



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN  
EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

***CAMPUS* MONTECILLO**

**POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA**

**CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y  
BIOLÓGICAS DE LODOS RESIDUALES Y SU  
USO EN TEPETATES DE TEXCOCO**

**GUADALUPE LÓPEZ OLVERA**

**TESIS**

**PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO**

**Julio 2015**

La presente tesis titulada: **Características químicas, físicas y biológicas de lodos residuales y su uso en tepetates de Texcoco**, realizada por la alumna: **Guadalupe López Olvera** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

EDAFOLOGIA

**CONSEJO PARTICULAR**

CONSEJERO



---

Dr. Julián Delgadillo Martínez

ASESOR



---

Dr. Mario Roberto Martínez Menes

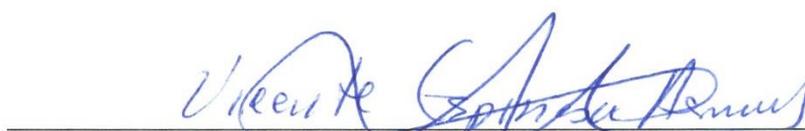
ASESOR



---

M. C. Salvador Agustín Peña Díaz

ASESOR



---

Dr. Vicente Espinoza Hernández

Montecillo, Texcoco, Estado de México, 2015

# CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y BIOLÓGICAS DE LODOS RESIDUALES Y SU USO EN TEPETATES DE TEXCOCO

Guadalupe López Olvera, MC  
Colegio de Postgraduados, 2015

## RESUMEN

Los lodos residuales son un recurso con posibilidades de usarse para mejorar las características del suelo y recuperar tepetates. Los tepetates son suelos volcánicos endurecidos expuestos, muy comunes en el Eje Volcánico Transversal Mexicano. Con el fin de evaluar su potencial, se colectaron lodos residuales provenientes del desazolve del canal de aguas negras “La Compañía” depositados en el lecho del Ex-Lago de Texcoco y de una planta de tratamiento de aguas residuales en el barrio de Santiaguito, Texcoco. Se determinaron sus características físicas (humedad, textura), químicas (pH, CE, MO, N, P, K, As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn), y biológicas (huevos de helmintos, coliformes, salmonela, bacterias totales, hongos, actinomicetos, solubilizadoras de fosfatos, celulolíticos, fijadoras de nitrógeno asimbióticas, sideróforos y degradadoras de carbono) y se estableció un ensayo en tres sitios (San Pablo Ixayoc, Tequexquinahuac y San Miguel Tlaixpan) con tepetate aflorado y diferente dosis de lodos residuales, compost y testigo para analizar su efecto en el mejoramiento de los suelos. Se evaluó el efecto en Da, CC, PMP, K, MO, N, P, NO<sub>3</sub>, Cu, Zn y CE. En campo, se demostró que los lodos colectados contienen elementos potencialmente tóxicos por debajo de los límites permitidos, son adecuados para uso agrícola, contienen microorganismos benéficos para el crecimiento vegetal a pesar de la presencia de coliformes y salmonela. En campo, se demostró que los lodos residuales pueden ser igual de eficientes que el compost para el desarrollo de la vegetación y que pueden ser recomendados para el desarrollo de cultivos siempre y cuando no superen los límites establecidos por las normas para contenido de elementos potencialmente tóxicos.

**Palabras clave:** enmienda, enterobacterias, elementos potencialmente tóxicos, bacterias promotoras del crecimiento en plantas, cultivos.

**CHEMICAL, PHYSICAL AND BIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF SEWAGE  
SLUDGE AND ITS USE ON TEPETATES IN THE REGION OF TEXCOCO**

**Guadalupe López Olvera, MC  
Colegio de Postgraduados, 2015**

**ABSTRACT**

Sewage sludge is a potential resource that can be used to improve soil characteristics and amend soil tepetates. Tepetate is a volcanic indurated soil on the surface that is very common along the Trans-Mexican Volcanic Belt. In order to assess the potential use of raw sludge to recover tepetates, we collected raw sludge samples from the desalting dredged sludge of channel "La Compañía", located on the bed of Lake Texcoco, and a treatment plant of urban waste in El Barrio Santiaguito, Texcoco, Mexico. Samples of sewage sludge were characterized for physical traits such as humidity and texture and for chemical traits such as pH, CE, MO, N, P, K, As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn. Also the biological parameters as total bacteria, fungi, actinomycetes, phosphate-solubilizing bacteria, cellulolytic bacteria, free-living nitrogen-fixing bacteria, siderophores and carbon degraders, and as well as helminths eggs, fecal coliforms and salmonella were analyzed. On superficial tepetate and tepetates with different tillage, it was established assays in three different locations: San Pablo Ixayoc, Tequexquahuac and San Miguel Tlaixpan, Texcoco, Mexico, using raw sludge. A compost treatment was used to compare the effect of raw sludge. The results showed that the amount of heavy metals in raw sludge treatments is below the allowed limits; indicating that raw sludge is adequate for land application and also contains beneficial microorganisms for plant growth. In the field, it was shown that raw sludge can be as efficient as compost for the development of vegetation on soil tepetates and can be recommended for the development of crops provided that it do not exceed the limits of potentially toxic elements.

**Key words:** amendment, enterobacteria, heavy metals, plant growth-promoting bacteria, crops.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar agradezco al pueblo de México al que le debo mi formación, haré el esfuerzo de corresponder divulgando lo aprendido.

Durante mi estancia en el Colegio de Postgraduados he encontrado personas amables y generosas que de alguna manera aportaron para mi desarrollo personal y profesional; a todas ellas mi agradecimiento.

Al Colegio de Postgraduados por darme un espacio para incrementar mis conocimientos.

A CONACYT, por la beca otorgada para llevar a cabo los estudios.

Al Dr. Julián Delgadillo Martínez por su disposición y paciencia para asesorarme en el desarrollo de esta tesis, así como a los doctores Mario Martínez y Vicente Espinoza y al MC. Salvador A, Peña por su asesoría.

A todos los (as) profesores (as) investigadores (as) que han compartido su saber, en especial al Dr. Carlos Ortiz, Lenom Cajuste y Dr. Juan Almaraz por su apoyo desinteresado para aclarar mis dudas.

Al M.C. Patricio Sánchez Guzmán por apoyarme en todo momento.

A los M.C. David Jaen y Francisco Landeros Sánchez<sup>†</sup> por su apoyo para realizar el trabajo de laboratorio.

A los trabajadores (as) que contribuyeron para facilitarme el trabajo de laboratorio: Abuelus, Antonioni, Cruz, Manuel (Chiconcuac), Fer, Gabi, Gonzalo, Julio, Laurita, Lorens, Rosario, Oscar, Wences. Gracias también por su amistad y sus palabras de aliento y de manera especial extendiendo mi agradecimiento a Carmelita y Remedios y los señores Mundo, Arturo, Juanito y Pedro.

También extendiendo mi agradecimiento al MC. Santos Vásquez Cervantes por apoyarme para conseguir los lodos residuales de la PTAR Santiaguito.

Gracias a los señores Genaro Pineda y Leonel Reyes y Mi amiga Laura Carrillo por su generosidad al prestarme el terreno donde se implementó el experimento.

A mis compañeros, gracias por hacer amenos esos ratos de labores y tareas, por su amistad y apoyo: Chabela, Miri, Alfred, Tanis, J.C., Esme, Steph, Carlitos, Adams, Dei, Vivi, Viky, Alex, Tino, Polo, Yes, Gil, Remedios, Man, Clau, Gisel, Eli, Pedro, Aza, Brig, Azu, Bernardino, Elvira, Sergio, Mari, Arthur y a los que me faltaron. Agradecimiento especial a Quique por su disposición para aclarar mis dudas.

A Jared Martínez por su ayuda en la colecta de muestras.

A Berrospe.

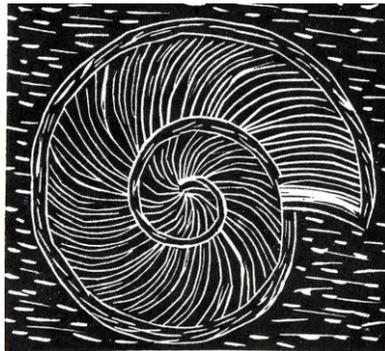
A vos Chan y vos Tio Chiwito por su apoyo incondicional.

## DEDICATORIA

A mi familia

## In memoriam

Amigos  
Luzbel y Manolo



### Amonita

Guadalupe López Olvera

Técnica: grabado

# CONTENIDO

HOJA DE FIRMAS .....	i
RESUMEN .....	ii
ABSTRACT .....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
CONTENIDO.....	vii
LISTA DE CUADROS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	ix
INTRODUCCIÓN .....	1
Planteamiento del problema .....	2
Objetivos .....	3
General:.....	3
Específicos: .....	3
Hipótesis: .....	3
REVISIÓN DE LITERATURA .....	4
Tepetate .....	4
Características .....	4
El origen de la problemática de los tepetates .....	5
Limitantes del uso agrícola de los tepetates .....	5
Rehabilitación del tepetate para la producción .....	6
Lodos residuales.....	6
Caracterización física y química de los lodos .....	7
Características biológicas.....	9
Gestión de los lodos residuales.....	10
Riesgo de contaminación del agua subterránea por uso de lodos residuales .....	11
Tratamientos aplicados a lodos residuales .....	13
Uso de lodos residuales para mejorar suelos .....	13
Efecto de lodos residuales en plantas cultivadas.....	14
REFERENCIAS .....	16
MATERIALES Y MÉTODOS .....	21

Fase I. Colecta de materiales orgánicos .....	21
Fase II. Análisis físicos y químicos de los materiales orgánicos.....	23
Preparación de las muestras para análisis .....	23
Análisis físicos.....	23
Análisis químicos.....	25
Fase III. Análisis biológicos de los materiales orgánicos .....	29
Fase IV. Etapa de campo.....	42
Descripción de los sitios experimentales .....	42
Establecimiento del experimento .....	45
Preparación del terreno .....	46
Variables a evaluar.....	47
Análisis físicos.....	47
Análisis químicos.....	50
Análisis estadístico .....	52
REFERENCIAS .....	53
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	58
Características de los materiales orgánicos .....	58
Análisis físicos y químicos.....	58
Análisis Biológicos.....	60
Variables evaluadas en los experimentos de aplicación de materiales orgánicos en tepetates .....	69
CONCLUSIONES.....	86
RECOMENDACIONES .....	87
REFERENCIAS.....	88
Anexo 1. densidad optica de las placas Biolog ecoplate.....	92

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Características físicas y químicas de lodos de Cuernavaca. ....	8
Cuadro 2. Elementos potencialmente tóxicos determinados en lodos. ....	9
Cuadro 3. Diversidad bacteriana presente en lodos residuales. ....	10
Cuadro 4. Efecto de lodos residuales en el rendimiento de cultivos. ....	14
Cuadro 5. Fuentes de carbono en la placa Biolog EcoPlate). ....	41
Cuadro 6. Características del tepetate en los sitios experimentales. ....	45
Cuadro 7. Tratamientos establecidos. ....	46
Cuadro 8. Características físicas y químicas de los materiales orgánicos. ....	59
Cuadro 9. Contenido total de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) en los materiales orgánicos. ....	60
Cuadro 10. Características biológicas de los materiales orgánicos. ....	65
Cuadro 11. Índice de Shannon-Weaver calculado para cada material orgánico ....	68
Cuadro 12. Propiedades físicas evaluadas. ....	74
Cuadro 13. Propiedades químicas evaluadas. ....	78
Cuadro 14. Contaminantes potenciales evaluados. ....	81
Cuadro 15. Producción de materia seca ....	84

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Planta de tratamiento de aguas residuales urbanas del Barrio Santiaguito .....	22
Figura 2. Depósitos de lodos en el Ex-Lago de Texcoco .....	22
Figura 3. Ubicación de los sitios experimentales .....	42
Figura 4. Sitio experimental San Pablo Ixayoc. ....	43
Figura 5. Sitio experimental Tequexquinahuac .....	43
Figura 6. Sitio experimental San Miguel Tlaixpan .....	44
Figura 7. Climograma. ....	45
Figura 8. Proporción de A) arenas, L) limos y R) arcillas presentes en compost y lodos de Chalco y Santiaguito. ....	58
Figura 9. Diversidad medida con el índice de Shannon-Weaver en compost, lodos de Chalco y lodos de Santiaguito. ....	67
Figura 10. Producción de fitomasa total en materia seca .....	85

## INTRODUCCIÓN

Los servicios con que cuenta una vivienda, son factores de importancia, tanto que se consideran indicadores para determinar el grado de desarrollo de la población, entre estos se incluyen la energía eléctrica, el agua potable y el drenaje (De la Vega E. *et al.*, 2011). El drenaje es la forma común empleada para la gestión del agua usada para las actividades sanitarias de la población de lo que se genera el agua residual. En México, para 2011, se contaba con plantas de tratamiento en operación con capacidad para procesar el 46.5 % de las aguas residuales (Comisión Nacional del Agua, 2012), derivado de estos procesos, se producen residuos sólidos como subproducto, que para el año 2002 se cuantificaban en 304 toneladas diarias.

La aplicación de residuos humanos al suelo agrícola es una práctica ancestral, la realizaban los antiguos griegos y romanos y se ha adoptado por diversos pueblos como una medida para mejorar sus medidas sanitarias, a la vez que se reconocían sus beneficios (Epstein, 2002). En México desde la época prehispánica, los Mexicas los consideraban un fertilizante y una enmienda adecuada para el acondicionamiento del suelo que se destinaría al uso agrícola (Williams, 1972; 1975; 2006).

En la época reciente, varios países han reglamentado la gestión de los lodos derivados del tratamiento del agua residual, y en sus normativas favorecen el uso agrícola de estos debido a que se considera la opción menos contaminante y de menor costo comparada con las alternativas de depositarlos en rellenos o el vertido en los océanos, incluso en algunos como Noruega, Dinamarca y Estados Unidos, más del 50 % de estos ya se destinan a la agricultura (Epstein, 2002).

La gran oferta de lodos residuales en la región centro de México y la presencia de terrenos degradados con presencia de tepetates aflorando son motivo de este estudio de aplicación de lodos residuales de dos zonas, con diferentes dosis y previo análisis físico, químico y biológico en tepetate para conocer el efecto en la producción de avena y vegetación nativa, así como en el mejoramiento de la fertilidad.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En México se producen una gran cantidad de lodos residuales, no se tiene una cifra oficial (Oropeza G., 2006), sin embargo para 2002 las plantas de tratamiento generaban 304 toneladas diarias para los cuales no se tiene un programa de gestión adecuada (Castrejón *et al.*, 2002). Los lodos residuales que se generan en plantas de tratamiento de aguas residuales en general son descargados en alcantarillas, cuerpos de agua, o dispuestos en tiraderos a cielo abierto, sin tratamientos o medidas que eviten la contaminación de suelo, agua subterránea o incidan en la salud pública (Oropeza G., 2006), desperdiciando recursos que pueden tener utilidad (Castrejón *et al.*, 2002). La disposición inapropiada (Oropeza G., 2006) así como el uso agrícola representan riesgo para el suelo y acuíferos debido a que contienen elementos potencialmente tóxicos, patógenos y compuestos orgánicos (Esteller, 2002). Dado que las características del suelo son determinantes en el proceso de atenuación de los contaminantes en un ambiente (Foster, 1988), se plantea analizar las propiedades físicas, químicas y biológicas de materiales orgánicos y valorar el riesgo del uso de estos en la agricultura, como mejoradores del suelo y del rendimiento de los cultivos.

