prevención de la degradación de los suelos con horizontes tepetatosos subyacentes o en proceso de formación, realizando un manejo adecuado de los terrenos en ladera para la producción agrícola, pecuaria y forestal; y por otro lado, el desarrollo de prácticas de habilitación de los tepetates para su uso agrícola y forestal, en caso de haber aflorado a la superficie.

### **3.1.5. Habilidad**

Como se ha visto, en México, las zonas erosionadas con afloramiento de tepetates ocupan una superficie considerable y densamente poblada; así mismo el crecimiento de la población en centros urbanos y rurales exige la expansión de la frontera agrícola para contrarrestar la dependencia externa del país en materia alimentaria y hace necesario el fortalecimiento de los esquemas de producción de subsistencia en las comunidades rurales, frente a la cada vez mayor inaccesibilidad a los alimentos y al control de su producción. Por estas razones, la habilitación y reincorporación de los tepetates al proceso productivo agrícola y forestal, se hacen prioritarias (Arias, 1992; Zebrowski, 1992). Además, la habilitación de estas capas endurecidas puede contribuir a retener una mayor proporción de habitantes en sus zonas de origen, que ante la falta y empobrecimiento de sus tierras de labor se ven obligados a migrar hacia los polos urbanos (principalmente las ciudades de México, Puebla, Tlaxcala y Cuernavaca) (Etchevers *et al.*, 1998).

Desde hace cientos de años, algunos pueblos mesoamericanos asentados en la parte central del país, desarrollaron técnicas para la reincorporación de zonas erosionadas. De modo que

los tepetates han sido utilizados con fines productivos desde tiempos prehispánicos. Hace más de 100 años, los tlaxcaltecas quebraban el tepetate en época de lluvias, una vez fracturado, lo fertilizaban a través de la incorporación de ceniza de hojas de maguey, posteriormente sembraban haba y frijol ayocote, que funcionaban como abonos verdes y en caso de que fuera posible utilizaban estiércol de los animales domésticos para enriquecerlo. Al año siguiente podían sembrar maíz (Hernández, 1987).

Debido a las limitantes físicas que presenta el tepetate para el laboreo, su recuperación es un proceso costoso. Las técnicas implementadas para la habilitación de tepetates involucran, de manera general, la roturación del material por métodos manuales y mecánicos (subsoleo), la construcción de terrazas, zanjas y bordos para reducir la erosión hídrica en terrenos en ladera; la aplicación de enmiendas (fertilizantes, residuos de cosecha, compostas y estiércoles); y la reforestación o cultivo de plantas que contribuyan a mejorar sus propiedades físicas y químicas (estructura, porosidad, retención de humedad, conductividad hidráulica, contenido de N y P) y a la formación de suelo (Arias, 1992; Zebrowski, 1992).

La primera acción de carácter técnico en la habilitación de los tepetates, es el mejoramiento de sus propiedades físicas, esto se logra mediante dos procesos: la roturación del material y la aplicación de enmiendas que favorezcan la formación de una estructura.

La roturación del tepetate se lleva a cabo por técnicas manuales o mecánicas, obteniéndose partículas lo suficientemente finas como para permitir la emergencia de las plantas, y lo suficientemente gruesas como para evitar su asfixia ( $10 < 0.25$  mm). Este proceso por sí solo no garantiza la habilitación de los tepetates para el cultivo, pues los fragmentos pueden ser recompactados o erosionado por efecto de las fuerzas de impacto y rompimiento, producidas por las gotas de lluvia y el laboreo. Además, las partículas finas que se producen durante la desintegración del tepetate pueden obstruir los espacios libres entre los fragmentos de mayor tamaño, reduciendo la porosidad del material fragmentado y favoreciendo nuevamente la cementación (Velázquez, 2002).

Por lo mencionado anteriormente, el proceso de habilitación consiste también en promover la formación de una estructura constituida por agregados, para evitar la recompactación. Esto se logra mediante la adición de materia orgánica en forma de abonos orgánicos (estiércoles, compostas y residuos de cosecha) y la siembra de especies vegetales en el material roturado, preferentemente en esquemas de rotación de cultivos. Los productos metabólicos orgánicos derivados de la descomposición de los abonos y los exudados radicales de las plantas, contribuyen a la formación de agregados y a la estructuración del tepetate, que a su vez favorece la acumulación de reservas hídricas y el desarrollo de un sustrato fácil de explorar para las raíces de las plantas (Etchevers *et al.*, 1998; Pimentel, 1992).

La segunda acción en la habilitación de estas capas endurecidas es la mejora de aquellas propiedades químicas que representan un impedimento para el desarrollo de los cultivos, principalmente la carencia de MO y la nula disponibilidad de nitrógeno y fósforo. Esto se logra también, mediante la adición de enmiendas orgánicas y a través de la aplicación de fertilizantes inorgánicos. Los productos resultantes de la mineralización de la materia orgánica aportada en las enmiendas (amonio, nitratos, sulfatos y fosfatos) constituyen una fuente de abastecimiento nutrimental importantes para los cultivos y los microorganismos del suelo (Etchevers *et al.*, 1998).

### **3.2. Calidad del suelo**

Con la finalidad de dar un uso apropiado a los suelos, que permita satisfacer las necesidades humanas y el funcionamiento adecuado de los ecosistemas, así como en el afán de desarrollar estrategias de prevención, diagnóstico y reversión del proceso de degradación de los suelos, se han desarrollado diversos criterios e indicadores que permiten evaluar su estado de “salud”, o dicho en términos formales, su calidad (Etchevers, 1999).

La calidad edáfica se puede definir como la capacidad de una clase específica de suelo para funcionar adecuadamente y de manera sostenida dentro de los límites de un ecosistema natural o alterado; es decir, para aceptar, almacenar y reciclar agua, nutrientes y energía, además de sostener la salud, la productividad y el hábitat de plantas, animales y seres

humanos. Esta definición, sintetizada por la Soil Science Society of America, recupera la multifuncionalidad del suelo y no sólo su aptitud para desempeñar una función con fines específicos, por lo que se aproxima más al concepto de “salud del suelo”, el cual considera a éste como un sistema dinámico, cuyas funciones están íntimamente relacionadas con la biota y que requiere de un manejo adecuado para su conservación (Flores, 2006; Karlen *et al.*, 1997).

Para evaluar la calidad de los suelos, se han desarrollado herramientas fáciles de generar, lógicas y replicables, denominadas indicadores, que son aplicadas a diferentes escalas o niveles de interés (global, nacional, regional y de sitio) y que aportan datos útiles, tanto en el monitoreo y planificación para mejorar la calidad ambiental, como en la selección de prácticas de manejo que mantengan y transformen de manera favorable la salud de los suelos (Etchevers, 1999).

Las propiedades de los suelos, que se han definido y utilizado ampliamente como indicadores de calidad pueden ser de carácter físico, químico o biológico. Se han incluido dentro de los indicadores físicos, aquellas propiedades que representan limitantes para el crecimiento de las plantas y que están relacionadas con la distribución de las partículas y poros del suelo, como la densidad aparente, capacidad de retención de agua, tamaño y estabilidad de agregados, conductividad hidráulica, presencia de costras superficiales, compactación y profundidad del suelo superficial. Como indicadores químicos se han designado a las propiedades que influyen en la calidad del agua, en la capacidad amortiguadora del suelo y en la disponibilidad de nutrimentos para las plantas y microorganismos edáficos, entre ellos se encuentran: el pH, el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, la concentración de nutrimentos y contaminantes, la salinidad, la conductividad eléctrica, la estructura y función de las sustancias húmicas. Por último, los indicadores biológicos son aquellos que reflejan la actividad de los seres vivos del suelo, como por ejemplo: la biomasa microbiana, la tasa de respiración, las tasas de descomposición de residuos, la actividad enzimática y la presencia de productos y subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos (Pajares, 2010; Masciandro y Ceccanti, 1999).

Cuando se habla de calidad o salud del suelo en el contexto de su uso para la producción agrícola, se puede afirmar que “un suelo sano es un suelo fértil”, entendiéndose por fertilidad a “la capacidad del suelo para proporcionar los nutrimentos necesarios, en las cantidades y balance adecuado para un buen crecimiento de las plantas” (Flores, 2006).

Velázquez (2002), con base en el conocimiento de los factores que limitan la calidad y potencial productivo de los tepetates, principalmente su infertilidad y su estructura masiva, propone el empleo de indicadores específicos en el monitoreo y control de los cambios sufridos por el tepetate durante los procesos de habilitación. Dichos indicadores se pueden dividir en dos grupos: los que reflejan cambios en su estructura (distribución y estabilidad de los agregados o fragmentos) y aquellos que reflejan su condición nutrimental o fertilidad (el pH, el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, el contenido de bases intercambiables y el porcentaje de saturación de bases).

### **3.2.1. Indicadores físicos de la calidad del suelo**

#### **3.2.1.1. Estructura: agregación y estabilidad de agregados**

La estructura es una propiedad dinámica del suelo que se refiere al arreglo o distribución de tamaños de sus partículas y poros. Es un término muy amplio, que incluye la agregación de las partículas primarias de suelo para formar partículas compuestas ó agregados, su estabilización y resiliencia (Agners, 1998). La estructura del suelo está íntimamente ligada a su composición mineralógica, textura y contenido de materia orgánica (Six, 2004). Así mismo, tiene una influencia muy importante en el balance hídrico y térmico del suelo, en su aireación, en la actividad de las comunidades microbianas que lo habitan, en la adsorción y desorción de nutrimentos y por lo tanto en su disponibilidad para las plantas, en la protección física de la materia orgánica, en el potencial de rendimiento y erodabilidad; por todo ello representa un buen indicador de la complejidad de la matriz del suelo y de su calidad (Siebe, 2006).

Una buena estructura para el crecimiento de las plantas involucra la presencia de poros para el almacenamiento y difusión de agua y aire, así como para el crecimiento de las raíces, la presencia de poros está en función del tamaño y acomodo de las partículas de suelo y de los

procesos de agregación (Oades, 1984). Por ejemplo, los suelos de textura arenosa tienen estructuras en las cuales la distribución del tamaño de los poros es determinada principalmente por el empaquetamiento de los granos de arena; esta estructura puede verse fácilmente alterada por la labranza, la compactación y el rearrreglo de las partículas de suelo provocado por la actividad de la fauna edáfica. La unión de los granos de arena depende primordialmente de factores biológicos, como la presencia de hifas y raíces cuyo crecimiento y actividad dan origen a la formación de macroagregados. En contraste, en los suelos de textura limosa y arcillosa, debido a la naturaleza cohesiva de las arcillas y a su capacidad de expandirse y contraerse al exponerse a ciclos de humedecimiento y secado, se observa la formación de agregados de tamaños variados. La unión de las partículas de arcilla depende principalmente de la producción de exudados radicales y de los productos de la actividad metabólica de los microorganismos del suelo (Oades, 1993).

La agregación es el proceso de formación de agregados o cúmulos de partículas primarias de suelo, que se unen entre sí con más fuerza que al resto de las partículas de suelo circundantes y es producto de la interacción y variación temporal de procesos físicos, químicos y biológicos. Al mantenimiento de la estructura, o dicho de otra forma, a la resistencia de las fuerzas cohesivas que mantienen unidas a las partículas de suelo en agregados, ante el efecto de fuerzas disruptivas se le denomina estabilidad (Kemper *et al.*, 1986). A la capacidad del suelo de recuperar la estructura de sus agregados y poros después de un disturbio se le conoce como resiliencia (Agners, 1998). La pérdida de estabilidad de los agregados del suelo, conlleva a la pérdida de la estructura y por lo tanto a la reducción de la tasa de infiltración de agua, conductividad hidráulica, porosidad, y en general a la aparición de condiciones físicas desfavorables para el desarrollo de las plantas y la fauna edáfica.

Por su tamaño, los agregados se clasifican en dos grandes clases: microagregados, con un diámetro inferior a 0.25 mm y macroagregados, con un diámetro superior a 0.25 mm. Como ya se ha mencionado, el tamaño de los agregados del suelo determina a su vez el tamaño de sus poros (Oades, 1984).

### **Formación de macro y microagregados**

De acuerdo con Oades y Waters (1991), la formación de los macroagregados en suelos estructurados depende primordialmente de agentes aglutinantes temporales y transitorios, los primeros se refieren a las hifas de los hongos y las raíces vegetales, los segundos representan los polisacáridos derivados de los exudados de microorganismos y plantas. Los macroagregados constituyen el núcleo de formación de los microagregados; en su interior, el material vegetal y la MO en descomposición estimulan la actividad de microorganismos edáficos, cuyas secreciones (mucílagos y metabolitos) actúan como agentes aglutinantes persistentes, en conjunto con las sustancias húmicas, al impregnar y asociar la materia orgánica particulada y fragmentos minerales del tamaño de arcillas en pequeños cúmulos organominerales, los microagregados estables del suelo. Los agentes aglutinantes persistentes pueden no ser de origen biológico, como en el caso de complejos de cationes metálicos polivalentes, óxidos y aluminosilicatos amorfos.

Debido a que los macroagregados se mantienen unidos por factores temporales y transitorios, muestran una menor estabilidad que los microagregados; en contraste, la estabilidad de los microagregados, mantenida por agentes persistentes, es mayor y menos dependiente del manejo agrícola. Gracias a su estabilidad y al tipo de sustancias que los mantienen unidos, los microagregados tienen un papel fundamental en el almacenamiento y estabilización de C en el suelo a largo plazo.

Los disturbios en los suelos, como la labranza, los procesos de humedecimiento y secado, entre otras fuentes de energía dispersiva, provocan la disgregación de los macroagregados, e inhiben la formación de microagregados en su interior, así como el almacenamiento de C a largo plazo. El cultivo y la adición de residuos vegetales y abonos al suelo, así como la actividad microbiana asociada a la descomposición de la materia orgánica, contribuyen a la formación de macro y microagregados, fomentando así la estructuración del suelo (Six *et al.*, 2004).

En el cuadro que se muestra a continuación se resumen los procesos y factores que de acuerdo con Oades (1993) y Six y colaboradores (2004) determinan la dinámica de

agregación, estabilización y degradación de agregados en el suelo. En seguida se explican brevemente aquellos que pudieran tener un efecto significativo en la transformación del tepetate fragmentado, bajo las condiciones mantenidas en el presente experimento.

- |            |   |   |
|------------|---|---|
| Físicos    | { | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Variables ambientales como el clima y la precipitación que provocan procesos de humectación y desecación, congelamiento y descongelamiento.</li> <li>• Labranza.</li> </ul>          |
| Químicos   | { | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ligantes inorgánicos: óxidos y cationes metálicos polivalentes.</li> <li>• Agentes dispersantes: ácidos orgánicos.</li> </ul>  |
| Biológicos | { | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fauna edáfica: principalmente lombrices y termitas.</li> <li>• Microorganismos: micorrizas, hongos saprófitos, archeas y bacterias.</li> <li>• Raíces y restos vegetales.</li> </ul> |

### **Ciclos de humectación y desecación**

Constituyen el factor de mayor importancia en la estructuración de suelos compactados, ya que favorecen la formación de partículas pequeñas a partir del rompimiento de fragmentos grandes. El proceso de desecación incrementa la tensión cohesiva entre las partículas de suelo, al mismo tiempo que provoca su cementación al inducir la precipitación en sus poros de iones y moléculas orgánicas solubles en forma de compuestos inorgánicos semicristalinos y compuestos orgánicos amorfos. En contraste, el proceso de humectación puede ser altamente disruptivo, ya que la hidratación de los iones y el hinchamiento osmótico de los agregados provocan la separación de las partículas de suelo y la formación de grietas. La intensidad de la disgregación depende de la velocidad de humedecimiento, el contenido de MO y de arcillas expandibles en el suelo. El humedecimiento lento, la cobertura vegetal, la presencia de MO, arcillas kaolínicas y óxidos e hidróxidos de hierro reducen en gran medida el rompimiento de los agregados durante la precipitación y riego, además de proteger el suelo del impacto de las gotas de lluvia (Kemper y Rosenau, 1986).

### **Agentes ligantes inorgánicos**

Los agentes ligantes inorgánicos, óxidos y cationes metálicos polivalentes (Ca, Mg, Al, Fe y en menores cantidades Mn, Zn y Cu) tienen un papel importante en la estabilización de los microagregados del suelo.

Los óxidos pueden actuar como agentes ligantes por la adsorción de materia orgánica en su superficie, por la unión electrostática entre óxidos cargados positivamente y arcillas cargadas negativamente, y al cubrir las superficies de los minerales favoreciendo la formación de puentes entre partículas primarias y secundarias. Por su parte, los cationes polivalentes establecen puentes entre los coloides del suelo cargados negativamente, mediante fuerzas de atracción electrostáticas. Por ejemplo, el calcio juega un papel muy importante en la formación de complejos órgano-minerales y por lo tanto en la formación de microagregados, e induce de manera indirecta la formación de macroagregados al estimular la actividad microbiana (Six *et al.*, 2004; Oades 1984).

### **Agentes dispersantes**

Algunos aniones orgánicos, producto de la actividad metabólica de plantas, hongos y bacterias (como lactato, acetato, salicilato, aspartato, citrato, oxalato, tartrato, fulvato y fosfato) pueden formar complejos con iones metálicos polivalentes adsorbidos en la superficie de las arcillas, lo que incrementa su carga negativa y provoca su dispersión, lavado e iluviación; este fenómeno cobra importancia en suelos con pH cercanos a 6, libres de  $\text{CaCO}_3$ , con bajos contenidos de MO. El efecto dispersivo de los aniones orgánicos de origen biológico es contrarrestado por la influencia estabilizante de los mucílagos producidos por raíces, bacterias y hongos en la rizósfera, que inducen la floculación de las partículas de suelo (Oades, 1984).

### **Microorganismos edáficos**

Los microorganismos edáficos (hongos, archeas y bacterias) intervienen en el proceso de agregación en diferentes escalas (macro y microescala) y su actividad está ligada a la textura y mineralogía del suelo. El micelio de los hongos envuelve las partículas minerales y orgánicas en una densa red de hifas y las cementa mediante la producción de

polisacáridos extracelulares, promoviendo así la formación de macroagregados y su estabilización. Cuando las raíces vegetales y las hifas mueren, su descomposición continúa por acción de bacterias que producen mucílagos y metabolitos capaces de aglutinar de manera persistente la MO particulada y los cristales de arcilla en microagregados. En suelos de textura arcillosa, tanto los hongos como las bacterias y sus productos metabólicos juegan un papel importante en la agregación, mientras que en suelos arenosos la agregación está más ligada a la presencia de redes de hifas y raíces de plantas (Six *et al.*, 2004; Oades, 1993).

### **Raíces y restos vegetales**

La vegetación afecta la estructura del suelo a través de diversos mecanismos que involucran: a) la actividad de las raíces (penetración, extracción de agua, anclaje y exudación de compuestos en la rizósfera), b) la incorporación de restos vegetales al suelo como una fuente de carbono para los microorganismos y la fauna edáfica que producen materiales estabilizantes al metabolizarlos y c) la protección física del suelo frente a procesos como la lluvia y la compactación (Agners, 1998).

Al crecer, las raíces ejercen una acción compresiva sobre el suelo circundante (en un perímetro de 0.05 a 2 mm) que puede alcanzar hasta 2 MPa (Agners, 1998). Las raíces fasciculadas, finas, de las monocotiledóneas pueden ejercer presiones de hasta 9 MPa; sin embargo, difícilmente crecen bajo dichas condiciones, su capacidad de penetración en sustratos compactados se relaciona con sus numerosas raíces finas, con las cuales pueden detectar grietas y bioporos preexistentes y crecer así en profundidad. En cambio, la habilidad de las dicotiledóneas y arbóreas, de raíces gruesas, para penetrar en sustratos compactados, se relaciona con la gran presión que ejercen al crecer en diámetro y su resistencia a la curvatura (Monsalve *et al.*, 2010). Las fuerzas compresivas modifican la estructura edáfica al reducir la porosidad, cambiar la forma de los poros e incrementar la densidad del suelo, con lo que favorecen la formación de microagregados. También pueden actuar como factores desestabilizantes de los macroagregados, al provocar su disgregación cuando penetran en sus macroporos y planos de fractura (Oades, 1993).

Uno de los efectos más significativos de las raíces en la estructura, es su capacidad para modificar el régimen hídrico y la frecuencia e intensidad de los ciclos de humectación y desecación en la rizósfera, lo cual se lleva a cabo mediante tres mecanismos principales: a) la absorción de agua, que provoca la desecación localizada del suelo y la adsorción de agentes ligantes a la superficie de los coloides y partículas de arcilla b) la producción de exudados radicales que reducen las tasas de humedecimiento del suelo, al bloquear los poros e impedir la disgregación de los agregados por eventos de humectación rápida y c) la regulación del flujo de agua a través del suelo, ya sea por la reducción de la tasa de infiltración cuando las raíces se encuentran vivas, ocupando los macroporos que han formado (bioporos) o por su incremento, cuando al morir dejan los macroporos vacíos, que conducen el agua a mayor velocidad y profundidad (Six *et al.*, 2004; Materechera *et al.*, 1991).

Por último las raíces vegetales representan una fuente directa e indirecta de materia orgánica; directa, por la contribución de su propia biomasa y por la producción de exudados (compuestos por polisacáridos) que inducen de manera transitoria, la formación y estabilización de agregados sin la intervención de la actividad microbiana (Agners, 1998), e indirecta, al estimular la actividad microbiana en la rizósfera, cuyos productos metabólicos (también polisacáridos) procedentes de la descomposición del mucílago y restos vegetales contribuyen a la formación de uniones órgano-minerales persistentes (Morel *et al.*, 1991). La descomposición de las raíces suscita una mayor y más estable agregación del suelo, que la de los tallos y hojas adicionados en forma de abonos verdes.

### **3.2.2. Indicadores químicos de la calidad del suelo**

#### **3.2.2.1. El pH del suelo**

El pH del suelo se refiere a su grado de acidez o basicidad, y depende de la especie y cantidad de cationes adsorbidos en la superficie de los minerales de arcilla y de la materia orgánica coloidal. El predominio de los cationes  $H^+$  y  $Al^{3+}$  en la superficie de intercambio de los coloides del suelo provoca un incremento en la concentración de iones  $H^+$  en solución, lo que induce un pH ácido. El predominio de cationes básicos (o formadores de

bases) como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$  provoca un incremento en la concentración de iones  $\text{OH}^-$  en solución, lo que induce un pH básico (Buckman y Brady, 1970).

El pH tiene una influencia muy importante en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos; a continuación se enuncian algunos de los efectos producidos por variaciones en este parámetro: a) afecta los procesos de dispersión-floculación de los coloides y por lo tanto la estructura del suelo y las propiedades físicas asociadas a esta (porosidad, aireación, retención de agua, conductividad hidráulica, regímenes de humedad y temperatura); b) afecta también propiedades químicas como la meteorización de la roca parental, la movilidad de elementos tóxicos como el Al y el Mn, la disponibilidad de macro y micronutrientes, las tasas de descomposición de la materia orgánica, la adsorción de aniones (sulfatos, fosfatos y cloruros), la neoformación de arcillas y por último, c) afecta propiedades biológicas de los suelos, como la relación entre las poblaciones de bacterias y de hongos, la humificación, la fijación de nitrógeno, la movilidad y disponibilidad de nutrientes para las plantas (Porta, 1999).

El pH óptimo para el desarrollo de la mayoría de las plantas se encuentra entre 6 y 7, en este intervalo se hallan disponibles prácticamente todos los nutrientes necesarios para el crecimiento y desarrollo vegetal. En suelos fuertemente ácidos ( $\text{pH} < 5.5$ ) las plantas pueden mostrar deficiencias de Ca, Mg y K a la vez que el Al, Fe y Mn, pueden alcanzar niveles tóxicos. En suelos alcalinos ( $\text{pH} > 7$ ) las plantas pueden mostrar deficiencias de algunos micronutrientes como Co, Cu, Fe, Mn, Zn (Marín *et al.*, 2002).

### **3.2.2.2. Materia orgánica del suelo (MOS)**

La MOS es el atributo clave de la calidad y fertilidad de los suelos, ya que tiene una influencia central en sus propiedades físicas y químicas: representa la principal fuente y reservorio de nutrientes para las plantas, la fauna y los microorganismos del suelo. Al presentar carga en su superficie, actúa como un sitio de intercambio iónico, teniendo un papel primordial en la adsorción de nutrientes y en la capacidad de intercambio catiónico de los suelos; promueve la floculación de las partículas minerales en agregados y su estabilización, con lo que favorece la estructuración y resiliencia del suelo y regula los

regímenes de humedad, infiltración y retención de agua (Masciandro y Ceccanti, 1999; Swift, 1993).

La materia orgánica del suelo, es la fracción orgánica del mismo que procede de la actividad y los residuos de plantas, animales y microorganismos. Representa un sistema complejo de compuestos variados, entre los que se encuentran: a) sustancias orgánicas lábiles no humificadas (como ácidos alifáticos y aromáticos, carbohidratos, aminoácidos, polipéptidos, proteínas, polisacáridos y lípidos), que son producto de la descomposición de los restos orgánicos y de los procesos de metabolismo y resíntesis llevados a cabo por los microorganismos edáficos, b) compuestos orgánicos estables o humificados y c) compuestos biológicamente activos, como los complejos de humus y enzimas extracelulares (Masciandro y Ceccanti, 1999; Kononova, 1982).

Los compuestos orgánicos lábiles sufren un rápido y constante recambio en el suelo, al ser la principal fuente de energía para los microorganismos edáficos. Las sustancias húmicas representan formas de MO resistentes a la descomposición, con baja solubilidad y estructura química compleja, que se pueden adsorber a las partículas de arcilla, óxidos y otras sustancias minerales, promoviendo procesos de agregación y oclusión de poros (Swift 1996). Al encontrarse adsorbidas a la fracción mineral del suelo, se mantienen protegidas de la degradación y complejación con otras sustancias, por lo que su mineralización o descomposición hacia sus constituyentes elementales se lleva a cabo en periodos prolongados de tiempo, representando una fuente de nutrimentos para las plantas, de lenta liberación y de largo plazo; de ahí que el contenido de sustancias húmicas en los suelos sea un mejor indicador de su calidad respecto al contenido de fuentes lábiles de MO. Además, tanto el humus como algunos productos intermedios de la degradación microbiana de materiales orgánicos, que conduce a su formación (como los ácidos poliurónicos), juegan un papel muy importante como floculantes de las partículas primarias de suelo y como estabilizantes de los agregados, por lo que contribuyen al desarrollo y mantenimiento de la estructura edáfica (Swift, 1996; Primavesi, 1982).

Los análisis bioquímicos, realizados por Flores y colaboradores (2011) en muestras de tepetate fragmentado, sometidas a tratamientos de habilitación anuales, con enmiendas orgánicas (composta, estiércol e inóculo de micorriza) y el establecimiento de plantas de durazno (*Prunus persica L.*) muestran contenidos muy bajos de ácidos prefúlvicos y prehúmicos (con valores máximos de 1.34 y 3.43 gC/kg de tepetate, respectivamente), predominando los ácidos prefúlvicos, lo que indica una tasa de humificación baja de las enmiendas. La relación entre el contenido de los dos tipos de ácidos, indica a su vez una mayor tasa de mineralización que de humificación. Por lo anterior, estos autores consideran que para observar la formación de MO estable en tepetate fracturado y enmendado se requiere el establecimiento de experimentos de larga duración (mayor a un año).

### **3. 2.2.3. Capacidad de intercambio catiónico**

La capacidad de intercambio catiónico es el número de moles de iones de carga positiva, que pueden ser intercambiados, por unidad de masa seca del suelo, bajo condiciones dadas de temperatura, presión, composición de la fase líquida del suelo y de la relación entre la masa y la solución del mismo (Porta, 1999). La capacidad de intercambio catiónico de los suelos depende del contenido y tipo de los minerales de arcilla y de los componentes orgánicos. Debido a que la carga negativa neta en la superficie de los coloides del suelo se debe a la suma de las cargas permanentes y las cargas variables que éste posea, la CIC es altamente dependiente del pH (Porta 1999).

La CIC, controla la disponibilidad de nutrimentos para las plantas  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ; interviene en los procesos de floculación-dispersión de las arcillas, en la estructuración del suelo, en la estabilización de los agregados y determina el papel del suelo como filtro natural, al permitir la retención de elementos contaminantes (metales pesados y pesticidas). La SEMARNAT, establece en la NOM -021-RECNAT-2000, que cuando la CIC de un suelo es mayor a  $25 \text{ cmol kg}^{-1}$  de suelo, se considera que existe una reserva nutrimental abundante.

#### **3.2.2.4. Bases intercambiables**

Los cationes intercambiables provienen de la meteorización del material parental, de la mineralización de la materia orgánica y de los aportes externos (superficiales y subterráneos). La composición del complejo de intercambio se debe a la selectividad en la adsorción de los distintos cationes:  $\text{Al}^{3+} \gg \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} \gg \text{NH}_4^{2+} > \text{K}^+ > \text{H}^+ > \text{Na}^+ > \text{Li}$ . En suelos calizos o básicos de regiones áridas y semiáridas, los cationes predominantes son el  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ , también conocidos como bases intercambiables, el porcentaje de bases en el complejo de intercambio con respecto a la CIC total del suelo, se denomina porcentaje de saturación de bases (Porta, 1999). En los tepetates el porcentaje de saturación de bases suele ser del 100 % o muy cercano a este valor.

#### **3.3. Mejoradores de la calidad del suelo**

Desde tiempos remotos, el ser humano ha desarrollado numerosas prácticas para mejorar las propiedades de los suelos, con la finalidad de habilitarlos para diversos usos, particularmente para promover su capacidad productiva. La mejora de la fertilidad de los suelos involucra un adecuado manejo de su estatus nutrimental, para proveer a las plantas los nutrientes que requieran en cantidad y balance, y el cuidado de otros factores de carácter físico y biológico como su humedad, temperatura, acidez, salinidad, estructura, biodiversidad y actividad de los microorganismos edáficos, que favorecen la exploración radical y la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas (Flores, 2006).

Entre las prácticas correctivas más comunes para mejorar la fertilidad de los suelos se encuentran: el aporte de enmiendas orgánicas (residuos de cosecha, compostas y estiércoles) y la adición de fertilizantes inorgánicos como fuentes de nutrición directa para las plantas. En el caso de los tepetates, el cultivo de especies vegetales, anuales o perennes, constituye un factor adicional y de gran importancia en la mejora de su fertilidad, ya que su sistema radical coadyuva a la formación y estabilización de agregados, promoviendo la estructuración del material roturado. Además, las plantas representan una fuente de materia orgánica que favorece la actividad de los microorganismos y fauna edáfica (Velázquez, 2002).

### 3.3.1. Enmiendas orgánicas: El estiércol

Las enmiendas orgánicas tienen un papel central en el mantenimiento de una gran variedad de sistemas de cultivo, ya que proveen un suplemento de nutrientes para las plantas durante su descomposición, favorecen la retención de agua y son el sustrato de la síntesis de materia orgánica estable que contribuye a la estructuración del suelo (Palm *et al.*, 2001). Estas cualidades contrarrestan procesos de degradación (compactación, incremento de la densidad aparente, encostramiento superficial, baja infiltración de agua, alta evaporación, erosión por viento y agua; arrastre, descomposición y lixiviación de materia orgánica y nutrientes), que son consecuencia del cultivo intensivo y de la implementación frecuente de prácticas de laboreo mecánicas, que alteran la estructura edáfica y la disponibilidad de nutrientes (Ramírez *et al.*, 2009).

A diferencia de los fertilizantes minerales, que son una fuente de nutrición directa para las plantas, los nutrientes en los abonos orgánicos, solo se vuelven disponibles tras un proceso de biodegradación que resulta en la producción de especies químicas inorgánicas asimilables, como el amonio ( $\text{NH}^+4$ ) y los nitratos ( $\text{NO}^-3$ ), también denominado mineralización. La tasa de mineralización de los materiales orgánicos es regulada por tres principales factores: 1) el ambiente físico-químico (pH, temperatura, contenido de agua y arcilla en el suelo), 2) la composición química del material (contenido de nutrientes, tipo y proporción de compuestos de carbono) y 3) la biomasa, estructura y actividad de las comunidades microbianas que participan en su descomposición (Nett *et al.*, 2009).

Los estiércoles están constituidos por las heces y orina de animales, mezclados con paja, residuos de cosecha, materiales usados como cama en los establos y una gran población de microorganismos. Su composición química es muy variable, ya que depende de diversos factores, principalmente de la especie animal que los produce, su edad, alimentación, naturaleza de los materiales usados en las camas y manejo (Flores, 2006). Algunos de los compuestos orgánicos presentes en el estiércol de bovino son celulosa, hemicelulosa, almidón, quitina y lignina, todos ellos poseen diversas tasas de mineralización, lo que provoca que la degradación de estas enmiendas sea gradual y prolongada; por ejemplo, el

contenido de componentes más recalcitrantes como la celulosa y la lignina, determinan las tasas de mineralización de C en etapas tardías, mientras que la proporción de componentes lábiles (carbohidratos de origen vegetal, compuestos nitrogenados solubles, como urea y carbonato de amonio,  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ) determina las tasas de descomposición en etapas tempranas (Nett *et al.*, 2009; Salazar *et al.*, 2003; Buckman y Brady, 1982). La tabla 1 muestra el contenido de humedad y los tres principales macronutrientes en el estiércol de diversas especies animales.

**Tabla 1: Composición química de estiércoles (Adaptado de Flores, 2006).**

Especie animal	Humedad (%)	Nitrógeno (%)	Fósforo (%)	Potasio (%)
Vaca	83.2	1.67	1.08	0.56
Caballo	74.0	2.31	1.15	1.30
Oveja	64.0	3.81	1.63	1.25
Cerdo	80.0	3.73	4.52	2.89
Gallina	53.0	6.11	5.21	3.20

El efecto benéfico de los estiércoles sobre el suelo, se debe a su liberación gradual de nutrientes que favorece el crecimiento y desarrollo de los cultivos en años posteriores a su aplicación y sobre todo a que representan una fuente de materia orgánica, cuya descomposición y posterior inmovilización contribuyen a la estructuración del suelo y a la estabilización de sus agregados y poros, además de promover la actividad de la biomasa microbiana, aumentar la retención de agua y la capacidad de intercambio catiónico (Salazar *et al.*, 2003).