## **OBJETIVOS**

### **General:**

Determinar el potencial de materiales orgánicos para recuperación de tepetate.

### **Específicos:**

1. Identificar las características físicas, químicas y biológicas de tres materiales orgánicos.
2. Determinar el posible uso de los materiales orgánicos para mejorar la fertilidad y para favorecer la producción de avena en tepetates de Texcoco.

## **HIPÓTESIS:**

Los materiales orgánicos evaluados pueden mejorar la fertilidad de los tepetates.

**H1.** Los materiales orgánicos evaluados poseen características físicas, químicas y biológicas que les permiten considerarlos como mejoradores de la fertilidad del suelo.

**H2.** Los materiales orgánicos evaluados pueden mejorar la fertilidad de tres tepetates de Texcoco y su capacidad para aumentar la producción de avena.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### Tepetate

La palabra tepetate tiene su origen en el náhuatl *tepetlatl* que se deriva de los elementos *tetl*: piedra y *petatl*: cama o estera, por lo que la palabra adquiere un significado de capa o estrato de piedra (López C., 2011). Se aplica a materiales que son como piedra o rocas suaves. Los aztecas clasificaban los materiales terrestres en tres categorías: roca, como roca y no roca, tomando como criterio la consistencia. Se asociaba con los colores, por lo que el término incluía un grupo amplio de materiales terrestres. Entre la población rural el término es vigente y su aplicación es consistente con la clasificación empleada por sus antepasados (Williams, 1972).

### Características

El tepetate se ha conceptualizado como una capa dura que aflora o subyace a un suelo y se caracteriza por su baja porosidad, limitada actividad biológica y bajo nivel de fertilidad que demerita o impide su uso agrícola (Avila Campuzano, 2011). También se les considera como horizontes cementados subyacentes a la capa de suelo que han aflorado a la superficie (Álvarez-Solís *et al.*, 2000).

En la vertiente oriental de la cuenca de México el 80 % de la superficie de las laderas son tepetates (Álvarez-Solís *et al.*, 2000). De acuerdo con Rodríguez-Tapia *et al.*, (2004), son saprolitas derivadas de tobas intemperizadas por procesos físico-químicos, que se conforman de materiales porosos con microestructura de bloques irregulares que permiten la circulación de agua.

En la zona oriental del estado de México, los tepetates se ubican en el pie de monte de la Sierra Nevada. Se trata de tobas andesíticas de la formación Tarango (Servicio Geológico Mexicano, 2002) del Plioceno-Cuaternario, formadas en el rango de 2.5 millones de años (Ma) a 0.6 a 0.08 Ma (Enciso-De la Vega, 1992). Se identifican piroclastos del Plioceno a una profundidad entre 100 y 200 m. Son materiales granulares

gruesos con propiedades hidráulicas variables que conforman el acuífero (Rodríguez y Ochoa, 1989).

Quantin *et al.*, (1992) al estudiar un tepetate de San Miguel Tlaixpan, concluyen que los tepetates de Texcoco son depósitos de cenizas volcánicas finas parcialmente alteradas que han formado arcilla y limo fino, los cuales conforman materiales densos y débilmente consolidados de tobas finas.

### **El origen de la problemática de los tepetates**

La deforestación, la apertura para tierras agrícolas, las prácticas agrícolas inadecuadas, la introducción de ganado en la época hispánica, aunados a la incidencia de factores erosivos como las lluvias torrenciales, han provocado la formación de cárcavas favorecieron la exposición de estos estratos consolidados denominados tepetates que conforman terrenos degradados sin capacidad para el desarrollo de vegetación, lo que se convirtió en un problema dada la elevada densidad poblacional de la región, que data desde tiempos previos a la conquista española (Williams, 1972; Werner, 1992; Navarro y Prat, 1996).

### **Limitantes del uso agrícola de los tepetates**

Los tepetates presentan limitaciones físicas, químicas y biológicas para el desarrollo de las plantas. En el aspecto químico destacan carencia de materia orgánica y la insuficiencia de nitrógeno y fósforo. Las limitantes físicas se deben a su dureza característica, alta densidad aparente, escasa macroporosidad, conductividad hidráulica y retención de humedad baja que dificultan el desarrollo de raíces. Biológicamente son estériles, esto debido al bajo contenido de materia orgánica, la baja concentración de carbono, en específico el carbono soluble. Por estas razones, presentan una escasa cobertura vegetal y su restitución implica una alta inversión de energía dirigida hacia su roturación, pero el mejorar un solo aspecto no es suficiente para asegurar la productividad por lo que se debe dar un enfoque integral (Etchevers B., 1997; Álvarez-Solís *et al.*, 2000; y Gama-Castro *et al.*, 2007). No obstante, también cuenta con factores favorables como la presencia de arcillas que permiten la retención de agua y nutrientes y la formación de

agregados después que se ha roturado el tepetate; abundancia de Ca, Mg y K y otros microelementos que aunado a la corrección de N y P permiten una buena productividad (Quantin, 1998).

### **Rehabilitación del tepetate para la producción**

Desde tiempos remotos se han ejecutado labores para la habilitación agrícola del tepetate, se roturaba y aplicaba materia orgánica, además de que se construían terrazas para disminuir los procesos erosivos (Pimentel, 1992; Navarro y Prat, 1996). Williams refiere dos elementos básicos de la tecnología para la restitución del tepetate al uso agrícola en la Cuenca de México durante la época prehispánica, si bien, aclara que se practicaban en todos los tipos de suelo; la roturación y la fertilización. Para la roturación, a golpes se fragmentaba la capa y se rompían los agregados. La fertilización se realizaba con materiales diversos y constituía un criterio de clasificación, entre estos, se reconoce el suelo *tlaluiyac* para referirse al que se ha fertilizado con *cuicatl* (heces humanas) o *tlazolli* (compost) y el tipo *axixtlalli* para el que se ha fertilizado con *xixtli* (orina) (Williams, 1972; 1975; y 2006).

En la época contemporánea, grupos de investigación han experimentado diferentes técnicas para restituir los tepetates a la producción. Las labores se resumen en la ejecución de labranza para mejorar físicamente el material, tales como la roturación, complementada con otras prácticas con efecto físico como barbecho, formación de terrazas y zanjas para retener suelo y agua. También, el uso de técnicas para mejorar su fertilidad que consisten en incorporación de fertilizantes orgánicos y minerales e incorporación de residuos agrícolas (Arias R., 1992; Oropeza y Rios, 1998; Llerena y Sánchez, 1992 y Pimentel B., 1992) y la adición de microorganismos simbiotes de plantas (Álvarez-Solis *et al.*, 1992; y Ferrera-Cerrato, 1992).

### **Lodos residuales**

Se conoce como lodos residuales los sólidos presentes en el agua residual y el producto de la transformación de sólidos disueltos y coloides transportados por las aguas

residuales que se han sedimentado. Estos se clasifican de acuerdo al tratamiento aplicado a las aguas residuales en: «lodos domésticos» o «lodos crudos» aquellos que provienen de agua no tratada y se colectan de sedimentadores y desnatadores; «lodos residuales» los remanentes del proceso de tratamiento de las aguas residuales y «biosólidos» los que provienen de plantas de tratamiento y además han sido sometidos a procesos de estabilización (Jiménez C., 2001; NOM-004-SEMARNAT-2002; Ortiz-Hernández *et al.*, 1995).

En México se producen 304 toneladas diarias de lodos en plantas de tratamiento, de los cuales solo el 2% son considerados lodos crudos y el resto son producto de agua residual que ha recibido algún tipo de tratamiento (Castrejón *et al.*, 2002). Los lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales representan el 18.66% del total de residuos clasificados como de manejo especial (Gutiérrez A., 2006) por La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.

La NOM-004-SEMARNAT-2002 determina que los lodos residuales, de acuerdo a su contenido de metales pesados, patógenos y parásitos se pueden clasificar en residuos no peligrosos y peligrosos. Los no peligrosos son aquellos cuyo contenido de contaminantes no supera los límites máximos permitidos, por lo cual son susceptibles de uso. De acuerdo a Nelson *et al.*(2004), en el centro de México, la producción de lodos se calcula en 0.036 m<sup>3</sup>/persona/año. Considerando los datos de INEGI del censo de 2010<sup>1</sup>, la producción diaria es de 11,079.7 m<sup>3</sup>.

En general, estos lodos están compuestos por materia orgánica residual no descompuesta, microorganismos, compuestos no biodegradables y/o potencialmente tóxicos y sales inocuas y/o potencialmente tóxicas (Cuadro 1) (Ortiz-Hernández *et al.*, 1995; Pathak *et al.*, 2009 y Nelson *et al.*, 2004).

### **Caracterización física y química de los lodos**

La naturaleza química de los lodos no ha sido bien caracterizada debido a su diversidad y las investigaciones se han enfocado a la fracción sólida. Entre los principales

---

<sup>1</sup> Revisión en línea <<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx>>

contaminantes se distinguen metales y cianuros, compuestos orgánicos volátiles, compuestos orgánicos semivolátiles, plaguicidas, bifenilos policlorados (BPCs), hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), dioxinas y otros (Jiménez C., 2001; Torri, 2009). En cuanto a compuestos orgánicos se considera que pueden contener hasta 400,000 sustancias peligrosas (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Características físicas y químicas de lodos de Cuernavaca (Ortiz-Hernández *et al.*, 1995).

<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Intervalo</b>
Densidad aparente (g cm <sup>-3</sup> )	0.87	0.71 - 1.02
CE (mmhos cm <sup>-1</sup> )	3.94	1.19 - 7.70
Humedad (%)	76.14	71.55 - 79.50
Sólidos (%)	23.86	20.50 - 28.45
pH (1:5)	6.01	5.35 - 6.69
Bicarbonatos (m Eq L <sup>-1</sup> )	4.59	3.00 - 8.00
Cloruros (mEq L <sup>-1</sup> )	6.35	3.20 - 20.00
Materia orgánica (%) (Walkley y Black)	55.45	44.16 - 83.00
Nitrógeno total (%)	4.46	2.47 - 5.65
Nitrógeno orgánico (%)	4.31	2.44 - 5.64
Relación C/N	12.43	10.79 - 17.88
Fósforo total (%)	1.59	1.00 - 3.60
Fósforo disponible (%)	0.11	0.07 - 0.29
CIC (m Eq 100 g <sup>-1</sup> )	65.00	49.00 - 89.00

Los lodos residuales pueden contener una gran variedad de elementos potencialmente tóxicos EPTs (Cuadro 2) derivados de las excreciones humanas (cromo, cobalto, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, selenio y zinc), del desgaste de cañerías (plomo, cobre y zinc), los interceptados y arrastrados por lluvias (cadmio, plomo, zinc) y los presentes en residuos industriales. La diversidad y concentración depende de las características del agua residual y la proporción residuos domésticos e industriales (Aguilar I., 2010; Castrejón *et al.*, 2002; Chao, *et al.*, 2006; Ortiz-Hernández *et al.*, 1995).

**Cuadro 2.** Elementos potencialmente tóxicos determinados en lodos (mg kg<sup>-1</sup>).

Elemento	Lodos de Cuernavaca				Lodos de la República Mexicana	
	(Ortiz-Hernández, <i>et al.</i> , 1995)				(Castrejón, <i>et al.</i> , 2002)	
	Totales (HNO <sub>3</sub> -HClO <sub>4</sub> )		Disponibles (EDTA 0.05M)		EPA 6010	
	Media	Intervalo	Media	Intervalo	Mínimo	Máximo
Aluminio	14300.00	4800 - 24000			4.10	180.40
Arsénico					0.00	10.00
Cadmio					0.00	3.20
Cobre	470.00	330 - 631	39.00	27.4 - 52.4	0.30	328.20
Cromo	312.00	126 - 457				
Hierro	9059.00	5982 - 12136	642.00	424 - 860		
Manganeso	110.00	55 - 208	11.20	5.6 - 21.1	1.00	643.60
Mercurio					0.20	61.30
Níquel	96.00	87 - 105	13.00	10.0 - 14.2	0.00	6.40
Plomo	479.00	267 - 823	15.00	3.4 - 25.7	5.80	2262.70
Zinc	1749.00	504 - 2904	58.40	16.8 - 97.0		

### Características biológicas

La presencia de organismos patógenos es la mayor limitante para su manejo. La diversidad y riqueza depende de la naturaleza de sus constituyentes orgánicos, de la concentración de nutrientes, de factores de crecimiento y toxicidad de los materiales. La especie de microorganismo y abundancia, depende del estado epidemiológico de la comunidad que genera las aguas (Jiménez C., 2001).

Las aguas residuales, precursoras de los lodos residuales, suelen ser ricas en bacterias (Cuadro 3) entre las que se identifican Pseudomonaceas; de la putrefacción, degradadoras de azúcares, almidón, grasa, urea y celulosa, vaginadas, oxidantes del azufre, desnitrificantes, diversas bacterias del Fe y del Mn, enterobacterias ligadas a deyecciones humanas. También pueden ser ricas en levaduras y hongos levaduriformes y metanogénicas (*Archaeobacterias*). Las concentraciones de microorganismos en lodos residuales de México son altas, más que las encontradas en países desarrollados (Marín G., 2003; Méndez, *et al.*, 2008).

**Cuadro 3.** Diversidad bacteriana presente en lodos residuales (Marín G., 2003; Méndez *et al.*, 2008).

<u>Pseudomonaceas</u>	<u>De la putrefacción</u>	<u>Levaduriformes</u>
<i>Zooglea</i>	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	<i>Saccharomyces</i>
<i>Achromobacter</i>	<i>P. aeruginosa</i>	<i>Candida</i>
<i>Arthrobacter</i>	<i>Proteus vulgaris</i>	<i>Rhodotorula</i>
<i>Sphaerotilus</i>	<i>Bacillus cereus</i>	<i>Lactomitus lacteus</i> *
<i>Nocardia</i>	<i>Aerobacter cloacas</i>	<i>Fusarium acueductum</i> *
	<i>Zooglea ramigera</i>	
<u>Desnitrificantes</u>	<u>Oxidantes del Azufre</u>	<u>Enterobacterias</u>
<i>Thiobacillus desnitrificans</i>	<i>Thiobacillus</i>	<i>Escherichia coli</i>
<i>Micrococcus denitrificans</i>	<i>Thiotrix</i>	<i>Aerobacter aerogenes</i>
	<i>Beggiatoa</i>	<i>Streptococcus faecalis</i>
<u>Vaginadas</u>	* Típicas de aguas domésticas	
<i>Sphaerotilus natans</i> **	** Hongo de las aguas residuales	

Los protozoos de las aguas residuales incluyen Amebas, Zooflagelados, Epystilis, Opercularia, Vorticella, Acineta, Paramecium (Marín G., 2003). También se detecta huevos de parásitos. Marín G., (2003) detectó que el 85% de los huevos aislados son de *Ascaris* sp. y el 15% restante corresponde a *Trichuris*, *Hymenolepis*, y *Toxocara* sp. Pathak (2009) refiere la presencia de virus (*Hepatitis*, *Enterovirus* y *Reovirus*) y protozoarios (*Entamoeba histolytica*, *Cryptosporidium* y *Giardia lamblia*).

### **Gestión de los lodos residuales**

En cuanto al destino de estos residuos en México, para 2002 se reportó que el 76% se depositan en rellenos sanitarios, cerca del 2% son vertidos en el drenaje y el 22% tenían algún uso como mejoradores de suelo y cubierta de rellenos superficiales (Castrejón, *et al.*, 2002). Se proponen como mejoradores del suelo agrícola por su contenido de nutrientes y materia orgánica (Cuadro 1), si bien se mencionan las desventajas de la presencia de Elementos Potencialmente Tóxicos (Cuadro 2), patógenos y los compuestos orgánicos, el contenido es variable ya que está en función del origen de las aguas y de si han sido sometidas a tratamiento o no (Ortiz-Hernández *et al.*, 1995; Torres *et al.*, 2005; Castrejón *et al.*, 2002) lo cual representa riesgo de contaminación para

el suelo y los acuíferos por la oxidación de nitritos y amonio y lixiviación de nitratos (Esteller, 2002).

### **Riesgo de contaminación del agua subterránea por uso de lodos residuales**

El agua subterránea tiene importancia vital en el suministro de agua potable. En México abastece a más del 70% de la población (Aguilar, 2010). Aun no se tiene un entendimiento completo de los procesos de contaminación, por lo que se da poca atención a la prevención. La contaminación se da principalmente alrededor de grandes centros urbanos por deficiencia en el saneamiento (falta de alcantarillado), disposición inadecuada de efluentes líquidos industriales y residuos sólidos urbanos, así como por prácticas agrícolas. Las principales consecuencias son incremento en la concentración de nitratos, solventes orgánicos sintéticos, desinfectantes y patógenos fecales (Foster, 1988; Oyeku, 2010).

El movimiento de los contaminantes se asocia a los flujos de agua que a su vez dependen del potencial hídrico, porosidad del material y presencia de fisuras, factores afectados por la actividad humana. En condiciones naturales estos permanecen en la zona no saturada en función de la tasa de infiltración anual por precipitación y del promedio del contenido de humedad (Foster e Hirata, 1988), en el caso de los lodos depositados en superficie, el potencial de contaminación se relaciona con la capacidad de adsorción y degradación, la presencia de microorganismos y la textura del suelo (Aller *et al.*, 1987).

El flujo de agua en zona no saturada, se caracteriza por un patrón heterogéneo de velocidad que ocurre por flujo de masas o convectivo. En medios porosos influye el tamaño del poro y este factor solo es importante en presencia de lluvia o riego. Sales fertilizantes o plaguicidas se mueven por influencia de difusión molecular, flujo de masas o convección, dispersión hidrodinámica, volúmenes de drenaje, adsorción o intercambio (Zamudio G., 1984).

La vulnerabilidad de los sistemas de agua subterránea depende de su sensibilidad de estos a impactos humanos y naturales y está en función de factores geohidrológicos que determinan la accesibilidad, la capacidad de atenuación de la misma y los estratos

por encima de ella. La vulnerabilidad, se define como el riesgo de que las aguas subterráneas se contaminen con alguna sustancia en concentraciones superiores a los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud para la calidad del agua de consumo humano (Pérez y Pacheco, 2004).

Los perfiles del suelo atenúan un gran número de contaminantes, sin embargo, no todos los perfiles del suelo y las condiciones hidrogeológicas son igualmente efectivas. El grado de atenuación es diferenciado según el tipo de contaminante y el proceso de contaminación en un ambiente dado. El flujo del agua y el transporte de contaminantes desde la superficie del suelo al nivel freático tienden a ser procesos lentos, pueden pasar años o décadas antes que se detecten los efectos. Existe la posibilidad de autoeliminación de contaminantes durante el transporte al subsuelo por degradación bioquímica y/o reacción química. Fenómenos de adsorción pueden retardar el proceso de contaminación e inducen variaciones temporales en la concentración de contaminantes (Foster e Hirata, 1988).

Los procesos de adsorción y filtración eliminan virus y bacterias, mientras que la capacidad contaminante de parásitos depende del transporte y supervivencia de los huevos a través del suelo. La supervivencia de los huevos es diferenciada de acuerdo al tipo de organismo e influye la textura, la temperatura del agua, la presencia de organismos antagónicos mientras que su capacidad de migración depende de la permeabilidad y composición del suelo en la zona no saturada, pH, conductividad hidráulica, presencia de compuestos orgánicos solubles y cationes. Estos últimos se han detectado en zona no saturada y en agua subterránea bajo los sitios donde se aplican lodos. La capacidad de contaminación de los EPTs está en función de su concentración y depende de la frecuencia de las aplicaciones al suelo. Los factores de atenuación dependen del contenido de materia orgánica del suelo, textura y pH. Estos se retiran por procesos de adsorción, intercambio de cationes y aniones, o por quelatación. La lixiviación puede ocurrir cuando se excede la capacidad de adsorción por el suelo o cuando se afecta su solubilidad por factores químicos (Aller *et al.*, 1987).

## **Tratamientos aplicados a lodos residuales**

Para disminuir contaminantes de lodos residuales se plantean varias opciones, entre estas la estabilización alcalina para disminuir microorganismos patógenos y huevos de helmintos (Jiménez *et al.*, 2001), estabilización de EPTs con plantas como la caña roja (*Phragmites australis*) (Cui *et al.*, 2008), compostar para eliminar microorganismos patógenos y huevos de parásitos (Torres *et al.*, 2005) y disminuir la biodisponibilidad de EPTs o bien el composteo complementado con la adición de residuos orgánicos (Ingelmo, *et al.*, 2008) o zeolitas (Zorpas *et al.*, 2008) y la aplicación bacterias sulfuro oxidantes para promover un proceso de biolixiviación para incrementar la solubilización del Cu, Zn y Pb y (Zhang *et al.*, 2009).

## **Uso de lodos residuales para mejorar suelos**

El uso de lodos residuales aplicados al suelo para mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas se ha documentado y en particular se recomienda para recuperar terrenos degradados. De las propiedades físicas, reportan efectos positivos en la densidad aparente, capacidad de retención de agua, porosidad, estabilidad de agregados, y el contenido de humus. Aporta N, P y materia orgánica e incrementa la conductividad eléctrica, así como la capacidad de intercambio catiónico. Con la presencia de lodos residuales se incrementa la actividad microbiana y enzimática. Todos estos parámetros inciden de manera favorable en el desarrollo de plantas que permitan formar una cobertura y producir cultivos. Sin embargo, dependiendo del origen de las aguas residuales, también poseen características desfavorables como la presencia de EPTs, que en función del pH del suelo pueden hacerse disponibles, lo que afectaría propiedades del suelo como el pH, el potencial redox y el contenido de sesquióxidos, aunado a efectos de fitotoxicidad y/o acumulación en el suelo (Singh y Agrawal, 2008; Chao *et al.*, 2005 y Banerjee *et al.*, 1997).

## Efecto de lodos residuales en plantas cultivadas

Investigaciones realizadas manifiestan que el aporte de lodos residuales contribuyó al incremento en rendimiento de cultivos de maíz (*Z. mays* L.), lino (*Linum usitatissimum*), algodón (*Gossypium hirsutum*), cebada (*Hordeum vulgare*), pastos (*Bouteloua gracilis*, *Hilaria mutica*, *Paspalum notatum* Flugge), girasol (*Helianthus annuus* L), y especies arbóreas como el álamo (*Populus euramericana*) y el manzano (*Malus pumila* Mill), esto cuando se adicionó diferentes cantidades de lodos residuales (Singh y Agrawal, 2008). En jitomate (*Lycopersicon sculentum* Mill) se observó un desarrollo normal de raíz y follaje cuando se germinó en macetas con mezcla de suelos y lodos en proporción 135 g kg<sup>-1</sup> de suelo (Utria-Borges, *et al.*, 2008). Como resultado de ensayos en campo con incrementos de lodos residuales aplicados en diferentes tipos de suelo, se reporta efecto favorable en el rendimiento de grano y paja de trigo (*Triticum aestivum* L.) (Cuadro 4).

**Cuadro 4.** Efecto de lodos residuales en el rendimiento de cultivos (t ha<sup>-1</sup>).

Trigo (Jamil <i>et al.</i> , 2006)			Trigo en rotación (Özyazici, 2013)				
Lodos residuales			Lodos residuales				
t ha <sup>-1</sup>	Grano	Paja	t ha <sup>-1</sup>	Grano	Paja		
				2002-4*	2003-5	2002-4	2003-5
0	3.21	5.80	0	3.45	1.83	5.60	1.97
10	4.22	7.22	10	5.07	3.73	7.74	6.29
20	5.22	8.00	20	5.90	4.96	8.39	6.67
40	6.15	8.70	30	4.47	4.06	8.42	7.88
60	5.65	9.30	40	4.47	3.75	8.90	9.12
80	5.20	9.82	50	3.89	3.54	8.02	8.52
100	5.10	9.40					

\* Corresponde al año en que se realizó la siembra

En síntesis, la aplicación de lodos residuales, por su alto contenido de materia orgánica, es una práctica para el mejoramiento de las condiciones edáficas y aumento en el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, tienen el inconveniente de la presencia de microorganismos patógenos y parásitos del ser humano y de animales domésticos. Al respecto, estudios recientes consideran que el suelo no es un medio adecuado para la proliferación de estos organismos causantes de enfermedades. Por ejemplo, Deredjian *et*

*al.*, (2014) estudiaron a *Pseudomonas aeruginosa* como microorganismo modelo por sus características de ser considerado un patógeno con resistencia a antibióticos, diverso en sus actividades metabólicas, diseminado en variados nichos ecológicos y huésped de animales y del ser humano.

*P. aeruginosa* tiene alta presencia en aguas residuales urbanas y estiércoles (Lavenir *et al.*, 2008), por consiguiente, ha sido detectada en abonos orgánicos elaborados a partir de estos y suelos agrícolas en los que se aplican, inclusive en compost (Kaszab *et al.*, 2011. Deredjian *et al.* (2014) se enfocaron en detección por PCR cuantitativa de *P. aeruginosa*, en 380 suelos de Francia y Burkina Faso, los cuales tenían como práctica común la aplicación de diversos abonos orgánicos, incluyendo el uso de aguas residuales y efluentes de granjas. A pesar de que este microorganismo patógeno fue detectado en todas las muestras de materiales orgánicos ( $10^3$ - $10^5$  UFC g<sup>-1</sup> de suelo), en los suelos fue escaso. En los únicos suelos donde se detectó fue en un viñedo de Burgundy, en el que se aplicaba compost hecho con residuos de la producción intensiva de champiñones y en dos suelos con aplicación de aguas residuales de origen urbano de Burkina Faso. Los máximos niveles de este microorganismo fueron de solo 10 UFC g<sup>-1</sup> de suelo. Lo anterior deja de manifiesto que algunos microorganismos patógenos pueden estar en altas concentraciones en materiales orgánicos de uso agrícola, pero su supervivencia en el suelo es reducida.

## REFERENCIAS

- Aguilar, I. A. ed., 2010. Calidad del agua. Un enfoque multidisciplinario. México: UNAM, Instituto de Investigaciones Económicas.
- Aller *et al.*, 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potencial using hydrogeologic settings. Oklahoma, USA: Environmental Protection Agency.
- Alvarez-S., J. D., Ferrera-Cerrato, R. y Zebrowski, C., 1992. Analisis de la microflora asociada al manejo agroecológico en la recuperación de tepetates. *Terra*, 10:419-424.
- Álvarez-Solís, J. D., Ferrera-Cerrato, R. y Etchevers-Barra, J. D., 2000. Actividad microbiana en tepetate con incorporación de residuos orgánicos. *Agrociencia*, 34:523-532.
- Arias R., H. M., 1992. Rehabilitación de tepetates: una alternativa para la producción agropecuaria y forestal. *Terra*, 10:309-317.
- Avila Campuzano, G. R., 2011. La reforestación en la formación de suelo a partir de tepetates. Texcoco: Colegio de Postgraduados.
- Banerjee, M. R., Burton, D. L. y Depoe, S., 1997. Impact of sewage sludge application on soil biological characteristics. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 66:241-249.
- Castrejón, *et al.*, 2002. Evaluación de la calidad de lodos residuales de México., México: Instituto de Ingeniería, Grupo de Tratamiento y Reúso. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Chao W., X. H., Mao-Lin, C. y Yun.Hai, W., 2005. Total concentrations and fractions of Cd, Cr, Pb, Cu, Ni and Zn in Sewage Sludge from municipal and industrial wastewater treatment plants. *Journal of Hazardous Materials*, B119:245-249.
- Chao, W. *et al.*, 2006. Extractable fractions of metals in sewage Sludges from five typical urban wastewater treatment plants of China. *Pedosphere*, 16(6):756-761.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2011. Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. Diciembre 2011. SEMARNAT, CONAGUA. México.

- Deredjian, A. *et al.*, 2014. Low occurrence of *Pseudomonas aeruginosa* in agricultural soils with and without organic amendment. *Frontiers on Cellular Infections Microbiology*, 4(53).
- Enciso-De la Vega, S., 1992. Propuesta de nomenclatura estratigráfica para la cuenca de México. Universidad Nacional Autónoma de México, *Revista del Instituto de Geología*, 10:26-36.
- Esteller, M. V., 2002. Vulnerabilidad de acuíferos frente al uso de aguas residuales y lodos en la agricultura. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, 2:103-113.
- Etchevers B., J. D., 1997. Factores físicos químicos y biológicos que afectan la productividad de los suelos volcánicos endurecidos. En: C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo, edits. *Suelos volcánicos endurecidos*. Quito: ORSTOM, pp. 155-161.
- Ferrera-Cerrato, R., 1992. Papel de los microorganismos en la recuperación de suelos marginales. *Terra*, 10:408-414.
- Foster, S. e Hirata, R., 1988. *Undergroundwater pollution risk determination: a methodology bases in current data*. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del ambiente (CEPIS), Organización Mundial de la Salud (OMS).
- Gama-Castro, J. *et al.*, 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*, LIX(1):133-145.
- Gutiérrez A., V., 2006. *Diagnóstico básico para la gestion integral de residuos*. D. F., México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.
- Ingelmo, F. *et al.*, 2008. Efecto del tiempo de compostaje en la biodisponibilidad de metales pesados en un compost elaborado con lodos de depuradora y virutas de madera. En: *I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*. Castellón: REDISA.
- Jamil, M., Qasim, M. y Umar, M., 2006. Utilization of Sewage Sludge on Organic Fertilizer in Sustainable Agriculture. *Journal of Applied Science*, 6(3):531-535.
- Jiménez C., B. E., 2001. *La contaminacion ambiental en México. causas efectos y tecnologia apropiada*. D. F., México: Limusa.
- Jiménez, B., Barrios, J. A. y Maya, C., 2001. *Estabilización alcalina de lodos generados en un tratamiento primario avanzado*. México: Instituto de Ingeniería UNAM.