Ayoama y colaboradores (1999), observaron que la aplicación prolongada de estiércol de bovino al suelo incrementó la concentración de materia orgánica particulada (parcialmente descompuesta) y MO asociada a limos y arcillas en los agregados (procesada por los microorganismos del suelo), además de que promovió indirectamente la formación y estabilización de macroagregados de 250 a 500  $\mu\text{m}$  al incentivar la producción de agentes de unión transitorios, principalmente polisacáridos, por los microorganismos edáficos. Asimismo señalan que la aplicación de estiércol provocó una reducción en la relación C/N en los macroagregados y una inmovilización temporal del nitrógeno en la biomasa microbiana al estimular su desarrollo.

La fertilidad del suelo puede verse afectada negativamente por la aplicación excesiva de estiércoles, ya que éstos pueden incrementar el contenido de sales y nitratos por encima de los límites requeridos para un adecuado crecimiento de las plantas, generando problemas de salinización, sodificación y contaminación de mantos freáticos por lixiviación de nitratos, por ello es necesario buscar un manejo y dosificación apropiados con base en el conocimiento de la fertilidad natural del suelo y de las características propias de la enmienda (Salazar *et al.*, 2003).

Como ya se ha visto, la liberación de nutrimentos por parte del estiércol no es inmediata a su aplicación; Dimas (2001), refiere que los estiércoles se mineralizan en un 70% a partir el primer año de aplicación y presentan un efecto residual hasta por dos años, el resto se transforma en humus, que produce un efecto benéfico en la estructura del suelo en el primer año. Eghball y Power (1999), reportan la mineralización de 40% del nitrógeno contenido en el estiércol de bovino aplicado en el primer año de cultivo, quedando el 80% restante disponible en los años subsecuentes.

La tabla 2 muestra los porcentajes de descomposición para climas templados de los estiércoles más comúnmente empleados en la agricultura:

Estiércol	Año después de su aplicación			
	Primero	Segundo	Tercero	Cuarto
Vacuno	<b>0.35</b>	<b>0.15</b>	<b>0.10</b>	<b>0.05</b>
Gallinaza	0.90	0.10	0.05	-
Porqueraza	0.65	0.30	0.10	-
Equino	0.30	0.15	0.10	0.05
Caprino	0.32	0.18	0.10	0.05

Tabla 2: Tasa de descomposición de estiércoles usados en la agricultura (SAGARPA, sin año. Recurso en línea. Fecha de consulta: 12 de junio del 2012).

En México se producen aproximadamente 61 millones de toneladas de estiércol al año. La gallinaza y la porqueraza son los estiércoles más ricos desde el punto de vista nutricional, además de que presentan una rápida liberación de nutrimentos en el primer año de aplicación. Los estiércoles de ganado vacuno y equino son los más pobres en cuanto contenido de nutrimentos y los liberan lentamente debido a su alta relación C/N; sin

embargo, presentan un efecto residual que contribuye a la fertilidad del suelo a largo plazo (SAGARPA, sin año. Recurso en línea. Fecha de consulta: 12 de junio del 2012).

### **3.3.2. Fertilizantes químicos inorgánicos**

Los fertilizantes químicos inorgánicos son productos industriales que proporcionan de manera directa y a corto plazo los nutrimentos requeridos por las plantas, al ser adicionados al suelo (Flores, 2006). Asimismo tienen un efecto indirecto en la fertilidad del suelo, al inducir el desarrollo de la biomasa radical; la cual promueve el empaquetamiento de las partículas y agregados del suelo, al mismo tiempo que produce exudados que actúan como agentes de unión transitorios y estimulan la actividad de los microorganismos edáficos (Agners, 1998).

El contenido que posean de los diferentes nutrimentos (principalmente nitrógeno, fósforo y potasio) se debe adecuar a las condiciones específicas del suelo al que serán aportados y a los requerimientos nutricionales del cultivo. De acuerdo con su estado físico se pueden clasificar en sólidos (en forma de polvo ó granulados), líquidos y gaseosos (Flores, 2006). Considerando los tres principales elementos que aportan al suelo se agrupan en tres clases:

1. Fertilizantes nitrogenados: amoniacales (sulfato de amonio, nitrato de amonio, y urea), a base de nitratos (nitrato de sodio, nitrato de calcio y nitrato de potasio).
2. Fertilizantes fosfatados: Superfosfato de calcio simple y superfosfato de calcio triple.
3. Fertilizantes potásicos: Cloruro de potasio y sulfato de potasio.

No todos los nutrimentos aportados al suelo a través de los fertilizantes minerales son absorbidos por las plantas, por lo que pueden perderse por lixiviación y escorrentía, contaminando cuerpos de agua subterránea y superficial o por volatilización, de ahí la necesidad de hacer un uso moderado de estas sustancias (FAO, 1999).

### 3.4. Especie vegetal: Girasol (*Helianthus annuus L.*)

El girasol, *Helianthus annuus L.*, es una planta anual, herbácea, dicotiledónea, perteneciente a la familia Asteraceae y al género *Helianthus*, que incluye 68 especies, de las cuales *H. annuus L.* es la más extendida en todo el mundo, existiendo diferentes subespecies de la misma, silvestres ó cultivadas como plantas oleaginosas, forrajeras y ornamentales. El nombre del género *Helianthus*, proviene del latín “helios” que significa sol y “anthos” que significa flor, mientras que el nombre específico *annuus*, alude a la anualidad de su ciclo de vida (Alba, 1990). En México también se le conoce como Guaco, Patito, Tlacopatle (del náhuatl Tlacopatli), Maíz de teja, Maíz de Texas, Chimalatl, Chimalácatl, Flor de sol, Acahual y Polacote (Vázquez, 2007).



#### 3.4.1. Clasificación botánica (APG III, 2009)

Orden: Asterales

Familia: Asteraceae

Subfamilia: Asteroideae

Tribu: Heliantheae

Género: *Helianthus*

Especie: *Helianthus annuus L.*

### 3.4.2. Distribución geográfica

Al igual que muchas de las especies de Asteraceae, el girasol es una planta cosmopolita que se desarrolla en climas templados y secos; cuyo crecimiento es favorecido por la perturbación de ambientes naturales, siendo abundantes en las primeras etapas de sucesión de las comunidades vegetales. Los ejemplares silvestres se distribuyen en gran parte del territorio de Estados Unidos y norte de México (Vázquez, 2007).

### 3.4.3. Morfología y fisiología

El girasol tiene una raíz pivotante, constituida por un eje principal dominante, que se ramifica en un sistema de raíces secundarias y terciarias. En suelos húmedos las raíces tienen un mayor desarrollo en sentido horizontal, cerca de la superficie del suelo, mientras que en suelos secos crecen en profundidad llegando a alcanzar longitudes de hasta 4 m (Vázquez, 2007; Alba, 1990).

El tallo es simple, cilíndrico, recto, vertical, de consistencia semileñosa, relleno de tejido acuoso o esponjoso que desaparece al madurar, pubescente y áspero. Su diámetro varía entre 2 y 6 cm y su altura hasta la base del capítulo oscila entre 40 y 200 cm. Las variedades silvestres pueden producir ramificaciones, mientras que las cultivadas con fines ornamentales desarrollan un tallo único. El tallo sólo se llega a ramificar por efecto del frío o la muerte del meristemo apical (Vázquez, 2007; Alba, 1990).

Las hojas son opuestas en la parte inferior del tallo y alternas en el centro y parte superior, trinervadas, con pecíolos largos (10 a 15 cm) y surcados, que conducen el agua hacia el tallo y éste a su vez hacia el suelo, incrementando el aprovechamiento hídrico de la planta. Aunque la forma de las hojas varía según la altura a la que nacen sobre el tallo, en general son cordiformes y acuminadas. El haz y el envés tienen una superficie áspera y pilosa; pueden medir entre 10 y 30 cm tanto en anchura como en longitud. El girasol posee un potencial fotosintético elevado, sobre todo en hojas jóvenes, y altas tasas respiratorias, que lo llevan a consumir elevadas cantidades de agua y carbohidratos. Asimismo tiene un metabolismo de tipo C3 con altos consumos de CO<sub>2</sub> (Vázquez, 2007; Hernández *et al.*, 1994; Alba, 1990).

La inflorescencia ó capítulo, consta de un pedúnculo y un ensanchamiento apical ó receptáculo donde se insertan las flores. El receptáculo tiene forma de disco plano, cóncavo o convexo, con un diámetro de entre 10 y 40 cm, cubierto por brácteas protectoras que forman el involucre; en su parte superior se insertan entre 700 y 3000 flores en variedades para producción de aceite y hasta 6000 en variedades cultivadas para el consumo directo de la semilla (Alba, 1990).

El capítulo está constituido por dos tipos de flores llamadas flósculos: los flósculos periféricos (flores liguladas y unisexuales) y los flósculos centrales (flores tubulares, hermafroditas, con un desfase en los momentos de liberación del polen y emergencia del estigma, para evitar la autofecundación). Los primeros se insertan en el borde externo del disco floral, son estériles y poseen una lígula de color amarillo intenso, que cumple la función de atraer a los insectos polinizadores (principalmente abejas melíferas y abejorros); las flores tubulares se insertan en el interior del capítulo, están formadas por un ovario inferior, protegido por dos sépalos y una corola de 5 pétalos adnados en sus extremos (de coloraciones variadas que van de amarillo a púrpura), 5 estambres adnados en su base y a la base de la corola y un estigma bifurcado, que durante la antesis da origen a dos lóbulos rizados. Durante la apertura de las flores, se abren de 1 a 4 anillos florales por día, del extremo hacia el centro de la inflorescencia, en un periodo de 5 a 10 días, que se puede prolongar si la temperatura y la incidencia de luz son bajas (Barrientos, 2001; Alba, 1990)

Su reproducción es alógama, siendo las abejas melíferas los principales vehículos del polen. Una vez ocurrida la fecundación, cada ovario da origen a un fruto denominado aquenio, cuyo tamaño varía entre los 3 a 2 mm de largo, 2 a 13 mm de ancho y 2.5 a 5 mm de grosor. El aquenio tiene un pericarpio duro, fibroso y se mantiene unido a la semilla, excepto en una de sus aristas, sus coloraciones son variadas: blancas, estriadas (blancas y negras), negras, pardas, rojizas y violáceas (Vázquez, 2007).

#### **3.4.4. Centro de origen de las variedades domésticas y usos tradicionales**

Hasta hace poco más de una década, se consideraba el este de Norteamérica como el centro de origen de las variedades domésticas de *Helianthus annuus L.*; fue entre 1997 y 2000 que se hallaron restos de girasol domesticado en San Andrés, Tabasco (en la costa

del Golfo de México) que datan de aproximadamente 4,000 años, lo que dio indicios de un evento de domesticación independiente y más antiguo (Harter *et al.*, 2004). Aparentemente el proceso de domesticación consistió en una selección direccional para lograr el incremento en el tamaño del aquenio, es decir, en la selección de plantas monocéfalas, con aquenios largos a partir de plantas silvestres ramificadas, con aquenios pequeños (Lentz *et al.*, 2001). La mayoría de las plantas pertenecientes al género *Helianthus* muestran una gran variación fenotípica que depende de componentes hereditarios y ambientales.

Desde hace 4000 años el girasol era cultivado por los pueblos indígenas habitantes de los actuales territorios de Arizona y Nuevo México, quienes lo utilizaban como alimento, como medicina y con fines religiosos. De acuerdo con la NRCS, citada por Vázquez (2007), los indios Dakota utilizan las infusiones de girasol para aminorar los dolores de pecho y problemas pulmonares; los Hopi para tratar problemas dermatológicos y picaduras de alacrán; los Navajo para prevenir infecciones prenatales causadas por los eclipses de sol; los Paiute emplean la raíz cocida para tratar el reumatismo y los Cherokee preparan infusiones de las hojas para tratar afecciones del riñón.

Alba (1990), refiere el empleo de las semillas molidas para la fabricación de pan, además de extraerse de ellas un tinte de color púrpura para la tinción de textiles y cestería y para la decoración de los cuerpos en ceremonias religiosas. El atlas de las plantas de la medicina tradicional mexicana (2009), reseña el uso de los tallos, en el estado de Sonora, para el tratamiento de diversas enfermedades, como la pleuresía, resfriados, llagas, heridas, trastornos nerviosos y dolor de cabeza. En Veracruz se ha documentado su uso, previa maceración en alcohol, para el tratamiento de las reumas mediante el frotamiento de las zonas afectadas. Hasta la fecha no existen estudios médicos que convaliden sus aplicaciones terapéuticas tradicionales.

El girasol era cultivado por los pueblos aztecas dentro de las milpas. Hernández (1942), quien fue enviado a las “Indias occidentales” a fines del siglo XVI, por Felipe II, con la encomienda de examinar y describir los géneros y formas de las plantas y animales de México, hace referencia a las flores y usos del girasol o “chimalacatl” en sus relatos: “hay ocultas en ellas semillas como de melones, aunque son cilíndricas, y que se les

parecen en la blandura, en el temperamento y en casi toda su naturaleza; y aunque comidas en alguna abundancia provocan dolor de cabeza, sin embargo suavizan el pecho, quitan el ardor y entre cierta gente hacen las veces de grano molidas, hechas pan y asadas. Nacen en cualesquiera lugares llanos y campestres, pero de preferencia en los campestres y cultivados”

En la actualidad la mayor parte del girasol cultivado es destinado a la producción de aceite, la pasta que resulta de su extracción, es empleada para la fabricación de alimentos para ganado, la planta seca también es utilizada como forraje y como cubierta para cultivos; las flores tienen un uso ornamental muy importante y son empleadas en la producción melífera (Vázquez, 2007).

#### **3.4.5. Ciclo de vida**

Dura entre 120 y 150 días, por lo que es una planta adecuada para su introducción a esquemas de rotación de cultivos. Hernández y colaboradores (1994) y Alba (1990) dividen el ciclo de vida de *Helianthus annuus L.* en cuatro y cinco etapas respectivamente. A continuación se presentan cuatro etapas principales, recuperando la información aportada por ambos autores.

##### **Primera etapa: germinación o emergencia**

Da inicio con la geminación de las semillas. De la siembra a la emergencia pueden transcurrir entre 10 y 30 días, según la temperatura del suelo, humedad, capacidad del hipocótilo para elongarse hasta la superficie, ataques de plagas, disponibilidad de nutrimentos y capacidad de absorción de los mismos. La temperatura óptima para la germinación es de 25°C, aunque pueden germinar en un rango de entre 5 y 40°C (Hernández *et al.*, 1994; Gay *et al.*, 1991).

##### **Segunda etapa: vegetativa o juvenil**

Comprende el periodo entre la emergencia y la formación de 4 a 5 pares de hojas. Su duración es de 20 a 22 días desde la emergencia. Esta etapa es de gran importancia, ya que condiciona el vigor y desarrollo posterior de la planta, en ella ocurre el enraizamiento y la formación de las primeras hojas. La disponibilidad de agua, la longitud del día y la temperatura influyen determinadamente en el desarrollo de la raíz

y los esbozos foliares. La escasez de agua puede provocar la reducción del número de esbozos foliares y por lo tanto el número de hojas en la madurez; el exceso de agua induce un escaso desarrollo del sistema radical.

#### **Tercera etapa: crecimiento activo, diferenciación del receptáculo y floración**

Comprende el intervalo entre la inducción e iniciación floral, hasta la antesis y fertilización. Transcurre de los 22 a los 58 días después de la emergencia. En esta etapa ocurre la formación de la inflorescencia y se produce un gran desarrollo en altura y biomasa foliar (la planta produce entre 7 y 8 pares de hojas), asimismo se da la máxima absorción de nutrimentos minerales y el máximo potencial de almacenamiento de carbohidratos. El crecimiento vegetativo cesa al inicio de la antesis, que dura entre 10 y 12 días y es altamente dependiente del cultivar, de la temperatura, de la capacidad de interceptación e intensidad de la radiación solar y de la disponibilidad de nutrimentos, principalmente de N, P y B. Durante la floración, el estrés hídrico y las altas temperaturas pueden afectar gravemente el rendimiento de la cosecha.

#### **Cuarta etapa: llenado de los frutos**

Consiste en el llenado y maduración de los frutos, transcurre durante 32 a 40 días posteriores al término de la etapa anterior. En esta fase el crecimiento vegetativo cesa o es muy escaso. El llenado de los frutos se lleva a cabo con los fotoasimilados producidos en ese momento por la planta, pero también con los procedentes de las reservas acumuladas en el periodo de preantesis. Durante esta fase se produce la síntesis y acumulación de ácidos grasos en las semillas.

#### **3.4.6. Influencia de los factores ambientales en el desarrollo del cultivo**

*Helianthus annuus L.* puede crecer en un amplio margen de temperaturas, que van desde 25 a 30 °C hasta 13 a 17°C, siendo la floración y la maduración de los frutos las etapas más sensibles a la variación del rango óptimo que va de los 21 a los 24°C. Las altas temperaturas tienen una influencia negativa en la fase de floración y las bajas temperaturas pueden retrasar la floración y provocar daños apicales promoviendo la dominancia lateral (Alba, 1990).

El fotoperiodo influye en el aceleramiento y retraso del desarrollo del girasol durante la etapa de formación de las hojas, puede incidir tanto en el número de hojas formadas como en la iniciación de las yemas florales, cuando la duración del día es corta, los tallos crecen alargados y se reduce la superficie foliar (Vázquez, 2007). Una vez que ha ocurrido la diferenciación del capítulo, la influencia de la luz pierde importancia como factor fotoperiódico y cobra significancia su cantidad y calidad, ya que si éstas son deficientes, ejercen una influencia negativa en el rendimiento de los frutos y en el contenido graso de las semillas (Alba, 1990).

Es un cultivo con alta demanda de agua (hasta 2.51 L al día en verano) y con poca eficiencia en su utilización en caso de disponer de ella en cantidades abundantes (sólo el 0.1% del agua que pasa por la planta es empleada en la fotosíntesis (Vázquez, 2007). Sin embargo en condiciones de escasez la eficiencia en el aprovechamiento se incrementa, debido a su profundo sistema radical (que le permite extraer agua del suelo a profundidades de hasta 3 m) y a que dispone de diversos mecanismos fisiológicos que le permiten reducir las tasas de evaporación, manteniendo al mismo tiempo su actividad metabólica; entre ellos se encuentran: 1) el ajuste osmótico que consiste en la acumulación de solutos en las células estomáticas, para reducir su potencial hídrico y mantenerse turgentes, conservando los estomas abiertos para el sostenimiento de la actividad fotosintética, 2) la marchitez de las hojas que permite reducir el ángulo de incidencia de los rayos solares y 3) la reducción de la superficie foliar mediante la senescencia acelerada de las hojas inferiores (Alba, 1990).

A pesar de su resistencia a condiciones de sequía, el estrés hídrico provoca un desarrollo deficiente de los órganos reproductivos, afectando el proceso de fecundación y en consecuencia el número de semillas producidas, así como el contenido de aceite de aquellas que se logran desarrollar. El periodo más crítico en cuanto al requerimiento de agua para el girasol se presenta 20 días antes y 20 días después a la floración (Alba, 1990).

No es un cultivo muy exigente en cuanto a condiciones de suelo se refiere. Puede crecer en suelos con un rango muy amplio de texturas que van desde arcillosa hasta arenosa, siempre y cuando presenten un buen drenaje, y no requiere de una fertilidad tan alta como otros cultivos (como maíz, trigo ó papa) para producir un rendimiento aceptable.

No es una planta muy susceptible al pH, ya que tolera magnitudes de pH que van de 5.8 hasta 8 (Penichet *et al.*, 2008; Alba, 1990). Alcanza el máximo potencial productivo en suelos profundos, con buen drenaje y retención de agua, de textura arcillo-arenosa o areno-arcillosa y pH 6 (Vázquez, 2007).

#### **3.4.7. Cultivo de girasol para uso ornamental**

En México se cultivan 469 especies de plantas ornamentales, de las cuales 90% son introducidas y 10% nativas. Este 10% (47 especies) representa sólo el 0.9% de las 4,200 especies de flores que se tienen registradas en la república, lo que habla de un inmenso potencial productivo en el ámbito de la floricultura. A esto se suma que la tribu Heliantheae, a la que pertenece el girasol, tiene como su principal centro de diversificación el territorio mexicano, incluyendo a 1150 especies de las cuales 740 son endémicas (Vázquez, 2007).

En México existen aproximadamente 10 mil productores dedicados al cultivo de flores de corte, sobre una extensión de tierra cultivada de más de 22 mil hectáreas, de las cuales 52 % se destinan al cultivo ornamental, que se concentra en la parte central del territorio (Distrito Federal, Guanajuato, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Morelos, Puebla, Querétaro, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz y Estado de México). Pese al gran potencial productivo con que cuenta México en el sector florícola, gracias a las favorables condiciones climáticas presentes en diferentes regiones del país y a la cercanía geográfica con EUA, segundo consumidor de flores en el mundo, su participación en el mercado internacional es reducida. Sólo 20 % de la producción nacional de flores se destina al mercado externo, mientras que el 80% restante se destina al mercado nacional (SAGARPA, 2008). Las exportaciones se estiman en menos de 1% del total mundial, de las cuales el 90% se dirigen a los Estados Unidos (ASERCA, 2006).

Frente a este panorama, el cultivo de girasol como planta de ornato adquiere importancia tanto por la potencialidad y expansión del mercado florícola en el mundo y en México, como por el hecho de que es una planta adaptable a variadas condiciones ambientales.

Por otra parte, tomando en cuenta la gran potencialidad de la actividad hortícola ornamental, así como la necesidad de ampliar la frontera agrícola en el país y las pocas exigencias edafoclimáticas del cultivo de girasol, *Helianthus annuus* L., se considera importante determinar el desarrollo de esta planta como partícipe del proceso de habilitación de tepetates. Además, tomando en consideración que la producción florícola nacional se concentra en la región central del país, del mismo modo que ocurre con las zonas erosionadas con afloramiento de tepetate, sería importante determinar la eficacia de las plantas cultivadas para flor de corte como factores promotores de la intemperización del tepetate.

#### **3.4.8. Consideraciones para la elección del girasol a cultivar**

La finalidad del cultivo de girasol como flor cortada es distinta respecto al oleaginoso y al forrajero. Para la producción de aceite, se suelen buscar plantas con capítulos grandes que produzcan altas cantidades de semillas, para la producción de forrajes se buscan plantas con un peso elevado, para su uso ornamental se buscan variedades pequeñas, con poco follaje y un capítulo no demasiado grande, con un diámetro que oscile entre 7 y 8 cm. La presencia de polen en las flores no es conveniente para su uso ornamental, ya que éste mancha los enseres y ropas próximos a ellas, por tal razón los principales cultivares de girasol ornamental son androestériles o carecen de polen (Melgares, 2001).

Es importante tomar en cuenta que se seleccionó un cultivar criollo de girasol para llevar a cabo el experimento, debido a que los cultivares criollos, por presentar una polinización libre, muestran una mayor variabilidad genética y por lo tanto una mayor resistencia a condiciones ambientales adversas que los híbridos o las variedades, que son sometidas a una fuerte selección artificial. Tomando en cuenta que el tepetate constituye un sustrato con muchas limitaciones para el crecimiento de las plantas, se consideró más adecuada la selección de un cultivar criollo que mostrase una mayor tolerancia y agresividad a las propiedades físicas y químicas presentadas por este sustrato, a pesar de que no tuviese las cualidades de los ejemplares híbridos y variedades desarrolladas para su comercialización como flores de ornato.

#### 4. ANTECEDENTES

Desde finales de la década de los 70, en México se han desarrollado diversas líneas de investigación con el afán de comprender el origen de los tepetates, su distribución, sus características fisicoquímicas y la problemática asociada a su afloramiento; todas ellas tendientes a plantear estrategias para la reincorporación de estas capas endurecidas al proceso productivo agrícola y forestal, así como a mitigar los procesos de erosión y degradación de suelos (Hidalgo *et al.*, 1999).

La mayoría de los trabajos de habilitación de tepetates realizados hasta la fecha en el ámbito de la investigación científica en nuestro país, se han desarrollado en los estados de Tlaxcala, Estado de México y Morelos, y han tenido como objetivo la mejora de sus propiedades físicas y su fertilidad a través de la promoción de procesos de fragmentación-agregación por métodos mecánicos y manuales, el establecimiento de especies vegetales anuales y perennes, y la adición de enmiendas orgánicas e inorgánicas.

Los primeros trabajos de habilitación de tepetates realizados en México con la finalidad de disminuir la pérdida de suelo, controlar los procesos de arrastre de sedimentos y azolve de cauces y obras, e incrementar la recarga de acuíferos, se iniciaron en 1973, en el marco del proyecto “Lago de Texcoco” en la vertiente oriental del valle de México. Llerena y Sánchez (1992) hacen una recopilación de los resultados obtenidos hasta 1990, que principalmente consistieron en la realización de obras de acondicionamiento (subsoleo, terraceo, zanjas trinchera, tinas ciegas y cepas comunes) y en la plantación de especies forestales en aproximadamente 8 mil ha de terrenos tepetatosos. Las especies vegetales que resultaron más eficientes para el control de la erosión fueron el eucalipto y *Pinus montezumae*. Avila y colaboradores (2011) reportan resultados favorables en cuanto a la formación de suelo y almacenamiento de agua a partir de tepetates rojos, después de 37 años de haberse realizado la plantación de especies forestales de casuarina y cedro en el ex-Lago de Texcoco.

Otro de los esfuerzos pioneros en plantearse el estudio de las capas volcánicas endurecidas, se llevó a cabo en 1989 con la formación del “Grupo Interdisciplinario de Estudio de los Tepetates”, en el cual confluyeron diversas instituciones nacionales e

internacionales, entre las que se encuentran el Colegio de Postgraduados de Chapingo, la Universidad Autónoma de Tlaxcala, la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, el Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación<sup>1</sup> y la Universidad Justus von Liebig de Giesse (Alemania), a las cuales se sumaron investigadores de Ecuador y Chile, a partir de 1994.

En México, este grupo se ha dedicado al estudio de tepetates tipo fragipán, en los valles de México y Tlaxcala. Los trabajos de rehabilitación agronómica realizados en fragipanes han sido ensayados en parcelas y en macetas, con el empleo de diversos cultivos, asociaciones y rotaciones de plantas (principalmente maíz, trigo, avena, cebada, frijol, haba, veza, trébol y carretilla), así como diferentes prácticas de laboreo y abonado e incorporación de microorganismos y mesofauna. Después de 3 a 5 años de rehabilitación se han logrado hacer productivos (Hidalgo *et al.*, 1999).

El presente trabajo es parte de una línea de investigación, enfocada en la habilitación de tepetates tipo duripán procedentes del estado de Morelos, a cargo del Dr. David Flores Román, en el Instituto de Geología de la UNAM, para lo cual han sido empleadas diversas enmiendas (estiércol, composta, vermicomposta y fertilizantes químicos) y especies vegetales anuales y perennes, arbóreas y herbáceas; principalmente gramíneas, leguminosas, especies forestales y plantas ornamentales, con la finalidad de evaluar su efecto en la estructuración del tepetate y en la mejora de su fertilidad. Así mismo se ha evaluado el rendimiento de las plantas al ser cultivadas en este sustrato, adicionado con enmiendas (Flores *et al.*, 2011; García *et al.*, 2008; García *et al.*, 2007; Plancarte, 2006; Izquierdo, 2004; Vargas, 2004; Velázquez, 2002; Acevedo *et al.*, 2001; Velázquez *et al.*, 2001; Acevedo, 1998; Velázquez, 1996).

Entre las especies perennes utilizadas se encuentran la higuera, el durazno, la casuarina, el pirul y el pasto *rhodes*; entre las plantas de ciclo corto se hayan el sorgo, la veza, el cempasúchil y el clavel. De las plantas mencionadas, las forestales y pastos perennes han resultado ser más exitosas en el proceso de habilitación, al ejercer una acción más prolongada sobre el sustrato (Plancarte, 2006; Velázquez 2002; Velázquez, 1996)

---

<sup>1</sup> Actualmente Institut de Recherche pour le Développement (IRD)

## 5. OBJETIVO

### Objetivo general

Cultivar el girasol ornamental, *Helianthus annuus L.*, en tepetate fragmentado adicionado con enmiendas orgánicas e inorgánicas bajo condiciones de invernadero, como una propuesta de incorporación de los tepetates al uso agrícola.

### Objetivos particulares

- Evaluar el efecto del cultivo del girasol y la aplicación de enmiendas orgánicas e inorgánicas (estiércol de bovino y fertilizantes inorgánicos) en la agregación y estabilidad de agregados del tepetate fragmentado.
- Evaluar el efecto del cultivo de girasol y la aplicación de enmiendas orgánicas e inorgánicas (estiércol de bovino y fertilizantes inorgánicos) en las propiedades químicas del tepetate fragmentado (pH, contenido de MO, C:N, CIC y bases intercambiables).
- Evaluar si el crecimiento y desarrollo de las estructuras vegetativas y reproductivas del girasol cultivado en tepetate fragmentado adicionado con enmiendas, son óptimos para la obtención de flor de corte.

## 6. HIPÓTESIS

- El establecimiento de las plantas de girasol, la aplicación de estiércol de bovino y fertilizantes químicos, contribuirán a la formación y estabilización de una estructura en el tepetate fragmentado, favoreciendo su habilitación para el uso agrícola.
- El establecimiento de las plantas de girasol, la aplicación de estiércol de bovino y fertilizantes químicos, promoverán la fertilidad del tepetate fragmentado, favoreciendo su habilitación para el uso agrícola.
- Los tratamientos a los que se adicionará el estiércol de bovino y la dosis más alta de fertilizante inorgánico, permitirán el cultivo de girasol en tepetate fragmentado y favorecerán el desarrollo de estructuras vegetativas y reproductivas adecuadas para el uso de *Helianthus annuus L.* como planta ornamental.

## 7. ÁREA DE ESTUDIO

El tepetate fue recolectado en el municipio de Tetela del Volcán, Estado de Morelos, en un sitio ubicado a  $18^{\circ}51'34.3''$  N y  $98^{\circ}44'16.6''$  W y 2127 msnm, sobre la carretera Tetela-Tlacotepec, a 9 km del poblado de Tetela del Volcán.

En el estado de Morelos se ha identificado la presencia de tepetates en una superficie de aproximadamente 65,000 ha, distribuidas en una franja altitudinal que va de los 1500 a los 2000 msnm, la cual corresponde al piedemonte de estructuras volcánicas. Esta superficie abarca una parte considerable de 11 de los municipios del estado entre los cuales se encuentra Tetela del Volcán, donde abundan los tepetates en el piedemonte del Popocatepetl, habiéndose formado a partir de tobas de ligera a medianamente consolidadas, alteradas por procesos pedogenéticos posteriores (Velázquez, 2002).

Tetela del Volcán se localiza en el noreste del Estado de Morelos, entre los paralelos  $18^{\circ} 49'$  y  $19^{\circ} 37'N$  y los meridianos  $98^{\circ} 37'$  y  $98^{\circ} 47' W$  a una altitud que oscila entre los 1700 y 5000 m.s.n.m. Cuenta con una superficie de  $98.518 \text{ km}^2$ . Limita al norte con el estado de México; al sur con el municipio de Zacualpan de Amilpas, al este con el estado de Puebla, y al oeste con el municipio de Ocuilco. Se encuentra dentro de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, en la subprovincia de Lagos y volcanes del Anahuac, dentro de su territorio se ubica una de las principales estructuras volcánicas del estado, el volcán Popocatepetl con 5,500 m de altitud. Así mismo forma parte de la región hidrológica del Balsas, hallándose entre las cuencas del Río Atoyac y del Río Grande de Amacuzac (INEGI, 2009).

La temperatura promedio mensual oscila entre los  $15.1$  y  $19.6^{\circ}C$ , el promedio de precipitación total anual es de  $1,065.1 \text{ mm}$ , ubicándose el periodo de mayor precipitación entre mayo y octubre, con un intervalo de precipitación mensual promedio que va de los  $81.2$  a los  $212.4 \text{ mm}$ . El clima es semifrío, subhúmedo con lluvias en verano, E(T), al norte del municipio; semifrío húmedo con abundantes lluvias en verano, C(E)(w) al centro; y templado subhúmedo con lluvias en verano, C(w) al sur (INEGI, 2011).

En cuanto a la geología del municipio, predominan las rocas ígneas extrusivas (brechas y basaltos) del periodo cuaternario, a las que sobreyacen suelos de tipo Andisol háplico, hiperdístico y umbricohúmico, excepto en las proximidades del volcán donde predomina el regosol esquelético (INEGI, 2011; Guerrero, 1993).

Del total de la superficie de Tetela del Volcán, 6,602 ha se destinan al uso forestal y 3,035 ha al uso agrícola. El 43.25 % del territorio se encuentra cubierto por bosque de coníferas representado por comunidades de pino y pino-encino. En cuanto a la tenencia de la tierra, 3,576 ha son de propiedad ejidal, 3,275 ha de propiedad comunal y 3,727 ha de propiedad particular (Enciclopedia de los municipios del Estado de Morelos, 2012).

Los suelos con predominante uso agropecuario, son derivados de cenizas volcánicas, con materia orgánica ácida y pobre en nutrimentos, o pobres en materia orgánica, limitados por pisos pedregosos y horizontes endurecidos. Debido a tales características se obtienen bajos y muy bajos rendimientos en el cultivo de cereales y leguminosas (maíz y frijol), así como en la ganadería con pastizal inducido, rendimientos altos en el cultivo de hortalizas y muy altos en el cultivo de frutales (Guerrero, 1993).

La actividad agropecuaria del municipio comprende cultivos anuales de temporal como maíz, frijol, jitomate y cempasúchitl; cultivos perennes de temporal como aguacate, pera, durazno e higo; y ganado mayor y menor (Enciclopedia de los municipios del Estado de Morelos, 2012).

#### **Características del tepetate inalterado:**

El tepetate recolectado tiene características físicas y químicas coincidentes con las reportadas por otros estudios realizados en la zona; se trata de un duripán de textura franca (29.26% de arena, 44.48% de limo y 25.71% de arcilla), con pH moderadamente ácido a neutro (6.7), contenido de materia orgánica muy bajo (0.1%), capacidad de intercambio catiónico media (14.8  $\text{cmol.kg}^{-1}$ ), contenido de calcio medio (6.60  $\text{cmol.kg}^{-1}$ ), de magnesio alto (5  $\text{cmol.kg}^{-1}$ ), de potasio bajo (0.28  $\text{cmol.kg}^{-1}$ ), una concentración de sodio de alrededor de 0.11  $\text{cmol.kg}^{-1}$  y un porcentaje de saturación de bases alto (Plancarte, 2006; Velázquez, 2002).