- Kaszab, E. *et al.*, 2011. Antibiotic resistance profiles and virulence markers of *Pseudomonas aeruginosa* strains isolated from composts. *Bioresources Technology*, 102(2):1543-1548.
- Lavenir, R. *et al.*, 2008. Spatio-temporal analysis of infra-specific genetic variations among a *Pseudomonas aeruginosa* water net work hospital population: invasion and selection of clonal complexes. *Journal of Applied Microbiology*, 105(5):1491–1501.
- Llerena V., F. A. y Sánchez B., B., 1992. Recuperación de tepetates en la vertiente oriental del Valle de México. *Terra*, 10:302-308.
- López C., A., 2011. Los glifos de suelo en códices acolhua de la Colonia temprana: un reanálisis de su significado. *Desacatos*, 37:145-162.
- Marín G., R., 2003. Fisicoquímica y microbiología de los medios acuáticos. Tratamiento y control de calidad de aguas. Madrid, España: Díaz de Santos.
- Méndez, J. M., *et al.*, 2008. Supervivencia de bacterias fecales en lodos residuales deshidratados tratados con amoníaco. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 7(3):229-235.
- Navarro G., H. y Prat, C., 1996. IX. Habilitación agrícola de los tepetates de los valles de México y Tlaxcala. En: p. Bovin, ed. *El campo mexicano: una modernización a marchas forzadas*. D.F, Mexico: Centro Frances de Estudios Mexicanos y Centroamericanos, pp. 253-291.
- Nelson, K., Jiménez C., B., Tchobanoglous, G. y Darby, J., 2004. Sludge accumulation, characteristics, and pathogen inactivation in four primary waste stabilization ponds in central Mexico. *Water research*, 38:111-127.
- Oropeza M., J. L. y Rios B., J. D., 1998. Modelos matemáticos de erosión hídrica para la optimización de la rehabilitación de tepetates con fines agrícolas. En: H. Navarro G., H. Poupon y M. A. Pérez O., edits. *Aptitud productiva en suelos volcánicos endurecidos (tepetates)*. Montecillo: Colegio de Postgraduados, ORSTOM, pp. 61-88.
- Ortiz-Hernández, M. L., Gutiérrez-Ruiz, M. E. y Sánchez-Salinas, E., 1995. Propuesta de manejo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca, Estado de Morelos, México.. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 11(2):105-115.
- Oyeku, O. y Eludoyin, A. O., 2010. Heavy metal contamination of groundwater resources in a Nigerian urban settlement. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 4(4):201-214.

- Özyazıcı, M. A., 2013. Effects of sewage sludge on the yield of plants in the rotation system of wheat-white head cabbage-tomato. *Eurasian Journal of Soil Science*, 2:35-44.
- Pathak, A., Dastidar, M. G. y Sreerishnan, T. R., 2009. Bioleaching of heavy metals from sewage sludge: A review. *Journal of Environmental Management*, 90:2343-2353.
- Pérez, C. R. y Pacheco, A. J., 2004. Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. *Ingeniería*, 8(1):33-42.
- Pimentel B., L., 1992. Como hacer productivos a los tepetates en México. *Terra*, 10:293-301.
- Quantin, P., 1998. Orientación y problemática científica para la regeneración y conservación de suelos volcanicos endurecidos y estériles. En: H. Navarro G., H. Poupon y M. A. Pérez O., edits. *Aptitud productiva en suelos volcánicos endurecidos (tepetates)*. Montecillo: Colegio de Postgraduados ORSTOM, pp. 7-16.
- Quantin, P., Zebrowski, C., Delaune, M. e Hidalgo M., C., 1992. El material original de los tepetates t2 y t3 de la región de Texcoco (México): ¿Loess o cineritas?. *Terra*, 10: 178-182.
- Rodríguez C., R. y Ochoa A., C., 1989. Estudio geoelectrico del sistema acuífero de la cuenca de México. *Geografía Internacional*, 28(2):191-205.
- Servicio Geológico Mexicano, 2002. Carta Geológico-Minera Ciudad de México E14-2 1:250000. Pachuca, México: Servicio Geológico Mexicano.
- Singh, R. P. & Agrawal, M., 2008. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management*, 28:347-358.
- Torres L., P. *et al.*, 2005. Influencia del material de enmienda en el compostaje de lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales-PTAR. *Revista Ingeniería e Investigación*, 25(2):53-61.
- Torri, S. I., 2009. Feasibility of using a mixture of sewage sludge and incinerated sewage sludge as a soil amendment. En: R. E. Baily, ed. *Air, water and soil pollution science and technology: Sludge: types, treatment processes and disposal*. New York: Nova Science Publishers, incorporated, pp. 187-208.
- Utria-Borges, E. *et al.*, 2008. Utilización agraria de los biosólidos y su influencia en el crecimiento de plántulas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Chapingo Serie Horticultura*, 14(1):33-39.

- Wei, Y. y Liu, Y., 2005. Effects of sewage sludge compost application on crops and cropland in 3-year field study. *Chemosphere*, 59:1257-1265.
- Werner, G., 1992. Suelos volcanicos endurecidos (tepetates) en el Estado de Tlaxcala: distribución, rehabilitación, manejo y conservación. *Terra*, 10:318-331.
- Williams, B. J., 1972. Tepetate in the Valley of Mexico. *Annals of the Association of American Geographers*, 62(4):618-626.
- Williams, B. J., 1975. Aztec soil science. *Boletín del Instituto Nacional de Geografía*, 7:115-120.
- Williams, B. J., 2006. Aztec soil knowledge: classes, management, and ecology. En: B. P. Warkentin, ed. *Footprints in the soil: people and ideas in soil history*. Amsterdam: Elsevier, pp. 17-41.
- Zamudio G., B., 1984. Predicción del movimiento de nitratos en suelos labrados. Chapingo, México: Colegio de Postgraduados.
- Zhang, P. *et al.*, 2009. Sewage sludge bioleaching by indigenous sulfur-oxidizing bacteria: Effects of ratio of substrate dosage to solid content. *Bioresource Technology*, 100:1394–1398.
- Zorpas, A. A., Inglezakis, V. J. y Loizidou, M., 2008. Heavy metals fractionation before, during and after composting of sewage sludge with natural zeolite. *Waste Management*, 28:2054–2060.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Fase I. Colecta de materiales orgánicos

**1) Lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales urbanas (PTARU) de Santiaguito.** Los lodos residuales se colectaron de la planta de tratamiento de agua residual en el Barrio Santiaguito en el Municipio de Texcoco, Estado de México.

En la planta de tratamiento se recibe agua residual domiciliaria, se conduce a un sedimentador para eliminar residuos sólidos gruesos y arena y de este se conduce a un tanque adyacente, donde se favorece la sedimentación de sólidos finos, lo que se considera tratamiento primario (Figura 1). Es en este depósito se colectó el material usado en los tratamientos. Se removió la cobertura de lirios acuáticos para después, por arrastre, captar los residuos depositados en el fondo. Se vertieron los materiales en bolsa de polietileno dentro de un bote de 19 L, se anudó y se colocó la tapa, para después trasladarlos al laboratorio. Se preparó una muestra compuesta para determinar humedad. Una porción se guardó en frascos de vidrio en refrigeración. A los frascos se les colocó doble tapa, una de polietileno para evitar el contacto con la tapa externa metálica y el resto se mantuvo en bolsa de polietileno a temperatura ambiente.

**2) Lodos de Chalco (desazolve del canal de aguas residuales “La Compañía”, Chalco, Estado de México).** Los lodos fueron colectados en el lecho del ex-Lago de Texcoco, lugar donde se depositan los lodos provenientes del desazolve del canal de aguas negras “La Compañía” de Chalco, Estado de México (Figura 2). Estos lodos representan una mezcla de materiales orgánicos a los cuales se les retiraron los residuos más gruesos, como piedras, plásticos y desechos urbanos diversos provenientes del desazolve del canal de aguas residuales “La Compañía”. Con pala se colectó y se guardó en bolsas de polietileno etiquetadas. En el laboratorio se hizo una mezcla compuesta homogénea para realizar los análisis y se guardó a temperatura ambiente.



**Figura 1.** Planta de tratamiento de aguas residuales urbanas del Barrio Santiaguito



**Figura 2.** Depósitos de lodos en el ex-Lago de Texcoco

**3) Lombricompost.** Se elaboró en las instalaciones del Colegio de Postgraduados con residuos orgánicos procedentes de las áreas verdes (corte del pasto, principalmente, y residuos vegetales producto de la poda de árboles y arbustos) y estiércol bovino. El compostaje se favoreció con la actividad de lombrices (*Eisenia andrei*).

## Fase II. Análisis físicos y químicos de los materiales orgánicos

### Preparación de las muestras para análisis

Para los análisis físicos y químicos, los lodos y compost se extendieron y secaron a la sombra a temperatura ambiente. Se trituraron con mortero y tamizaron con tamiz de acero inoxidable con malla de 2 mm de apertura. Se almacenaron en bolsas de polietileno etiquetadas y a temperatura ambiente hasta su uso. Para los análisis se emplearon reactivos de grado analítico. Lodos y compost se analizaron en laboratorio para determinar pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica, N, P, K, y EPTs (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn). Los procedimientos se describen a continuación:

### Análisis físicos

#### Porcentaje de humedad

La humedad se determinó colocando una fracción de la muestra en botes metálicos. Se pesó el bote y de la muestra húmeda (A), se colocó en horno de secado eléctrico con aire forzado a 105 °C y después de 48 h se obtuvo el peso seco (B, incluye peso del bote). El porcentaje de humedad se estimó con la siguiente relación.

$$\text{Humedad (\% H)} = \frac{A-B}{B - \text{tara del bote}} \times 100$$

Se determinó también el porcentaje de sólidos totales de acuerdo a Jiménez (2001)  $\text{sólidos totales} = A/(B - \text{tara del bote}) \times 100$

#### Textura

El análisis del tamaño de partículas se fundamenta en la ley de Stokes que establece que la resistencia ofrecida por un líquido al descenso de las partículas en suspensión varía en forma directamente proporcional con el cuadrado del radio de las partículas, lo que se escribe:

$$V = \frac{2(Dp - Do) g r^2}{9u}$$

En la cual,

- V = Velocidad de caída de las partículas,
- Dp = Densidad real del suelo,
- Do = Densidad del agua,
- r = Radio de las partículas,
- g = Aceleración de la gravedad,
- u = Viscosidad del líquido (Blair F., 1965)

Para la determinación de la textura se utilizó el método de la pipeta que es un procedimiento considerado de muestreo directo, que consiste en tomar una sub-muestra con una pipeta a una profundidad y tiempo determinado, que supone la eliminación por sedimentación de todas las partículas mayores de un diámetro X (Norambuena V. *et al.*, 2002).

Se siguió la propuesta de Van Reeuwijk (1999) y el procedimiento se llevó a cabo con muestra tamizada en malla de 2 mm de apertura, que se obtuvo de los sitios de muestreo de los primeros 20 cm. Se vertió el suelo en un frasco de 130 mL se adicionó 20 mL de hexametáfosfato [(NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub> al 4% con NaCO<sub>3</sub> al 1% p/v]] y se llenó con agua destilada, se colocó en agitador recíproco durante toda la noche. Se filtró en tamiz de 0.105 mm de apertura para colectar arena por lavado con agua corriente y estas se colocaron en un bote para el secado en horno a 70 °C por 5 h y determinar el peso. La solución filtrada se vertió en una probeta de 1000 mL, se agitó e inmediatamente, se tomó la primera alícuota con una pipeta volumétrica de 25 mL a una profundidad de 10.5 cm y se vació en un bote de aluminio para colocarlo en parrilla eléctrica hasta observar sequedad total. Se dejó enfriar y se determinó el peso en balanza analítica. Esta primera alícuota corresponde a la fracción de limos gruesos (< 50 µm). Este último paso se repitió a los 5 min para tomar la alícuota a 11.5 cm que corresponde a limos finos (< 20 µm) y al cabo de 5 ½ h se repite el último procedimiento para sorber una alícuota a 7.5 cm que corresponda a arcillas (< 2 µm). Al final se realiza el cálculo del porcentaje de las fracciones de arenas, limos y arcillas, dato que permite identificar la clase textural con el triángulo de texturas.

El cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$\text{arenas} = A = (\text{peso del bote} + \text{muestra}) - \text{bote}$$

$$\text{arcillas} = K = \left( ((\text{peso del bote} + \text{muestra}) - \text{bote}) \times 40 \right) - 0.1$$

40 = 1000/25, relación del volumen total al que se aforo la muestra (1000) y los 25 mL del volumen de la alícuota.

$$\text{limos finos} = L = \left( ((\text{peso del bote} + \text{muestra}) - \text{bote}) \times 40 \right) - K$$

$$\text{limos gruesos} = M = \left( ((\text{peso del bote} + \text{muestra}) - \text{bote}) \times 40 \right) - (K + L)$$

$$\text{peso de la muestra} = PM = A + K + L + M$$

$$\% \text{ Arenas} = \% A = \frac{A}{PM} * 100$$

$$\% \text{ limos} = \% L = \frac{L + M}{PM} * 100$$

$$\% \text{ Arcillas} = \% R = \frac{K}{PM} * 100$$

## **Análisis químicos**

### **pH y CE**

El pH refleja la actividad de los iones hidrógeno concentrados en la solución de suelo, representada como el logaritmo negativo. La conductividad eléctrica (CE) es el inverso de la resistencia de la solución al paso de corriente y estima la cantidad de sales contenidas en la solución de suelo (Jackson, 1976).

La determinación de pH y CE se realizó con una solución lodos agua relación 1:2 (Van Reeuwijk, 1999). Para esto se usó una muestra de 10 g con 20 mL de agua destilada depositados en tubos Falcon de 50 mL. Los tubos se colocaron en un agitador mecánico recíproco durante 60 min. Al cabo de la agitación, con un potenciómetro de electrodo de vidrio (Oakton PH 510) sumergido en la solución se midió el pH y se reposaron las muestras por 24 horas antes de medir la CE con un conductímetro (Conductronic CL35). El conductímetro se calibró previamente con una solución de KCl 0.01 M a 1.412 mS.

## Determinación de materia orgánica (Walkley y Black)

El procedimiento se basa en la oxidación con dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) por dilución del ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) de compuestos carbonados alterados resistentes como el humus y humatos, así como de residuos orgánicos poco alterados de fácil descomposición que constituyen la materia orgánica, excepto el carbón elemental que es la fracción menos activa del suelo. El exceso de dicromato se determina por titulación con sulfato ferroso (Jackson, 1976; Álvarez-Benedí y Muñoz-Carpena, 2005; Rowell L, 1994).

Para llevar a cabo esta determinación se siguieron las indicaciones de Van Reeuwijk (1999). Se pesó 0.50 g de muestra tamizada en malla de 0.25 mm de apertura, se colocó en matraz Erlenmeyer de 500 ml y se le agregó 10 mL de solución de dicromato 0.1667 M para en seguida adicionar dentro de una campana extractora, 20 mL de ácido sulfúrico concentrado reposando posteriormente por 30 min hasta atemperar la solución antes de agregar 220 mL de agua destilada. Después se agregó 5 mL de ácido fosfórico concentrado más 8 gotas de difenilamina sulfonato de bario como indicador y se agitó. Se procedió a la titulación con solución de  $FeSO_4$  (278 g  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  más 15 mL de  $H_2SO_4$  aforado a 1 L) hasta observar el vire a verde.

Para el cálculo se utilizó la siguiente fórmula:

$$\%CO = \left( \frac{V1 - V2}{S} \right) \times N \times 0.39$$

%CO = Carbono orgánico porcentual

V1 = mL de la solución del sulfato ferroso requerido para el blanco

V2 = mL de la solución del sulfato ferroso requerido para la muestra

S = peso de la muestra secada al aire en gramos

N = Normalidad del  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$

0.39 =  $3 \times 10^{-3} \times 60\% \times 1.3$  (3 = peso equivalente del carbono)

Para el cálculo de la materia orgánica se reemplazaron los valores en la siguiente fórmula:

$$\%MO = \%CO \times 2$$

## Determinación de nitrógeno (Kjeldahl modificado)

Para la determinación de nitrógeno total se empleó la técnica de micro Kjeldahl (Van Reeuwijk, 1999; Margesin y Schinner, 2005). El procedimiento determina el nitrógeno orgánico e inorgánico. La oxidación con ácido sulfúrico convierte el nitrógeno orgánico en amonio, luego se neutraliza el ácido con un álcali y se destila el amoniaco recogiéndolo en una disolución valorada de ácido. El nitrógeno en forma de amidas y aminas se convierte en ion amonio que es retenido en el ácido sulfúrico mientras que las formas más oxidadas como los grupos nitro, azo, azoxi y compuestos heterocíclicos pasan antes por un proceso de reducción a ion amonio en presencia del ácido salicílico (Brown y Sallee, 1977; Skoog y West, 1986).

El proceso consta de tres etapas, la primera es la digestión, para la cual se tomó una muestra de 0.50 g tamizada en malla de 2 mm de apertura y se colocó en tubos de ensayo, se les agregó 4 mL de la mezcla ácido sulfúrico – ácido salicílico (33.3 g de ácido salicílico en 1 L de ácido sulfúrico concentrado) y una pizca de mezcla digestora (Consta de la mezcla de 96 g de sulfato de sodio, 3.5 g sulfato de cobre y 0.5 g de selenio en polvo negro), para reposar 24 h antes de colocarlos en la parrilla para la digestión a temperaturas que van desde 100 °C . Se dejan en la parrilla hasta completar la digestión que se identifica por el cambio de color de la muestra hasta que adquiere un tono grisáceo lechoso. Se deja enfriar previo a la adición de agua destilada. La siguiente etapa es la destilación para lo cual se vacía la muestra en matraz de destilación y se le agrega 20 mL de hidróxido de sodio al 38% y 50 mL de agua destilada, mientras que en un matraz Erlenmeyer de 125 mL se colocan 20 mL de ácido bórico al 4% (140 g en 1 L) con 4 gotas de indicador (0.13 g de rojo de metilo y 0.20 g de verde de bromocresol en 200 mL de etanol) para recibir el destilado que se destina a la titulación, esto es hasta completar 50 mL. La tercera etapa es la titulación para lo cual se usó ácido sulfúrico 0.1 N, el cual se dosificó con una bureta hasta observar el cambio de color a rosa.

El cálculo se realizó sustituyendo valores en la fórmula:

$$\%N = \frac{a - b}{s} \times N \times 1.4$$

- N = Nitrógeno porcentual
- a = Volumen de ácido sulfúrico empleado en titular la muestra
- b = Volumen de ácido sulfúrico empleado en titular el blanco

- s = Peso de la muestra secada al aire en gramos  
 N = Normalidad del ácido sulfúrico  
 1.4 =  $14 \times 10^3 \times 100\%$  (14 = peso atómico del N)

Para los cálculos se valora la normalidad del ácido sulfúrico con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , esto se realizó colocando 0.25 g de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  en un matraz Erlenmeyer con 50 mL de agua destilada. Se añadieron 4 gotas de indicador y se tituló con el ácido sulfúrico utilizado en la titulación de las muestras hasta observar el cambio de color a rosa. Para calcular la normalidad se empleó la siguiente fórmula:

$$N (\text{H}_2\text{SO}_4) = (0.25 \text{ g}/53) \times (1/V \text{ H}_2\text{SO}_4)$$

- N ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) = Normalidad del ácido sulfúrico  
 0.25g = Peso de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$   
 53 = Número de equivalentes del ácido sulfúrico  
 V  $\text{H}_2\text{SO}_4$  = Volumen del ácido sulfúrico gastado en la titulación en L.

### **Determinación de P, K, y elementos potencialmente tóxicos (EPTs) totales**

La digestión húmeda permite la disolución del material orgánico para convertir los elementos a formas solubles por calentamiento con ácidos concentrados (Carter y Gregorich, 2007). El funcionamiento del microondas se basa en la aplicación de un campo de alta frecuencia para provocar la oscilación de las moléculas eléctricamente polarizadas de la muestra y el disolvente, con un efecto térmico (Incropera y De Witt, 1999) en un lapso de tiempo reducido. Con el uso de recipientes cerrados se reduce la pérdida por volatilización y la contaminación (Wang *et al.*, 2006). El ICP se fundamenta en la ionización de átomos con energía campos magnéticos de radiofrecuencia, transportados por argón de los cuales una fracción de estos se captura en la región de interface del sistema (Margesin y Schinner, 2005; Smith, 1991).

Se retomó el procedimiento sugerido por Margesin y Schinner (2005) con modificaciones. Previo al análisis, los materiales se lavaron con solución de ácido nítrico al 10 % (v/v). Se colocó una muestra de 0.25 g en un tubo de PTFE-TFM (politetrafluoroetileno modificado con perfluoropropilviniléter) de 100 mL, se le adicionó 5 mL de ácido nítrico concentrado. Se digirió en horno de microondas (Anton Paar, Multiwave 3000) durante 30 min con una temperatura programada inicial de 140 °C y una

máxima de 200°C y presión máxima de 20 bar. Permanecieron 30 min más en el horno para su estabilización hasta que la temperatura bajo a menos de 100°C y la presión a menos de 1 bar, al cabo de este lapso se vació en matraces aforados de 25 mL para después agregar agua destilada al aforo y filtrar con papel Whatman #42. Las muestras se cuantificaron por espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP, Varian 725-ES).

### **Fase III. Análisis biológicos de los materiales orgánicos**

Se realizó una caracterización biológica de los materiales propuestos como enmienda que incluye conteo en placa de grupos de microorganismos y conteo de huevos de helmintos.

#### **Patógenos y huevos de helmintos**

De acuerdo a la norma vigente NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT, 2003), que regula el uso de lodos residuales y biosólidos, se debe realizar una cuantificación de coliformes fecales, salmonela y huevos de helmintos para que los lodos puedan aprovecharse con fines de mejoramiento de suelos sin que su uso represente un riesgo para la población.

#### **Conteo de huevos de helmintos**

Los huevos de helmintos son estadios parasitarios de pasaje cuya función es la transferencia a los hospederos, necesitan una estancia en el suelo para completar su desarrollo y volverse infectivos (Guarnera, 2013). En el suelo, normalmente se pueden encontrar hasta diez millones de huevos por metro cuadrado a 10 cm de profundidad (Brevik, 2013) y algunas como el de *Áscaris*, pueden permanecer viables por años (Beeching y Geoff, 2014). En lodos residuales, los huevos de helmintos se aglutinan y permanecen viables hasta por un año (Cruz V., 2014). Las condiciones climatológicas de una región, las costumbres higiénicas, personales y comunitarias de sus habitantes, los

hábitos alimenticios y el control sanitario de un país son factores que determinan la mayor o menor posibilidad de existencia e incidencia de los helmintos como problema de salud pública (Ramírez A., 1998).

Para el conteo de huevos de helmintos se aplican técnicas de concentración, las cuales se clasifican en físicas y fisicoquímicas, estas consisten en mezclar una porción de material con un líquido de densidad adecuada, de tal manera que los elementos parasitarios se separen por flotación o sedimentación. La concentración de parásitos por flotación permite concentrar huevos o larvas aun cuando estén presentes en pequeñas cantidades, a técnica más utilizada es la de flotación con sulfato de zinc (Método Faust). La técnica fisicoquímica se fundamenta en la acción disolvente de los reactivos empleados que forman dos fases no miscibles, en una se localizan preferentemente los parásitos y en la otra el material acompañante, el más usado es el de formol-éter que consiste en diluir la muestra directamente en formol al 10%, tamizar y agregar éter etílico, emulsionar por agitación y examinar, tras centrifugación, el sedimento donde se concentran los huevos (Prats, 2005; Olivas E., 2004).

Se retomó el procedimiento de la norma NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT, 2003). Se depositó el equivalente a 2 g de sólidos totales (% de sólidos totales = 100 % - % de humedad) de lodos más 200 mL de solución Tween 80 al 1% (v/v con agua destilada) en un frasco con tapa (con la misma solución se enjuaga el recipiente de la muestra), y se agitó durante 15 minutos en agitador mecánico recíproco para homogeneizar. Posterior al agitado se vertió la suspensión en un recipiente con capacidad de 2 L, y se agregó 800 mL más de la solución Tween 80, misma que se aprovechó para enjuagar el frasco. Se reposó la suspensión durante 3 horas y al cabo de este tiempo, con una manguera de hule (con jeringa de 50 mL se extrae el aire para generar vacío e inmediatamente se coloca el extremo de la manguera en el recipiente que recibirá el agua extraída, el cual se coloca a un nivel más bajo que el que contiene la muestra) se extrajo el máximo del sobrenadante sin alterar el sedimento, el cual se pasó por un tamiz del número 100 (poro de 0.149  $\mu\text{m}$ ).

El filtrado se recuperó en un recipiente de 2 L y se incorporaron los enjuagues con agua destilada (1 L) del tamiz y recipiente para después sedimentar por 3 h. Concluido el plazo, se aspira el sobrenadante al máximo y se recupera el sedimento en tubos de

centrífuga de 50 mL. Se coloca el tubo en la centrífuga a 660 g durante 5 min (estas son las condiciones para todas las etapas de centrifugado), se aspira el sobrenadante y se desecha para resuspender la pastilla en 150 mL de solución sulfato de zinc (800 g de  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  en 1000 mL de agua destilada con gravedad específica regulada a 1.3) y agitar con vórtex. Se repite el centrifugado. El sobrenadante se recuperó en un recipiente de 2 L y se agregó 1 L de agua destilada para después sedimentar durante 3 h. El sobrenadante se aspiró por vacío y se recuperó el sedimento en tubos Falcon de 50 mL incluyendo el agua empleada para enjuagar el recipiente. El tubo se coloca en la centrífuga, se aspira el sobrenadante y se desecha, mientras que el sedimento se resuspende por agitación con vórtex y se transfiere a un tubo de 50 mL cónico (incluir agua usada para enjuagar el tubo de 200 mL) para repetir el centrifugado. Se aspira el sobrenadante para desecharlo y la pastilla se resuspende con 15 mL de solución de alcohol-ácido (650 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.1N con 350 mL de alcohol etílico), se agrega 10 mL de éter (maniobrar dentro de una campana de extracción) y se agita suavemente (destapar de vez en cuando para dejar escapar el gas). Se coloca nuevamente el tubo en la centrífuga para después aspirar el sobrenadante hasta 2 mm por arriba de la parte cónica del tubo (dentro de una campana de extracción). Se repite el enjuague con alcohol-ácido y el centrifugado para después retirar el sobrenadante hasta dejar 5 mL en el tubo. Se agregó a la pastilla 5 mL de solución de hipoclorito de sodio (10% v/v) se reposo durante 10 min, al cabo de este tiempo, se aforó con agua destilada, centrifugó, decanto y se aspiró el sobrenadante hasta dejar 5 mL. Se realizó un enjuague final con agua destilada y centrifugó, se aspiró el sobrenadante hasta dejar 1 mL de volumen final.

Para el conteo se empleó una cámara Neubauer a la cual se le colocaron 100  $\mu\text{L}$  de la muestra procesada. Se observó al microscopio a 20 y 40 aumentos para identificar huevos comparando con esquemas publicados por Chitwood y Chitwood (1974) y fotografías publicadas por Jiménez, B. (2009). El resultado se expresa como número de huevos  $\text{g}^{-1}$  de sólidos totales.

## Conteo de microorganismos

Los análisis microbiológicos se realizaron con el método de dilución y conteo en placa (Ramírez G. *et al.*, 2013). Las labores se llevaron a cabo dentro de una cámara de flujo laminar complementada con un mechero para favorecer condiciones de asepsia.

La dilución se realizó mezclando 10 g del material en 90 mL de agua destilada esterilizada. La solución se agitó 60 min en un agitador de vaivén a 180 oscilaciones por minuto y se preparó una serie de diluciones vertiendo 1 mL de la solución en tubos de ensayo con 9 mL de agua destilada esterilizada hasta la dilución  $10^{-6}$  agitando el tubo con un vórtex 10 segundos antes de preparar la dilución sucesiva (Harrigan y McCance, 1979).

Para cada prueba se prepararon medios de cultivo con agua destilada para vaciar en cajas Petri. Se vertió 20 mL en cada caja y se reposaron para enfriar durante 24 h dentro de la cámara de flujo laminar y después almacenar en posición invertida a temperatura ambiente dentro de una bolsa de polietileno cerrada y estéril hasta su uso.

Los medios de cultivo y los materiales empleados se esterilizaron en olla de presión a 121 °C equivalentes a 1.26 kg cm<sup>-2</sup>.

Para el conteo en placa se empleó el método de extensión superficial (Ramírez G., *et al.*, 2013). Sobre el medio ya gelificado. Con micropipeta, se colocó 100 µL de la solución diluida en el centro de la caja Petri. Previo a la inoculación, la dilución se agitó con un vórtex por 3 segundos y con un asa de Drigalski se extendió sobre toda la superficie del medio de cultivo. El asa de Drigalski se esterilizó previo a su uso sumergiéndola en alcohol, se pasó por la flama del mechero y se enfrió. Las cajas inoculadas se sellaron con película de PVC (plástico de cocina) e incubaron en una cámara de crecimiento en posición invertida en rangos de tiempo y temperatura de acuerdo a las recomendaciones para cada tipo de microorganismo. Para la inoculación se usaron diferentes diluciones de acuerdo al tipo de microorganismo deseado y se realizó por triplicado.

Para el conteo se consideró cada punto y se calculó la media aritmética de las repeticiones, el resultado se multiplica por el factor de dilución y se reduce para reportarlo con solo dos cifras significativas (Harrigan y McCance, 1979).

### **Coliformes totales**

El grupo denominado coliformes totales incluye todas las bacterias aerobias y anaerobias facultativas, Gram negativas, no formadoras de esporas y con forma de bastón que fermentan lactosa con formación de gases antes de 48 h a 35°C. La diferencia entre coliformes totales y fecales en la capacidad de los primeros en crecer a  $44.5 \pm 0.5$  °C (Henry y Heinke, 1999). Las enterobacterias están ampliamente distribuidas en suelo, agua, plantas e insectos, ya que en general tienen requerimientos nutricionales simples y aunque forman parte de la flora normal de animales de sangre caliente, son pocas las cepas patógenas para los humanos. Debido a que *Escherichia coli* tiene como nicho el intestino humano y es viable por un cierto tiempo fuera de él, se ha usado como indicador de la presencia de otros enteropatógenos intestinales. Aunque casi todas estas bacterias crecen en medios de cultivo simples se han ideado medios especiales para obstaculizar el crecimiento de bacterias Gram positivas entre enteropatógenos y saprobios por su coloración, tal es el caso del agar de eosina azul de metileno (agar EMB) que al mismo tiempo permite diferenciar a *E. coli* por la coloración verde metálico brillante del otras coliformes que presentan apariencia redondeada y húmeda (Romero C., 2007; Ausina R. y Moreno G., 2006; (Madigan *et al.*, 2004). Por lo tanto, el agar EMB se usa como prueba confirmativa de la presencia de coliformes (McKinney, 2004).

Se empleó agar de eosina azul de metileno (EMB-agar Merck), también llamado agar Levine, un medio de cultivo comercial para identificación y diferenciación de enterobacterias (Harrigan y McCance, 1979), se utilizaron 36 g de polvo L<sup>-1</sup> de agua, con ajuste de pH a 7. Una vez sembradas las muestras, se incubaron en cámara a 28°C por 24 horas.