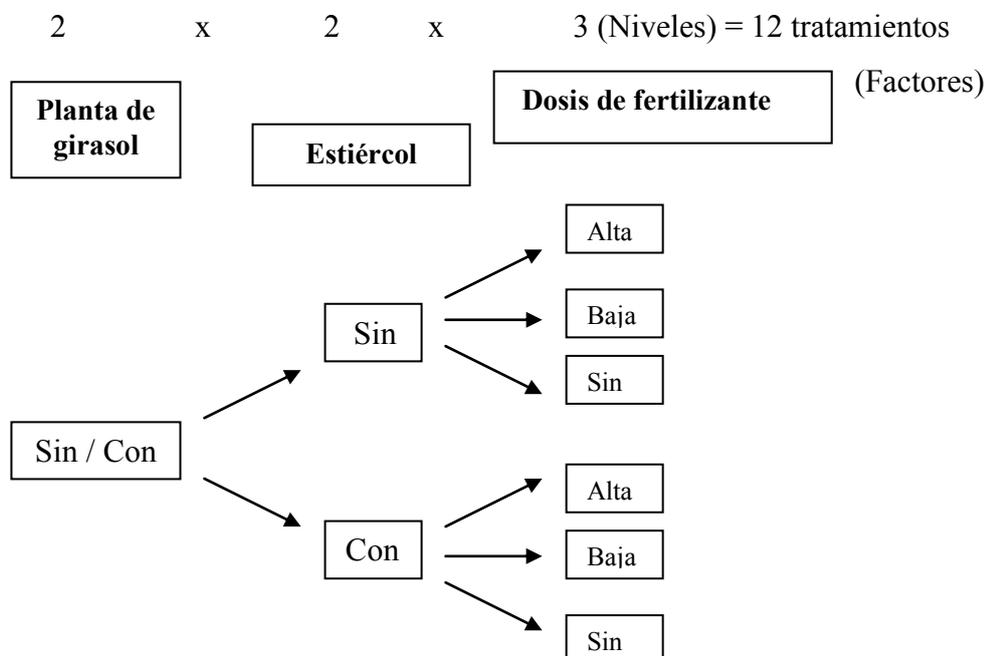
## 8. METODOLOGÍA

El estudio de la modificación de las propiedades físicas (agregación y estabilidad de agregados) y químicas (pH, MO, CIC, bases intercambiables y porcentaje de saturación de bases) del tepetate fragmentado por efecto de la adición de enmiendas (estiércol y fertilizante químico en dos dosis) y el establecimiento de la especie vegetal *Helianthus annuus L.*, así como la evaluación de los componentes del rendimiento del girasol, se llevó a cabo en condiciones de invernadero en el Instituto de Geología de la UNAM de junio a octubre de 2010.

### 8.1. Diseño experimental

Se empleó un diseño experimental trifactorial 2x2x3, que contempla los siguientes factores: planta de girasol considerando dos niveles: con planta y sin planta, estiércol de bovino considerando dos niveles: con estiércol y sin estiércol, y fertilizante químico administrado en dos dosis, alta (N150-P100-K50) y baja (N100-P60-K30) considerando tres niveles: sin fertilizante, con fertilizante en dosis alta y con fertilizante en dosis baja.

#### Factores considerados:



En total se establecieron 12 tratamientos con distribución completamente al azar con tres repeticiones cada uno; lo que equivale a un total de 36 unidades experimentales que

permanecieron en el invernadero del instituto de Geología de la UNAM durante un periodo de cinco meses (tabla 3 y figura 2).

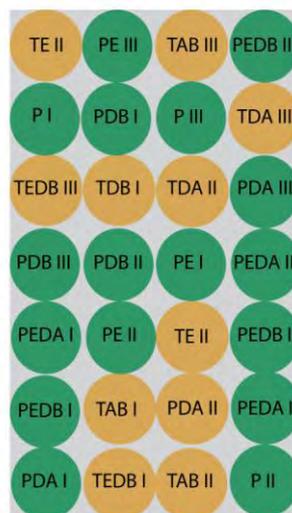
**Tabla 3: Tratamientos establecidos.**

Tratamiento	Planta	Estiércol	Fertilizante	Clave del tratamiento	Descripción del tratamiento
1	Sin	Sin	Sin	TAB	Testigo absoluto
2	Sin	Sin	Dosis alta	TDA	Testigo dosis alta
3	Sin	Sin	Dosis baja	TDB	Testigo dosis baja
4	Sin	Con	Sin	TE	Testigo estiércol
5	Sin	Con	Dosis alta	TEDA	Testigo estiércol dosis alta
6	Sin	Con	Dosis baja	TEDB	Testigo estiércol dosis baja
7	Con	Sin	Sin	P	Planta
8	Con	Sin	Dosis alta	PDA	Planta dosis alta
9	Con	Sin	Dosis baja	PDB	Planta dosis baja
10	Con	Con	Sin	PE	Planta estiércol
11	Con	Con	Dosis alta	PEDA	Planta estiércol dosis alta
12	Con	Con	Dosis baja	PEDB	Planta estiércol dosis baja

**BLOQUE 1**



**BLOQUE 2**



**Figura 2.** Distribución al azar de los 36 tratamientos establecidos en los bloques 1 y 2 del invernadero del Instituto de Geología, UNAM.

## 8.2. Desarrollo del experimento

El tepetate que se utilizó (240 kg en total) se recolectó en el municipio de Tetela del Volcán en el estado de Morelos. Se fragmentó haciendo uso de un martillo y se tamizó para obtener fragmentos de entre 10 y 2 mm. Una vez roturado, el material se colocó en 36 unidades experimentales con capacidad de 5 kg cada una. Las unidades carecían de orificios para evitar la pérdida de agua y nutrimentos.

Para evaluar la influencia de los tratamientos sobre el tepetate inalterado se preparó un testigo absoluto (tepetate sin planta y enmiendas). También se prepararon unidades experimentales testigo que solo contenían tepetate y las enmiendas correspondientes, con la finalidad de analizar su influencia individual y combinada sobre las transformaciones ocurridas en el tepetate en el transcurso del experimento (testigo con dosis baja de fertilizante, testigo con dosis alta de fertilizante, testigo con estiércol, testigo con estiércol y dosis baja de fertilizante, testigo con estiércol y dosis alta de fertilizante).

El estiércol, obtenido en el mercado de plantas de Xohimilco, fue adicionado en 18 unidades experimentales en una dosis de 72 Mg ha<sup>-1</sup> equivalente a 180 g por maceta<sup>2</sup>. Las 36 unidades experimentales fueron colocadas, siguiendo una distribución al azar, en los bloques 1 y 2 del invernadero del Instituto de Geología, bajo las siguientes condiciones de humedad y temperatura: 48.4% y 21.7 °C. En cada maceta, se colocaron tres semillas de girasol (previamente tratadas con captan disuelto en agua, un fungicida empleado en la desinfección de las semillas, a una concentración de 2g/L) que fueron regadas por la mañana y por la tarde durante nueve días. Se agregó cada vez, la cantidad de agua necesaria para dejar humedecido el tepetate justo por debajo de la superficie, de modo que las semillas tuviesen suficiente agua para germinar. En total se sembraron 72 semillas de girasol criollo, procedentes de la central de abastos, el 60 % de las cuales habían germinado a los ocho días después de la siembra (Figura 3A).

<sup>2</sup> Cálculo de la dosis de estiércol por maceta: Considerando que una ha de suelo (con una densidad aparente de 1 Mg/m<sup>3</sup>) pesa 2, 000, 000 kg y que la dosis de estiércol empleada es de 72 Mg ha<sup>-1</sup> se puede hacer la siguiente relación:

$$\begin{array}{l} 2, 000, 000 \text{ kg de sustrato} \quad \text{---->} 72, 000 \text{ kg de estiércol} \\ 5 \text{ kg de tepetate por maceta} \quad \text{---->} X \end{array}$$

$$X = \frac{360, 00}{2, 000, 000} = 0.18 \text{ kg} = 180 \text{ g de estiércol por maceta.}$$

Cuando las plántulas desarrollaron de 2 a 3 pares de hojas (Figura 3B) fueron trasplantadas de modo que sólo quedara una en cada maceta. A partir del séptimo día posterior al trasplante, las plantas fueron regadas cada tercer día.



**Figura 3.** A. Germinación de las semillas de girasol. B. Plántulas con 2 a 3 pares de hojas desarrolladas.

El fertilizante inorgánico fue agregado 42 días después de la germinación, durante la etapa del ciclo de vida que comprende el intervalo entre la inducción e iniciación floral hasta la antesis (de los 22 a los 58 días después de la emergencia de la plántula). Cabe mencionar que esta etapa es de suma importancia en la determinación de los componentes del rendimiento de la planta de girasol, pues se forma el máximo potencial de almacenaje de carbohidratos y minerales además de desarrollarse la inflorescencia (Hernández *et al.*, 1994).

La composición del fertilizante inorgánico fue la siguiente: como fuente de nitrógeno se utilizó sulfato de amonio ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ); como fuente de fósforo, superfosfato de calcio simple ( $\text{CaH}_4 (\text{PO}_4)_2 \text{H}_2\text{O}$ ), como fuente de potasio, cloruro de potasio (KCl). Se seleccionaron estos fertilizantes por ser los más comúnmente usados y de menor precio. A los tratamientos que se adicionó la dosis alta de fertilizante (N150-P100-K50) se agregó 1.83 g de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  marca Nutrigarden, 1.29g de  $\text{CaH}_4 (\text{PO}_4)_2 \text{H}_2\text{O}$  (comprado a granel en Xochimilco) y 0.21g de KCl marca J. T. Baker, disueltos en 100 ml de agua destilada. A los tratamientos que se adicionó la dosis baja de fertilizante (N100-P60-K30) se agregó 1.22g de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , 0.77 g de  $\text{CaH}_4 (\text{PO}_4)_2 \text{H}_2\text{O}$  y 0.125g de KCl disueltos en 100 ml de agua destilada.

Las dosis de fertilización fueron establecidas de acuerdo con las tablas de fertilización propuestas por Alba (1990) para cultivos de girasol bajo condiciones de riego y niveles

de fertilidad de suelo que van de medios a bajos (con contenidos de fósforo menores a 250 ppm y de potasio menores a 35 ppm), en los que se reportan rendimientos de entre 2500 y 3000 Mg ha<sup>-1</sup>.

### **8.3. Evaluación de propiedades físicas y químicas del tepetate**

Una vez concluido el experimento y habiéndose retirado las plantas de las macetas, el tepetate roturado se dejó secar a temperatura ambiente, sobre papel periódico. Después se procedió a tomar una muestra (aproximadamente 2 kg) de cada unidad experimental utilizando el método de cuarteo y se realizaron los análisis de laboratorio pertinentes para determinar sus propiedades físicas y químicas.

#### **Propiedades físicas**

##### **Distribución del tamaño de los agregados:**

Se hizo pasar una muestra de 500 g de tepetate seco a través de una columna de tamices con aberturas de 10.0, 5.0, 2.0, 1.0, y 0.25 mm, que se agitó de manera manual por un minuto. Después de la agitación, las fracciones con partículas de diversos diámetros se colocaron en recipientes de aluminio y se pesaron, cada fracción se expresó como un porcentaje del total de la muestra (Kemper y Rosenau, 1986).

##### **Estabilidad de agregados:**

Se determinó con base en el método de tamizado en húmedo referido por Kemper y Rosenau (1986). Se hizo pasar una muestra de tepetate de 100 g previamente humedecida, por una columna de tamices de 5.0, 3.0, 2.0, 1.0, 0.5, y 0.25 mm de abertura, que se mantuvo en agitación manual por un lapso de 1 minuto, mientras se encontraba sumergida en un recipiente con agua. Posteriormente las fracciones contenidas en cada tamiz se colocaron en charolas de aluminio y se secaron en la estufa a 100°C; las diferentes fracciones se pesaron hasta registrar un peso constante. El peso de cada fracción se expresó como un porcentaje del total de la muestra. El peso de la fracción <0.25 mm se obtuvo restando al peso inicial de la muestra, la suma de los pesos del resto de las fracciones.

## Propiedades químicas

### Potencial de hidrógeno:

Se determinó con un potenciómetro Orión modelo 920A, en el sobrenadante de una mezcla de tepetate y agua con relación 1:2.5 (10 g de tepetate tamizado a 2 mm en 25 ml de agua). La mezcla se agitó durante 30 minutos en un agitador mecánico antes de realizar la medición, (NOM-021-RECNAT-2000).

### Materia orgánica y relación C:N:

El contenido de materia orgánica se evaluó a través del porcentaje de carbono total mediante la siguiente relación (Jackson, 1970):  $\%MO = \%C \times 1.724$

La relación C:N se determinó con base en los porcentajes de materia orgánica y nitrógeno total utilizando la siguiente ecuación:  $C/N = \frac{\% MO}{N \text{ Total}} + 0.58$

El porcentaje de carbono total y nitrógeno total se determinaron en muestras de 1 mg de tepetate molido, mediante un analizador elemental CNHS/O Perkin Elmer 2400, serie II, en el modo CHN, bajo las siguientes condiciones analíticas: helio como gas acarreador, temperatura de combustión: 980°C, temperatura de reducción: 640°C, detector de conductividad térmica, acetanilida como compuesto de calibración y como material de referencia: una muestra de calibración de suelo LECO para CNS.

### Capacidad de intercambio catiónico (CIC):

Se determinó en muestras de 1 g de tepetate molido y tamizado a 2 mm, con base en Jackson (1970). Se empleó una disolución de  $CaCl_2$  1N a pH 7 para saturar superficie de intercambio con iones de  $Ca^{++}$  (catión índice). Posteriormente la muestra se lavó con alcohol etílico para eliminar el exceso de solución saturante. Finalmente el catión índice fue desplazado con una solución de NaCl 1N pH 7, para ser cuantificado por titulación con EDTA.

### Bases intercambiables:

Se extrajeron en muestras de 1 g de tepetate molido y tamizado a 2 mm, por centrifugación con acetato de amonio 1N pH 7. La determinación del  $Ca^{++}$  y  $Mg^{++}$  se

realizó por titulación del extracto con EDTA. El  $\text{Na}^+$  y el  $\text{K}^+$  se cuantificaron por flamometría, con un flamómetro CORNING modelo 400 (Sparks, 1996).

#### **Porcentaje de saturación de bases:**

Se calculó con base en la capacidad de intercambio catiónico y el contenido de bases

intercambiables extraídas con acetato de amonio, mediante la siguiente fórmula (NOM-021-RECNAT-2000):

$$\% \text{ S. B.} = \frac{(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + \text{Na}^{++} + \text{k}^+) 100}{\text{C.I.C}}$$

#### **8.4. Evaluación de los componentes del rendimiento de las plantas de girasol**

Cuatro días después de la apertura total del capítulo floral de las plantas sometidas a los distintos tratamientos se evaluaron los siguientes componentes del rendimiento de *Helianthus annuus L.*:

#### **Caracteres reproductivos:**

- ***Diámetro del capítulo:*** la medición se realizó con un flexómetro, durante el periodo de floración, cuando las flores liguladas se encontraban completamente desarrolladas y mantenían una posición perpendicular con respecto al capítulo.
- ***Longitud de las flores liguladas:*** Con un flexómetro se midió la longitud de cada una de las flores liguladas cuando éstas se encontraban en posición perpendicular al capítulo. Con las mediciones obtenidas se calculó un promedio.
- ***Número de flores liguladas:*** Se contó el número de flores liguladas en el momento previo al corte de la inflorescencia.
- ***Días de vida en florero:*** Las inflorescencias fueron cortadas dejando un tramo de 40 cm de tallo a partir de la base del capítulo y colocadas en agua en matraces limpios con una capacidad de 500 ml, se mantuvieron a temperatura ambiente y expuestas a luz continua durante 12 horas diarias. Se contaron los días a partir de la colocación de las inflorescencias en el florero, hasta la manifestación de los primeros síntomas de marchitez. Se tomó en cuenta como punto de término de la vida en florero el inicio de la senescencia de la primera flor ligulada, manifiesta á través de cambios en la coloración del pétalo y arrugamiento (Verdugo, 2003).

### Caracteres vegetativos:

- **Altura de la planta:** se midió desde la base del tallo hasta la superficie del capítulo.
- **Número de hojas:** se contó el número de hojas desde la base del tallo hasta la base del capítulo floral.
- **Diámetro del tallo:** se realizó un corte transversal a 30 cm de la base del tallo, posteriormente se midió el diámetro en la región del corte con un flexómetro.
- **Peso fresco de la planta:**

**Biomasa aérea total:** se determinó al momento del corte en una balanza analítica.

**Biomasa subterránea total:** una vez que se realizó el corte de la parte aérea de la planta, el contenido de la unidad experimental se vertió sobre papel periódico, posteriormente se extrajo la raíz y se registró su peso en una balanza analítica.

- **Peso seco de la planta:**

**Biomasa aérea total:** La parte aérea de la planta se colocó en una bolsa de papel estraza para después introducirla a la estufa durante tres días a una temperatura de 70°C. Posteriormente se pesó la bolsa hasta registrar un valor de peso constante.

**Biomasa subterránea total:** se siguió el mismo procedimiento que en el caso de la parte aérea.

- **Longitud promedio de las raíces laterales:** con un flexómetro se determinó la longitud de 2 de las raíces secundarias de mayor tamaño y se sacó un promedio de ambos valores.
- **Longitud de la raíz pivotante:** Se determinó con un flexómetro.

### 8.5. Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos obtenidos, se llevó a cabo mediante un análisis de varianza (ANOVA) para determinar si existieron diferencias significativas en las propiedades físicas y químicas del tepetate y en el rendimiento del girasol por efecto de los tratamientos implementados. Asimismo se realizó una prueba de comparación de medias de Tukey, para identificar entre que tratamientos existieron diferencias estadísticamente significativas, en cuanto al los componentes del rendimiento de la especie vegetal y calidad del tepetate. Para todo lo anterior se utilizó el programa estadístico JMP 5.0.1 (2002).

Se considera que hay una diferencia significativa entre tratamientos cuando la significancia arrojada por el análisis de varianza es menor a 0.05, lo que equivale a un 95% de probabilidad de que los datos que se están analizando presentan una diferencia que no es debida al azar. Una significancia menor a 0.01 equivale a un 99% de probabilidad de que los datos que se están analizando presentan una diferencia que no es debida al azar.

## **9. DISCUSIÓN Y RESULTADOS**

### **9.1. Análisis de las propiedades físicas del tepetate**

#### **9.1.1. Agregación o porcentaje de fragmentos por categorías de tamaño.**

En el presente trabajo se empleará el término “fragmento” para designar las unidades de tepetate obtenidas al término del experimento ya que en trabajos previos, en los que se han implementado las mismas condiciones de manejo (cultivo de plantas y adición de enmiendas orgánicas e inorgánicas en tepetate fragmentado), solo se ha documentado la presencia de agregados después de 2 años en los que el material roturado se encontró expuesto al efecto de los tratamientos (Velázquez 2002). Además no se utilizó ninguna metodología para diferenciar los fragmentos de los agregados que se hubiesen podido formar. Asimismo se utilizará el término “porcentaje de agregación” para designar el porcentaje de fragmentos distribuidos en cada categoría de tamaño, por haberse empleado una metodología de cuantificación y clasificación de agregados para monitorear los cambios en la distribución de los fragmentos por efecto de los tratamientos (Kemper y Rosenau 1986).

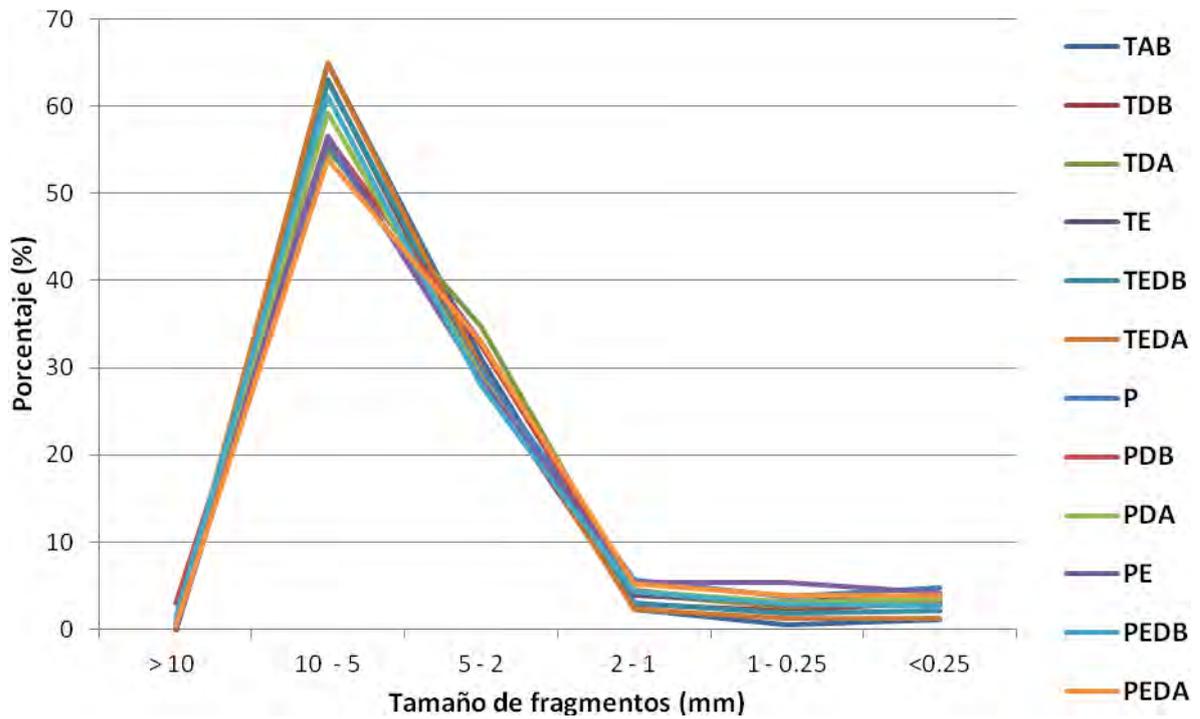
La figura 4 muestra que todos los tratamientos presentaron el mayor porcentaje de agregación en la fracción de 10 a 5 mm y el menor porcentaje en la fracción mayor a 10 mm, siguiendo una distribución semejante a la del testigo absoluto (TAB), únicamente expuesto a los procesos de humectación-dsecación asociados al riego. La prueba de Tukey indicó que no existieron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en cuanto al porcentaje de agregación (Tabla 4); sin embargo, se observaron algunas tendencias que serán descritas e interpretadas a continuación.

**Tabla 4.** Distribución del tamaño de fragmentos para los tratamientos establecidos, desviación estándar y significancia del análisis de comparación de medias (prueba de Tukey).

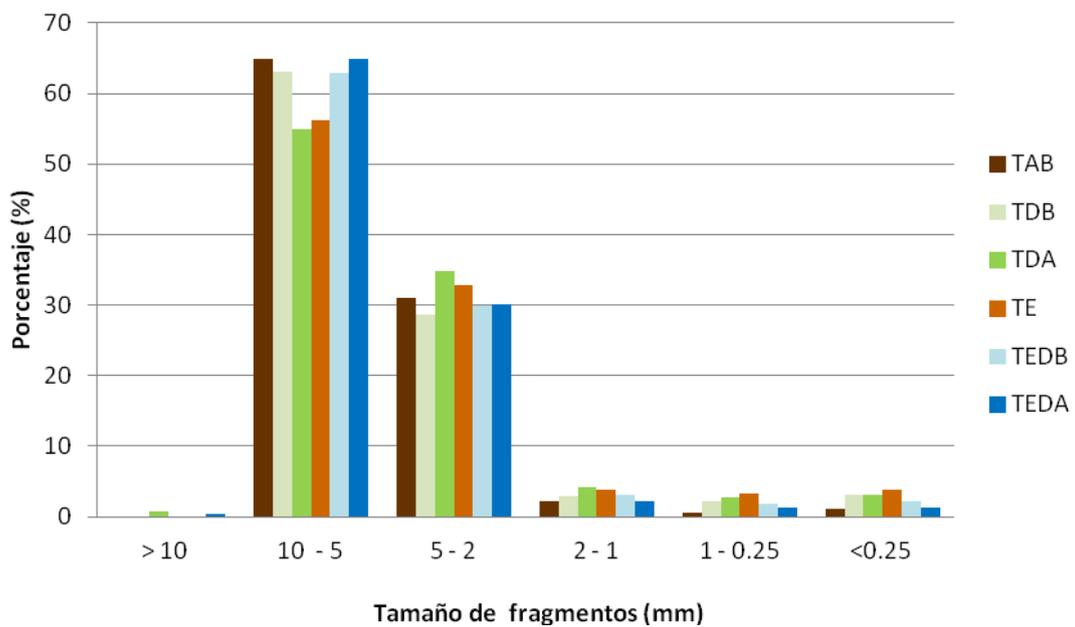
	Porcentaje de agregación (%)					
	> 10 mm	10- 5mm	5 - 2 mm	2 - 1 mm	1 – 0.25 mm	< 0.25 mm
<b>TAB</b> <sup>2</sup>		64.99 ± 8.20 a	31.02 ± 6.15 a	2.30 ± 1.67 a	0.60 ± 0.43 a	1.09 ± 0.07 a <sup>1</sup>
<b>TDB</b>		63.04 ± 6.39 a	28.75 ± 2.34 a	2.90 ± 1.05 a	2.19 ± 1.46 a	3.12 ± 1.69 a
<b>TDA</b>	0.71 a	55.01 ± 7.75 a	34.79 ± 3.37 a	4.12 ± 1.26 a	2.66 ± 1.50 a	3.18 ± 1.80 a
<b>TE</b>		56.12 ± 8.59 a	32.91 ± 4.40 a	3.86 ± 1.28 a	3.24 ± 1.26 a	3.87 ± 2.35 a
<b>TEDB</b>		62.94 ± 1.91 a	29.85 ± 2.72 a	3.08 ± 1.46 a	1.92 ± 1.46 a	2.21 ± 1.81 a
<b>TEDA</b>	0.35 a	64.99 ± 5.39 a	30.07 ± 3.67 a	2.24 ± 0.89 a	1.25 ± 0.70 a	1.32 ± 0.37 a
<b>P</b>	0.41 a	55.71 ± 5.43 a	29.75 ± 1.25 a	5.70 ± 2.40 a	3.84 ± 1.60 a	4.85 ± 1.45 a
<b>PDB</b>	3.08 a	56.37 ± 6.71 a	32.46 ± 3.07 a	4.56 ± 1.77 a	2.74 ± 1.81 a	2.84 ± 1.50 a
<b>PDA</b>	0.61 ± 0.23 a	59.27 ± 10.03 <sup>a</sup>	29.07 ± 5.38 a	4.38 ± 2.00 a	3.23 ± 2.95 a	3.44 ± 3.72 a
<b>PE</b>		56.50 ± 10.59 <sup>a</sup>	28.58 ± 4.48 a	5.39 ± 2.14 a	5.33 ± 2.28 a	4.20 ± 1.15 a
<b>PEDB</b>	1.37 ± 1.37 a	61.14 ± 11.16 <sup>a</sup>	27.92 ± 6.09 a	4.37 ± 1.88 a	2.91 ± 1.51 a	2.75 ± 0.85 a
<b>PEDA</b>	0.43 a	53.92 ± 9.33 a	32.89 ± 4.43 a	5.21 ± 2.05 a	3.90 ± 1.93 a	3.93 ± 1.26 a

<sup>1</sup> Los valores que tienen la misma letra son estadísticamente semejantes.

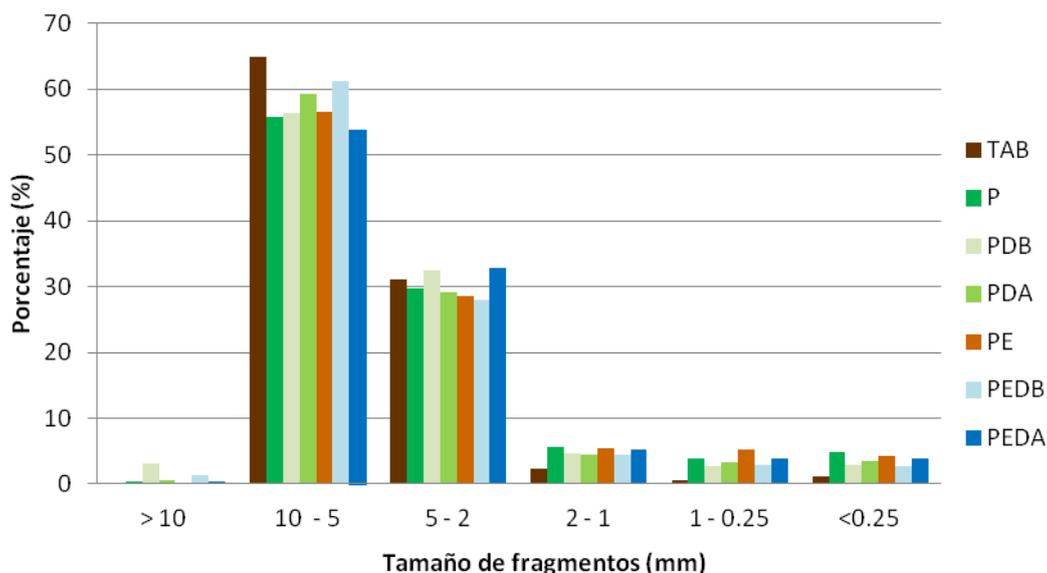
<sup>2</sup>TAB: Testigo Absoluto, TDB: Testigo Dosis Baja, TDA: Testigo Dosis Alta, TE: Testigo Estiércol, TEDB: Testigo Estiércol Dosis Baja, TEDA: Testigo Estiércol Dosis Alta, P: Planta, PDB: Planta Dosis Baja, PDA: Planta Dosis Alta, PE: Planta Estiércol, PEDB: Planta Estiércol Dosis Baja, PEDA: Planta Estiércol Dosis Alta.



**Figura 4.** Distribución porcentual promedio de fragmentos de tepetate por categorías de tamaño.



**Figura 5.** Distribución porcentual promedio de fragmentos de tepetate por categorías de tamaño en los tratamientos testigo (sin planta de girasol).



**Figura 6.** Distribución porcentual promedio de fragmentos de tepetate por categorías de tamaño en los tratamientos con plata de girasol comparados con el testigo absoluto.

En las figuras 5 y 6, se puede apreciar que los porcentajes de agregación en los tratamientos con planta, en las categorías de 2-1 mm, 1-0.25 mm y menores a 0.25 mm, parecen haberse incrementado con respecto a los porcentajes de agregación en los tratamientos testigo, al mismo tiempo que se redujeron en la categoría de 10 a 5 mm. Únicamente en dos de los tratamientos testigo, TDA y TE, el porcentaje de agregación se redujo en la categoría de 10 a 5 mm, a semejanza de los tratamientos con planta, incrementándose en la categoría de 5 a 2 mm.

La reducción de los porcentajes de agregación en el intervalo de 10 a 5 mm en los tratamientos con planta y su incremento en las fracciones de menor diámetro (2-1, 1-0.25 y <0.25 mm), podría indicar el comienzo de un proceso de disgregación promovido por el crecimiento de las raíces vegetales en el tepetate fragmentado. Por otra parte, la reducción en los porcentajes de agregación en el intervalo de 10 a 5 mm, en los tratamientos TDA y TE respecto al TAB, puede estar relacionada con otro tipo de fuerza disruptiva como la humectación asociada al riego.

Al evaluarse estadísticamente la influencia individual de los factores estudiados (planta, estiércol y fertilizante) y su interacción, sobre la distribución de los fragmentos de tepetate, se observó que la planta fue el único factor que produjo diferencias

estadísticamente significativas entre tratamientos en el intervalo de 0.25 a 2 mm, siendo altamente significativas en las fracciones de 0.25 a 1 mm y 1 a 2 mm (Apéndice I). Esto refuerza la hipótesis de que la planta pudo haber tenido un efecto importante en la disgregación de los fragmentos mayores y por lo tanto en el aumento de los porcentajes absolutos de los fragmentos menores a 2 mm.

Se ha documentado el éxito de las dicotiledóneas en la penetración y desestabilización de sustratos compactados, debido a que sus raíces son duras y resistentes a la deformación, además de que ejercen una presión considerable sobre el sustrato al crecer en diámetro (Materchera *et al.*, 1992). Asimismo las especies de plantas perennes muestran una mayor efectividad en la penetración de capas endurecidas debido a que ejercen una acción prolongada sobre el sustrato, mientras que las plantas anuales cuya sobrevivencia depende de una extensión radical rápida, ejercen una acción reducida (Scott, 1977).

Por otra parte, habría que tomar en cuenta, que las raíces en crecimiento, sobre todo en suelos compactados, se ramifican preferentemente entre las superficies expuestas y entre las unidades estructurales del suelo más que a través del material compactado, debido a su incapacidad para vencer la magnitud de las fuerzas que resisten al incremento en el tamaño de los poros (Scott 1977). Por lo anterior, cabría suponer que otras fuerzas disruptivas pudieron haber coadyuvado al efecto disgregante de las raíces sobre el material compactado, que por sí solas habrían encontrado una mayor dificultad para penetrar en las unidades de tepetate. Los ciclos de humectación-desección asociados al riego pudieron haber sido las fuerzas coadyuvantes en el proceso de disgregación producido por la planta.

De acuerdo con Kemper y Rosenau (1986), la humectación debida al riego puede ser una fuerza altamente disruptiva en los agregados del suelo, ya que el agua ejerce presión al ingresar entre las superficies de las partículas de arcilla apartándolas unas de otras. Cuando la humectación es rápida, los agregados (en este caso los fragmentos) se mojan de manera no uniforme debido a que las zonas expuestas al frente de humedad sufren un hinchamiento osmótico más rápido que las zonas menos expuestas. Esto conduce a la formación de planos de fractura y al posterior rompimiento de los agregados. La absorción localizada de agua por parte de las raíces, también puede provocar que la

humectación de los agregados ó fragmentos no sea homogénea incrementando así la formación de grietas (Russell, 1973). En el caso del girasol, sus elevadas tasas de transpiración y su baja eficiencia en el aprovechamiento de agua, cuando dispone de ella en abundancia<sup>3</sup>, pudieron haber tenido un efecto importante en la intensidad de los procesos de desecación y en la humectación no homogénea de los fragmentos de tepetate, contribuyendo a corto plazo a la aparición de grietas en el material roturado.