## **Salmonela**

La salmonela se clasifica dentro del grupo de las enterobacterias y se encuentra ampliamente distribuida en el ambiente aunque su principal reservorio es el intestino de animales homeotermos y poiquilitermos. Son bacilos Gram negativos de respiración aerobia facultativa, se desarrollan entre los 7 y 48°C con un rango de pH entre 4 y 8, en ambientes con una actividad de agua del orden de 0.93. Fuera del intestino sobrevive y mantiene su capacidad infectiva durante varias semanas en el agua y en el suelo por años. Se reconocen dos especies *Salmonella enterica* y *S. typhimurium* y son más de 2,500 serovares, aunque la mayoría de las enfermedades en humanos son causadas por un número pequeño de éstas (Xian-Zhi, 2009; Organización Mundial de la Salud, 2005; Cook, *et al.*, 2007).

Se inocularon cajas preparadas con agar verde brillante útil para identificar y aislar *Salmonella* (Agar verde brillante rojo de fenol-lactosa-sacarosa con nombre comercial Agar BPLS, Merck), este se clasifica como medio selectivo y diferencial ya que evidencia la hidrólisis de lactosa (Romero C., 2007), en proporción de 57 g L<sup>-1</sup> de agua destilada y se incubó a 37° C por 24 h. Para la siembra se aislaron todas las colonias presentes en agar EMB transfiriendo con palillos estériles. Para proporcionar condiciones anaerobias, las cajas se sellaron inmediatamente después de la siembra. Las colonias de *Salmonella* se identifican por el color rojizo o anaranjado que presentan, mientras que las colonias amarillentas manifiestan la presencia de enterobacterias fermentadoras de lactosa y sacarosa.

## **Bacterias totales**

Organismos menos evolucionados y de menor complejidad estructural que en el suelo se encuentran adheridas a las arcillas y humus donde su cantidad y tipo están determinados por el tipo de suelo, particularmente el contenido de arcilla, humedad, aireación, temperatura, contenido de materia orgánica y pH. Prefieren pH cercano a la neutralidad y presencia de humedad. En suelos agrícolas, las prácticas de labranza modifican las poblaciones (Gómez C. y Corlay C., 2010).

Se preparó Agar Nutritivo (Merck) en proporción de 20 g L<sup>-1</sup> de agua con pH de 7.0. Una vez sembradas las muestras, se incubaron a 28°C durante 24 h.

### **Hongos totales**

Con el nombre de hongo se designa a organismos morfológicamente similares filogenéticamente no relacionados que forman un grupo heterogéneo. Son ubicuas, viven en cualquier sitio que presente material orgánico, agua y una temperatura apropiada entre 4 y 60°C. Comprende un inmenso número de individuos unicelulares y pluricelulares distribuidos en una gran diversidad de especies, por su proceso de respiración se dividen en aerobios principalmente, microaerófilicos o anaerobios facultativos. De nutrición heterótrofa, metabolizan carbohidratos y otras sustancias orgánicas presentes en la materia orgánica, los hay simbióticos, parásitos y saprófitos en su mayoría.

La mayoría de las especies viven en el suelo, se ubican a profundidades variables hasta más de 1 m de profundidad, y su presencia depende de la humedad riqueza de restos orgánicos, aireación, pH principalmente. En ambientes acuáticos viven cuando hay aire disuelto, en aguas putrefactas son pocos por carecer de oxígeno libre y prefieren la presencia de luz, en general colonizan espacios con abundancia de bacterias, para aprovechar los restos o degradar en forma conjunta el material orgánico (Herrera y Ulloa, 1998; Varela F. y Amora L., 2010).

Se cultivaron en PDA (Merck) más rosa de bengala (1 g en 100 mL de alcohol) en proporción de 39 g y 3.3 mL por L de agua, respectivamente, con pH 7 e incubación a 28 °C durante 3 días, una vez sembradas las muestras.

### **Actinomicetos**

Organismos procariontes cosmopolitas incluye aerobios, anaerobios facultativos y microaerófilicos, mesófilos y termófilos, parásitos y saprófitos. Se distribuyen principalmente en suelo, donde son el segundo grupo en abundancia, y ambientes acuáticos. Son más de 40 géneros e incluye algunos importantes para la mineralización.

Se encuentran en mayor número en suelos ricos en materia orgánica o humus y en rizosfera y prefieren pH mayor a 5 o ligeramente alcalino. En conteos en placa presentan aspecto seco mate, polvoso, fuerte adherencia al medio y crecimiento concéntrico ocasional (Gómez C. y Corlay C., 2010; Rodríguez C *et al.*, 2005).

Se inocularon cajas de Czapeck (BD Bioxon 50g por L de agua, se solubilizó con calor y agitación, pH regulado a 7.3 antes de la esterilización) y se incubó a 28°C durante 5 días, una vez sembradas las muestras.

### Solubilizadores de fosfatos

El fósforo (P) es un nutriente esencial para el desarrollo de organismos, en el suelo una fuente natural es la materia orgánica de la que constituye del 30 al 50% donde se encuentra en formas orgánicas de alto peso molecular que debe ser convertido a sus formas inorgánicas solubles ( $P_i$ ,  $HPO_4^{2-}$ ,  $H_2PO_4^-$ ) de bajo peso molecular para que lo asimilen las células, labor que realizan microorganismos aeróbicos y anaeróbicos por liberación de ácidos orgánicos. Un gran número de microorganismos se han detectado en la rizósfera con técnicas visuales de conteo en placa en medio de cultivo con fuentes minerales de fosfatos, donde la presencia de zonas claras alrededor de las colonias manifiesta su habilidad de solubilización (Rodríguez y Fraga, 1999; Sindhu *et al.*, 2014).

Se incubó en placa con medio de cultivo Pikovskaya el cual se preparó con los ingredientes enlistados más adelante. Posterior al esterilizado, se reposó para atemperar y después se agitó moviendo el matraz sobre la mesa para evitar la formación de burbujas previo al vaciado en cajas. La incubación se realizó a 28°C por un lapso de 7 días, una vez sembradas las muestras (Zaidi *et al.*, 2014).

Reactivo	Cantidad *	Reactivo	Cantidad *
Glucosa	10 g	MnSO <sub>4</sub>	Trazas
Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	5 g	FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	Trazas
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.5 g	Extracto de levadura	0.5 g
NaCl	0.2 g	Agar Agar	15 g
KCl	0.2 g	Agua destilada	1 L
MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0.1 g	pH	7.0 ± 0.2

\* Cantidades para preparar un litro de medio de cultivo.

## Celulolíticos

Se conocen como celulolíticos a un grupo diverso de organismos (Gram positivos y negativos, anaeróbicos y aeróbicos) que degradan celulosa, componente principal de la pared celular de las plantas y el hidrato de carbono más ampliamente extendido. En el suelo la celulosa la degradan microorganismos aerobios (hongos, mixobacterias y otras eubacterias), y en condiciones anaeróbicas actúan bacterias (mesófilas y termófilas), hongos anaeróbicos y protozoarios (Beyer y Walter, 1987; Castillo R. *et al.*, 2005; Schlegel y Zaborosch, 1997).

Se preparó un medio de cultivo con carboximetilcelulosa como única fuente de carbono y sales para aportar elementos nutritivos a partir de los ingredientes enlistados a continuación:

Ingrediente	Cantidad	Ingrediente	Cantidad
Solución salina estándar de Winogradsky	5 mL	Solución de micronutrientos	de
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	1 g	KMoO <sub>4</sub>	0.05 g
Extracto de suelo*	20 mL	MnSO <sub>4</sub>	0.05 g
Solución de micronutrientos	1 mL	Na <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.05 g
Carboximetilcelulosa	10 g	CoNO <sub>3</sub>	0.05 g
Agua destilada	1 L	CdSO <sub>4</sub>	0.05 g
pH	6.5	Cu <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.05 g
		ZnSO <sub>4</sub>	0.05 g
		Agua destilada	1 L
<hr/>			
Solución salina estándar de Winogradsky			
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	5 g		
MgSO <sub>4</sub>	2 g		
NaCl	2.5 g		
Fe(SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0.5 g		
Agua destilada	1 L		
pH	7		

\* El extracto de suelo se prepara con suelo agrícola y agua de la llave en proporción 1:1, se esteriliza a 121°C equivalente a 1.26 kg cm<sup>-2</sup> durante 18 min en olla de presión, se reposa 24 h, se filtra y el filtrado se esteriliza nuevamente. Se almacena en frasco ámbar en refrigeración.

Se incubó a 35 °C durante 48 h. Para el revelado se empleó una solución de rojo congo (1% p/v) la cual se dispersó sobre el medio de cultivo y se reposó durante 15 min, posteriormente se enjuagó con una solución de NaCl 1M (58.44 g en 1 L de agua destilada). Se considera degradadores de celulosa los puntos con halo transparente (Teather y Wood, 1982).

### **Microrganismos fijadores de nitrógeno de vida libre (Diazótrofos)**

Los microorganismos fijadores de nitrógeno de vida libre, o también llamados fijadores de N atmosférico no-simbióticos, son capaces de utilizar el nitrógeno molecular de la atmosfera para cubrir sus necesidades y lo transforman en compuestos nitrogenados aprovechables por las plantas u otros organismos. Su hábitat es el suelo e incluye especies que forman asociaciones simbióticas no específicas. Se identifican anaeróbicas obligadas o facultativas, aeróbicas obligadas y fotosintéticas. Este grupo incluye bacterias, actinomicetos y cianobacterias y se conocen como fijadores de nitrógeno de vida libre a los géneros *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Beijerinckia* y *Clostridium*, entre otros. Todos fijan nitrógeno y también pueden utilizar amoníaco, urea o nitrato. Se estima que aportan entre 25 y 50 kg de N ha<sup>-1</sup>, anualmente. Se desarrollan en carbohidratos, alcoholes y ácidos orgánicos (Madigan *et al.*, 2004; Mayz-Figueroa, 2004; Rodríguez C. *et al.*, 2005).

Para estos microorganismos se empleó el medio Rennie modificado de acuerdo a Holguin (Holguin *et al.*, 1996). Es un medio que combina componentes químicos excepto nitrógeno e incluye manitol para favorecer *Azotobacter*, biotina y ácido p-aminobenzoico para *Bacillus* sp.

A partir de los siguientes reactivos, se preparan las soluciones por separado y se ajusta el pH de la solución A en 7 antes de esterilizar. La biotina y el ácido p-aminobenzoico se esterilizan por filtración y se agregan a la solución B cuando se enfría y después se mezcla con la solución A. En seguida se puede verter la solución final en cajas Petri. Las cajas se incubaron a 28 °C, una vez sembradas con las muestras.

Cantidades para preparar un L de medio de cultivo:

Reactivo	Cantidad	Reactivo	Cantidad
Solución A		Solución B	
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.20 g	MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0.20 g
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.80 g	CaCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	0.06 g
NaCl <sub>2</sub>	0.10 g	Agua destilada	100 mL
Na <sub>2</sub> Fe EDTA	0.014 g	Biotina	5 µL
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	0.025 g	Ácido <i>p</i> -aminobenzoico	10 µL
Manitol (polvo)	5.00 g		
Extracto de levadura	0.10 g		
Sacarosa	5.00 g		
Lactato de sodio (60% v/v)	0.50 mL		
Agua destilada	900 mL		
Agar	15.00 g		

### Sideróforos

Microorganismos aerobios requieren hierro para sus funciones metabólicas como la síntesis de ATP y otras esenciales, dada la limitante de la disponibilidad de este elemento en presencia de oxígeno, muchos de estos, sintetizan sideróforos para formar quelatos con el hierro presente en el suelo en forma de Fe<sup>3+</sup> y transformarlo en su forma soluble Fe<sup>2+</sup>. Los sideróforos son agentes quelatantes (hidroximatos y catecoles) específicos del ion férrico de bajo peso molecular elaborados por microorganismos que se desarrollan en ambientes donde el hierro es limitante (Chu *et al.*, 2010; Neilands, 1995).

Para identificar la presencia de microorganismos productores de sideróforos, se siguió el procedimiento de Brian (Brian *et al.*, 2011) al cual se le realizaron modificaciones.

En primer término los materiales a usar se lavaron con una solución de ácido sulfúrico al 10% (v/v) y se enjuagaron con agua bidestilada (ddH<sub>2</sub>O).

Se preparó la solución colorante de la siguiente manera:

Solución 1. - Se mezcló 0.06 g de cromo azurol (CAS, Fluka Chemicals) en 50 mL de H<sub>2</sub>O bidestilada.

Solución 2. – 0.0027 g de  $\text{FeCl}_3 - 6 \text{H}_2\text{O}$  en 10 mL de HCl 10 mM.

Solución 3. – 0.073 g de HDTMA en 40 mL de  $\text{H}_2\text{O}$  bidestilada.

Se procedió a mezclar la solución 1 con 9 mL de la solución 2 y se le agregó la solución 3. La mezcla final adquiere un tono azul.

La modificación del procedimiento consistió en cambiar el medio de cultivo, el cual se preparó con Caldo Nutritivo y Agar (Merck) de acuerdo a las indicaciones del producto.

La relación de medio de colorante y medio de cultivo es de 133.33 mL por L de medio de cultivo, 100 mL por 750 de medio de cultivo, el cual se mezcló posterior a la esterilización.

Las cajas inoculadas se incubaron a 28°C por 48 horas, una vez sembradas las muestras. Se consideró como productores de sideróforos los puntos que presentaron halo anaranjado.

### **Microorganismos desarrollados en diferentes fuentes de carbono.**

Las placas Biolog EcoPlate se crearon para estudios de ecología y comunidades microbianas, consta de 31 fuentes de carbono (**Cuadro 5**) e incluye un pozo con agua, en total tres repeticiones por placa que dan un total 96 pozos con colorante tetrazolio que al reducirse adquiere un color violeta que indica la degradación de las fuentes de carbono exclusivamente (Garland y Mills, 1991).

El uso del espectrofotómetro se fundamenta en la técnica de turbidimetría, por la cual se mide la densidad óptica de los microorganismos directamente relacionada con la cantidad que hay de estos en una muestra e inversamente relacionada con la cantidad de luz que pasa a través de la muestra (Ramírez G. *et al.*, 2013). Placas de Biolog EcoPlate™ se inocularon con 100  $\mu\text{L}$  de la dilución  $10^{-3}$  de los lodos residuales y compost. Se utilizó una muestra por placa, en la cual ya se incluyen tres repeticiones. Se incubó a 28 °C y se tomó la lectura de absorbancia en espectrofotómetro (Biotek, modelo synergy 2, complementado con el programa Gen5) cada 24 h por 6 días.