Una vez formadas las grietas y planos de fractura por los riegos subsecuentes y la absorción radical de agua, las mismas raíces se podrían haber desarrollado con mayor facilidad en los nuevos espacios y poros creados, evitando así la recompactación del material e incrementado su disgregación.

El efecto disruptivo de las raíces del girasol, observado en el presente experimento, no excluye el hecho de que esta planta pueda tener una influencia importante en la estabilización de la estructura del tepetate a largo plazo. En experimentos de mayor duración, en los que se han establecido especies perennes sobre tepetate fragmentado con adición de enmiendas, se han observado importantes efectos de las plantas en la macroagregación del tepetate (Velázquez, 2002).

Aunque las influencias del estiércol y el fertilizante en la agregación no fueron significativas en este trabajo, habría que tener en cuenta que dichas enmiendas actuaron de manera indirecta en el proceso de disgregación provocado por la planta, al promover el desarrollo de las raíces vegetales.

Por último, en dos de los tratamientos testigo (TDA Y TEDA) y en todos los tratamientos con planta excepto en PE, se observó la formación de fragmentos mayores a 10 mm que no estuvieron presentes al inicio del experimento. Esto coincide con los resultados reportados por Flores *et al.* (2011), Plancarte (2006) y Velázquez *et al.* (2001), que atribuyeron la presencia de unidades mayores a 10 mm en tepetate fragmentado sometido a la acción de enmiendas y especies vegetales, a los procesos de agregación provocados principalmente por los ciclos de humectación-desecación. El proceso de secado, en los intervalos de tiempo transcurridos entre riegos, pudo haber provocado la precipitación entre los fragmentos del material fino resultante de la

---

<sup>3</sup> Alba (1990) estima un consumo de hasta 1m<sup>3</sup> de agua para producir de 2 a 3 kg de biomasa seca.

disgregación y de compuestos inorgánicos amorfos (sílice), producidos por el intemperismo del tepetate, favoreciendo la cohesión de éstos en agregados mayores a 10 mm (Flatch *et al.*, 1992).

Aunque la presencia de las plantas no provocó diferencias significativas entre los porcentajes de agregados en la fracción mayor a 10 mm, éstas también pudieron haber influido en su formación. De acuerdo con Six (2004), Agners (1998) y Oades (1993), las raíces de las plantas controlan directa e indirectamente la formación y estabilización de los macroagregados del suelo. Actúan directamente como agentes aglutinantes temporales al formar estructuras reticulares que mantienen a las partículas o fragmentos agrupados. A su vez los productos de la rizodepositación, funcionan como sustancias aglutinantes y de manera indirecta promueven la formación de agentes de unión transitorios, al estimular la actividad microbiana, cuyos productos metabólicos, principalmente polisacáridos, favorecen la agregación de las partículas de suelo.

La materia orgánica aportada por el estiércol, los productos de rizodepositación, la biomasa microbiana y sus productos metabólicos también pueden contribuir a la formación y estabilización de macro y microagregados en el tepetate a largo plazo, lo que no fue evidente en este experimento debido a su corta duración. Velázquez (2002), encontró que la interacción de las plantas (pasto rhodes e higuera), el estiércol y los fertilizantes químicos, produce diferencias significativas en el porcentaje de agregación del tepetate con respecto al material únicamente sometido a riegos subsecuentes, después de 12 meses de transcurrido el establecimiento de los tratamientos. La misma autora refiere que durante el primer año de influencia de los factores mencionados en tepetate fragmentado, la tendencia en la distribución de los porcentajes de agregación indica el predominio de un proceso de disgregación de los fragmentos y hasta dos años después se logra observar la formación de agregados.

### **9.1.2. Estabilidad de agregados**

La tabla 5 muestra que no se obtuvieron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos en cuanto a la estabilidad de los fragmentos. Los mayores porcentajes de fragmentos estables, se observaron en la fracción mayor a 5 mm y los menores porcentajes en la fracción de 0.5 a 0.25 mm, siguiendo una distribución semejante a la

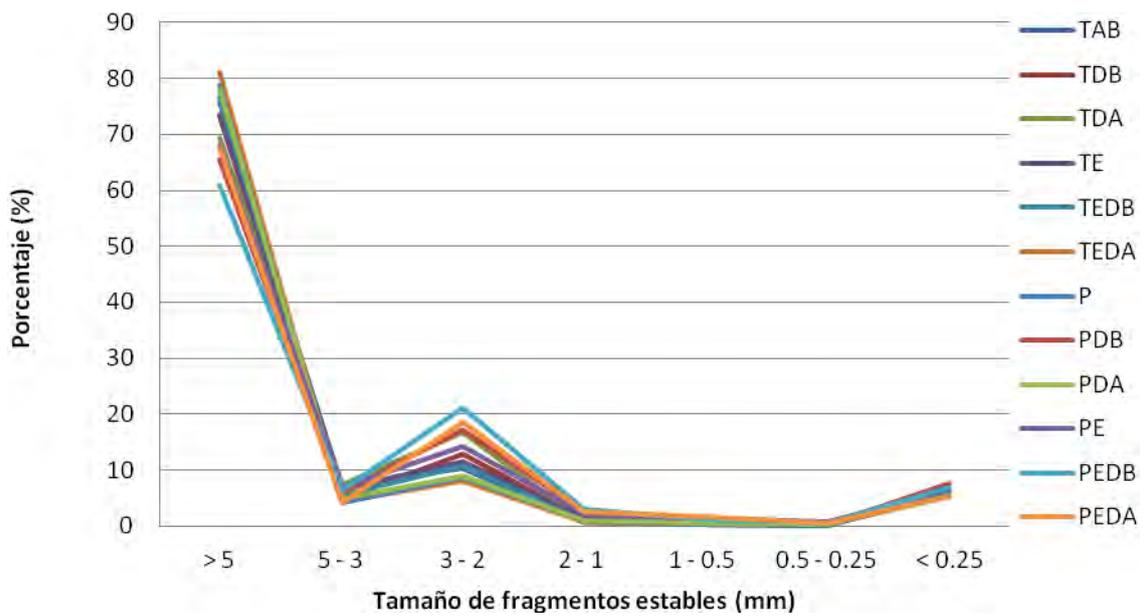
del testigo absoluto. En la fracción de 3 a 2 mm se registró la mayor variación en los porcentajes de fragmentos estables entre tratamientos (Figura 7).

La equivalencia estadística en la estabilidad de los fragmentos sometidos a los diversos tratamientos, se debió a que las unidades de tepetate tipo duripán, al estar consolidadas y cementadas por procesos geológicos y pedogenéticos, constituyen materiales de alta estabilidad (Velázquez, 2002); a esto se suma que los cinco meses en que transcurrió el experimento no fueron suficientes para provocar que la alteración del material por efecto de las plantas y las enmiendas, se manifestara en cambios significativos en su estabilidad.

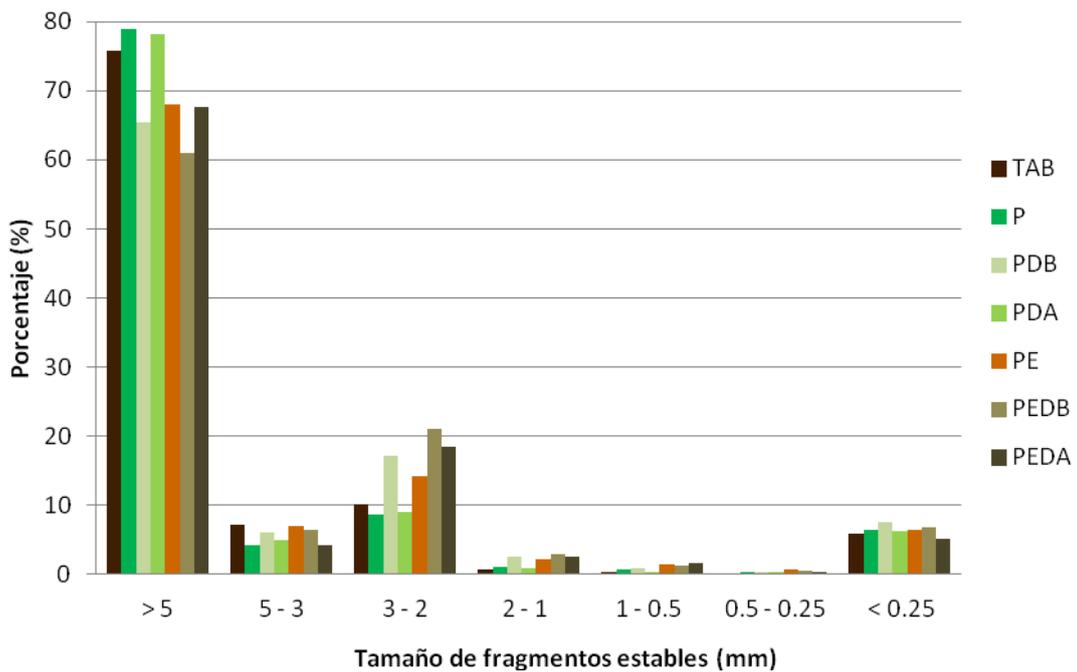
**Tabla 5.** Porcentaje promedio de fragmentos estables de tepetate por categorías de tamaño en los tratamientos establecidos, desviación estándar y significancia del análisis de comparación de medias (prueba de Tukey).

	Porcentaje de fragmentos estables (%)						
	> 5 mm	5 - 3 mm	3 - 2 mm	2 -1 mm	1 - 0.5 mm	0.5 - 0.25 mm	<0.25 mm
<b>TAB</b>	75.78 ± 5.35 a	7.11 ± 3.06 a	10.20 ± 4.34 a	0.66 ± 0.72 a	0.25 ± 0.24 a	0.07 ± 0.06 a	5.93 ± 0.74 a
<b>TDB</b>	73.33 ± 12.08 a	4.76 ± 2.42 a	12.78 ± 6.38 a	1.16 ± 0.87 a	1.22 ± 1.74 a	0.57 ± 0.73 a	6.17 ± 2.64 a
<b>TDA</b>	69.39 ± 7.14 a	7.43 ± 1.92 a	16.80 ± 5.2 a	0.80 ± 0.21 a	0.15 ± 0.08 a	0.18 ± 0.01 a	5.24 ± 1.65 a
<b>TE</b>	73.55 ± 3.29 a	6.63 ± 1.10 a	11.54 ± 2.28 a	1.28 ± 0.98 a	1.01 ± 1.16 a	0.44 ± 0.34 a	5.55 ± 1.01 a
<b>TEDB</b>	76.65 ± 2.30 a	5.57 ± 1.01 a	10.85 ± 0.93 a	0.71 ± 0.35 a	0.17 ± 0.01 a	0.11 ± 0.07 a	5.98 ± 0.87 a
<b>TEDA</b>	80.96 ± 10.25 a	4.42 ± 2.27 a	8.02 ± 7.05 a	0.63 ± 0.96 a	0.37 ± 0.53 a	0.16 ± 0.19 a	5.44 ± 0.05 a
<b>P</b>	78.88 ± 10.95 a	4.16 ± 1.35 a	8.62 ± 6.80 a	1.02 ± 0.85 a	0.66 ± 0.46 a	0.30 ± 0.20 a	6.36 ± 1.34 a
<b>PDB</b>	65.47 ± 8.06 a	6.00 ± 0.88 a	17.21 ± 4.45 a	2.55 ± 1.61 a	0.97 ± 0.74 a	0.33 ± 0.19 a	7.46 ± 1.27 a
<b>PDA</b>	78.19 ± 6.97 a	4.90 ± 2.65 a	9.03 ± 4.62 a	0.86 ± 0.27 a	0.41 ± 0.12 a	0.32 ± 0.07 a	6.30 ± 0.80 a
<b>PE</b>	68.05 ± 2.86 a	6.91 ± 2.35 a	14.18 ± 0.54 a	2.13 ± 1.09 a	1.49 ± 1.24 a	0.76 ± 0.58 a	6.48 ± 0.61 a
<b>PEDB</b>	60.99 ± 3.44 a	6.42 ± 1.65 a	21.04 ± 3.63 a	3.00 ± 1.01 a	1.21 ± 0.31 a	0.50 ± 0.09 a	6.84 ± 0.46 a
<b>PEDA</b>	67.61 ± 15.26 a	4.22 ± 1.89 a	18.53 ± 10.46 a	2.58 ± 1.72 a	1.54 ± 0.60 a	0.36 ± 0.15 a	5.16 ± 1.05 a

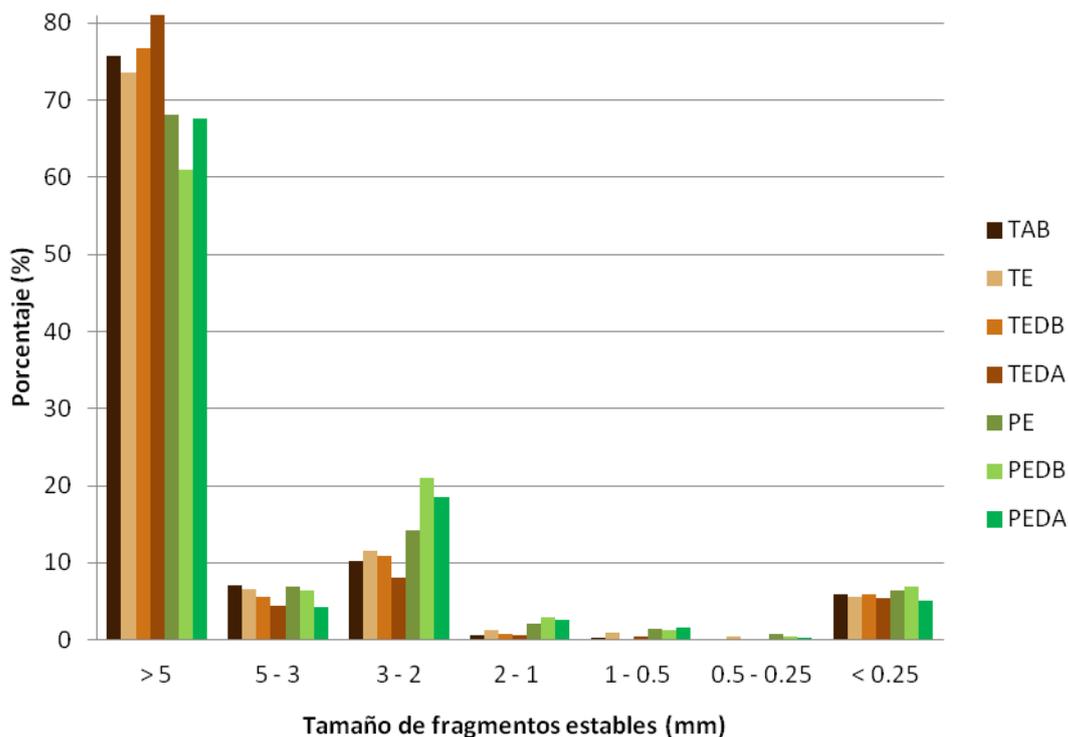
<sup>1</sup> Los valores que tienen la misma letra son estadísticamente semejantes.



**Figura 7.** Distribución porcentual promedio de fragmentos estables de tepetate.



**Figura 8.** Distribución porcentual promedio de fragmentos estables en los tratamientos con plata y en el testigo absoluto.



**Figura 9.** Distribución porcentual promedio de fragmentos estables en los tratamientos con estiércol y en el testigo absoluto.

Por otra parte, el reacomodo y empaquetamiento del material fino resultante de la meteorización de los fragmentos durante los periodos de desecación, también pudo haber contribuido al mantenimiento de la estabilidad del tepetate. Esta suposición se sustenta en lo planteado por Deneff y colaboradores (2001), quienes señalan que conforme se incrementan los ciclos de humectación-desecación, la estabilidad de los agregados aumenta y éstos se rompen cada vez menos, debido a que en cada periodo de desecación las partículas disgregadas se reacomodan en configuraciones más empacadas, lo que resulta en una mayor cohesión entre ellas.

A lo anterior se suma el efecto de los ciclos de humectación-desecación en la precipitación de cubiertas de sílice y en la recementación del material roturado. De acuerdo con Flatch y colaboradores (1992), cuando el suelo está húmedo, el sílice hidratado ( $\text{Si}(\text{OH})_4$ ) se encuentra adsorbido en la superficie de las arcillas, sesquióxidos y aluminosilicatos primarios; cuando el suelo se seca el  $\text{Si}(\text{OH})_4$  se precipita en forma de óxido de silicio entre las superficies de los minerales y partículas de suelo. La sucesión

de ciclos provoca un aumento progresivo de las cubiertas de  $\text{SiO}_2$  que puede llevar a la cementación de las partículas y al incremento de su estabilidad.

Al no haber obtenido diferencias significativas en el porcentaje de fragmentos estables entre tratamientos, se procedió a analizar la influencia individual de los factores planta, estiércol y fertilizante así como su interacción, en la estabilidad de los fragmentos. Con lo que se encontró que el efecto del girasol en interacción con el estiércol, produjo diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en el porcentaje de fragmentos estables para la fracción mayor a 5 mm y que la especie vegetal produjo diferencias altamente significativas entre tratamientos, para la fracción de 2 a 1 mm. (Apéndices I y II).

Se realizaron las gráficas 8 y 9 con la finalidad de mostrar los porcentajes de fragmentos estables para los diferentes tratamientos, tomando como elemento común en cada caso la presencia de planta (figura 8) y la adición de estiércol (figura 9), por haber sido estos factores o su interacción, las únicas fuentes de variación que arrojaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos. Las gráficas también se elaboraron con la finalidad de identificar tendencias en la influencia de ambos factores.

En las gráficas mencionadas, se observa que los tratamientos que contuvieron planta y estiércol, tendieron a presentar una menor estabilidad en la fracción mayor a 5 mm y un mayor porcentaje de fragmentos estables distribuidos en el intervalo de 0.5 a 3 mm con respecto a los tratamientos TE, TEDB, TEDA, P y PDA.

La disminución de la estabilidad en la categoría de fragmentos mayores a 5 mm en PE, PEDA y PEDB, se puede asociar a que en estos tratamientos, la adición temprana de estiércol, promovió el desarrollo de sistemas radicales densos, con abundantes raíces secundarias gruesas, que pudieron haber tenido un efecto desestabilizante al penetrar en el sustrato e incrementar el agrietamiento de los fragmentos. Como ya se mencionó anteriormente, la penetración de las raíces en el sustrato, principalmente en las grietas, puede inducir la desestabilización de los macroagregados del suelo y su posterior disgregación (Agners, 1998). A esto se suma que los agregados ó fragmentos de mayor tamaño, son más susceptibles a los ciclos de humectación-deseccación, ya que

desarrollan un mayor número de planos de fractura que los fragmentos pequeños (Denef *et al.*, 2001).

La desestabilización y posterior disgregación de los fragmentos mayores a 5 mm probablemente fueron las causas del incremento en los porcentajes de fragmentos estables en el intervalo de 0.5 a 3 mm. Sin embargo hay que tomar en cuenta que la presencia de mayores porcentaje de agregados estables en este intervalo en PE, PEDB y PEDA respecto al resto de los tratamientos, también pudo estar influenciada por el efecto estabilizante de la MO contenida en la enmienda, las redes de raíces finas, los exudados radicales producidos por las plantas y los mucílagos resultantes de la actividad metabólica de los microorganismos (Tysdall, 1994). Chenu y colaboradores (2000), mencionan que estos materiales orgánicos incrementan la estabilidad de los agregados al bloquear sus poros y reducen las tasas de humedecimiento del suelo, con lo que amortiguan las fuerzas disruptivas ejercidas por el agua durante la precipitación y el riego.

Respecto a la influencia de las plantas en la estabilización de la estructura del suelo Agners (1998) sugiere que la intensificación de los procesos de desecación en la rizósfera asociados la absorción radical de agua, induce la sorción de agentes ligantes temporales y transitorios a la superficie de las partículas de suelo incrementando la estabilidad de los macroagregados.

Aunque la reorganización de los fragmentos disgregados no se observó en este trabajo por su corta duración, es importante resaltar que las partículas disgregadas por el efecto disruptivo del crecimiento radical y los ciclos de humectación-desecación en etapas tempranas de la transformación del tepetate roturado, se pueden reagrupar en etapas posteriores bajo el efecto de los exudados radicales liberados en la rizósfera, que actúan como agentes de unión transitorios y por la formación de extensas redes de raíces finas que mantienen unidas a las partículas de tepetate y a la materia orgánica en macroagregados de manera temporal; por lo que las fuerzas disruptivas provocadas por la penetración de las raíces pueden ser promotoras de procesos de reorganización y agregación del tepetate a largo plazo (Agners, 1998).

Este fenómeno ha sido documentado por Velázquez (2001), quien encontró la formación de macroagregados de entre 2 y 20 mm, a partir de tepetate roturado con un diámetro inicial menor a 2 mm, después de 18 meses de ser sometido a la influencia de higuera y pasto *rhodes* adicionados con fertilizante químico.

Por otra parte, en los tratamientos testigo con estiércol, se observa una tendencia al mantenimiento e incremento de la estabilidad de los fragmentos mayores a 5 mm respecto al testigo absoluto y a los tratamientos que contuvieron estiércol y planta. La mayor estabilidad aparente de estos tratamientos con respecto a los que presentaron planta se pudo deber a la ausencia de las fuerzas disruptivas asociadas a la penetración de las raíces. Mientras que la tendencia al aumento de su estabilidad en cuanto al TAB (particularmente en el caso de TEDB y TEDA) pudo haber tenido un origen distinto.

El efecto favorable del estiércol en el suelo, además de representar una fuente de nutrimentos para las plantas e incrementar la retención de agua, se debe a que constituye una fuente de materia orgánica cuya descomposición e inmovilización contribuyen a la estabilización de los agregados y poros del suelo (Salazar *et al.*, 2003).

Hafida y colaboradores (2008), mencionan algunos de los efectos benéficos de la materia orgánica en la estabilidad estructural de los suelos, entre los que cabe resaltar la restricción del hinchamiento diferencial de los agregados; el decrecimiento de la presión interna generada por los componentes gaseosos del suelo durante los procesos de humectación rápida asociados al riego y la precipitación; y la oclusión y modificación de la superficie de los poros que reducen las tasas de humedecimiento del suelo. Las tres propiedades citadas se deben al carácter hidrófobo de algunos de los componentes de la materia orgánica, como es el caso de los detritos de plantas y microorganismos, bacterias y materia orgánica amorfa libre (Chenu *et al.*, 2000).

De lo anterior se puede suponer que la materia orgánica aportada por el estiércol en los tratamientos TEDB y TEDA fue la responsable de mantener e incluso incrementar la estabilidad de los fragmentos más susceptibles de disgregarse (mayores a 5 mm) con respecto al TAB, al disminuir el efecto disruptivo de la humectación y promover la cohesión entre las partículas de tepetate gracias a que pudo haber favorecido la

formación de asociaciones intermoleculares entre las partículas finas durante los procesos de desecación (Denef *et al.*, 2001).

Por otro lado, el estiércol, además de representar una fuente directa de materia orgánica cuyas propiedades estabilizantes ya fueron mencionadas en los párrafos anteriores, promueve indirectamente la formación de productos de síntesis microbiana como polisacáridos y gomas, que funcionan como agentes aglutinantes transitorios de las partículas de suelo (Bossuyt *et al.*, 2001)

De acuerdo con Kay (1998), los materiales procedentes de plantas, animales y microorganismos que forman parte de la materia orgánica del suelo y no se encuentran asociados a la fracción mineral se caracterizan por su labilidad y por su capacidad para fungir como estabilizantes temporales de la estructura del suelo. Se distinguen dos tipos de materiales orgánicos lábiles: los que ocluyen los poros del suelo, como las raíces finas e hifas de hongos y los que se encuentran en forma particulada y libre (como los contenidos en el estiércol). Estos últimos representan una fuente de carbón mineralizable, importante para los microorganismos del suelo y sus predadores, que al descomponerla producen materiales extracelulares, como los polisacáridos, que se adsorben a la fracción mineral del suelo y son muy efectivos en el fortalecimiento de los planos de fractura de sus agregados.

Aunque la modificación de la forma y estabilidad estructural del tepetate por efecto de las plantas de girasol y las enmiendas, no produjo diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos establecidos, sí se observaron ligeras transformaciones en las que la planta y el estiércol tuvieron una mayor influencia. Las plantas incrementaron los procesos de disgregación de los fragmentos mayores a 5 mm, en los tratamientos donde dispusieron de una fuente de materia orgánica mineralizable desde etapas tempranas de su desarrollo (fase inicial del proceso de estructuración); además fomentaron el incremento de fragmentos estables en el intervalo de 0.5 a 3 mm. Por su parte el estiércol contribuyó a la estabilización de los fragmentos mayores a 5 mm en los tratamientos que no incluyeron la presencia de la especie vegetal. Lo anterior indica que la combinación de ambos factores tuvo un efecto tendiente a la disgregación, probablemente asociado al desarrollo de sistemas radicales extensos y vigorosos.

Velázquez (2002) señala la necesidad de seleccionar especies con sistemas radicales fuertes, densos y con un alto potencial de producción de exudados, así como la importancia del aporte de materia orgánica a través de enmiendas, para inducir la formación de una estructura estable en tepetate fragmentado a largo plazo. A su vez, sugiere un periodo mínimo de dos años para observar el efecto de la interacción de ambos factores en la formación de unidades estructurales estables (macro y microagregados) debido a que en este periodo se puede llevar a cabo la síntesis de agentes de unión persistentes a partir de la interacción de las plantas y los microorganismos.

Los resultados obtenidos en cuanto a los parámetros físicos del tepetate (forma y estabilidad estructural) permitieron observar tendencias en las etapas iniciales de habilitación del tepetate tipo duripan, por efecto de las enmiendas y la especie vegetal utilizada; donde esta última, *Helianthus annuus L.*, mostró cualidades negativas y positivas en el proceso de habilitación. Las cualidades negativas se atribuyen a la brevedad de su ciclo de vida; las positivas al hecho de que bajo un aporte adecuado de materia orgánica mineralizable, desarrollan sistemas radicales densos que incrementan los procesos de disgregación mediante la intensa absorción de agua asociada a sus altas tasas de evapotranspiración, además de producir exudados con capacidad estabilizante.

## **9.2. Análisis de las propiedades químicas del tepetate**

### **9.2.1. Potencial de hidrogeno (pH) en agua**

Los resultados presentados en la tabla 6, indican que existieron diferencias estadísticamente significativas en el pH, entre los diversos tratamientos. El análisis del efecto individual de los factores estudiados, mostró que el estiércol y el fertilizante fueron los factores de mayor influencia en las diferencias observadas (Apéndice I).

Los tratamientos que contuvieron estiércol fueron estadísticamente equivalentes entre sí y semejantes al TAB, en relación al cual presentaron un ligero incremento de entre 0.3 y 0.4 unidades en la escala de pH. Asimismo mostraron diferencias estadísticamente significativas con respecto a los tratamientos que únicamente fueron adicionados con

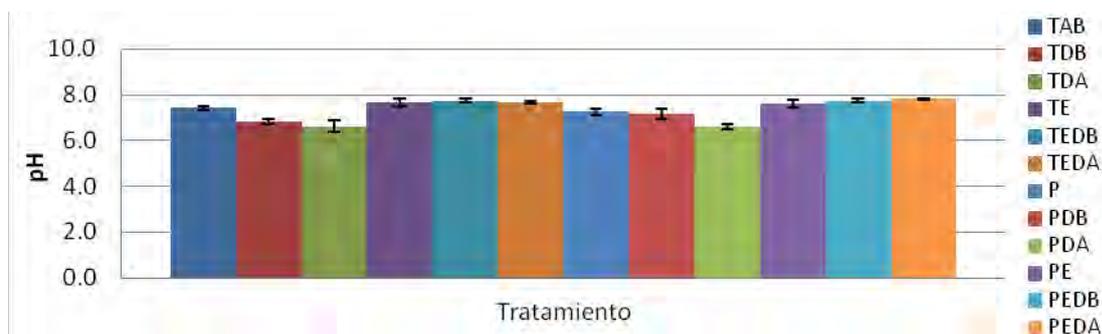
fertilizante químico (TDB y TDA) y con respecto a los tratamientos en los que se estableció la planta y se adicionó el fertilizante químico (PDA y PDB).

Por otra parte, los tratamientos que fueron adicionados con la dosis de fertilización química (excepto PEDB y PEDA) fueron estadísticamente semejantes entre sí y diferentes del TAB (excepto PDB), respecto al cual mostraron un decremento en la escala de pH de entre 0.2 y 0.6 unidades para la dosis baja de fertilización y de 0.8 unidades para la dosis alta, lo que refleja un efecto acidificante del fertilizante en el pH del tepetate, que se incrementó al aumentar la dosis. Igualmente, los tratamientos mencionados fueron estadísticamente diferentes de los tratamientos a los que se adicionó estiércol. El efecto acidificante del fertilizante en TDB fue ligeramente contrarrestado por la planta en PDB, pero no lo suficiente como para que se presentaran diferencias estadísticas significativas entre ambos tratamientos. El tratamiento testigo con planta también presentó un decremento mínimo (no significativo) en el pH con respecto al TAB de 0.1 unidades.

**Tabla 6.** Valores de pH en agua de los tratamientos establecidos, desviación estándar y significancia del análisis de comparación de medias.

Tratamiento	pH	Tratamiento	pH
<b>TAB</b>	7.4 ± 0.08 <b>abc</b> <sup>1</sup>	<b>P</b>	7.3 ± 0.14 <b>bc</b>
<b>TDB</b>	6.8 ± 0.12 <b>de</b>	<b>PDB</b>	7.2 ± 0.21 <b>cd</b>
<b>TDA</b>	6.6 ± 0.25 <b>e</b>	<b>PDA</b>	6.6 ± 0.11 <b>e</b>
<b>TE</b>	7.7 ± 0.16 <b>a</b>	<b>PE</b>	7.6 ± 0.17 <b>ab</b>
<b>TEDB</b>	7.7 ± 0.08 <b>a</b>	<b>PEDB</b>	7.7 ± 0.08 <b>a</b>
<b>TEDA</b>	7.7 ± 0.06 <b>a</b>	<b>PEDA</b>	7.8 ± 0.03 <b>a</b>

<sup>1</sup> Los valores que tienen la misma letra son estadísticamente semejantes.



**Figura 10.** Promedio del valor de pH para las tres repeticiones de cada uno de los 12 tratamientos y desviación estandar asociada.

Como ya se mencionó, los cambios más significativos en el pH (de hasta 0.8 unidades por debajo del valor del TAB), se presentaron en los tratamientos donde se adicionó el fertilizante químico, lo que se podría asociar al efecto acidificante del sulfato de amonio aplicado como fuente de nitrógeno.

La reacción ácida del sulfato de amonio, se debe a que en el proceso de nitrificación del ion amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) se liberan protones. Este proceso no tiene un efecto nocivo en el suelo mientras el nitrógeno absorbido por las plantas en forma de nitratos, regrese al sustrato a través de la incorporación de restos vegetales y animales. El problema surge cuando el retiro de los cultivos y la aplicación frecuente de fertilizantes nitrogenados para reemplazar la pérdida de nutrimentos, conduce a un desbalance de iones en el suelo y a una acidificación permanente (Bleam, 2012). De la anterior explicación y del elevado contenido de bases en el estiércol, se puede comprender por qué en los tratamientos donde se adicionó estiércol y fertilizante químico, el decremento en el pH por efecto del sulfato de amonio no fue perceptible.

Aunque en el presente trabajo no se observó un efecto significativo de la especie vegetal en el pH, en experimentos de mayor duración, que implementen condiciones de manejo semejantes, habría que tener en cuenta algunos procesos provocados por las plantas que podrían originar cambios en éste parámetro. A continuación se explican algunos de ellos. La disminución del pH podría asociarse a la acidificación fisiológica causada por las raíces de los cultivos. Esta última se debe tanto a la absorción radical de cationes básicos ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  y  $\text{K}^+$ ), como a la respiración de las raíces que incrementa la concentración de  $\text{CO}_2$  y la formación de ácido carbónico en la rizósfera (Plancarte, 2006; Hinsinger *et al.*, 2003; Youssef *et al.*, 1989).

Respecto al efecto acidificante de las raíces, Fernández y Ramírez (2001) mencionan que bajo condiciones de deficiencia de fósforo, el pH en la rizósfera disminuye por el incremento de la exudación radical de citratos. Este es un mecanismo fisiológico empleado por las plantas para incrementar el aprovechamiento de P proveniente de fuentes escasamente solubles, como el superfosfato de calcio simple, empleado en este trabajo. Los mismos autores señalan que en suelos con alto contenido de bases intercambiables (como es el caso del tepetate) este mecanismo fisiológico de acidificación puede no ser evidente.

Por otra parte, Velázquez (2002) encuentra que el pasto *rhodes* cultivado en tepetate, eleva el pH en 0.3 unidades, por la liberación de diversos productos metabólicos a la rizósfera. Plancarte (2006) también observa un ligero incremento en el pH de muestras de tepetate tipo duripán por efecto del establecimiento de higuera, y lo asocia a la influencia de las raíces en la retención de bases. En el caso del girasol la acidificación por efecto de la formación y disociación del ácido carbónico debe tomarse en cuenta debido a sus altas tasas respiratorias.

El incremento del pH en los tratamientos a los que se incorporó el estiércol de bovino, se debió probablemente a la liberación de las bases contenidas en la enmienda durante su mineralización; al incremento de la actividad microbiana y radical, que favoreció la disolución de los minerales pirogénicos que constituyen el tepetate (principalmente vidrio volcánico, piroxenos, micas, plagioclasas y feldespatos alcalinos) así como de minerales autigénicos o de neoformación (como haloisita, caolinita, montmorillonita, alofano, óxidos hidratados de hierro, sesquióxidos de aluminio y silicio), todos ellos ricos en bases; y la capacidad de amortiguamiento (*buffer*) de la MO contenida en la enmienda, que pudo haber adsorbido los iones ácidos liberados durante el metabolismo vegetal y microbiano (Plancarte, 2006; Acevedo *et al.*, 2002; Acevedo, 1998).

En la figura 10 se observa que en los tratamientos con planta y estiércol existe una tendencia al incremento del pH desde PE hasta PEDA. En estos casos, la liberación de bases producida por la descomposición de la enmienda pudo haber favorecido el desarrollo de sistemas radicales densos que incrementaron el intemperismo de los fragmentos de tepetate, lo que resultó en la liberación de bases al medio (Flores *et al.*, 2011)

Por otro lado se ha reportado que la absorción de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$  afecta el pH en la rizósfera, vía el establecimiento de un equilibrio de cargas entre la planta y el suelo. Walker en 1960, postuló que pasan más aniones que cationes hacia la raíz y que la neutralidad eléctrica a través de la interface existente entre la raíz y el suelo se mantiene por la salida de aniones (como el  $\text{HCO}_3^-$ ) desde la raíz, lo que puede llevar a un incremento del pH de hasta dos unidades (Youssef *et al.*, 1989). Teniendo en cuenta este mecanismo de regulación iónica, la disponibilidad de una fuente constante de nitrógeno en el estiércol y el desarrollo de sistemas radicales densos, pudieron haber coadyuvado a incrementar ligeramente el pH en los tratamientos PEDB y PEDA, por la liberación de  $\text{HCO}_3^-$ .

A pesar de las variaciones observadas en el pH por efecto de los tratamientos, éste se mantuvo en un rango óptimo para favorecer la disponibilidad de los nutrientes requeridos por la especie vegetal y los microorganismos (Sparks, 2003).

### **9.2.2. Materia orgánica y relación C:N**

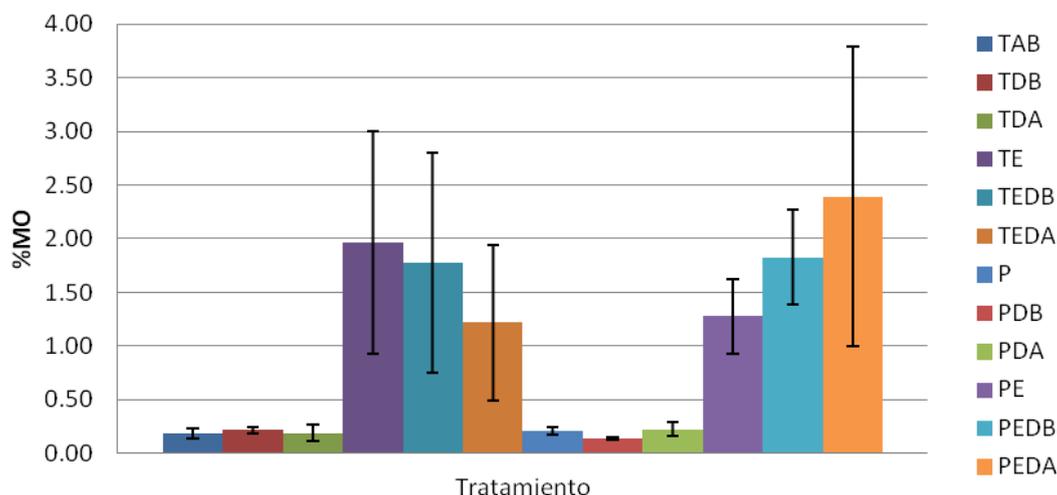
La tabla 7 muestra que únicamente existieron diferencias estadísticamente significativas entre el tratamiento PEDA y los tratamientos a los que no se adicionó estiércol. La prueba de Tukey permitió identificar tres grupos de respuestas (Figura 11). Un primer grupo está integrado por los tratamientos que presentaron los menores porcentajes de materia orgánica (entre 0.14 y 0.23%): TAB, TDB, TDA, P, PDB, PDA, todos tuvieron en común la ausencia de estiércol. Un segundo grupo incluye a los tratamientos testigo a los que se adicionó estiércol con dosis de fertilización (TE, TEDB, TEDA) y los tratamientos con planta y estiércol, sin dosis de fertilización y con dosis baja de fertilización, PE y PEDB respectivamente, cuyos porcentajes de materia orgánica oscilaron entre 1.22 y 1.96%. En el tercer tipo de respuesta se incluye únicamente al tratamiento PEDA que contuvo la especie vegetal, el estiércol y la dosis alta de fertilización, presentando el mayor porcentaje de materia orgánica (2.39%).

**Tabla 7.** Contenido de materia orgánica y relación C:N en los tratamientos establecidos, desviación estándar y significancia del análisis de comparación de medias.

Tratamiento	%MO	C:N	Tratamiento	%MO	C:N
TAB	0.19 ± 0.04 <b>b</b> <sup>1</sup>	4.1 ± 0.9 MB <sup>2</sup> <b>c</b>	<b>P</b>	0.21 ± 0.04 <b>b</b>	5.7 ± 1.6 MB <b>bc</b>
TDB	0.22 ± 0.03 <b>b</b>	3.4 ± 0.3 MB <b>c</b>	<b>PDB</b>	0.14 ± 0.01 <b>b</b>	4.9 ± 1.2 MB <b>bc</b>
TDA	0.19 ± 0.07 <b>b</b>	3.1 ± 0.8 MB <b>c</b>	<b>PDA</b>	0.23 ± 0.07 <b>b</b>	4.9 ± 0.9 MB <b>bc</b>
TE	1.96 ± 1.04 <b>ab</b>	9.8 ± 1.3 B <b>a</b>	<b>PE</b>	1.28 ± 0.35 <b>ab</b>	10.5 ± 0.8 M <b>a</b>
TEDB	1.77 ± 1.02 <b>ab</b>	9.4 ± 1.8 B <b>a</b>	<b>PEDB</b>	1.83 ± 0.44 <b>ab</b>	11.0 ± 0.3 M <b>a</b>
TEDA	1.22 ± 0.72 <b>ab</b>	8.4 ± 1.7 B <b>ab</b>	<b>PEDA</b>	2.39 ± 1.39 <b>a</b>	11.0 ± 1.8 M <b>a</b>

<sup>1</sup> Los valores que tienen la misma letra son estadísticamente semejantes.

<sup>2</sup> Las letras mayúsculas indican la descripción cualitativa de la relación C:N con base en Velázquez (1997), donde: MB= Muy Baja, B= Baja, M= Mediana.



**Figura 11.** Porcentaje de MO para las tres repeticiones de cada uno de los 12 tratamientos y desviación estándar asociada.

En la grafica 11 se aprecia que el estiércol tuvo una influencia importante en la producción de las diferencias observadas entre tratamientos. Esto se corroboró al evaluar estadísticamente la influencia individual de los factores planta, estiércol y fertilizante, así como su interacción; el estiércol fue el único factor cuyos efectos en el contenido de materia orgánica, generaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Apéndice I).

El aporte de estiércol al tepetate roturado pudo haber influido directa e indirectamente en el contenido final de materia orgánica. Su influencia indirecta se asocia a dos

fenómenos: por un lado a su capacidad para promover el establecimiento y crecimiento de comunidades microbianas; por otro su efecto favorable sobre el desarrollo de la biomasa radical, que cobra importancia al ser las plantas los principales seres vivos responsables de ingresar compuestos ricos en carbono al suelo y por lo tanto de proporcionar a los microorganismos una fuente de energía de fácil descomposición (Ferrera *et al.*, 1997).

La presencia de planta en P, PDA y PDB no contribuyó significativamente al incremento en el porcentaje de materia orgánica, con respecto al TAB y los tratamientos testigo con dosis de fertilización. Esto pudo deberse al escaso desarrollo del sistema radical observado en dichos tratamientos.

En los tratamientos testigo con estiércol y fertilizante (TE, TEDB, TEDA) se percibe una tendencia al descenso en el porcentaje de materia orgánica conforme se incrementa la dosis de fertilización. La cual pudo deberse a que las fuentes de nutrición mineral, favorecieron el crecimiento de la biomasa microbiana, lo que produjo una mayor descomposición de la materia orgánica adicionada en el estiércol y la pérdida de C por la actividad respiratoria de los microorganismos. Esto coincide con la reducción de la relación C:N presentada por la enmienda original (que se discutirá más adelante), y con la ausencia de plantas que contribuyeran a retornar carbono al suelo por la fijación fotosintética del CO<sub>2</sub> atmosférico (Tate III, 1992).

En los tratamientos PE, PEDB y PEDA, se puede apreciar una tendencia inversa a la señalada en el párrafo anterior. Conforme se incrementa la dosis de fertilización, el porcentaje de materia orgánica es mayor. Esto se puede asociar al desarrollo de sistemas radicales densos, que al aportar materia orgánica rica en carbono al tepetate compensaron las pérdidas provocadas por la actividad respiratoria de los microorganismos y de las mismas plantas.

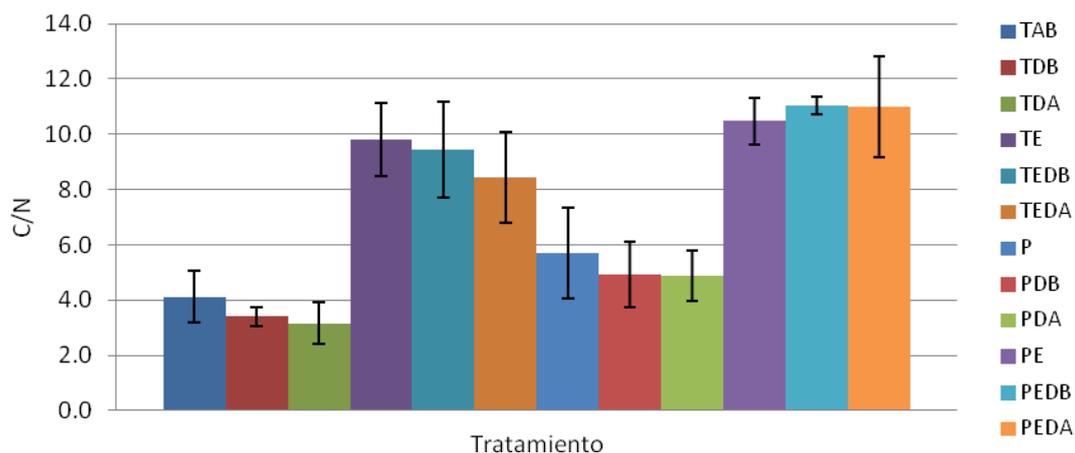
Finalmente, el TAB, a pesar de no haber sido adicionado con enmiendas, presenta un porcentaje de materia orgánica mayor al reportado en tepetate inalterado (Placarte (2006) refiere un contenido de 1% en una muestra inalterada de un duripán del Estado de Morelos), esto se podría relacionar con la existencia de una incipiente biomasa microbiana, ya que la roturación del material y la entrada de agua y aire en los poros y

espacios creados, favorece el incremento de la actividad microbiana (Plancarte, 2006; Velázquez, 2002).

Por otra parte, la figura 12 muestra el valor promedio de la relación C:N para cada tratamiento. La importancia de esta relación es que habla de las cualidades que presenta la materia orgánica contenida en el tepetate; específicamente indica el potencial de mineralización e inmovilización del nitrógeno (Henry *et al.*, 1996).

Cuando un sustrato posee una alta relación C:N con respecto a la biomasa microbiana responsable de su descomposición, la fracción de nitrógeno orgánico que será mineralizado, es decir transformado por los microorganismos del suelo a formas inorgánicas asimilables para las plantas ( $\text{NO}_3$ ), es menor que la proporción de carbono orgánico que será oxidado para la producción de energía, lo cual resulta en la disminución de la relación C:N. La reducción del porcentaje de nitrógeno que será mineralizado se debe a que la biomasa microbiana lo utilizará para incorporarlo a sus células y tejidos, inmovilizándolo de manera temporal. Un sustrato que posee una relación C:N baja con respecto a los microorganismos encargados de su descomposición, favorece una mineralización más rápida de la fracción de nitrógeno orgánico y la liberación de nitrógeno asimilable para las plantas (Janssen, 1996).

La SAGARPA (Sin año. Recurso en línea. Fecha de consulta: 12 de junio del 2012), reporta una relación C:N en el estiércol vacuno de 26:1 y especifica que los materiales orgánicos con una relación C:N menor de 22 y un contenido de nitrógeno mayor a 1.2% permiten una adecuada liberación de nitrógeno para la nutrición vegetal. Por lo anterior, la elevada relación de C:N en el estiércol bovino, puede conducir a la inmovilización de N en la biomasa microbiana a corto plazo y a una mineralización más lenta y prolongada de este elemento en etapas posteriores, de ahí su efecto residual en la nutrición vegetal. En cuanto a la relación C:N en el girasol, Janssen (1996) reporta en brotes un valor de 14.4, de lo que se deduce que sus restos son fácilmente mineralizables.



**Figura 12.** Promedio de la relación C:N para las tres repeticiones de cada uno de los 12 tratamientos y desviación estandar asociada.

El análisis estadístico de la relación C:N, indicó la existencia de diferencias altamente significativas en este parámetro debidas a los tratamientos. Por otra parte, el análisis de los efectos individuales producidos por los factores estudiados en dicha relación, indicó que el estiércol y la planta tuvieron un papel predominante en las diferencias observadas entre tratamientos.

Entre TAB, TDB, TDA, P, PDB y PDA (pertenecientes al primer grupo de tratamientos mencionado en el parámetro anterior, por ser estadísticamente equivalentes entre sí en cuanto a su contenido de MO), se obtuvieron diferencias altamente significativas en cuanto a la relación C:N de su materia orgánica, siendo menor en TAB, TDB y TDA que en P, PDB y PDA.

Es posible que el incremento de la relación C:N en P, PDB y PDA, respecto a TAB, TDB y TDA, se haya debido a que la planta aportó al tepetate materiales lábiles ricos en C, entre los que se incluyeron restos de raíces y exudados radicales, además de favorecer la actividad de las comunidades microbianas productoras de mucílagos, también ricos en carbono (Troeh y Thompson, 1993).

Por otra parte los tratamientos TE, TEDB, TEDA, PE, PEDB y PEDA (pertenecientes a los grupos 2 y 3), resultaron ser estadísticamente semejantes entre sí y diferentes de los tratamientos testigo sin planta. En los tratamientos testigo con estiércol la relación C:N

fue baja, mientras que en los tratamientos con estiércol y planta la relación C:N fue mediana (Vázquez Alarcón, 1997).

La relación C:N baja en TE, TEDB y TEDA se podría asociar a la descomposición y consumo microbiano de las fuentes de carbono orgánico presentes en el estiércol. Mientras que la relación C:N mediana en PE, PEDB y PEDA podría estar relacionada con los aportes radicales de compuestos orgánicos ricos en carbono, que restituyeron las pérdidas asociadas a la mineralización de la enmienda.

Por último, en la figura 12 se observa una tendencia a la reducción de la relación C:N por la adición de fertilizante químico en los tratamientos TDA y TDB con respecto a TAB, en TEDA y TEDB con respecto a TE y en PDB y PDA con respecto a P. Lo que podría relacionarse con la fijación, en la biomasa microbiana, de parte del nitrógeno mineral adicionado en el fertilizante químico (Troeh y Thompson, 1993).

La adición de estiércol contribuyó de manera directa al incremento del contenido de materia orgánica en el tepetate, lo cual representa una tarea de primera importancia en su habilitación para el uso agrícola, ya que sus bajos contenidos de MO, N, P y la presencia de una escasa comunidad microbiana son los principales factores que restringen el crecimiento de las plantas y por lo tanto la capacidad productiva de estas capas endurecidas (Álvarez *et al.*, 2000). Asimismo el fertilizante y la planta tuvieron un efecto menos perceptible en el incremento del porcentaje de MO, pero es de suponerse que lo promovieron de manera indirecta. El fertilizante al favorecer el desarrollo de la biomasa vegetal y microbiana y la planta al aportar compuestos lábiles, ricos en carbono y promover con ello el crecimiento de la biomasa microbiana.

Por otro lado la interacción de los tres factores, llevó al desarrollo de diversas relaciones C:N, las cuales resultan apropiadas para promover la nutrición de las plantas. De acuerdo con Henry (1996) una relación C:N de 20:1 o menor, favorece la mineralización de la materia orgánica y la disponibilidad de nutrimentos para las plantas. Al término del presente experimento, la mayor relación registrada fue de 11:1, lo que indica que la materia orgánica contenida en el tepetate se puede mineralizar con facilidad, liberando los principales elementos requeridos para la nutrición vegetal de cultivos posteriores, incrementando así la fertilidad del material roturado.

La variada composición del estiércol en cuanto a fuentes de carbono lábiles y recalcitrantes (desde carbohidratos simples y proteínas, hasta polisacáridos complejos medianamente estables como la celulosa y la hemicelulosa, y muy estables, como la lignina) favorece su permanencia en el suelo por prolongados periodos de tiempo, así como su lenta y continua mineralización, factores que contribuyen al crecimiento vegetal y al mantenimiento de las comunidades microbianas. Por lo anterior se consideró a esta enmienda es adecuada en el proceso de habilitación de tepetates y en la nutrición del girasol ornamental (Nett *et al.*, 2009; Salazar *et al.*, 2003; Henry *et al.*, 1996).

Así mismo, el cultivo permanente de especies vegetales anuales y perennes, con sistemas radicales densos, permite el aporte constante de fuentes de carbono lábiles al tepetate, las cuales juegan un papel fundamental en la estabilización estructural del suelo. Janzen y colaboradores (1992), refieren el incremento en el contenido de materia orgánica lábil en suelos cultivados continuamente. Velázquez (2002) señala la efectividad de los pastos en la aportación inmediata de compuestos orgánicos de fácil descomposición a la rizósfera.

El aporte de materia orgánica al tepetate, mediante la adición de enmiendas orgánicas y el establecimiento de especies vegetales, es una práctica fundamental en la habilitación de estas capas endurecidas para su uso agrícola. Las enmiendas usadas en el presente experimento han sido ampliamente utilizadas para el mismo fin en numerosos trabajos previos en campo e invernadero (Flores *et al.*, 2011; García *et al.* 2008; Plancarte, 2006; Velázquez, 2002; Acevedo *et al.* 2001; Velázquez *et al.* 2001) y una vez más han mostrado su efectividad al incrementar el contenido de materia orgánica y nutrientes disponibles para las plantas en el tepetate fragmentado tipo duripán, así como en la formación y estabilización de su estructura.

### **9.2.3. Capacidad de intercambio catiónico (cmol kg<sup>-1</sup>)**

Los resultados expuestos en la tabla 8, indican que existieron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en cuanto a la capacidad de intercambio catiónico. Los tratamientos en los que se adicionó estiércol presentaron valores superiores al valor de TAB; mientras que los tratamientos a los que no se

adicionó esta enmienda presentaron valores semejantes a los del testigo absoluto, de lo que se deduce que la influencia del estiércol fue predominante sobre el resto de los factores estudiados (Figura 13). Al realizar el análisis estadístico de la influencia individual de la planta, el estiércol y el fertilizante, así como de su efecto combinado en este parámetro (Apéndice I y II), se encontró que el estiércol, el fertilizante y su interacción tuvieron un efecto significativo en la capacidad de intercambio catiónico, siendo la influencia individual del estiércol altamente significativa.

**Tabla 8.** Capacidad de intercambio catiónico en los tratamientos establecidos, desviación estándar y significancia del análisis de comparación de medias.

Tratamiento	CIC (cmol/kg)	Tratamiento	CIC (cmol/kg)
TAB	19.54 ± 0.58 bcd <sup>1</sup>	P	18.19 ± 0.58 cd
TDB	17.51 ± 1.55 d	PDB	19.15 ± 0.64 cd
TDA	17.90 ± 0.45 cd	PDA	17.91 ± 2.04 cd
TE	23.85 ± 0.03 ab	PE	21.75 ± 2.11 abcd
TEDB	25.40 ± 2.32 a	PEDB	24.53 ± 2.97 a
TEDA	22.41 ± 1.50 abc	PEDA	20.95 ± 1.36 abcd

<sup>1</sup> Los valores que tienen la misma letra son estadísticamente semejantes.

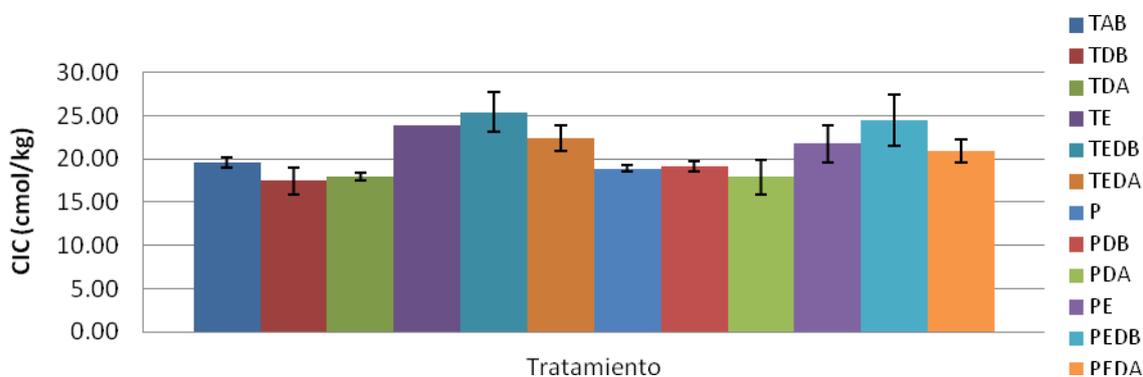
La CIC obtenida en las muestras de tepetate que no contuvieron estiércol, incluido el TAB, fue media, oscilando entre 17.51 y 19.15 cmol kg<sup>-1</sup> (Vázquez Alarcón, 1997). En general los tepetates presentan CIC de medias a altas, lo cual se debe a su elevado contenido de amorfos (alófanos y óxidos hidratados de Al y Fe), que actúan como cementantes entre los minerales cristalinos y arcillas, al depositarse en forma de películas sobre su superficie (Acevedo *et al.*, 2002). Los amorfos poseen una elevada superficie específica para la adsorción de iones y por ello contribuyen a incrementar la capacidad de intercambio iónico de los suelos que los contienen (Troeh y Thompson, 1993).

Es posible que el incremento en la CIC, observado en los tratamientos adicionados con estiércol, se debiera a la presencia de la materia orgánica aportada por la enmienda. La materia orgánica contiene una gran variedad de grupos funcionales que se encuentran en contacto con la solución del suelo. La mayoría de estos grupos se ionizan desarrollando cargas variables, dependientes del pH. Los grupos carboxilo, quinónicos, fenólicos y

enólicos, se ionizan perdiendo protones en pH básico, con lo que desarrollan cargas negativas capaces de retener cationes (Essington, 2004; Sparks, 2003).

La CIC de la fracción mineral de los suelos es menos susceptible a los cambios en el pH, debido a que los minerales presentan un predominio de sitios con carga permanente, formados por la sustitución isomórfica de cationes en sus redes cristalinas. Sin embargo, los materiales amorfos, óxidos, oxihidróxidos e hidróxidos metálicos, presentan numerosos sitios de carga variable, con lo que su CIC es más susceptible a los cambios en el pH (Sparks, 2003).

La ligera disminución en la CIC de los tratamientos que fueron adicionados con fertilizantes inorgánicos respecto al TAB, puede estar relacionada con la acidificación producida por la nitrificación del sulfato de amonio. Así, el aumento en la concentración de iones  $H^+$  pudo haber favorecido la protonación de los sitios de intercambio con carga variable de los amorfos y la formación de cargas positivas en su superficie que impidieron la adsorción de cationes.



**Figura 13.** Promedio de la capacidad de intercambio catiónico para las tres repeticiones de cada uno de los 12 tratamientos y desviación estándar asociada.

## 9.2.4. Bases intercambiables

### 9.2.4.1. Concentración de calcio ( $cmol\ kg^{-1}$ )

En la tabla 9 se exponen los valores de concentración de calcio obtenidos en los diferentes tratamientos. Los análisis estadísticos indican que todos los tratamientos mostraron valores estadísticamente semejantes entre sí, excepto TE que fue estadísticamente diferente de P y PDB, así como PEDB que fue estadísticamente

diferente de P, PDB y PDA. En general, se aprecia que los tratamientos a los que se adicionó la dosis de estiércol fueron los que presentaron los valores más elevados de  $\text{Ca}^{++}$ , obteniéndose la máxima concentración del catión en el tratamiento PEDB.

Por otra parte los tratamientos a los que no se les adicionó estiércol presentaron los valores más pequeños de  $\text{Ca}^{++}$ , muy cercanos a la concentración obtenida en el testigo absoluto. El análisis de la influencia individual de los factores controlados, indica que el estiércol fue el factor causante de las diferencias observadas.

**Tabla 9.** Concentración calcio en los tratamientos establecidos, desviación estándar y significancia del análisis de comparación de medias.

Tratamiento	$\text{Ca}^{++}$ (cmol $\text{kg}^{-1}$ )	Tratamiento	$\text{Ca}^{++}$ (cmol $\text{kg}^{-1}$ )
TAB	10.61 ± 0.28 bcd <sup>1</sup>	P	9.50 ± 0.94 d
TDB	10.93 ± 1.52 bcd	PDB	10.16 ± 0.60 cd
TDA	11.37 ± 1.38 bcd	PDA	10.95 ± 2.27 bcd
TE	14.92 ± 2.25 ab	PE	14.15 ± 1.93 abcd
TEDB	14.67 ± 0.08 abc	PEDB	17.18 ± 2.93 a
TEDA	14.42 ± 1.00 abc	PEDA	12.95 ± 1.06 abcd

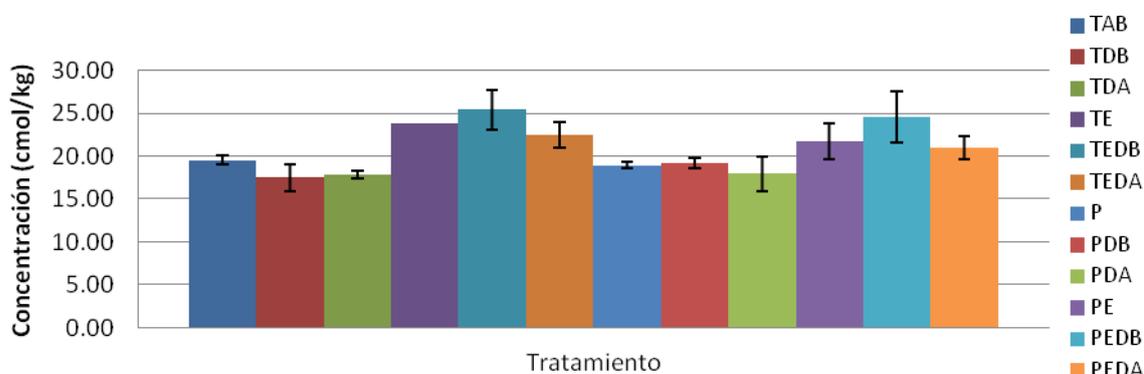
<sup>1</sup> Los valores que tienen la misma letra son estadísticamente semejantes.

De acuerdo con Vázquez Alarcón (1997), las concentraciones de calcio intercambiable se consideran altas en todos los tratamientos, excepto en P, cuya concentración fue media. Esto coincide con lo reportado para otras capas endurecidas (Flores *et al.*, 2011; Plancarte, 2006) y se debe al intemperismo de los feldspatos y micas que constituyen el tepetate, así como a la preferencia del  $\text{Ca}^{++}$  por el complejo de intercambio, ya que este catión es el que presenta el menor radio iónico y mayor valencia respecto al resto de las bases intercambiables (Hillel, 1998).

La figura 14, muestra que los tratamientos a los que se adicionó estiércol tuvieron las mayores concentraciones de  $\text{Ca}^{++}$  intercambiable. Esto se asocia a la presencia del catión en la enmienda, que de acuerdo con Labrador (1996), equivale al 3.74% de la su masa seca, en forma de  $\text{CaO}$ , superando los porcentajes de  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ . El tratamiento que mostró los valores más elevados de calcio fue PEDB, lo que se podría atribuir a la influencia de las raíces en la fragmentación del tepetate y en la exposición

de una mayor superficie de intercambio para la adsorción de iones, así como a una mayor intensidad en la disolución de los minerales pirogénicos debida a la absorción de cationes por la especie vegetal (Flores *et al.*, 2011).

Las plantas no tuvieron un efecto significativo en la concentración de  $\text{Ca}^{++}$  intercambiable, esto se debe a que en general sus requerimientos de calcio son bajos. Este elemento interviene en el balance de otros nutrimentos dentro de las plantas, además de ser requerido en pequeñas cantidades para mantener la integridad de las membranas plasmáticas y facilitar la absorción de iones. En suelos con CIC superiores a  $5 \text{ cmol kg}^{-1}$  no se presentan problemas por deficiencia de este nutrimento (Barber, 1995), por lo que en el presente experimento se encontró en una concentración suficiente para la nutrición del girasol.



**Figura 14.** Promedio de la concentración de calcio para las tres repeticiones de cada uno de los 12 tratamientos y desviación estandar asociada.

#### 9.2.4.2. Concentración de magnesio ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )

La tabla 10 indica que las concentraciones de magnesio intercambiable fueron altas (Vázquez Alarcón, 1997) y estadísticamente iguales en todos los tratamientos establecidos. Las elevadas concentraciones de  $\text{Mg}^{++}$  intercambiable obtenidas se asocian a la alteración de minerales ferromagnesianos en el tepetate (Flores *et al.*, 2011), así como al hecho de que este catión es el segundo más abundante en el complejo de intercambio, después del calcio, en suelos con pH superior a 5.5 (Barber, 1995).

**Tabla10.** Concentración de magnesio en los tratamientos establecidos, desviación estándar y significancia del análisis de comparación de medias.

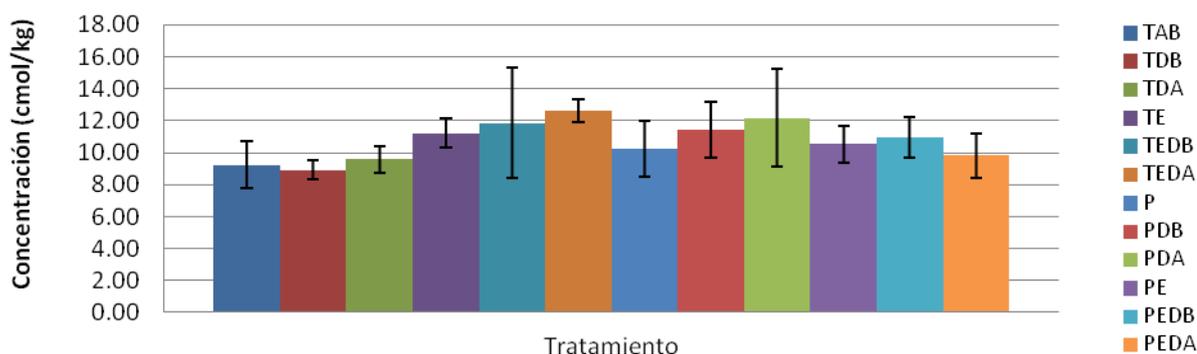
<b>Tratamiento</b>	<b>Mg<sup>++</sup> (cmol kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>Mg<sup>++</sup> (cmol kg<sup>-1</sup>)</b>
TAB	9.24 ± 1.45 a <sup>1</sup>	<b>P</b>	10.23 ± 1.73 a
TDB	8.91 ± 0.59 a	<b>PDB</b>	11.45 ± 1.77 a
TDA	9.75 ± 0.87 a	<b>PDA</b>	12.17 ± 3.06 a
TE	11.23 ± 0.91 a	<b>PE</b>	10.54 ± 1.14 a
TEDB	11.85 ± 3.45 a	<b>PEDB</b>	10.99 ± 1.26 a
TEDA	12.62 ± 0.73 a	<b>PEDA</b>	9.81 ± 1.40 a

<sup>1</sup> Los valores que tienen la misma letra son estadísticamente semejantes.

En la Figura 15 se puede apreciar que la aplicación del estiércol incrementó ligeramente la concentración de Mg<sup>++</sup> en los tratamientos TE, TEDB y TEDA, lo que se asocia al contenido del catión en la enmienda. Labrador (1996) refiere que el magnesio en forma de MgO representa el 1.08 % de la masa seca del estiércol de bovino.

Asimismo en los tratamientos P, PDB y PDA se observa una tendencia al incremento de la concentración de Mg<sup>++</sup> conforme aumenta la dosis del fertilizante, lo que podría estar asociado al efecto de la enmienda en el desarrollo del sistema radical del girasol, que a su vez pudo haber favorecido la disolución de los minerales pirogénicos provocando la liberación de bases.

Los tratamientos PE, PEDB y PEDA, mostraron una reducción en el contenido de Mg<sup>++</sup>, respecto a TE, TEDB, TEDA, PDB y PDA que se debió probablemente a la absorción del catión por parte de las plantas de girasol, las cuales desarrollaron una mayor superficie foliar en estos tratamientos y por lo tanto requirieron de un mayor suministro de magnesio para la realización de sus procesos fisiológicos. En las plantas, el magnesio forma parte de la molécula de clorofila, participa como cofactor en numerosos procesos enzimáticos y tiene un papel importante como estabilizante estructural de nucleótidos y proteínas (Barker *et al.*, 2007).



**Figura 15.** Promedio de la concentración de magnesio para las tres repeticiones de cada uno de los 12 tratamientos y desviación estándar asociada.

### 9.2.4.3. Concentración de sodio ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )

**Tabla 11.** Concentración de sodio en los tratamientos establecidos, desviación estándar y significancia del análisis de comparación de medias.