Para el análisis de los resultados, se hizo un cálculo del desarrollo de color por cada fuente de carbono restándole el valor de la densidad óptica (OD) del pozo que contiene agua y se aplicó la fórmula del índice de Shannon-Weaver que se aplica para calcular la diversidad de organismos (Tian *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2013):

$$AWCD = \sum_{i=1}^s \frac{OD_i}{n}$$

$$H = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$$

s = Representa el valor individual de cada fuente de carbono (pozo)

n = Fuentes de carbono totales (31)

OD = Densidad óptica en el pozo *i*

H = Índice de Shannon-Weaver

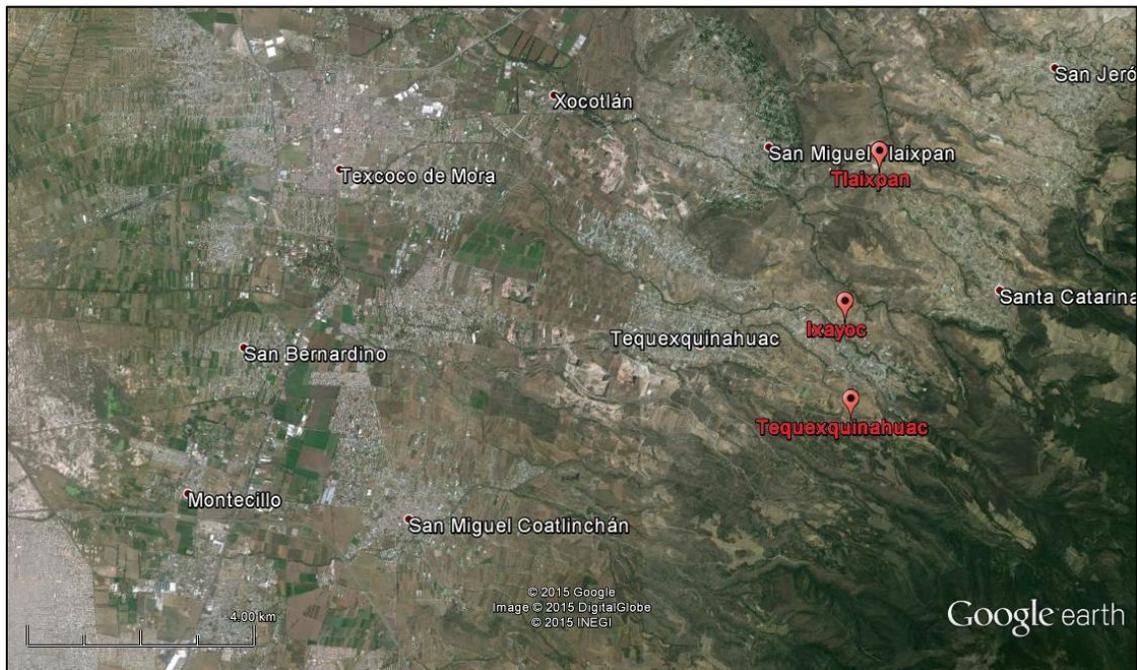
P<sub>i</sub> = Valor que representa el cambio de color del sustrato *i*

**Cuadro 5.** Fuentes de carbono en la placa Biolog EcoPlate (fuentes carbono en idioma inglés, tal y como las cita el fabricante en el Programa Gen5).

A1 Water	A2 β-Methyl-D-Glucoside	A3 D-Galactonic Acid	A4 L-Arginine
B1 Pyruvic Acid Methyl Ester	B2 D-Xylose	B3 D-Galacturonic Acid	B4 L-Asparagine
C1 Tween 40	C2 i-Erythritol	C3 2-Hydroxy Benzoic Acid	C4 L-Phenylalanine
D1 Tween 80	D2 D-Mannitol	D3 4-Hydroxy Benzoic Acid	D4 L-Serine
E1 α-Cyclodextrin	E2 N-Acetyl-D-Glucosamine	E3 γ-Hydroxybutyric Acid	E4 L-Threonine
F1 Glycogen	F2 D-Glucosaminic Acid	F3 Itaconic Acid	F4 Glycyl-L-Glutamic Acid
G1 D-Cellobiose	G2 Glucose-1-Phosphate	G3 α-Ketobutyric Acid	G4 Phenylethyl-amine
H1 α-D-Lactose	H2 D,L-α-Glycerol Phosphate	H3 D-Malic Acid	H4 Putrescine

## Fase IV. Etapa de campo

Se realizó un experimento de aplicación de materiales orgánicos al suelo a fin de evaluar el crecimiento de la avena y los cambios físicos y químicos debidos a los tratamientos. El experimento se llevó a cabo en Texcoco, México (Figura 3), en tres localidades localizadas en el pie de monte de la Sierra Quetzaltepec (INEGI, 2002) , se reconocen la presencia de lomeríos como topoformas dominantes.



**Figura 3.** Ubicación de los sitios experimentales (Imagen de satélite, Google earth 2015)

### Descripción de los sitios experimentales

En San Pablo Ixayoc el sitio se localizó en un terreno agrícola que se trabaja desde hace treinta años aproximadamente. Está ubicado en un terreno con pendiente, por lo que se acondicionó con terrazas y vegetación en el borde de cada terraza. Las terrazas se destinan a la siembra de milpa (Maíz-frijol-calabaza) y flores de cempasúchil y nube,

entre otros cultivos. Se labora año con año y se le hacen aportaciones frecuentes de estiércol bovino (Figura 4).



**Figura 4.** Sitio experimental San Pablo Ixayoc.

El sitio Tequexquihuac es un área con relictos de bosque de pino encino con pendiente. El suelo es un tepetate expuesto donde se desarrollan plantas espontaneas y en el cual se realizan labores ocasionales para el control de la erosión. Se han establecido zanjas y se ha reforestado con cipreses (Figura 5).



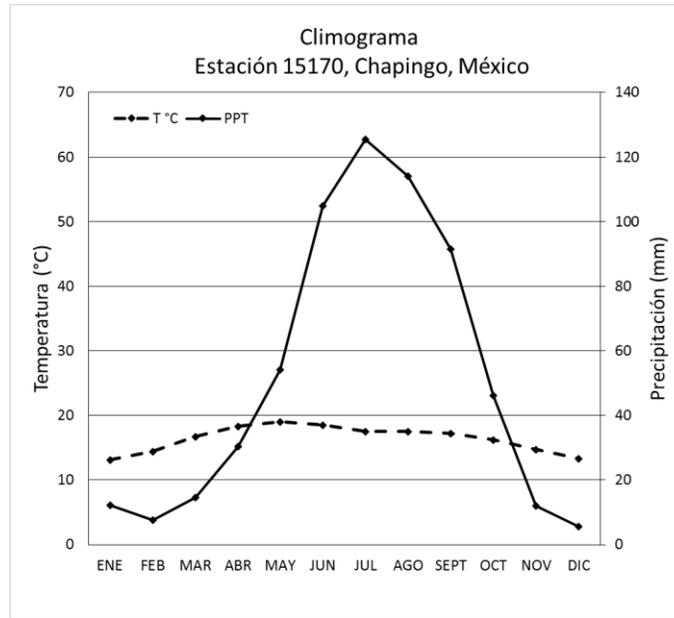
**Figura 5.** Sitio experimental Tequexquihuac

En San Miguel Tlaixpan se trabajó en un terreno agrícola acondicionado con terrazas para el control de la erosión con presencia de vegetación espontánea en el borde de la terraza para contrarrestar el efecto de la pendiente en el proceso de degradación. El suelo es tepetate con abundancia de piedras de entre 5 y 10 cm de diámetro las más frecuentes. En la terraza elegida se siembra ocasionalmente haba, avena u otras gramíneas forrajeras. El manejo para mejorar la fertilidad es limitado (Figura 6).



**Figura 6.** Sitio experimental San Miguel Tlaixpan

El clima es del tipo templado subhúmedo con lluvias en verano (C (w<sub>2</sub>) (w) b (i')) (García, 1968; García, 1981). Con temperatura media anual de 16.4, y 618.5 mm de precipitación media anual. El periodo de lluvias se extiende de abril a octubre (Figura 7) (CONAGUA, 2015).



**Figura 7.** Climograma con datos de las Normales climatológicas de la estación Chapingo (15170).

La textura y el pH de los tres sitios experimentales son similares y se muestran en el cuadro 6. Las propiedades físicas, químicas de los suelos se analizarán posteriormente.

**Cuadro 6.** Características del tepetate en los sitios experimentales

	Ixayoc	Tequexquihuac	Tlaixpan
<b>Textura</b>	Franco	Franco arcilloso	Franco
<b>pH (1:5)</b>	7.5	7.3	7.6

### Establecimiento del experimento

Se establecieron 8 tratamientos con tres repeticiones totalmente al azar en lotes de 0.25 m<sup>2</sup> en tres sitios, dos en terrenos cultivados en San Miguel Tlaixpan y San Pablo Ixayoc y uno en terreno no cultivado en Tequexquihuac (Cuadro 7).

**Cuadro 7.** Tratamientos establecidos.

<b>Clave del tratamiento</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>Dosis de material orgánico</b>	<b>Planta</b>
		(t de materia seca ha <sup>-1</sup> )	
TSP	Testigo sin planta	0	Arvenses
TCP	Testigo con planta	0	Avena + Arvenses
S3	Lodo de Santiaguito	3	Avena + Arvenses
S5	Lodo de Santiaguito	5	Avena + Arvenses
L3	Lodo de Chalco	3	Avena + Arvenses
L5	Lodo de Chalco	5	Avena + Arvenses
C3	Compost	3	Avena + Arvenses
C5	Compost	5	Avena + Arvenses

### **Preparación del terreno**

El terreno se preparó con pala recta y se marcaron con estacas e hilo las parcelas (unidades experimentales). El suelo se removió hasta una profundidad de 20 cm. Se niveló y se integró la enmienda orgánica correspondiente. Los tratamientos testigo se prepararon de la misma forma, sin embargo, en éstos no se aplicó enmienda orgánica alguna.

Los tratamientos se establecieron el 1, 2 y 22 de abril de 2014 (San Pablo Ixayoc, Tequexquinahuac y San Miguel Tlaixpan, respectivamente). Se sembró avena (*Avena sativa* L.) de la variedad Karma (16 de mayo de 2014 para los 3 sitios). La densidad de siembra utilizada fue de 490 kg ha<sup>-1</sup> de semilla, se distribuyó al voleo sobre la superficie, se cubrió con una ligera capa de tierra. La planta permaneció en el terreno hasta completar su desarrollo. Se cosechó a los 102 días después de la siembra. Las labores culturales incluyeron el deshierbe antes de la siembra de avena y riego ligero al momento de la siembra.

En el periodo de desarrollo del experimento, se registró una precipitación de 614.4 mm desde el 1 de abril, fecha de aplicación de enmiendas hasta el 26 de agosto, fecha de cosecha de la planta.

### **Variables a evaluar**

Transcurrido el experimento se colectaron muestras de suelo de los sitios experimentales para evaluar las diferencias en las propiedades físicas y químicas que se identificaron y que son atribuibles a los tratamientos y se cosechó la parte aérea de la avena sembrada.

### **Colecta de muestras de tepetate**

El suelo se muestreó con una barrena tipo Riverside. Se excavó en todas las áreas de los tratamientos para la toma de muestras alteradas. Por cada tratamiento se introdujo dos veces la barrena para sacar suficiente muestra. Las muestras de suelo se tomaron a dos profundidades, 0 a 10 y de 10 a 20 cm y se colocaron en bolsas de polietileno con sus respectivas etiquetas.

### **Preparación de muestras en el laboratorio**

Las muestras se secaron a la sombra hasta reducir la humedad. Posteriormente se trituraron con mortero y se pasaron por un tamiz con malla de 2 mm de apertura. El peso requerido para cada análisis se determinó en una balanza analítica. Se hizo uso de reactivos de grado analítico.

### **Análisis físicos**

Las propiedades físicas e hidrológicas de los suelos con o sin tratamiento fueron, textura, densidad aparente, humedad a capacidad de campo y a punto de marchitamiento permanente y conductividad hidráulica. El análisis de textura se realizó con el método de

la pipeta americana, descrito con anterioridad ya que se aplicó a los lodos y compost para caracterizarlos.

### **Densidad aparente (Da)**

La densidad aparente se refiere a la cantidad de masa de sólidos que existe por unidad de volumen total de suelo y varía de acuerdo al manejo dado al mismo. La densidad aparente se usa para estimar la compactación, porosidad total, micro y macro porosidad (Gandoy B., 1991). Es el cociente entre la masa del suelo, incluida el agua que contiene  $M$  y el volumen que ocupa,  $V$ . Se expresa en  $Mg\ m^{-3}$ ,  $kg/m^{-3}$  o  $g\ cm^{-3}$  (Sánchez-Girón R., 1996).

$$Da = \frac{M}{V}$$

Se usó el método de la parafina, que consiste en seleccionar un agregado, de aproximadamente tres cm de diámetro, al que se le coloca un hilo delgado de forma que se pueda suspender en el aire y se le hace un nudo en el extremo. De este terrón se le determina el peso ( $Pta$ ) y posteriormente se sumerge en parafina líquida ( $0.90\ g\ mL^{-1}$ ) a  $60^{\circ}C$ , de forma rápida, para que se forme una película delgada y uniforme y se dejan secar. En caso de observar poros en la película, se sumerge una vez más y se determina el peso del agregado con la parafina ( $Ppa$ ). Al final se determina el peso del terrón parafinado sumergido en agua ( $Ppw$ ), para lo cual se hace uso de una base que se coloca sobre el platillo de la balanza para suspender el agregado con parafina dentro de un recipiente con agua destilada. Dado que al momento de coleccionar las muestras el suelo estaba saturado, al secarse se formaron los agregados que se usaron para este procedimiento.

Para las muestras que no tenían terrón, se empleó la técnica de la probeta que consiste en pesar 50 g de suelo tamizado ( $m$ ) en malla con 2 mm de apertura, colocarlo en una probeta de 100 mL, identificar el volumen y golpearla 40 veces sobre una superficie de madera cubierta con un paño húmedo y al cabo se determina nuevamente el volumen ( $v$ ).

$$Da = \frac{m}{v} ; \quad m\ terron = Pta; \quad Pt = Pta / (1 + (P/100));$$

$$V\ agregado = Ppa - (Ppw + v\ parafina); \quad v\ parafina = (Pta - Ppa)/0.89$$

Da	= Densidad aparente	Ppw	= Peso del terrón parafinado en agua
m	= Masa del agregado (Pt)	0.89	= Densidad de la parafina
V	= Volumen del agregado	Pt	= Peso del agregado seco
Pta	= Peso del terrón al aire	P	= Porcentaje de humedad gravimétrica
Ppa	= Peso del terrón parafinado al aire		

### Capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente

La capacidad de campo (CC) y el punto de marchitamiento permanente (PMP) son propiedades hidrológicas del suelo relacionados con la textura (Valverde, 2007) que permiten calcular la humedad aprovechable (HA). La capacidad de campo corresponde al grado de humedad de un suelo que después de saturado se drena por la fuerza de gravedad, mientras que el punto de marchitez permanente es el volumen de agua contenida en los poros que las raíces de las plantas no pueden extraer (Martínez A., *et al.*, 2005).

La prueba de laboratorio se realizó por medio de sistemas de presión (Gandoy B., 1991) con muestra tamizada con malla de 2 mm de apertura. En la olla y membrana de presión a 0.3 y 15 atm respectivamente, se coloca una porción de aproximadamente 20 g de muestra en anillos de hule de tal forma que se llene el anillo y se forme un montículo. Se colocan un número aproximado de 20 muestras en cada membrana, se saturan con agua destilada y se dejan reposar 24 h. Al día siguiente se elimina el exceso de agua antes de colocar en la membrana y olla y se disponen para mantener la presión de 0.3 atm para capacidad de campo y 15 atm para punto de marchitamiento permanente.