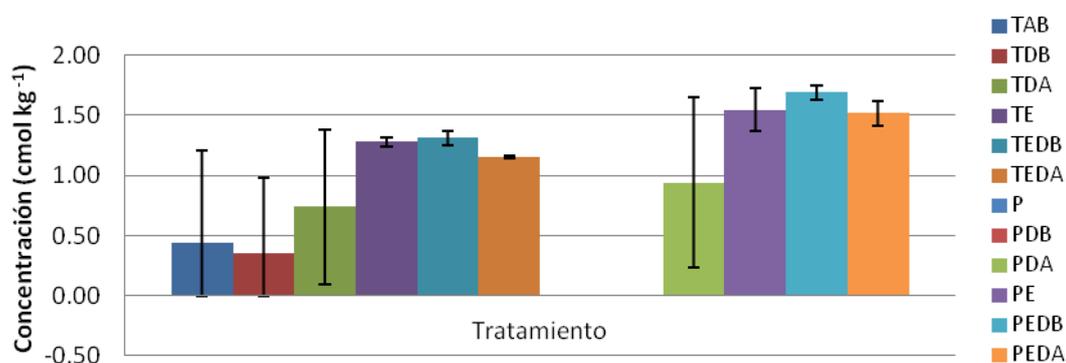
Tratamiento	$\text{Na}^+$ ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )	Tratamiento	$\text{Na}^+$ ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )
<b>TAB</b>	$0.44 \pm 0.76$ ab <sup>1</sup>	<b>P</b>	Debajo del límite de detección <b>b</b>
<b>TDB</b>	$0.36 \pm 0.62$ ab	<b>PDB</b>	Debajo del límite de detección <b>b</b>
<b>TDA</b>	$0.74 \pm 0.64$ ab	<b>PDA</b>	$0.94 \pm 0.71$ ab
<b>TE</b>	$1.28 \pm 1.31$ ab	<b>PE</b>	$1.54 \pm 0.18$ ab
<b>TEDB</b>	$1.31 \pm 0.06$ ab	<b>PEDB</b>	$1.69 \pm 0.06$ a
<b>TEDA</b>	$1.15 \pm 0.01$ ab	<b>PEDA</b>	$1.52 \pm 0.01$ ab

<sup>1</sup> Los valores que tienen la misma letra son estadísticamente semejantes.

La tabla 11 muestra que en cuanto a la concentración de sodio, únicamente existieron diferencias significativas entre PEDB y los tratamientos donde se estableció la planta sola y la planta con dosis baja de fertilización (P y PDB). El análisis estadístico de la influencia individual de los factores estudiados, indica que el estiércol fue la única variable que tuvo un efecto significativo en las diferencias encontradas entre tratamientos (Apéndice I).

En la figura 16 se puede observar que los tratamientos cuyos promedios de concentración poseen desviaciones estándar más pequeñas son los que contuvieron estiércol, lo que indica que las repeticiones de cada tratamiento mostraron una variación

pequeña entre sí en cuanto a sus valores de concentración de  $\text{Na}^+$ . Por otra parte, el resto de los tratamientos mostraron una amplia variación en la concentración de sodio registrada para sus tres repeticiones, de ahí su gran desviación estándar. Los tratamientos TAB, TDB, TDA, P y PDB presentaron repeticiones donde la concentración de sodio no fue detectada por el flamómetro (menor a 10 ppm).



**Figura 16.** Promedio de la concentración de sodio para las tres repeticiones de cada uno de los 12 tratamientos y desviación estándar asociada.

El incremento en la concentración de sodio en los tratamientos donde se adicionó estiércol, puede deberse al elevado contenido de este catión en la enmienda, que equivale aproximadamente al 0.58% de su materia seca en forma de  $\text{Na}_2\text{O}$  (Labrador 1996). Guerrero 1996, señala que el sodio debe representar entre el 0 y 3% de la CIC para no interferir en la asimilación de otros cationes importantes para la nutrición vegetal. Así mismo Bohn *et al.* (2001) plantea que si se encuentra en una proporción superior al 5-15% puede provocar problemas de salinidad.

La proporción de sodio respecto a la CIC en los tratamientos donde no se adicionó estiércol, osciló entre el 0 y 4 %, mientras que en aquellos donde se aplicó la enmienda osciló entre el 5.1 y 7 %. Estos porcentajes indican que en algunos tratamientos, principalmente en los que se utilizó estiércol, las concentraciones de sodio en el tepetate, superaron los límites recomendados para no afectar la nutrición vegetal (0-3% de la CIC), por lo que habría que tener precaución en el manejo de la enmienda en caso de realizarse aplicaciones subsecuentes (Salazar *et al.*, 2004).

Las concentraciones de sodio registradas en los diferentes tratamientos no tuvieron una influencia perceptible en el desarrollo de las plantas de girasol. Sin embargo, hay que resaltar que el girasol es susceptible a la salinidad del suelo debido a sus altas tasas de transpiración y consumo de agua, las cuales se ven afectadas cuando elevados contenidos de sodio en el suelo incrementan su potencial osmótico dificultando la absorción radical de agua (Alba, 1990).

Las concentraciones de sodio obtenidas en los tratamientos a los que no se adicionó estiércol, se asociaron al intemperismo de los feldespatos sódicos que forman parte del tepetate, probablemente provocado por los ciclos de humectación-desección y por la acción de las raíces en los tratamientos con planta (Flores *et al.*, 2011). Asimismo, la acción del sistema radical en la meteorización de los fragmentos pudo haber favorecido un ligero incremento en las concentraciones de sodio obtenidas en los tratamientos PE, PEDB y PEDA, con respecto a los tratamientos testigo que contuvieron estiércol (TE, TEDB y TEDA) (figura 11).

Bohn (2001) menciona que otra fuente de  $\text{Na}^+$  en los suelos, es el agua de riego, que normalmente contiene sales disueltas; por lo que habría que considerar que una parte del sodio adsorbido en el complejo de intercambio podría proceder del agua aportada durante el riego de las macetas (Plancarte, 2006).

#### **9.2.4.4. Concentración de potasio ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )**

La tabla 12 indica que existieron diferencias estadísticamente significativas en cuanto al contenido de potasio entre tratamientos. La prueba de Tukey habla de que los tratamientos que contuvieron estiércol fueron estadísticamente semejantes entre sí y diferentes de los tratamientos que no fueron adicionados con la enmienda. Por otra parte el análisis individual de la influencia de los factores estudiados, así como de su efecto combinado, mostró que la planta, el estiércol y su interacción, tuvieron una influencia significativa en la concentración de potasio, siendo la influencia del estiércol altamente significativa (Apéndice I y II).

**Tabla 12.** Concentración de potasio en los tratamientos establecidos, desviación estándar y significancia del análisis de comparación de medias.

Tratamiento	K <sup>+</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )	Tratamiento	K <sup>+</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )
TAB	1.98, ± 0.30 c <sup>1</sup>	P	1.59 ± 0.22 c
TDB	1.73 ± 0.34 c	PDB	1.85 ± 0.09 c
TDA	1.83 ± 0.35 c	PDA	1.99 ± 0.47 c
TE	4.40 ± 0.33 ab	PE	3.28 ± 0.27 b
TEDB	4.84 ± 0.10 a	PEDB	4.48 ± 0.83 ab
TEDA	4.36 ± 0.59 ab	PEDA	3.77 ± 0.66 ab

<sup>1</sup> Los valores que tienen la misma letra son estadísticamente semejantes.

De acuerdo con Vázquez Alarcón (1996) todos los tratamientos presentaron concentraciones de potasio altas. Lo que se podría asociar al intemperismo de los minerales pirogénicos del tepetate (principalmente feldespatos y micas) ricos en bases (Flores *et al.*, 2011; Acevedo *et al.*, 2002), así como al potasio contenido en el estiércol que fue adsorbido al complejo de intercambio.

Si se contrastan los tratamientos TAB, TDB y TDA se percibe que la adición del fertilizante químico provocó una ligera disminución en la concentración de K<sup>+</sup> intercambiable. De acuerdo con Porta (1999) y Hillel (1998), las diferencias en el radio, valencia y propiedades de hidratación de los diferentes cationes, provocan que estos sean adsorbidos a la superficie de intercambio con diferente intensidad. El ion amonio contenido en el fertilizante químico, tiene una mayor preferencia por la superficie de intercambio que el potasio, por lo que este último pudo haber sido desplazado por efecto de la adsorción de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, en los tratamientos mencionados.

Lo anterior se sustenta en lo planteado por Russell (1973), quien afirma que uno de los efectos de adicionar sulfato de amonio como fuente de nitrógeno a los suelos es la adsorción de iones amonio en el complejo de intercambio y el desplazamiento de una cantidad equivalente de otras especies iónicas de carga positiva entre las que se encuentran el Ca<sup>++</sup>, el Mg<sup>++</sup> y el K<sup>+</sup>.

El mismo autor afirma que una vez ocurrida la nitrificación del amonio, los iones nitrato pueden ser neutralizados temporalmente por cationes básicos. Cuando los nitratos son

empleados por las plantas y microorganismos, los cationes se liberan y reingresan al complejo de intercambio. Es posible que la intensa actividad biológica provocada por la descomposición del estiércol en los tratamientos PEDB y PEDA, haya contrarrestado el proceso de desplazamiento de los iones de  $K^+$ , al promover la nitrificación del amonio y la reincorporación de iones básicos como el  $K^+$  a la superficie de intercambio durante la absorción de nitratos realizada por la planta.

Por otra parte, el incremento en la concentración de  $K^+$  en los tratamientos a los que se aplicó estiércol, se pudo deber al contenido original de potasio en la enmienda (hasta el 3 % de su materia seca en forma de  $K_2O$ ) que supera el de magnesio y sodio (Labrador, 1996).

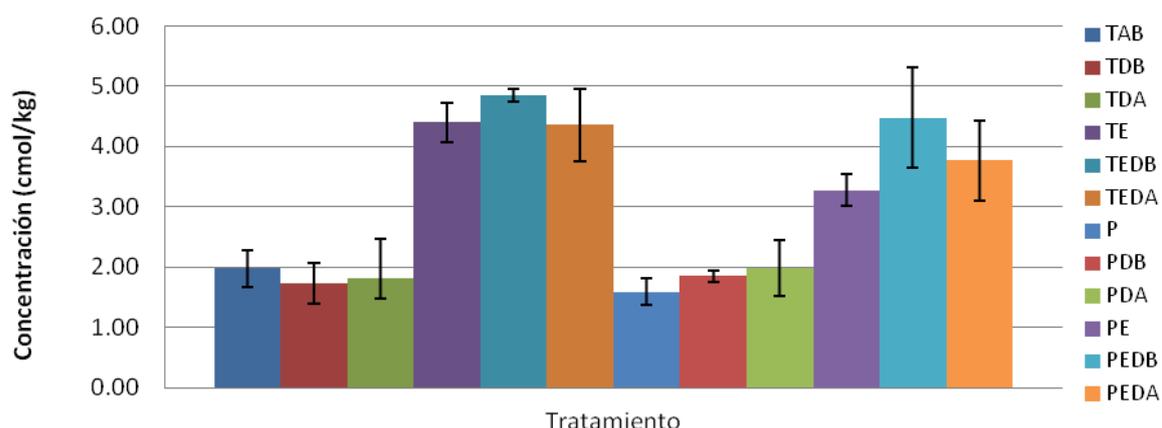
El estiércol también pudo haber afectado indirectamente la concentración de  $K^+$  intercambiable al promover el desarrollo de sistemas radicales extensos y una intensa actividad microbiana que contribuyeron al intemperismo de los feldespatos potásicos y micas a través de diversos procesos entre los que se pueden considerar los siguientes: a) la producción de  $CO_2$  como resultado del metabolismo microbiano y vegetal que formó ácido carbónico al disolverse en el agua b) la acción mecánica de las raíces que favoreció la disgregación de los fragmentos y el incremento de la superficie de intercambio iónico del tepetate y c) la absorción de nutrimentos por parte de las plantas que indujo una diferencia en la concentración de iones, provocando la liberación de cationes de las estructuras minerales (Flores *et al.*, 2011; Plancarte, 2006).

El potasio es requerido por las plantas en grandes cantidades, ya que interviene en el metabolismo de los carbohidratos, regula la actividad de otros elementos esenciales, es responsable de la activación de numerosas enzimas, promueve el crecimiento de los tejidos meristemáticos y participa en el cierre de los estomas (Flores, 2006). La figura 17 muestra que los tratamientos PE, PEDB y PEDA presentaron menores concentraciones de  $K^+$  que los tratamientos testigo sin planta TE, TEDB y TEDA, lo cual se pudo deber a la absorción de  $K^+$  realizada por el girasol, que consume grandes cantidades de este elemento, antes de la floración (Alba, 1990).

La absorción de  $K^+$  por las raíces, se ve influenciada por la edad de las plantas, la morfología de su sistema radical y la transpiración foliar. Al incrementarse el radio de

las raíces ingresa una mayor cantidad de potasio a la planta por unidad de superficie radical. Asimismo, durante los periodos de iluminación, las tasas de asimilación del catión se incrementan al aumentar la transpiración foliar (Barber, 1995). Lo anterior podría justificar la reducción en la concentración de  $K^+$  en PE, PEDB y PEDA, ya que en estos tratamientos las plantas desarrollaron una gran superficie foliar y raíces gruesas y numerosas.

En los tratamientos PDB y PDA donde las plantas desarrollaron sistemas radicales deficientes y una escasa biomasa aérea, no se observaron diferencias respecto a los tratamientos testigo TDA y TDB. Esto se puede asociar a que la disolución de los minerales ígneos, debió ser más significativa que la absorción del catión realizada por las plantas.



**Figura 17.** Promedio de la concentración de potasio para las tres repeticiones de cada uno de los 12 tratamientos y desviación estandar asociada.

#### 9.4.4. Porcentaje de saturación de bases

En todos los tratamientos el porcentaje de saturación de bases fue del 100%, lo que indica que la cantidad de bases en el complejo de intercambio no se modificó por efecto de los tratamientos. En general los tepetates muestran elevados contenidos de bases intercambiables que saturan la superficie de intercambio catiónico debido a que están constituidos por minerales pirogénicos ricos en bases, como feldespatos y micas (Flores *et al.*, 2011). Los resultados obtenidos respecto a este parámetro coinciden con lo

observado para otros tepetates y resultan favorables para el desarrollo de las especies vegetales (Velázquez, 2002).

El tepetate resultó ser un sustrato adecuado para el crecimiento y desarrollo del girasol en cuanto al suministro de  $K^+$ ,  $Ca^{++}$  y  $Mg^{++}$ , sobretodo considerando que esta especie vegetal se cultiva normalmente en suelos neutros o alcalinos y que consume elevadas cantidades de potasio para la regulación de la apertura estomática y la transpiración, mecanismos que tienen un papel importante su capacidad para resistir a la sequía (Alba 1990).

### 9.3. Evaluación de los componentes del rendimiento de *Helianthus annuus L.*

A continuación se observan dos tablas (13 y 14) que indican los valores promedio de cada uno de los componentes del rendimiento evaluados en las plantas de girasol para los tratamientos P, PDB, PDA, PE, PEDB, PEDA y la desviación estándar asociada a ellos. Así mismo se indican los resultados de la prueba de Tukey de comparaciones múltiples, para aquellos parámetros en que se obtuvo una diferencia significativa entre tratamientos después de realizar la prueba de comparación de medias Anova (Apéndice III).

**Tabla 13.** Promedios de los componentes de rendimiento del girasol, desviación estándar y significancia del análisis estadístico, para los seis tratamientos que involucraron la presencia de planta.

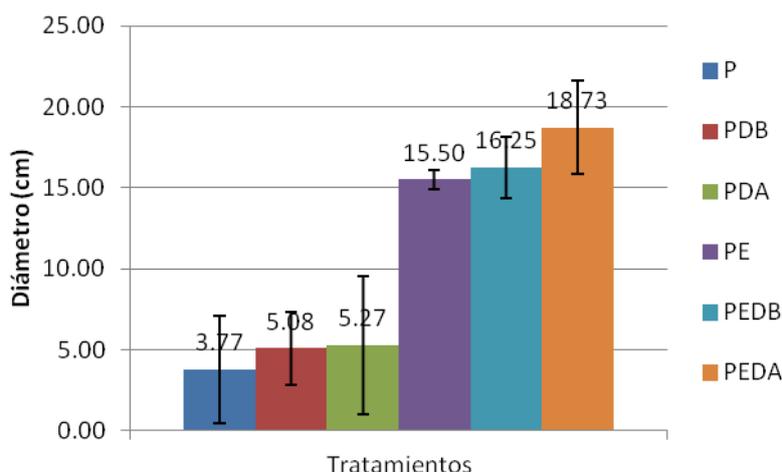
Tratamiento	Diámetro Capítulo (cm)	Longitud de Flores liguladas (cm)	Número de Flores liguladas	Tiempo de en vida Florero (días)	Número de Hojas	Diámetro del tallo (cm)
P	3.77 ± 3.29 a <sup>1</sup>	2.29 ± 0.77 a	9.67 ± 4.93 a	12.33 ± 6.81 a	16.67 ± 1.15 a	0.29 ± 0.07 a
PDB	5.08 ± 2.27 a	2.93 ± 0.99 a	12.33 ± 2.08 a	8.00 ± 2.65 a	17.67 ± 5.03 a	0.28 ± 0.08 a
PDA	5.27 ± 4.25 a	2.32 ± 1.31 a	20.50 ± 0.71 a	10.67 ± 0.58 a	26.00 ± 7.94 a	0.43 ± 0.16 a
PE	15.50 ± 0.62 b	5.46 ± 0.15 b	31.00 ± 5.29 b	6.67 ± 0.58 a	32.67 ± 0.21 a	1.13 ± 0.21 b
PEDB	16.25 ± 1.89 b	5.51 ± 0.54 b	30.33 ± 8.14 b	7.00 ± 1.00 a	28.00 ± 2.65 a	1.27 ± 0.32 b
PEDA	18.73 ± 2.91 b	6.73 ± 0.42 b	31.67 ± 3.21 b	8.00 ± 1.00 a	31.00 ± 9.61 a	1.33 ± 0.06 b

**Tabla 14.** Promedios de los componentes de rendimiento del girasol, desviación estándar y significancia del análisis estadístico, para los seis tratamientos que involucraron la presencia de planta.

Tratamiento	Altura planta (cm)	Peso fresco (g)	Peso Seco (g)	Long. raíz pivotante (cm)	Longitud de raíces secundarias (cm)
P	59.00 ± 7.57 a <sup>1</sup>	5.07 ± 0.98 b	4.08 ± 0.10 b	7.03 ± 4.14 a	0.55 ± 0.33 a
PDB	71.90 ± 18.32 ab	7.25 ± 4.88 b	6.57 ± 4.73 b	11.67 ± 3.02 a	5.02 ± 2.39 a
PDA	106.97 ± 53.75 abc	20.01 ± 14.89 b	11.09 ± 8.76 b	9.73 ± 1.81 a	2.62 ± 2.62 a
PE	205.50 ± 36.40 bcd	132.80 ± 62.59 ab	53.80 ± 8.07 a	5.17 ± 1.26 a	7.95 ± 3.73 a
PEDB	160.17 ± 36.76 cd	239.06 ± 117.66 a	63.54 ± 18.79 a	7.50 ± 2.43 a	10.38 ± 3.20 a
PEDA	189.00 ± 35.16 d	286.49 ± 103.16 a	76.33 ± 29.82 a	7.69 ± 0.27 a	10.43 ± 6.43 a

<sup>1</sup> Los valores que tienen la misma letra son estadísticamente semejantes.

### 9.3.1. Diámetro del capítulo



**Figura 18.** Promedio del diámetro del capítulo para las tres repeticiones de cada uno de los seis tratamientos que involucraron la presencia de planta y desviación estándar asociada.

En la figura 18, se puede observar una tendencia ascendente en el diámetro del capítulo del tratamiento que sólo contiene planta (P), al tratamiento que contiene estiércol y la dosis alta de fertilización química (PEDA).

Los resultados obtenidos en el análisis de varianza, indican que existieron diferencias altamente significativas en el diámetro del capítulo floral de las plantas que fueron sometidas a los seis diferentes tratamientos (Apéndice III). La prueba de Tukey muestra

que los tratamientos que incluyeron la aplicación de estiércol (PE, PEDB y PEDA) produjeron resultados estadísticamente semejantes entre sí y diferentes de los tratamientos a los que no se agregó la enmienda (PDA, PDB y P), siendo los primeros los que produjeron los mayores diámetros del capítulo floral.

El efecto favorable del estiércol sobre el diámetro del capítulo, está relacionado con el papel de esta enmienda en el suministro de los macro y micronutrientes requeridos por la planta en el periodo previo a la floración. De acuerdo con Eghball y colaboradores (1999) y Labrador, entre el 30 y 40 % de los nutrientes contenidos en la fracción lábil del estiércol se mineralizan en el primer año de aplicación.

Por otra parte, la materia orgánica parcial o totalmente descompuesta, posee cargas negativas en su superficie que favorecen la adsorción de cationes, los cuales se intercambian por cantidades equivalentes de otros cationes presentes en el suelo y por aquellos producidos por las plantas (Buckman y Brady, 1985). Así la materia orgánica aportada a través del estiércol no solo pudo haber representado una fuente de N y P orgánicos susceptibles de mineralizarse por la acción microbológica, sino que probablemente aumentó la capacidad de intercambio catiónico del tepetate, proporcionando un mayor número de sitios activos para la adsorción de nutrientes intercambiables.

La producción de capítulos grandes y vigorosos en los tratamientos donde se agregó el estiércol, indica que su aplicación al tepetate fragmentado, satisface adecuadamente las necesidades nutricionales del girasol ornamental en el periodo que resulta crítico para la determinación de los componentes de su rendimiento. Dicho periodo incluye la etapa de desarrollo vegetativo y el inicio de la floración, que transcurren desde la emergencia de la planta hasta los 30 a 35 días posteriores. En este periodo el girasol absorbe aproximadamente el 75% de N y el 60 % del P que consumirá para el mantenimiento de sus hojas, tallos y raíces, y para el desarrollo de la inflorescencia (Aguerrizábal *et al.*, 2001).

Los diámetros preferidos para la comercialización del girasol como flor de corte no superan los 8 cm (Melgares, 2001). Los tratamientos PE, PEDA y PEDB produjeron diámetros que oscilaron entre los 15 y 18 cm, por lo que convendría probar la aplicación

de dosis menores de estiércol para el cultivo de girasol con fines ornamentales en tepetate fragmentado. Otra propuesta sería cultivarlo en un esquema de rotación, realizando la aplicación de estiércol en el primer ciclo de cultivo y la siembra del girasol en el segundo ciclo para aprovechar el efecto residual de la enmienda.

Por otra parte, los tratamientos que no contuvieron estiércol (P, PDB y PDA) produjeron capítulos pequeños. Incluso, en dos de las repeticiones del tratamiento P, el capítulo floral se mantuvo cerrado, lo cual se considerarse un síntoma de deficiencia de fósforo (Figura 19). La carencia de P afecta el desarrollo del capítulo y puede retrasar la floración entre 13 y 30 días bajo condiciones de deficiencia severa (Díaz, 2004).



**Figura 19.** A y B. Se observan síntomas de deficiencia de fósforo en los tratamientos P-I y P-II respectivamente a los 37 días de la emergencia de las plántulas. C. A manera de contraste, se observa la inflorescencia del tratamiento PEDa-III, adicionado con estiércol y la dosis alta de fertilización química.

La adición de fertilizantes minerales no produjo diferencias significativas en el diámetro del capítulo floral de los tratamientos PDB y PDA con respecto a P. Es posible que una parte importante de los nutrientes proporcionados por el fertilizante se lavaran al fondo de las macetas a causa de la percolación del agua de riego, ya que el tepetate fragmentado posee una escasa agregación, una estructura compacta y una baja porosidad que reducen su capacidad de retención de agua y favorecen su pérdida por percolación o por escurrimiento superficial (Gama *et al.*, 2007) y con ello el arrastre de nutrientes.

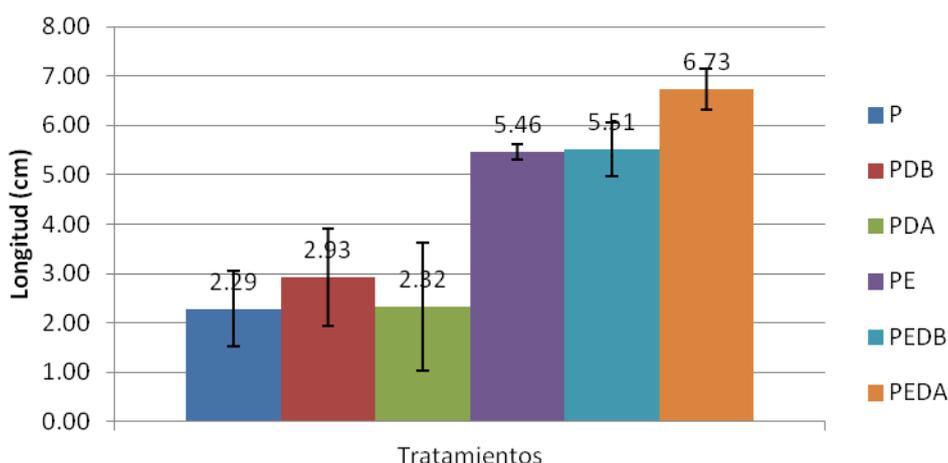
Debido a que las macetas no se encontraban perforadas, los nutrientes probablemente quedaron retenidos en el fondo, sin embargo la escasa longitud y densidad radical observadas en PDB y PDA, pudieron haber impedido la exploración de la totalidad del

volumen de las unidades experimentales, llegando sólo algunas raíces secundarias muy finas al fondo.

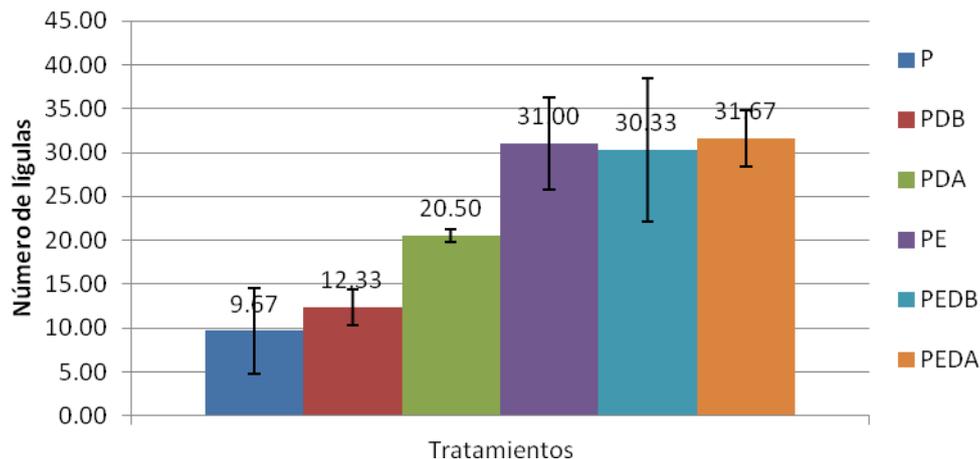
A lo anterior se suma que algunos aniones como los fosfatos ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) se adsorben fuertemente en los complejos de intercambio de materiales con carga variable, lo que reduce su disponibilidad para las plantas (Alcalá *et al.*, 2009; Troeh y Thompson, 1993). El tepetate es rico en materiales amorfos, principalmente alófono y óxidos de Fe y Al, por lo que parte del P adicionado en el superfosfato de calcio simple, pudo haberse fijado a la superficie de intercambio de estos materiales, reduciéndose su disponibilidad para el girasol.

Considerando la importancia del suministro de fósforo en etapas tempranas del ciclo de vida del girasol y tomando en cuenta los procesos de arrastre y fijación de este elemento que pudieran ocurrir por la composición y deficiente estructuración del tepetate en etapas tempranas del proceso de habilitación; se vuelve fundamental aportar al tepetate no sólo una fuente de nutrición mineral, sino una fuente de materia orgánica que además de mineralizarse provea de una superficie de intercambio adicional para la adsorción de nutrimentos y favorezca directa e indirectamente procesos de macroagregación (Plancarte, 2006; Velázquez, 2002).

### 9.3.2. Longitud promedio y número de flores liguladas por capítulo



**Figura 20.** Longitud promedio de las flores liguladas y desviación estandar asociada.



**Figura 21.** Número de flores liguladas promedio y desviación estandar asociada.

En las figuras 20 y 21, se observa que hay una tendencia ascendente en los parámetros “longitud promedio de flores liguladas” y “número de flores liguladas” del tratamiento que solo involucra la presencia de planta al tratamiento que contiene estiércol y la dosis alta de fertilización química. Nuevamente el nitrógeno y fósforo, adicionados a través de la fertilización orgánica favorecieron el desarrollo de la inflorescencia teniendo el fósforo el lugar mas relevante en la fisiología de la floración.

El análisis de varianza para ambos parámetros, indica que existieron diferencias altamente significativas en la longitud promedio y número de flores liguladas de las plantas que fueron sometidas a los seis diferentes tratamientos (Apéndice III). Los resultados obtenidos en las pruebas de Tukey respectivas, indican que los tratamientos que incluyeron la aplicación de estiércol produjeron resultados estadísticamente semejantes entre sí y diferentes de los tratamientos a los que no se agregó estiércol, siendo los primeros los que ocasionaron el mayor número de lígulas por capítulo y las mayores longitudes promedio de flor.

El efecto favorable del estiércol en la longitud y número de lígulas en los tratamientos PE, PEDB y PEDA, se debió probablemente a que además de proporcionar una fuente de P mineralizable, incrementó el número de sitios activos para su adsorción y por lo tanto su disponibilidad para las plantas en la etapa de desarrollo previa a la floración. En este periodo el P se acumula en forma de sales, en tallos y hojas, para ser movilizado posteriormente hacia la inflorescencia (Díaz, 2004).

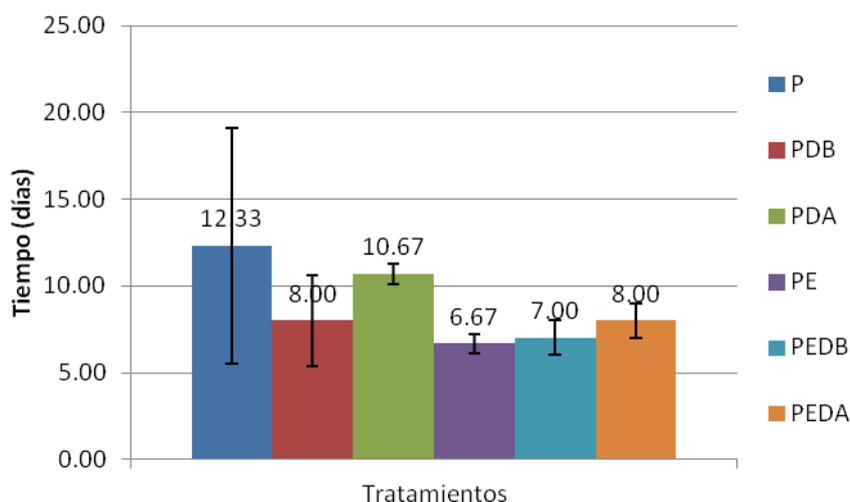
El estiércol también pudo haber contrarrestado la fijación de los fosfatos en la superficie de los amorfos al aportar materiales orgánicos capaces de formar complejos con el fósforo. De acuerdo con Barker *et al.* (2007) algunos ácidos orgánicos reducen el proceso de fijación y precipitación del fósforo, a través de la formación de complejos (o quelatos) con cationes como Fe, Al y Ca que reaccionan con el P.

Particularmente en PDB y PDA la ausencia de diferencias con respecto a P puede estar relacionada con el arrastre de los nutrientes minerales al fondo de las macetas, que no encontraron una superficie adecuada para su adsorción y en la fijación del fósforo a la superficie de los amorfos, que no fue contrarrestada por la presencia de materia orgánica.

De acuerdo con Aguerrizábal y colaboradores (2001) el número total de flores en el ápice reproductivo del girasol, es controlado por tres factores: a) el número de flores que se desarrollan en la etapa de 8 a 10 pares de hojas, el cual depende del perímetro inicial del capítulo, b) el espacio que proporciona el tejido del receptáculo en expansión (o área generativa) para la diferenciación de nuevas flores y c) el número de flores en cada fila del receptáculo, que depende del diámetro máximo alcanzado por el receptáculo en la etapa de 14 a 16 pares de hojas. Estos factores son altamente dependientes de la nutrición mineral y carbonada, así como de la disponibilidad de agua en la etapa de desarrollo de la inflorescencia, la cual tiene una duración aproximada de 20 días y transcurre entre los 22 y 58 días posteriores a la emergencia.

El hecho de no haber observado diferencias significativas en el número y longitud de las lígulas por efecto de la fertilización inorgánica en P, PDB y PDA, pudo estar relacionado a que de los 22 días posteriores a la emergencia (alrededor de los cuales da inicio la floración) hasta los 42 días en que fue adicionado el fertilizante, las plantas carecieron de nutrientes suficientes para promover la expansión del área generativa, restringiendo así la diferenciación de nuevas flores en etapas posteriores de la floración, aun cuando la planta ya dispusiese de una fuente de nutrición mineral.

### 9.3.3. Tiempo de vida en florero



**Figura 22.** Promedio del tiempo de vida en florero y desviación estandar asociada.

El tiempo de vida en florero no sigue la tendencia ascendente del tratamiento P al tratamiento PEDA que se percibe en los gráficos del resto de los parámetros evaluados, sino una tendencia inversa. A pesar de que en dos de las repeticiones del tratamiento P no se observó un desarrollo completo de las inflorescencias (los capítulos se mantuvieron cerrados), las lígulas que llegaron a sobresalir de los capítulos florales, tardaron más tiempo en mostrar signos de marchitez que en el resto de los tratamientos.

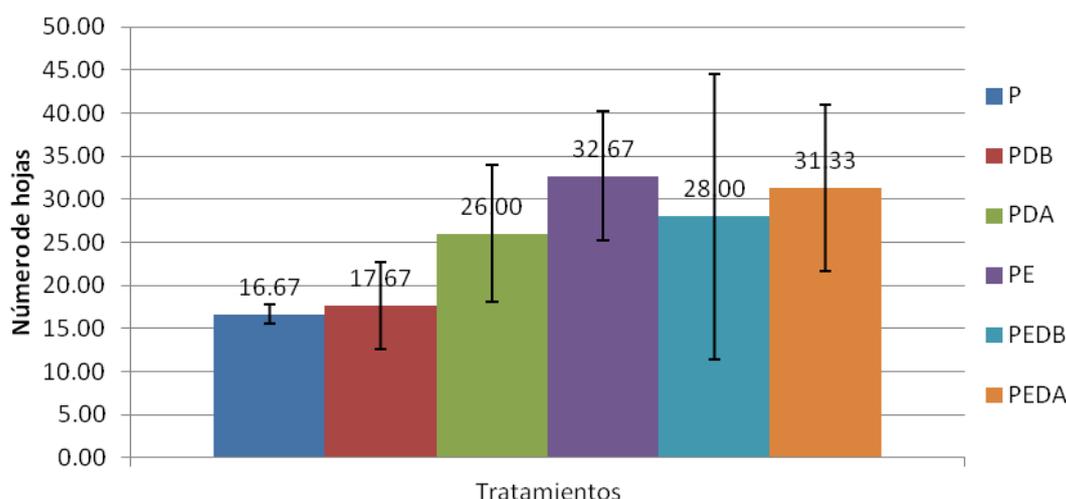
Las flores cortadas mueren con rapidez debido al consumo de las reservas de azúcares necesarias para la biosíntesis y el mantenimiento de la vida. Los azúcares presentes en las ramas florales al momento del corte, retrasan la proteólisis y promueven la síntesis de amidas y proteínas, preservan las actividades enzimáticas involucradas en la síntesis de sucrosa (principal molécula transportadora de energía en las flores), retrasan la llegada del pico de etileno característico de la senescencia, la exudación masiva de solutos (provocada por la pérdida de la integridad de la membrana) y la degradación de fosfolípidos (Paulin, 1986).

Tomando en consideración lo anterior, podría suponerse que en aquellos capítulos que mostraron un desarrollo incompleto por la deficiencia de nutrimentos, las lígulas que lograron sobresalir, dispusieron de mayores reservas de azúcares, ya que éstas se distribuyeron sólo en unas pocas flores, lo que las llevó a permanecer en buen estado por más tiempo.

Los resultados obtenidos en el análisis de varianza, indican que no existieron diferencias significativas entre tratamientos respecto al tiempo de vida en florero de las inflorescencias (significancia mayor a 0.01). La prueba de Tukey confirma estos resultados.

La ausencia de diferencias significativas en este parámetro puede estar relacionada con el hecho de que “el tiempo de vida en florero” está determinado en un 70% por factores postcosecha, como la dificultad para absorber y transportar agua por los vasos conductores, la incapacidad del tejido floral para retener agua y la variación de la concentración osmótica intracelular; mientras que sólo el 30 % está determinado por factores precosecha como son la nutrición mineral, los problemas fitosanitarios, las condiciones del suelo, luminosidad y la disponibilidad de agua (López *et al.*, 2011).

#### 9.3.4. Número de hojas



**Figura 23.** Promedio del número de hojas y desviación estandar asociada.

En la figura 23 se aprecia que las plantas adicionadas con estiércol desarrollaron un mayor número de hojas que las plantas sometidas al resto de los tratamientos. El análisis de varianza indicó que las diferencias observadas entre tratamientos respecto a la magnitud de este parámetro no fueron estadísticamente significativas.

En posteriores estudios valdría la pena tomar en cuenta el tamaño de las hojas, pues su variación era muy evidente entre los tratamientos que tuvieron un aporte temprano de materia orgánica y nutrimentos, y los que no. Además, la magnitud de la superficie foliar es un parámetro de suma importancia, ya que determina la cantidad de luz que

será interceptada por la planta, influyendo directamente en la fotosíntesis y en la elaboración de sustancias alimenticias y metabolitos que serán movilizados para la formación de la inflorescencia.

Aguirrezábal y colaboradores (2001) señala que existe una relación lineal entre la cantidad de radiación lumínica interceptada por el girasol y su crecimiento en peso seco. Esto se pudo corroborar visualmente, ya que las plantas que desarrollaron una mayor superficie foliar (PE, PEDB y PEDA), presentaron los mayores promedios de peso seco. La incorporación de estiércol al tepetate en el momento previo a la siembra, favoreció el crecimiento y desarrollo de la biomasa vegetativa del girasol, lo que se reflejó positivamente en el tamaño y vigor de las hojas, no así en su número.

También hay que mencionar que en los tratamientos P, PDB y PDA, en los que el aporte de nutrimentos se realizó a través del fertilizante químico, las plantas mostraron síntomas severos de deficiencia de N y P a lo largo de su desarrollo.

La falta de nitrógeno es una de las causas más comunes de la reducción del rendimiento del girasol. Este elemento es necesario para su crecimiento y para la diferenciación y desarrollo de sus órganos, la mayor parte del nitrógeno requerido por la planta es consumido antes de la floración, acumulándose en tallos y hojas, para después pasar a la semilla (Alba, 1990).

Un suministro adecuado de N permite un buen desarrollo foliar antes de la floración y el mantenimiento posterior de la actividad fotosintética, así como la redistribución de los compuestos nitrogenados a las semillas (Alba, 1990). El síntoma más común de deficiencia es la clorosis foliar que puede aparecer en cualquier fase de su desarrollo, las hojas viejas muestran manchas necróticas en estados avanzados de carencia (Figura 24).

En el caso del fósforo, las máximas necesidades se producen durante la floración, antes de la cual el P se acumula en forma de sales minerales en tallos y hojas para pasar después a las semillas. La carencia de este elemento tiene efectos negativos sobre el vigor del girasol en la nacencia y el crecimiento de la planta en las primeras fases de su desarrollo, además de afectar la formación y el llenado de las semillas. Los síntomas foliares de carencia se manifiestan como áreas empapadas de agua en las hojas

inferiores que evolucionan a necrosis oscuras, los tejidos necróticos ocurren principalmente entre las nervaduras mayores (Díaz, 2004; Alba, 1999) (Figura 25).

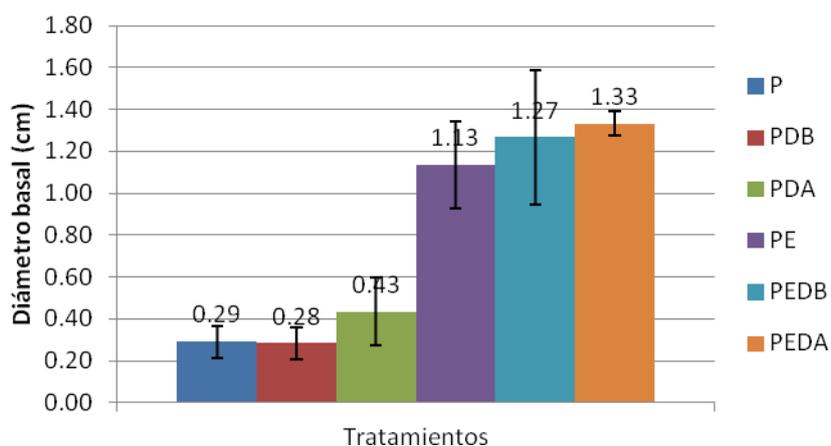


**Figura 24.** Deficiencias nutricionales (clorosis y necrosis de las hojas más viejas) en los tratamientos P-I, P-II y PDB-III respectivamente a los 37 días de la emergencia de las plántulas.



**Figura 25.** Tejidos necróticos entre las nervaduras mayores, síntomas de deficiencia de fósforo y nitrógeno en los tratamientos P-II y PDA-III respectivamente a los 37 días de la emergencia de las plántulas.

### 9.3.5. Diámetro del tallo



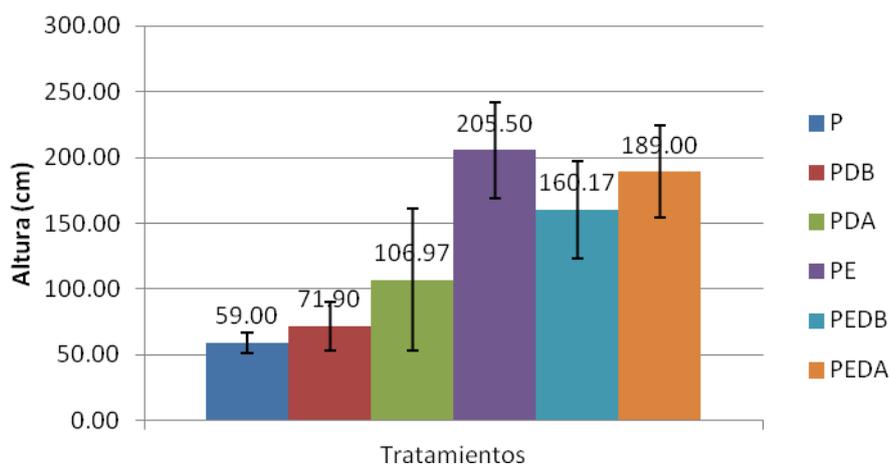
**Figura 26.** Promedio del diámetro del tallo y desviación estándar asociada.

En la figura 26 se observa una tendencia ascendente en el diámetro del tallo, del tratamiento que sólo involucra la presencia de planta, al tratamiento que contiene estiércol y la dosis alta de fertilización química. El aporte temprano de materia orgánica mineralizable a través de la adición de estiércol en los tratamientos PE, PEDB y PEDA, parece haber favorecido el desarrollo de estructuras vegetativas más robustas. En los tratamientos que no se adicionó estiércol se obtuvieron diámetros de tallo muy reducidos (de entre 0.3 y 0.4 cm) e incluso se llegó a presentar el fenómeno de acame.

Considerando que la mayor absorción de nutrimentos en la planta de girasol se concentra en los primeros estadios de su desarrollo (desde la emergencia de la plántula, hasta desarrollo de los 7 a 8 pares de hojas), absorbiéndose entre las dos terceras y tres cuartas partes de los principales nutrimentos extraídos del suelo (Alba, 1990) y que las deficiencias de N producen un retraso en el crecimiento de las plantas y en la diferenciación y desarrollo de sus órganos (Barrientos, 2001), es posible explicar el bajo rendimiento de las estructuras vegetativas (incluyendo el diámetro del tallo) en las plantas de girasol sometidas a aquellos tratamientos donde no existió un aporte de N y P desde etapas tempranas de su crecimiento (P, PDB y PDA).

Con base en el análisis de varianza, se puede afirmar que existieron diferencias altamente significativas entre los efectos de los seis diferentes tratamientos sobre el diámetro del tallo (Apéndice III). Los resultados obtenidos en la prueba de Tukey indican que los tratamientos que incluyeron la aplicación de estiércol produjeron resultados estadísticamente semejantes entre sí y diferentes de los tratamientos a los que no se agregó estiércol, siendo los primeros los que produjeron los tallos más vigorosos y de mayor diámetro.

### 9.3.6. Altura de la planta



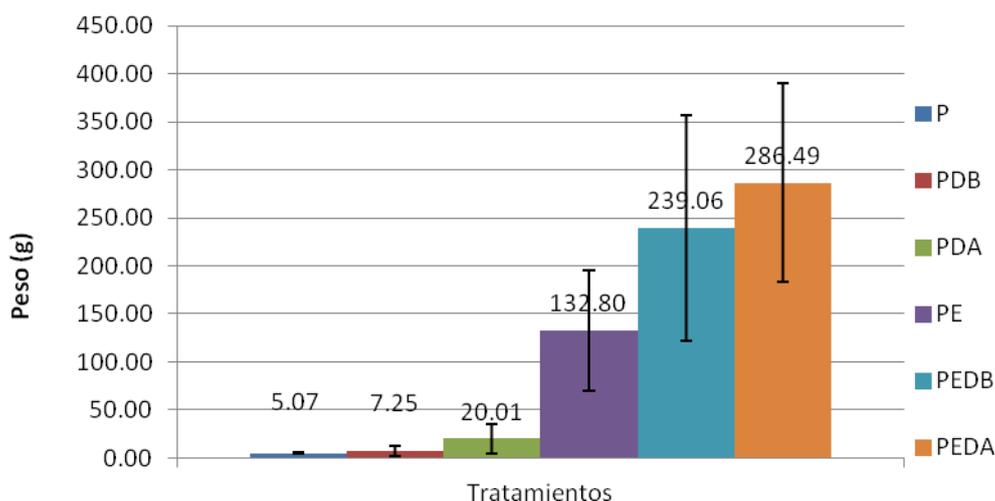
**Figura 27.** Promedio de la altura de la planta (cm) y desviación estandar asociada.

Con base en el análisis de varianza, se puede afirmar que existieron diferencias altamente significativas en la altura de las plantas sometidas a los diferentes tratamientos. La prueba de Tukey indicó que la altura de las plantas en los tratamientos PE, PEDB y PEDA fue estadísticamente diferente de la obtenida en P y que la altura en PDB fue estadísticamente diferente a la obtenida en PEDB y PEDA. En la figura 27 se observa que el tratamiento PE fue el que produjo las plantas con mayor altura, siendo además estadísticamente semejante al resto de los tratamientos que contuvieron estiércol y dosis de fertilización química.

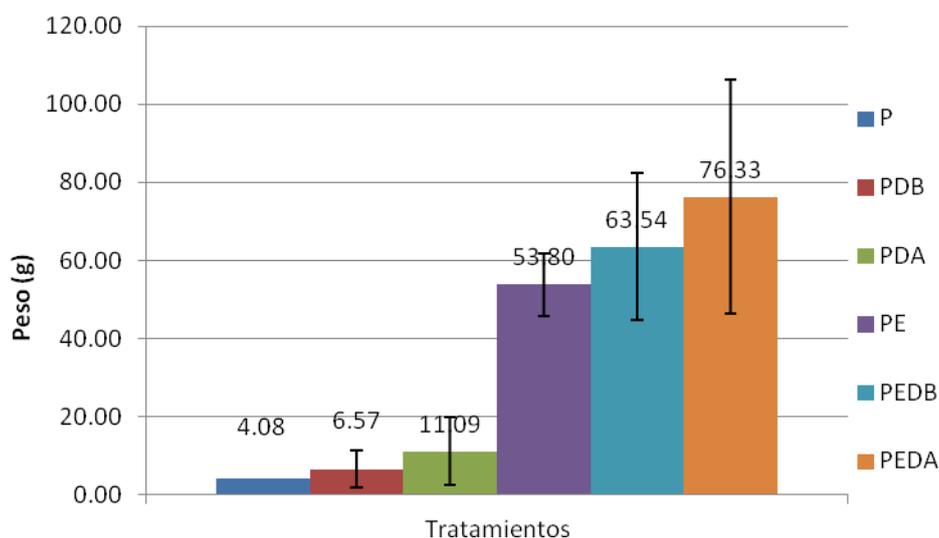
Los tratamientos adicionados con estiércol produjeron los tallos de mayor altura en las plantas de girasol, lo que confirma la importancia de un aporte temprano de N y P, pero principalmente de nitrógeno en las primeras etapas del ciclo de vida de la planta para el desarrollo y crecimiento de sus estructuras vegetativas.

La prueba de comparaciones múltiples indica también que aunque las plantas de los tratamientos que no fueron adicionados con estiércol (P, PDB y PDA) presentaron alturas estadísticamente semejantes entre sí, mostraron una tendencia al incremento de la altura conforme aumentó la dosis de fertilización desde P hasta PDA. De lo anterior se deduce que el fertilizante inorgánico tuvo un efecto favorable en la altura del tallo que no se vio reflejado en otros componentes del rendimiento vegetativo del girasol, por lo que se puede considerar a este parámetro un indicador sensible de la presencia de nutrimentos en etapas tardías del desarrollo de la planta.

### 9.3.7. Peso seco y peso fresco



**Figura 28.** Promedio del peso fresco de la planta (g) y desviación estándar asociada.



**Figura 29.** Promedio del peso seco de la planta (g) y desviación estándar asociada.

El análisis de varianza indica que existieron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en cuanto al peso fresco de las plantas de girasol. Los tratamientos P, PDB y PDA produjeron pesos frescos estadísticamente semejantes entre sí y diferentes de los obtenidos en PEDA y PEDB, en los cuales se registraron los mayores pesos. Por su parte las plantas del tratamiento PE presentaron pesos frescos intermedios entre los tratamientos que no fueron adicionados con estiércol y los que fueron adicionados con estiércol y dosis de fertilización.

En cuanto al peso seco, también se observaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos. Los que involucraron la adición de estiércol fueron

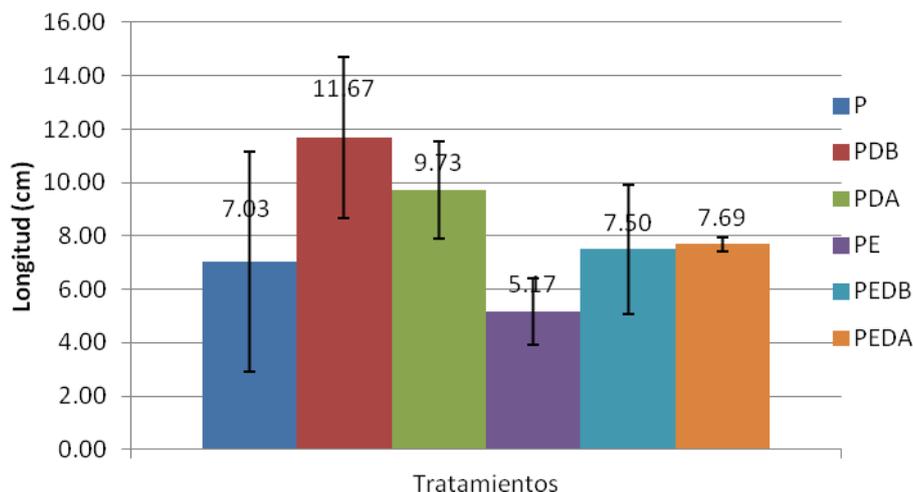
estadísticamente semejantes entre sí y diferentes de aquellos a los que no se adicionó la enmienda, además de producir los mayores pesos secos.

Los pesos fresco y seco, de las plantas (figuras 28 y 29 respectivamente) muestran una tendencia ascendente desde P hasta PEDA. Nuevamente la aplicación del estiércol tuvo una influencia significativa al proporcionar los nutrimentos requeridos por la planta antes de la etapa de floración. Aguirrezábal y colaboradores (2001), señalan que cuando las cantidades de nitrógeno y fósforo disponibles en el suelo son suficientes, el girasol no muestra una respuesta efectiva a la fertilización, de ahí que las plantas de los tratamientos PE, PEDB y PEDA no presentaran, entre sí, diferencias estadísticamente significativas en cuanto al peso de su biomasa.

Debido al escaso contenido de estos macronutrientes en el tepetate, las plantas que se establecieron en los tratamientos donde no fue adicionado el estiércol, no dispusieron de una fuente de nutrición mineral antes de la floración y por lo tanto desarrollaron una escasa biomasa vegetativa que se reflejó en pesos reducidos.

La adición de fertilizante a los 42 días de la emergencia en los tratamientos PDB y PDA no produjo un efecto significativo en el peso de las plantas, ni logró corregir las deficiencias que se presentaron en la etapa juvenil. De acuerdo con Aguirrezábal *et al.* (2001), el impacto del déficit mineral sobre el rendimiento del cultivo de girasol y sus componentes, no sólo depende de la intensidad y duración de la deficiencia, sino de la etapa fenológica del cultivo en que se presenta. En este experimento las deficiencias se presentaron en la etapa de mayor absorción de nutrimentos, por lo que su impacto en los componentes del rendimiento fue considerable, sobretodo en los caracteres reproductivos del girasol, que son de gran importancia si se busca cultivar esta planta como flor de corte.

### 9.3.8. Longitud de raíz pivotante



**Figura 30.** Promedio de la longitud de la raíz pivotante (cm) y desviación estándar asociada.

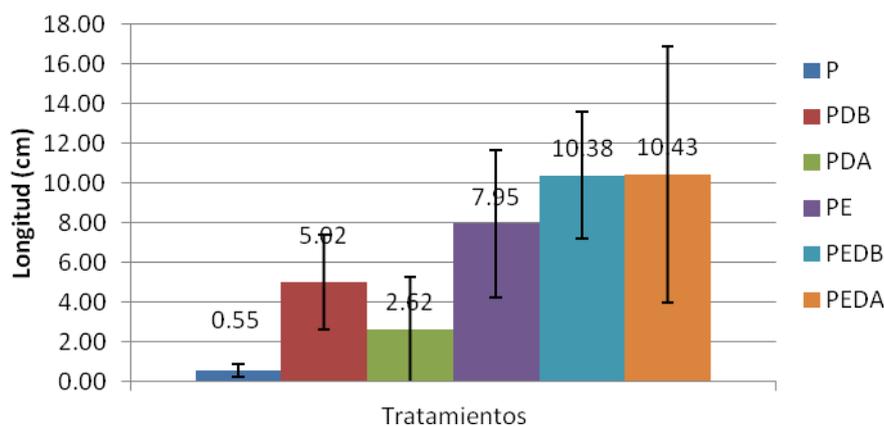
El girasol posee una raíz principal pivotante que, si las condiciones del suelo lo permiten, puede llegar a profundidades de más de 3 metros. En macetas, se ha observado que entre la segunda y tercera semanas posteriores a la emergencia de la plántula, la raíz principal alcanza hasta 80 cm de profundidad (Hernández *et al.*, 1994).

En la figura 30 se puede apreciar que las raíces pivotantes de mayor longitud se obtuvieron en los tratamientos PDB y PDA. Suponemos que esto se debió a que los nutrimentos adicionados con la fertilización química, fueron arrastrados por el agua de riego hacia el fondo de las macetas, de ahí que las raíces principales incrementaran su longitud hasta encontrarlos.

Por otra parte las plantas cultivadas bajo los tratamientos que fueron adicionados con estiércol, mostraron raíces pivotantes más cortas que los tratamientos PDB y PDA, lo que permite suponer que las partículas de estiércol, al estar distribuidas de manera más homogénea entre los fragmentos de tepetate y al ofrecer una mayor superficie de intercambio para la adsorción de nutrimentos, promovieron un menor desarrollo de la raíz principal y en cambio un extenso desarrollo de raíces secundarias y terciarias que encontraron nutrimentos disponibles y homogéneamente distribuidos a una menor profundidad.

Los resultados del análisis de varianza indican que no existieron diferencias significativas entre los efectos de los seis diferentes tratamientos sobre la longitud de la raíz pivotante (Apéndice III). Los resultados obtenidos en la prueba de Tukey confirman la ausencia de diferencias significativas en los resultados producidos por los diferentes tratamientos.

### 9.3.9. Longitud promedio de las raíces secundarias



**Figura 31** Promedio de la longitud de las raíces secundarias (cm) y desviación estándar asociada.

El análisis de varianza indica que no existieron diferencias significativas entre los efectos de los seis diferentes tratamientos sobre la longitud de las raíces secundarias (Apéndice III).

En el girasol, las raíces secundarias son numerosas en la cercanía del cuello de la planta y su densidad disminuye drásticamente a 15 cm de éste. Pueden alcanzar una longitud similar a la de la raíz primaria y de ellas se ramifican numerosas raíces de orden superior (terciarias y cuaternarias) y de menor longitud, responsables de la exploración del sustrato en áreas que ya han sido colonizadas por las raíces primaria y secundarias (Aguirrezábal *et. al.*, 2001).

Aunque no se encontraron diferencias significativas en la longitud de las raíces secundarias de los diferentes tratamientos, visualmente se pudo apreciar que los tratamientos a los que se adicionó estiércol desarrollaron un mayor número de raíces secundarias en las proximidades del cuello de la raíz primaria. Estas raíces eran mas

gruesas y se ramificaban en densas redes de raíces terciarias y cuaternarias. En el caso de los tratamientos P, PDB y PDA, se observaron pocas raíces secundarias, cortas y delgadas, con escasas ramificaciones terciarias y cuaternarias.

Aguirrezábal y colaboradores (2001) mencionan que la arquitectura del sistema radical en el girasol se define principalmente durante la etapa de germinación al estadio de 10 hojas, una mala preparación del suelo en esta etapa puede afectar la capacidad posterior del cultivo para absorber agua y nutrimentos.

Es posible que la ausencia de nutrimentos en los tratamientos P, PDB y PDA en la etapa de máxima elongación radical (germinación-estadio de 10 hojas) haya provocado el desarrollo de sistemas radicales deficientes, con pocas raíces secundarias, que en etapas posteriores del desarrollo de la planta no fueron eficaces en la exploración del sustrato y en la absorción de nutrimentos. De ahí que el resto de los componentes del rendimiento en esos tratamientos presentaran magnitudes reducidas y que la adición de fertilizante químico no produjera en ellos un efecto significativo.

Por el contrario, en los tratamientos que fueron adicionados con estiércol, las raíces secundarias se desarrollaron extensamente en la etapa de máxima elongación radical, lo que favoreció la exploración del sustrato y la absorción nutrimentos. El desarrollo de sistemas radicales extensos además de contribuir a la disgregación y macroagregación del tepetate, pudo haber promovido la acumulación temporal de materia orgánica y nutrimentos en la proximidad de las raíces, evitando su arrastre por la percolación del agua de riego (Plancarte, 2006; Velázquez, 2001).

Badalucco y Kuikman (2001) observan en pastos, que a bajas concentraciones de N las plantas desarrollan raíces más finas, capaces de explorar un mayor volumen de suelo en busca de nutrimentos. Como se mencionó anteriormente los tratamientos que no fueron adicionados con estiércol desarrollaron raíces secundarias más delgadas; sin embargo, no se observó que exploraran un mayor volumen de tepetate respecto a las raíces de los tratamientos con estiércol. Esto se puede asociar a que la dureza de los fragmentos no permitió la penetración de las raíces finas y por lo tanto su crecimiento estuvo restringido al espacio existente entre los fragmentos, mientras que las raíces gruesas de los tratamientos con estiércol, debieron ejercer un efecto disruptivo mayor sobre los

fragmentos promoviendo su disgregación y la formación de una mayor superficie de soporte, para el desarrollo de las raicillas.



**Figura 32.** Contraste del sistema radical del girasol en los tratamientos PDA (A) y PEDa (B).

## 10. CONCLUSIONES

- ❖ En general las condiciones de manejo implementadas (es decir la aplicación de enmiendas orgánicas e inorgánicas), resultaron favorables para el cultivo de girasol ornamental en tepetate fragmentado.
- ❖ El estiércol tuvo una influencia positiva en el desarrollo de los caracteres reproductivos del girasol, al producir los mayores valores en cuanto al diámetro del capítulo floral, longitud y número de flores liguladas. Por lo anterior se podría asumir que dicha enmienda es adecuada y suficiente para el cultivo de girasol en tepetate fragmentado, para su uso como flor de corte.
- ❖ La enmienda también tuvo efectos positivos en el desarrollo y crecimiento de los caracteres vegetativos del girasol, produciendo los mayores valores en cuanto al diámetro del tallo, altura de la planta y longitud de raíces secundarias.
- ❖ El efecto positivo del estiércol en la nutrición del girasol se debió a que la enmienda constituyó una fuente de materia orgánica mineralizable y contribuyó al incremento de la CIC en el tepetate. Además pudo haber contrarrestado procesos de arrastre y fijación de nutrimentos.
- ❖ Los parámetros “número de hojas” y “tiempo de vida en florero” no mostraron una respuesta significativa a las condiciones de manejo empleadas en el experimento.
- ❖ Aunque los tratamientos no provocaron cambios significativos en la agregación, la planta parece haber favorecido la disgregación de los fragmentos de tepetate de mayor tamaño, ya que se observó una disminución de los porcentajes de agregación en la categoría de 10 a 5 mm y un incremento en el intervalo de 2 a 0.25 mm.
- ❖ La planta, el estiércol y los ciclos de humectación-desección parecen contribuir a la formación de agregados mayores a 10 mm en algunos tratamientos, lo que se podría asociar al empaquetamiento y recementación de los fragmentos por la precipitación de partículas finas y óxido de sílice. Así como a la probable formación de

macroagregados por la acción de las raíces, los productos de rizodepositación y los mucílagos microbianos.

- ❖ La presencia de plantas con sistemas radicales densos parece haber producido dos tipos de efectos en la estabilidad de los fragmentos: su desestabilización en la categoría de fragmentos mayores a 5 mm, y el incremento de su estabilidad en el intervalo de 0.5 a 3 mm.
- ❖ El estiércol parece haber influido en la estabilización de los fragmentos mayores a 5 mm, lo que se podría relacionar con su capacidad para disminuir el efecto disruptivo de la humectación y para promover indirectamente la formación de agentes de unión transitorios.
- ❖ De los factores estudiados el estiércol tuvo un papel predominante en el aumento del porcentaje de materia orgánica del tepetate fragmentado, lo que incrementó su fertilidad. La planta por su parte contribuyó a elevar la relación C:N de la MO al aportar al tepetate compuestos lábiles, ricos en carbono.
- ❖ El fertilizante químico produjo una disminución del pH en los tratamientos que no fueron adicionados con estiércol. En el resto de los tratamientos el pH no se modificó significativamente, manteniéndose en un intervalo óptimo para la nutrición vegetal.
- ❖ La CIC y el contenido de bases intercambiables se mantuvieron en rangos óptimos para la nutrición mineral del girasol y no se modificaron por efecto de la especie vegetal ni la fertilización mineral. La adición de estiércol provocó un incremento en ambos parámetros, lo que se asoció a su contenido de cationes y materia orgánica.

## 11. RECOMENDACIONES

La formación y estabilización de agregados en tepetate fragmentado (tipo duripán) adicionado con enmiendas orgánicas e inorgánicas y cultivado con plantas, solo se ha documentado en experimentos de habilitación cuya duración es mayor a dos años; por lo que si en trabajos posteriores se desean monitorear los cambios ocurridos en la estructura de este material, convendría someterlo a procesos de habilitación más prolongados.

Respecto al tipo de cultivos empleados en la habilitación de tepetate tipo duripán, se podría sugerir el uso de plantas perenes (herbáceas como los pastos ó arbóreas como los frutales y especies forestales) ya que estas ejercen una acción más prolongada sobre el sustrato. Las plantas de ciclo de vida corto como el girasol u otras especies ruderales con ciclos de vida anuales y bianuales podrían resultar efectivas si se incorporan en esquemas de producción que involucren la rotación de cultivos.

El aporte de nutrimentos minerales al tepetate, a través de fertilizantes inorgánicos, sin la adición previa de materia orgánica, resulta insuficiente para promover una nutrición adecuada de las plantas cultivadas en tepetate fragmentado, ya que la deficiente estructuración y baja porosidad de este material, favorecen fenómenos de percolación de agua y arrastre de nutrimentos. Por ello se recomienda el uso preferente de fuentes de nutrición orgánicas que al mismo tiempo que proveen de nutrimentos a las plantas contribuyen a la estructuración del tepetate.

## 12. LITERATURA CITADA

- Acevedo, S. O. A., Cruz, S. M. y Cruz, C. E., 2002. **Distribución de óxidos de Fe, Al y Si en horizontes endurecidos de origen volcánico.** *Agrociencias* 36(004): 401-409.
- Acevedo, S. O. A., Velázquez, R. A. S. y Flores, R. D., 2001. **Agregación por especies vegetales y abonos orgánicos en tepetates fracturados en condiciones de invernadero.** *Terra Latinoamericana* 19 (4): 363-373.
- Acevedo, S. O. A., 1998. **Morfogénesis de suelos con tepetate de una área del estado de México y su incorporación al proceso productivo.** Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., 277 p.
- Agners, D. A. y Caron, J., 1998. **Plant-induced changes in soil structure: Processes and feedbacks.** *Biogeochemistry* 42: 55-72.
- Aguirrezábal, L. A. N., Orioli, G. A., Hernández, L. F., Pereyra, V. R. y Miravé, J. P., 2001. **Girasol Aspectos fisiológicos que determinan el rendimiento.** Edición digital. Unidad Integrada Balcarce, Buenos Aires, Argentina, 111 p.
- Alba, O. A., 1990. El cultivo del girasol. Ediciones Mundi Prensa, Madrid, 158 p.
- Alcalá de Jesús, M., Hidalgo, M. C. y Gutiérrez, C. M del C., 2009. **Mineralogía y retención de fosfatos en andisoles.** *Terra Latinoamericana* 27(4): 275-286.
- Álvarez, S. J. D., Ferrera, C. R. y Etchevers, B. J. D., 2000. **Actividad microbiana en tepetate con incorporación de residuos orgánicos.** *Agrociencia* 34(005):523-532.
- Angiosperm Phylogeny Website III (APG III), 2009 [En línea]. [Fecha de consulta 10 de noviembre del 2012]. Disponible en: <<http://www.mobot.org/MOBOT/research/APweb>>.
- Arias, R. H. M., 1992. **Rehabilitación de Tepetates: una alternativa para la producción agropecuaria y forestal.** *Terra Latinoamericana* 10 (Número especial: suelos volcánicos endurecidos): 309-317.
- ASERCA, 2006. **La floricultura Mexicana, el gigante que está despertando.** *Claridades agropecuarias* 154: 3-39.

- ASERCA, 2008. **Floricultura**. SAGARPA, *Boletín comercialización* 7: 3-5[En línea]. [Fecha de consulta 12 de julio de 2012]. Disponible en: <<http://www.aserca.gob.mx/artman/uploads/boletin--2008-11.pdf>>.
- **Atlas de las plantas de la medicina tradicional mexicana**, 2009. Biblioteca Digital de la medicina tradicional Mexicana [En línea]. [Fecha de consulta 25 de julio del 2012]. Disponible en: <[www.medicinatradicionalmexicana.unam.mx](http://www.medicinatradicionalmexicana.unam.mx)>.
- Ávila, C. G. R., Gutiérrez, C. M. del C., Ortiz, S. C. A., Ángeles, C. E. y Sánchez, G. P., 2011. **Evaluación de las reforestaciones en la formación de suelo a partir de tepetates**. *Revista Chapingo*, Serie de ciencias forestales y del ambiente 17(3): 303-312.
- Ávila, M. J., 2009. **Manual para el cultivo del girasol**. Serie B, Núm. 20. Instituto de Investigaciones Agrícolas y Centro de Investigaciones Agrícolas del Estado Portuguesa, Venezuela, 48 p.
- Ayoama, M., Agners, D. A., N'Dayegamiye, A., 1999. **Particulate and mineral-associated organic matter in water-stable aggregates as affected by mineral fertilizer and manure applications**. *Canadian Journal of Soil Science* 79(2): 295-302.
- Badalucco, L., y Kuikman, J. P., 2001. **Mineralization and immobilization in the rhizosphere**. In: Pinton, R., Varanini, Z., y Nannipieri, P. (Eds.). *The Rhizosphere. Biochemistry and organic substances at the soil-plant interface*. Marcel Dekker, Inc., U.S.A., pp. 159-196.
- Barber, A. S., 1995. **Soil Nutrient Bioavailability. A Mechanistic Approach**. John Wiley & Sons Inc. U.S.A., pp. 231-300.
- Barker, V. A. y Pilbean, J. D., 2007. **Handbook of plant nutrition**. CRC Press, Taylor & Francis Group, USA, pp. 19 – 181.
- Barrientos, R. L. Y., 2001. **Evaluación de tres fertilizantes orgánicos en girasol (*Helianthus annuus L.*) var. Sumbright**. Tesis Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Cuautitlán Izcalli, Edo. De México, 77 p.
- Bleam, F. W., 2012. **Soil and environmental Chemistry**. Academic Press, Madison, Wisconsin, U.S.A., pp. 257-277.
- Bohn, L. H., Mc Neal, L. B. y O'Connor, A. G., 2001. **Soil Chemistry**. John Wiley & Sons Inc., U.S.A., pp. 26-67.

- Bossuyt, H., Denef, K., Six, J., Frey, S. D., Merckx, R. y Paustian, K., 2001. **Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability.** *Applied Soil Ecology* 16(3):195-208.
- Buckman, O. H. y Brady, C. N., 1985. **Naturaleza y propiedades de los suelos.** UTEHA, 3ª reimpresión, México., pp. 376-404.
- Chenu, C., Le Bissonnais, Y. y Arrouays, D., 2000. **Organic Influence on Clay Wettability and Soil Aggregate Stability.** *Soil Science Society of America* 64: 1479-1486.
- Denef, K., Six, J., Bossuyt, H., Frey, D. S., Elliot, T. E., Merckx, R. y Paustian, K., 2001. **Influence of dry-wet cycles on the interrelationship between aggregate particulate organic matter, and microbial community dynamics.** *Soil Biology & Biochemistry* 33:1599-1611.
- Díaz, A. J. I., 2001. **Influencia de especies vegetales, abono y fertilizante, sobre algunas características químicas de tepetate fragmentado en condiciones de campo.** Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F., 82 p.
- Díaz, Z. M., 2004. **Importancia del Fósforo en la Nutrición Mineral de Girasol** [En línea]. [Fecha de consulta 10 de mayo del 2012]. Disponible en: <<http://www.elsitioagricola.com/articulos/diazzorita/Importancia%20del%20Fosforo%20en%20la%20Nutricion%20Mineral%20de%20Girasol.asp>>.
- Dimas, L. J., Estrada, D. A., Martínez, R. E. y Valdez, C. R. D., 2001. **Abonos orgánicos y su efecto en propiedades físicas y químicas del suelo y rendimiento de maíz.** *Terra Latinoamericana* 19 (004):293-299.
- **Enciclopedia de los municipios del Estado de Morelos**, 2012 [En línea]. [Fecha de consulta: 13 de agosto del 2012]. Disponible en: <<http://www.elocal.gob.mx/work/templates/enciclo/morelos/Municipios/17022a.htm>>.
- Eghball, B. y Power, F. J., 1999. **Phosphorus and Nitrogen Based Manure and Compost Applications: Corn Production and Soil Phosphorus.** *Soil Science Society of America Journal* 63: 895-901.
- Essington, E. M., 2004. **Soil and water chemistry. An Integrative Approach.** CRC Press, U.S.A., pp. 373-377.

- Etchevers, B. J. D., Pérez, O. M. A., Brito, V. H., Vargas, I. M. y López, N. U., 1998. **La fertilidad de los tepetates en el eje neovolcánico en los Estados de México y Tlaxcala.** In: Navarro, G. H., Poupon, H. y Pérez, O. M. A. (Eds.). Aptitud productiva en suelos volcánicos endurecidos (tepetates). Montecillo, Edo. de México, Colegio de Postgraduados, pp.17-35.
- Etchevers, B. J. D., 1999. **Indicadores de la calidad del suelo.** In: Siebe, C., Rodarte, C. H., Toledo, G., Etchevers, B. J. D. y Oleschko, K. (Eds.). Conservación y restauración de suelos. Programa Universitario del Medio Ambiente (PNUMA). Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México, D. F., pp.239-261.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 1999. **Guía para el manejo eficiente de la nutrición de las plantas.** Italia, pp. 15-17.
- Fernández, S. M. y Ramírez, R., 2001. **Efecto del sistema radical de siete líneas de maíz en los cambios de pH de la rizosfera y su influencia en la disponibilidad del fósforo.** *Bioagro* 13(001): 3-9
- Ferrera, C. R., Ortiz A., Delgadillo, J. y Santamaría, S., 1997. **Uso de la materia orgánica en la recuperación de tepetates y su influencia en los microorganismos.** En: Zebrowski, C., Quantin, P. y Trujillo, G., (Eds.). Suelos volcánicos endurecidos, III Simposio Internacional (Quito, diciembre de 1996), pp. 225-237.
- Flatch, W. K., Nettleton, D.W. y Cadwick, A. O., 1992. **The criteria of duripans in the U.S. soil taxonomy and the contribution of micromorfology to characterize silica indurated soils.** *Terra Latinoamericana* 10 (Numero especial de Suelos volcánicos endurecidos): 34-45.
- Flores, R. D., Alcalá, M. J. R., González, V. A. y Gama, C. J. E., 1991. **Los tepetates.** *Geografía*, Revista del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) 3(4): 36-42.
- Flores, R. D., Alcalá, M. J., 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 (UNAM) 10 (2): 151-163.

- Flores, R. D., Alcalá, M. J., González, V. A. y Gama, C. J. E., 1996. **Duripans in subtropical and temperate subhumid climate of the Trans-Mexico volcanic belt.** *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 13(2): 228-239.
- Flores, R. D., 2006. **Fertilidad de suelos.** En XXIV Curso Diplomado Internacional de Edafología “Nicolas Aguilera”.
- Flores, R. D., Muñiz, I. C. G., Galicia, P. M. S., Ferrerato, C. R. y Zenteno, G., 2011. **Enmiendas orgánicas y durazno, *Prunus pérsica* (L.) Batsch, en el mejoramiento de una capa endurecida, tepetate tipo duripán.** *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.* 63 (3): 479-486.
- Gama, C. J., Solleiro, R. E., Flores, R. D., Sedov, S., Cabadas, B. H. y Díaz, O. J., 2007. **Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: el caso del Glacis de Buenavista, Morelos.** *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 19 (1): 133-145.
- García, A., Flores, R. D., García, C. N. E. y Ferrera, C. R., 2008. **Efecto de enmiendas orgánicas, higuera y micorriza sobre las características de un tepetate.** *Terra Latinoamericana* 26 (4): 309-315.
- García, C. A., Flores, R. D., García, C. N. E., Ferrera, C. R. y Velázquez, R. A., 2007. **Habilitación de un tepetate por efecto de mejoradores biológicos.** *Agrociencia* 41(7): 721-731.
- Gay, M. C. y Corbineau, F., 1991. **Effects of temperature and oxygen on seed germination and seedling growth in sunflower (*Helianthus annuus* L.).** *Environmental and Experimental Botany* 31(2): 193-200.
- Guerrero, G. A., 1996. **El suelo, los abonos y la fertilización de los cultivos.** Ediciones Mundi Prensa, España, pp. 23-27.
- Guerrero, G. M. A., 1993. **Suelos agropecuarios del Estado de Morelos. Producción y rendimiento.** Universidad Nacional Autónoma de México, Centro regional de Investigaciones Multidisciplinarias, México, pp. 260-270.
- Harter, V. A., Gardner, A. K., Falush, D., Lentz, L. D., Bye, A. R. y Reisberg, H. L., 2004. **Origin of extant domesticated sunflowers in eastern North America.** *Nature* 430: 201 – 205.
- Halevy, H. A. y Mayak, S., 1979. **Senescence and Postharvest physiology of cut Flowers, Part 1.** *Horticultural Reviews* 1: 204-236.

- Hafida, Z. y Caron, J., 2008. **Aggregate slaking during rapid wetting: Hydrophobicity and pore occlusion.** *Canadian Journal of Soil Science* 88(1): 85-97.
- Henry, L. C. y Harrison, B. R., 1996. **Carbon Fractions in Compost and Compost Maturity Tests.** In: Magdoff, F.R.; Tabatabai, M. A.; Hanlan, Jr. E. A. (Eds.). *Soil Organic Matter: Analysis and interpretation*. SSSA Special Publication, No. 46, Madison Wisconsin, U.S.A., pp.51-67
- Hernández, L.F. y Orioli, G.A., 1994. **El ideotipo del girasol (*Helianthus annuus L.*).** *Agriscientia* 11: 87-98.
- Hernández, F., 1942. **Historia de las plantas de Nueva España.** Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), pp. 110-102.
- Hernández, X. E., 1987. **Etnobotánica de Tlaxcala.** In: Ruíz, F. F. J. (Ed.). *Uso y Manejo de los tepetates para el desarrollo rural*. Universidad Autónoma de Chapingo, pp. 1-8.
- Hillel, D., 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press, USA, pp. 75 -100.
- Hinsinger, P., Plassard, C., Tang, C., y Jaillard, B., 2003. **Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: A review.** *Plant and Soil* 248:43-59.
- Hidalgo, M. C., Etchevers, D. J., Pérez, M. A., Vera, A., Flores, R. D. y Navarro, H., 1999. **Restauración de suelos volcánicos endurecidos. La experiencia del centro de México: Proyecto Tepetates.** In: Siebe, C., Rodarte, C. H., Toledo, G., Etchevers, J., Oleschko, K., 1999. *Conservación y restauración de suelos*, Programa Universitario del Medio Ambiente (PNUMA), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México, D. F., pp. 451-472.
- Instituto Nacional de Estadística y geografía (INEGI), 2009. **Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos** [En línea]. [Fecha de consulta 15 de agosto del 2012]. Disponible en: <<http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/17/17022.pdf>>.
- Instituto Nacional de Estadística y geografía (INEGI), 2011. **Anuario estadístico del estado de Morelos**, pp. 13-18.
- **Inventario Nacional Forestal (INF)**, 2000. Comisión Nacional Forestal (CONAFOR).

- Izquierdo, C. T., 2004. **Efecto de composta, vermicomposta y cempasúchil (*Tagetes erecta L.*) y la formación de agregados a partir de un tepetate fragmentado.** Tesis Licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), 110 p.
- Jackson, M.L., 1970. **Análisis químico de suelos.** Omega, España, pp. 94-101, 282-286.
- Janssen, B. H., 1996. **Nitrogen mineralization in relation to C:N and decomposability of organic materials.** *Plant and soil* 181:39-45.
- Janzen, H. H., Campbell, C. A., Brandt, S. A., Lafond, G. P. y Townley, S., 1992. **Light-Fraction Organic Matter in Soils from Long-Term Crop Rotations.** *Soil Science Society of America Journal* 55(6): 1799-1806.
- JMP, The Statistical Discovery Software, version 5.0.1a, 2002.
- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., Schuman, G. E. **Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial).** *Soil Science Society of America Journal* 61(1): 4-10.
- Kay, B. D., 1998. **Soil Structure and Organic Carbon: A review.** In : Lal, R., Kimble, J. M., Follet, R. F. y Stewart, B. A. (Eds.). *Soil processes and the carbon cycle.* CRC Press, New York, U.S.A., pp. 169-167.
- Kemper, W.D. y Rosenau, R. C., 1986. **Aggregate stability and size distribution.** In: A. Klute (Ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods.* Soil Science Society of America. Madison, WI, U.S.A., pp. 422-442.
- Labrador, M. J., 1996. **La materia orgánica en los agroecosistemas.** Ediciones Mundi Prensa, España, pp. 121-128.
- Lenz, L. D., Poul, D. M., Pope, O. K. y Wyatt, A. R., 2001. **Prehistoric Sunflower (*Helianthus annuus L.*) domestication in Mexico.** *Economic Botany* 55(3):370-376.
- Llerena, V. F. V. y Sánchez, B. B., 1992. Recuperación de tepetates en la vertiente oriental del valle de México. *Terra* 10 (Número especial de suelos volcánicos endurecidos):302-308.
- López, J. P., Sandoval, V. M., González, H. V., Colinas, L. MT., 2011. **Comportamiento fisiológico postcosecha de tallos florales de rosa (*Rosa***

- hibryda L.) en respuesta al fósforo aplicado en precosecha. Revista Biociencias 1(2): 3-16.*
- López, F. R., 2002. **Degradación de los suelos. Causas procesos evaluación e investigación.** Serie: Suelos y Clima (SC-75), Universidad de los Andes, Venezuela, p. 117-144.
  - Marín, G. M. L., Argón, R. P. y Gómez, B. C., 2002. **Análisis químicos de suelos y aguas.** Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, España, p.19.
  - Masciandro, G. y Ceccanti, B., 1999. **Assessing soil quality in different agro-ecosystems trough biochemical and chemico-structural properties of humic substances.** *Soil & Tillage Research* 51:129-137.
  - Marinissen, J. C. Y. y Dexter, A. R., 1990. **Mechanisms of stabilization of earthworm casts and artificial casts.** *Biology and Fertility of Soils* 9:163-167.
  - Materechera, A. A., Alston, A. M., Kirby, J. M. y Dexter, A. R., 1992. **Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil.** *Plant and Soil* 144:297-303.
  - Melgares, A. J., 2001. **El cultivo de girasol (*Helianthus annuus*) para flor cortada.** *Revista Flormarket* II (2): 55-61.
  - Miehlich, G., 1992. **Formation and properties of tepetate in central higlands of Mexico.** *Terra* 10 (Numero especial de suelos volcánicos endurecidos): 137-144.
  - Monsalve, M., Bochet, E. e Ingelmo, F., 2010. **Capacidad de las raíces para penetrar sustratos compactados y detectar grietas. Metodología y aplicación a la colonización vegetal de laderas erosionadas en ambiente semiárido.** *C. & G.* 24(1-2): 47-61.
  - Morel, J. L., Habib, L., Plantureux, S. y Guckert, A., 1991. **Influence of maize root mucilage on soil aggregate stability.** *Plant and Soil* 136: 11-119.
  - Navarro, H., Poupon, H. y Pérez, M. A., 1998. **Potencialidades agronómicas y sistemas rotacionales para la recuperación de los suelos volcánicos endurecidos.** In: Navarro, G. H., Poupon, H. y Pérez, O. M. A. (Eds.). Aptitud productiva en suelos volcánicos endurecidos (tepetates). Montecillo, Estado. de México, Colegio de Postgraduados, pp.36-59.

- Nelson, D. W. y Sommers, L. E., 1996. **Total carbon, organic carbon and organic matter.** In: Sparks, D. L. (Ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods* Soil Science Society of America. Madison WI, USA. p. 961-1010.
- Nett, L., Aversch, S., Ruppel, S., Rühlmann, J., Feller, C., Eckhard, G. y Fink, M., 2010. **Does long-term farmyard manure fertilization affect short-term nitrogen mineralization from farmyard manure?.** *Biol Fertil Soils* 46:159-167.
- NOM-021-RECNAT-2000, **Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.** Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), pp.31-35.
- Oades, J. M. y Waters, A. G., 1991. **Aggregate hierarchy in soils.** *Soil Research* 29: 815-828.
- Oades, J. M., 1993. **The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure.** *Geoderma* 56:377-400.
- Oades, J. M., 1984. **Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management.** *Plant and Soil* 76: 319-337.
- Pajares, S., Gallardo, J. F., Masciando, G., Ceccanti, B. y J. D. Etchevers, 2010. **Enzyme activity as an indicator of soil quality changes in degraded cultivated Acrisols in the Mexican Trans-volcanic Belt.** *Land Degradation & Development* 22(3): 373-381.
- Palm, C. A., Giller, K. E., Mafongoya, P. L. y Swift, M. J., 2001. **Management of organic matter in the tropics: translating theory into practice.** *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 61: 63-75.
- Paulin, A., 1986. **Influence of exogenous sugars on the evolution of some senescence parameters of petals.** *Acta Hort. (ISHS)* 181:183-194 [En línea]. [Fecha de consulta: 15 de Junio de 2012]. Disponible en: <[http://www.actahort.org/books/181/181\\_22.htm](http://www.actahort.org/books/181/181_22.htm)>.
- Peña, H. D. y Zembrowski, C., 1992. **Los suelos y tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada.** *Terra* 10 (Numero especial: suelos volcánicos endurecidos): 151-155.

- Penichet, C., Guerra, G. y Carballo, G., 2008. **El girasol. Sus posibilidades económico – productivas en el desarrollo agropecuario.** *Observatorio de la Economía Latinoamericana* N° 95 [En línea]. [Fecha de consulta: 25 de marzo de 2012]. Disponible en:  
<<http://www.eumed.net/coursecon/ecolat/cu/2008/cgg.htm>>.
- Pimente, L., 1992. **Como hacer productivos a los tepetates en México.** *Terra* 10 (Numero especial: suelos volcánicos endurecidos): 293-301.
- Plancarte, S. A., 2006. **Efecto de abonos orgánicos e higuera, *Ficus carica L.*, en la agregación y las principales propiedades químicas de un tepetate fragmentado.** Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México, D.F., 107 p.
- Porta, C. J. 1999. **Edafología para la agricultura y el medio ambiente.** Mundi Prensa, España, pp. 195-236.
- Ramírez, E. M., Castro, M. B., Rivera, O. P., Andrade, L., Belmonte, S. F., 2009. **Fertilización orgánica y prácticas de conservación sobre el rendimiento de sorgo de temporal.** Congreso Internacional sobre Desertificación, Murcia, España [En línea]. [Fecha de consulta: 23 de julio del 2012]. Disponible en:  
<<http://congresos.um.es/icod/icod2009/paper/viewFile/5401/5191>>.
- Reeves, D. W., 1997. **The role of soil organic matter in mantaining soil quality in continuous corpping systems.** *Soil Tillage Research* 43:131-167.
- Russell, E. W., 1973. **Soil conditions and plant growth.** Longman, England, 849 p.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca (SAGARPA), sin año. **Utilización de estiércoles.** En: Fichas técnicas sobre actividades agrícolas, pecuarias y de traspatio [En línea]. [Fecha de consulta: 12 de junio del 2012]. Disponible en:  
<<http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasaapt/Utilizaci%F3n%20de%20esti%E9rcoles.pdf>>.
- Salazar, S. E., Trejo, E. H. I.; Vázquez, V. C. y Rivera, O. O., 2003. **Aplicación, manejo y descomposición del estiércol de bovino.** En: Salazar, S. E., Fortis, H. M, Vázquez, A. A. y Vázquez, V. C. (Eds.). *Agricultura Orgánica.* Facultad de Agricultura y Zootecnia del UJED, México, pp. 18-36.
- Scott, R. R., 1977. **Plant root systems: Their function and interaction with the soil.** McGraw Hill Book Company, England, pp 170-192.

- Siebe, C., Reinhold, J. y Sthar, K., 2006. **Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo**, 2ª Edición, pp. 22,23.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S. y Denef, K., 2004. **A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics**. *Soil & tillage Research*, 79: 7-31.
- Sparks, D. L., 1996. **Methods of soils analysis. Part 3. Chemical Methods**. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Book Series: 5, Madison, Wisconsin, U.S.A., 1390 p.
- Sparks, L. D., 2003. **Environmental Soil Chemistry**. Academic Press, U.S.A., p. 352.
- Swift, M. J., 1993. **Organic matter and the sustainability of agricultural systems: Definition and measurement**. In. Merckx, R. y Mulongoy, K. (Eds.). *Soil organic matter dynamics and sustainability of tropical agriculture: proceedings of an international symposium organized by the Laboratory of soil Fertility and Soil Biology, Katholieke universiteit Leuven (K. U. Leuven) and the International Institute of Tropical Agriculture (IITA)*. John Wiley & sons. Chichester-NY-Brisbane-Toronto-Singapore, pp. 3-17.
- Troeh, R. F. y Thompson, M. L., 1993. **Soils and soil fertility**. Oxford University Press, New York, U.S.A, pp.89-127.
- Tysdall, J. M., 1994. **Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils**. *Plant and Soil*, 159: 115-121.
- Vargas, G. T. A., 2004. **Producción de clavel (*Dianthus caryophyllus L.*) y su efecto en la formación de agregados en un tepetate fragmentado**. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México D.F. 92 p.
- Vázquez, G. L. M., 2007. *Girasoles, mirasoles y acahuales, recursos ornamentales de México*. Salomé Castañeda, Toluca, Estado de México, 96 p.
- Velázquez, A. A., 1997. **Guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo**. Universidad Autónoma de Chapingo (UACH), México, 13 p.
- Velázquez, R. A. S., 1997. **Disgregación, alteración y agregación de dos niveles de trituración de tepetates del estado de Morelos por especies perennes en condiciones de invernadero**. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), 117 p.

- Velázquez, R. A. S., 2002. **Especies vegetales, abono y fertilizante: su influencia en la calidad de un tepetate de Tetela del volcán Estado de Morelos.** Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), 126 p.
- Velázquez, R. A. S., Flores R. D. y Acevedo S. O. A., 2001. **Formación de agregados en tepetate por influencia de especies vegetales.** *Agrociencia* 35(003), pp. 311-320.
- Verduge, G., 2003. **Efecto de inhibidores de etileno en postcosecha de flores cortadas de *lilium*.** *Ciencias e Investigación Agraria* 30(2): 89-95.
- Youssef, A. R. y Chino, M., 1989. **Root-induced changes in the rhizosphere of plants I. pH Changes in Relation to the Bulk Soil.** *Soil Science and Plant Nutrition* 35(3): 461-468.
- Zebrowski, C., 1992. **Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina.** *Terra* 10 (Número especial: suelos volcánicos endurecidos): 15-23.

### 13. APÉNDICES

**Apéndice I.** Significancia de los resultados del análisis de varianza para los parámetros químicos y físicos del tepetate. Se consideraron de manera independiente las siguientes fuentes de variación: Planta, estiércol, fertilizante y tratamiento.

Fuente de variación	Planta		Estiércol		Fertilizante		Tratamiento		
	Valor de F	Prob. de F	Valor de F	Prob. de F	Valor de F	Prob. de F	Valor de F	Prob. de F	
% MO	0.1693	0.6835	52,8825**	< .0001	0.0821	0.9214	5,4275**	<b>0.0003</b>	
C/N	18.0732**	<b>0.0002</b>	224.4266**	< .0001	1.0010	0.3791	19.2263 **	< .0001	
pH	0.1833	0.6715	85,2048**	< .0001	5,4582**	<b>0.0093</b>	32,0267**	< .0001	
Na <sup>+</sup> (cmol/Kg)	0.2459	0.926	33,8576**	< .0001	2,0363	0,1482	5,134**	0.0005	
K <sup>+</sup> (cmol/Kg)	4,8958*	<b>0.0344</b>	209,2764**	< .0001	2.1571	0.1327	26,5493**	< .0001	
Ca <sup>++</sup> (cmol/Kg)	0.3575	0.5542	52,8932**	< .0001	1.0752	0.3536	6,6991**	< .0001	
Mg <sup>++</sup> (cmol/Kg)	0.2196	0.6426	2.1254	0.1549	0.4736	0.6272	1.3991	0.2361	
C.I.C (cmol/Kg)	0.986	0.3284	66,4221**	< .0001	21,32821*	<b>0.0384</b>	8,9627**	< .0001	
Agregación (mm)	< 0.25	4.1546	<b>0.0501</b>	0.0054	0.9421	0.5991	0.5556	1.2505	0.3094
	0.25 - 1	9.1414**	<b>0.005</b>	0.9748	0.3311	0.7166	0.4963	1.7359	0.1251
	1 - 2	12.2889**	<b>0.0014</b>	0.0038	0.951	0.4119	0.6659	1.4874	0.2003
	2 - 5	0.6778	0.4166	0.1954	0.6615	0.6979	0.5053	0.8161	0.6253
	5 - 10	2.5428	0.4166	0.0064	0.9368	0.4544	0.639	0.8297	0.6135
	> 10	3.9957	0.544	0.457	0.5041	1.5944	0.2192	0.9754	0.4933
Estabilidad (mm)	< 0.25	39,668	0.0556	0.9289	0.3429	29,750	0.0663	0.9914	0.482
	0.25 - 0.05	2.5768	0.1189	0.7416	0.396	0.6836	0.5725	1.2057	0.3371
	0.05 - 1	3.5256	0.0702	1.6612	0.2073	0.3679	0.6953	1.1692	0.3591
	1 - 2	11.8384*	<b>0.0017</b>	2.7827	0.1057	1.5541	0.2279	2.1476	0.059
	2 - 3	3.042	0.0914	0.9909	0.3275	1.7093	0.1982	1.8138	0.1103
	3 - 5	0.3837	0.5403	0.0163	0.8994	0.8865	0.4226	1.0012	0.4746
	> 5	3.5951	0.0676	0.8545	0.3626	1.4823	0.2433	1.5782	0.1715

\*\*P <0.01, indica la existencia de diferencias altamente significativas, \*P <0.05, indica la existencia de diferencias significativas.

**Apéndice II.** Significancia de los resultados del análisis de varianza para los parámetros químicos y físicos del tepetate. Se consideró como fuente de variación la interacción de los siguientes factores: Planta, estiércol y fertilizante.

Fuente de variación	Planta * Estiércol		Estiércol * Fertilizante		Planta * Fertilizante	
	Valor de F	Prob. de F	Valor de F	Prob. de F	Valor de F	Prob. de F
% MO	N.S.	-	N.S.	-	N.S.	-
C/N	N.S.	-	N.S.	-	N.S.	-
pH	N.S.	-	27.2099*	< .0001	3.3777*	<b>0.051</b>
Na <sup>+</sup> (cmol/Kg)	N.S.	-	3.5018*	<b>0.047</b>	N.S.	-
K <sup>+</sup> (cmol/Kg)	5.1631*	<b>0.0323</b>	N.S.	-	N.S.	-
Ca <sup>++</sup> (cmol/Kg)	N.S.	-	N.S.	-	N.S.	-
Mg <sup>++</sup> (cmol/Kg)	8.9629**	<b>0.0063</b>	N.S.	-	N.S.	-
C.I.C (cmol/Kg)	N.S.	-	3.4772*	<b>0.0472</b>	N.S.	-
Agregación (mm)	< 0.25	N.S.	-	N.S.	-	N.S.
	0.25 - 1	N.S.	-	N.S.	-	N.S.
	1 - 2	N.S.	-	N.S.	-	N.S.
	2 - 5	N.S.	-	N.S.	-	N.S.
	5 - 10	N.S.	-	N.S.	-	N.S.
	> 10	N.S.	-	N.S.	-	N.S.
Estabilidad (mm)	< 0.25	N.S.	-	N.S.	-	N.S.
	0.25 - 0.05	N.S.	-	N.S.	-	N.S.
	0.05 - 1	N.S.	-	N.S.	-	N.S.
	1 - 2	N.S.	-	N.S.	-	N.S.
	2 - 3	N.S.	-	N.S.	-	N.S.
	3 - 5	N.S.	-	N.S.	-	N.S.
	> 5	5.0776*	0.0341	N.S.	-	N.S.

\*\*P < 0.01, indica la existencia de diferencias altamente significativas, \*P < 0.05, indica la existencia de diferencias significativas.

**Apéndice III.** Muestra la significancia de los resultados del análisis de varianza para los parámetros de rendimiento del girasol. Se consideraron de manera independiente las siguientes fuentes de variación: Estiércol, fertilizante y tratamiento.

Fuente de variación	Estiércol		Fertilizante		Tratamiento	
	Valor de F	Prob. de F	Valor de F	Prob. de F	Valor de F	Prob. de F
<b>Diámetro del capítulo (cm)</b>	95.2595**	< .0001	1.2168	0.3257	17.6355**	< .0001
<b>Longitud promedio de Flores liguladas (cm)</b>	71.2983**	< .0001	0.885	0.4346	17.7284**	< .0001
<b>Número de flores liguladas</b>	42.6698**	< .0001	0.2495	0.7826	7.6325**	<b>0.0019</b>
<b>Tiempo de vida en florero (días)</b>	4.7351**	< .0001	0.8033	0.3363	1.6095	0.2311
<b>Número de hojas</b>	11.6195**	<b>0.0042</b>	1.2373	0.32	3.2095*	<b>0.0454</b>
<b>Diámetro del tallo (cm)</b>	133.2093**	< .0001	1.6083	0.2351	24.4331**	< .0001
<b>Altura de la planta (cm)</b>	38.6391**	< .0001	1.1791	0.4675	9.5134	0.0007
<b>Peso fresco (g)</b>	37.6083	< .0001	2.1021	0.1591	9.7799**	<b>0.0007</b>
<b>Peso seco (g)</b>	69.128	< .0001	1.545	0.2476	13.3303**	<b>0.0001</b>
<b>Longitud de raíz pivotante (cm)</b>	5.7795*	<b>0.0306</b>	3.4933	0.0588	2.4928	0.905
<b>Longitud promedio de raíces secundarias (cm)</b>	12.5707**	<b>0.0032</b>	2.4156	0.1255	3.3201*	<b>0.0446</b>

\*\*P <0.01, indica la existencia de diferencias altamente significativas, \*P <0.05, indica la existencia de diferencias significativas.

**Apéndice IV.** Las siguientes figuras muestran las tres repeticiones correspondientes a cada uno de los seis tratamientos que incluyeron la presencia de planta al momento de la apertura total de la inflorescencia en al menos una de las repeticiones.



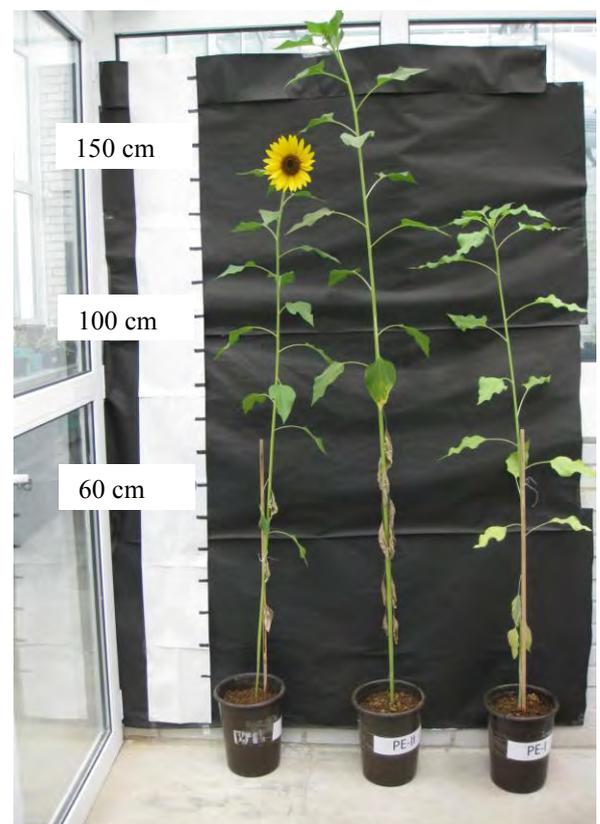
**Figura 33.** Repeticiones del tratamiento P.



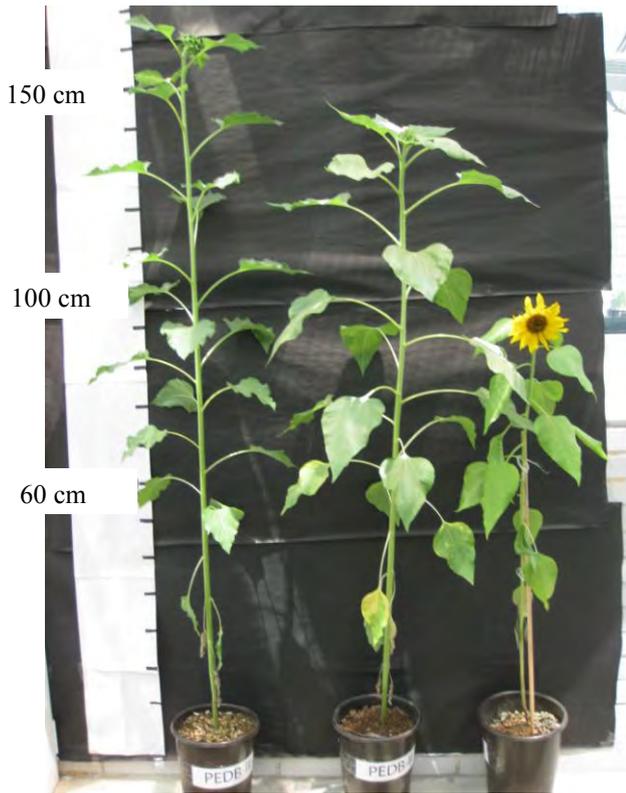
**Figura 34.** Repeticiones del tratamiento PDB.



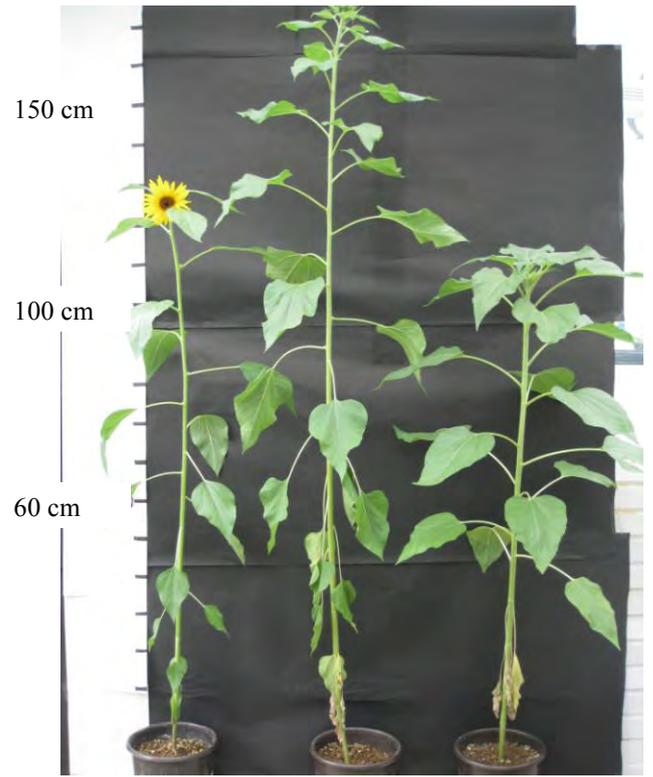
**Figura 35.** Repeticiones del tratamiento PDA.



**Figura 36.** Repeticiones del tratamiento PE.



**Figura 37.** Repeticiones del tratamiento PEDB.



**Figura 38.** Repeticiones del tratamiento PEDA.