Después de 48 h se sacan de las ollas y se colocan las muestras en cajas metálicas con tapa, se determina el peso y se meten al horno de secado a 105°C durante 48 h para determinar el peso en seco. El cálculo se realiza usando las siguientes formulas:

$$CC = \frac{PSH-PSS}{PSS} \times 100 \quad ; \quad PMP = \frac{PSH-PSS}{PSS} \times 100$$

CC	= Capacidad de campo en porcentaje, con base en suelo seco.
PMP	= Punto de marchitez permanente en porcentaje con base en suelo seco.
PSH	= Peso de suelo húmedo.
PSS	= Peso de suelo seco.

## Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica se define como la velocidad del flujo que se presenta en un medio saturado, que depende de las características del suelo y del fluido y se expresa en forma cuantitativa. Puede determinarse en el campo o en laboratorio con muestras alteradas o inalteradas, saturadas o insaturadas (Montenegro y Malagon, 1990). La forma más común de determinarla es con muestras tamizadas (< 2 mm) debido a la facilidad de obtener las muestras y la repetición de las condiciones que permitan comparar datos (Loveday, 1974).

La muestra de suelo se colocó en cilindros de PVC en cantidad suficiente para llenar el cilindro, se tamizó previamente en malla de 2 mm de apertura. Para disminuir el aire se compacto con ligeros golpes en el costado del cilindro. Los cilindros cuentan con base y tapa de acrílico, la base presenta un orificio para drenar y la tapa con dos orificios, uno en un costado para conectarla al flujo de agua y uno superior para liberar el aire, son de 5 y 10 cm de altura y 7 cm de diámetro. Después de llenar los cilindros, se toma lectura de la altura de la columna de suelo y se coloca la tapa. Se conecta la tapa del cilindro al flujo de agua, se abre la llave y se mantiene abierta hasta estabilizar el flujo de la base. Para las lecturas, con probeta se determinó el volumen que se captó en vasos de precipitados en intervalos de 5 min. Se tomaron varias lecturas y para determinar la conductividad hidráulica, se empleó la siguiente ecuación:

$$K = Vol/t \times A \times i$$

- K = Conductividad hidráulica (mm hr<sup>-1</sup>)
- Vol = cm<sup>3</sup> de agua medidos
- t = Tiempo en horas para obtener el volumen medido.
- A = Área del cilindro en cm<sup>2</sup>.
- i = Gradiente igual a H/L.
- H = Longitud total de la columna del suelo (suelo más la carga de agua en cm).
- L = Longitud de la columna de suelo.

## Análisis químicos

Los procedimientos empleados para conductividad eléctrica, nitrógeno, carbono orgánico, fósforo y EPTs, son los mismos que se usaron para los lodos residuales, descritos con anterioridad. A parte, para definir las características del tepetate, se midió el pH de la misma forma que se realizó para los lodos y compost.

### **Determinación de nitratos con la técnica de colorimetría**

Los nitratos son compuestos nitrogenados simples que se encuentran como iones en la disolución del suelo y junto con el amonio y nitritos, representan menos del 2% del nitrógeno total. Plantas y microorganismos asimilan nitrógeno en forma de nitratos. La degradación de la materia orgánica por microorganismos libera nitrógeno en forma de aminas y aminoácidos que por procesos enzimáticos se transforma en compuestos amónicos y una fracción de estos se oxidan a nitratos durante el proceso llamado nitrificación (Navarro B. y Navarro G., 2003).

Para el análisis de las muestras se retomó el procedimiento de Cataldo *et al*, (1975) con modificaciones realizadas por Robarge *et al.*, (1983).

Se empleó una solución de suelo relación 1:2, consistente de 10 g de suelo con 20 mL de agua destilada, que fue depositada en tubos Falcon con capacidad de 50 mL. Se agitaron las muestras en agitador de vaivén por un lapso de una h (los tubos se acomodaron en dirección del movimiento de agitación) y se procedió filtrar con papel Whatman #42. Del extracto filtrado se tomó una muestra de 0.2 mL con una micropipeta y se depositó en tubos de ensayo de 50 mL. Se le adicionó 0.8 mL de mezcla de ácido sulfúrico con ácido salicílico (Solución de ácido salicílico al 5% p/v, en ácido sulfúrico concentrado) con micropipeta y 19 mL de solución de hidróxido de sodio 2N con dispensador automático. Las muestras se mantuvieron a temperatura ambiente por 20 min y se determinó la absorbancia a 410 nm, para lo que se empleó un espectrofotómetro Thermo Electron Corporation modelo Genesys 10 UV. Como referencia se preparó una curva de concentraciones conocidas de nitratos con  $\text{KNO}_3$ .

El cálculo se efectuó con la siguiente ecuación:

$$NO_3(mg\ kg^{-1}) = \frac{\text{absorbancia} - \text{ordenada}}{\text{pendiente} \times \text{alícuota}}$$

### **Rendimiento de biomasa aérea**

Concluido el ciclo de la avena, la parte aérea se colectó completa haciendo un corte desde la base a nivel del suelo. Se depositaron en bolsas de papel y se etiquetaron. De la misma forma se procedió con las plantas espontaneas. Se realizaron deshierbes y estas plantas se procesaron para determinar biomasa.

En laboratorio se enjuagaron con agua corriente y después dos veces con agua destilada (Salinas y García, 1985). Se fragmentaron y se colocaron en bolsas limpias perforadas para después colocarlas en el horno de secado con extracción de aire forzado a 65°C durante 48 h.

Las muestras se pesaron sin bolsa para determinar la biomasa total para lo que se consideró el peso de la planta secada en el horno sin la raíz.

### **Análisis estadístico**

Para analizar las variables de respuesta a los tratamientos, se empleó un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de diferencia mínima significativa (LSD) con el software Statistical Analysis System (SAS) versión 9.0.

## REFERENCIAS

- Álvarez-Benedí, J. y Muñoz-Carpena, R. eds., 2005. Soil-Water-Solute Process. Characterization: An integrated approach. Boca Raton(Florida): CRC Press.
- Ausina R., V. y Moreno G., S., 2006. Tratado SEIMC de enfermedades infecciosas y microbiología clínica. Buenos Aires: Editorial Médica Panamericana.
- Beeching, N. y Geoff, G. eds., 2014. Lecture notes: Tropical medicine. 7th ed. s.l.:John Wiley and Sons.
- Beyer, H. y Walter, W., 1987. Manual de química orgánica. España: Reverté.
- Blair F., E., 1965. Manual de riegos y avenamiento. Bogotá: Incora.
- Brevik, E., 2013. Soils and human health. An overview. En: E. C. Brevik y L. C. Burgess, eds. Soils and human health. Boca Raton: CRC Press.
- Brian, C. L., Haarmann, D. y Lynne, A. M., 2011. Use of blue agar CAS assay for siderophore detection. *Journal of Microbiology & Biology Education*, 12(1):51-53.
- Brown, G. H. y Sallee, E. M., 1977. Química cuantitativa. Barcelona: Reverté.
- Carter, M. R. y Gregorich, E. G. eds., 2007. Soil sampling and methods of analysis. Segunda ed. Boca Raton(Florida): CRP Press.
- Castillo R., F. *et al.*, 2005. Biotecnología ambiental. Madrid: Editorial Tébar.
- Cataldo, D. A., Haroon, M., Schrader, L. E. y Youngs, V. L., 1975. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 6(1):71-80.
- Chen, F. *et al.*, 2013. Changes in soil microbial community structure and metabolic activity following conversion from native *Pinus massoniana* plantations to exotic *Eucalyptus* plantations. *Forest Ecology and Management*, 291:65-72.
- Chitwood, B. G. y Chitwood, M. B., 1974. Introduction to nematology. Segunda ed. Baltimore: University Park Press.
- Chu, B. C. *et al.*, 2010. Siderophore uptake in bacteria and the battle for iron with the host; a bird's eye view. *Biometals*, 23:601-611.
- Cook, F. J., Threlfall, E. J. y Wain, J., 2007. Current trends in the spread and occurrence of human salmonellosis: molecular typing and emerging antibiotic resistance. En: M. Rhen, ed. *Salmonella: Molecular biology and pathogenesis*. Great Britain: Horizon Bioscience, pp. 1-29.
- CONAGUA, 2015. Normales climatológicas. Comisión Nacional del Agua. Consulta realizada el 19 de enero de 2015 en

<[http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=42&Itemid=75](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75)>

- Cruz V., M., 2014. La contaminación y gestión de la contaminación proveniente de los procesos industriales. En: Introducción a la ingeniería industrial. México: Grupo Editorial Patria, p. 384.
- Gandoy B., W., 1991. Manual de laboratorio para el manejo físico de suelos. Chapingo: Universidad Autónoma Chapingo.
- García, E., 1968. Los climas del Valle de México según el sistema de clasificación climática de Köeppen modificado por la autora. Chapingo: Colegio de Postgraduados, SARH.
- García, E., 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen: para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. Tercera ed. México: UNAM.
- Garland, J. L. y Mills, A. L., 1991. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level sole-carbon-source utilization. *Applied and Environmental Microbiology*, 57(8):2351-2359.
- Gómez C., G. y Corlay C., L., 2010. Microbiota edáfica y su importancia en la agricultura. En: Microbiología agrícola: hongos, bacterias, micro y macrofauna, control biológico y planta-microorganismo. México: Trillas, p. 568.
- Guarnera, E. A., 2013. Aspectos esenciales de la interfase de las zoonosis parasitarias. Buenos Aires: Dunken.
- Harrigan, W. F. y McCance, M. E., 1979. Métodos de laboratorio en microbiología de alimentos y productos lácteos. León: Editorial Academia.
- Henry, J. G. y Heinke, G. W., 1999. Ingeniería Ambiental. Segunda ed. Naucalpan de Juárez (México): Prentice Hall.
- Herrera, T. y Ulloa, M., 1998. El reino de los hongos: micología básica y aplicada. Segunda ed. México: FCE, IB, UNAM.
- Holguin, G., Bashan, Y. y Ferrera-Cerrato, R., 1996. Interacciones entre plantas y microorganismos benéficos: III. Procedimientos para el aislamiento y caracterización de hongos micorrizicos y rizobacterias promotoras de crecimiento en plantas. *Terra*, 14(2):211-227.
- Incropera, F. P. y De Witt, D. P., 1999. Fundamentos de transferencia de calor. Cuarta ed. Naucalpan, México: Prentice Hall.

- INEGI, 2002. Estadísticas del medio ambiente del Distrito Federal y Zona Metropolitana 2002. Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Jackson, M., 1976. Análisis químico de suelos. Tercera ed. Barcelona: Ediciones Omega.
- Jiménez C., B. E., 2001. La contaminación ambiental en México. causas efectos y tecnología apropiada. D. F., México: Limusa.
- Jiménez, B., 2009. Helminth ova control in wastewater and sludge for agricultural reuse. En: W. O. K. Grabow, ed. Encyclopaedia of biological, physiological and health sciences, Water and health. Oxford: UNESCO/EOLSS, pp. 429-449.
- Loveday, J., 1974. Methods for analysis of irrigated soils. Victoria: Commonwealth Agricultural Bureaux.
- Madigan, M. T., Martinko, J. M. y Parker, J., 2004. Brock biología de los microorganismos. Decima ed. Madrid: Pearson Educacion.
- Margesin, R. y Schinner, F. edits., 2005. Manual of Soil Analysis - Monitoring and Assessing Soil Bioremediation. Berlin: Springer.
- Martínez A., P. E., Martínez S., P. y Castaño C., S., 2005. Fundamentos de hidrogeología. Madrid: Mundi-Prensa.
- Mayz-Figueroa, J., 2004. Fijación biológica del nitrógeno. Revista UDO Agrícola, 4(1):1-20.
- McKinney, R. E., 2004. Environmental pollution control microbiology. New York: CRC Press.
- Montenegro, G. H. y Malagon, C. D., 1990. Propiedades físicas de los suelos. Bogotá: Instituto Geográfico "Agustin Codazzi", Secretaría de Hacienda y Crédito Público.
- Navarro B., S. y Navarro G., G., 2003. Química agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Segunda ed. Madrid: Mundi-Prensa.
- Neilands, J. B., 1995. Siderophores: structure and function of microbial iron transport compounds. The Journal of Biological Chemistry, 270(45):26723-26726.
- Norambuena V., P., Luzio L., W. y Vera E., W., 2002. Comparación entre los métodos de la pipeta y Bouyoucus y su relación con la retención de agua en ocho suelos de la zona altiplánica de la Parinacota, Chile. Agricultura Técnica, 62(1):150-157.
- Olivas E., E., 2004. Manual de prácticas de microbiología I, II y parasitología: Programa de medicina. Ciudad Juárez: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
- Organización Mundial de la Salud ed., 2005. Evaluaciones de riesgos de salmonella en huevos y pollos para asar: resumen interpretativo. Roma: Food & Agriculture Organization.

- Prats, G., 2005. Microbiología clínica. Madrid: Editorial Médica Panamericana.
- Ramírez A., G., 1998. Manual de enfermedades infecciosas. Segunda ed. San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Ramírez G., R. M. *et al.*, 2013. Cuantificación de microorganismos. En: R. M. Ramírez G., ed. Manual de prácticas de microbiología general. D. F. México: Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 147-178.
- Robarge, W. P., Edwards, A. y Jhonson, B., 1983. Water and waste water analysis for nitrate via nitration of salicylic acid. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 14(12):1207-1215.
- Rodríguez C., E., Gamboa C., M. d. M., Hernández C., F. y García H., J. D., 2005. Bacteriología general: principios y prácticas de laboratorio. San José: Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- Rodríguez, H. y Fraga, R., 1999. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances*, 17:319-339.
- Romero C., R., 2007. Microbiología y parasitología humana. Bases etiológicas de las enfermedades infecciosas y parasitarias. Tercera ed. México: Editorial Médica Panamericana.
- Rowell L, D., 1994. Soil science: methods & applications. New York: Pearson Education Limited.
- Salinas, J. G. y García, R., 1985. Métodos químicos para el análisis de suelos ácidos y plantas forrajeras. Cali, Colombia: Centro Internacionak de Agricultura Tropical.
- Sánchez-Girón R., V., 1996. Dinámica y mecánica de suelos. Madrid: Ediciones Agrotécnicas S.L.
- Schlegel, H. G. y Zaborosch, C., 1997. Microbiología general. Barcelona, España: Ediciones Omega.
- SEMARNAT, 2003. Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Diario Oficial de la Federación, 15 Agosto, pp. 18-60.
- Sindhu, S. S., Phour, M., Choudhary, S. R. y Choudhary, D., 2014. Phosphorus Cycling: prospects of using rhizosphere microorganisms for improving phosphorus nutrition of plants. En: N. Parmar y A. Singh, edits. *Geomicrobiology and biogeochemistry*. s.l.:Springer, pp. 199-238.
- Skoog, D. A. y West, D. M., 1986. Introducción a la química analítica. Sevilla: Reverté.
- Smith, K. A. ed., 1991. Soil analysis; modern instrumental techniques. 2nd ed. New York: Marcel Dekker.

- Teather, R. M. y Wood, P. J., 1982. Use of congo red-polysaccharide interactions in enumeration and characterization of cellulolytic bacteria from bovine rumen. *Applied and Environmental Microbiology*, 43(4):777-780.
- Tian, Y., Zhang, X., Wang, J. y Gao, L., 2013. Soil microbial communities associated with the rhizosphere of cucumber under different summer cover crops and residue management: A 4-year field experiment. *Scientia Horticulturariae*, 150:100-109.
- Valverde, J. C., 2007. Riego y Drenaje. San José: EUNED.
- Van Reeuwijk, L. P. ed., 1999. Procedimientos para Análisis de Suelos. 1ª ed Español. Montecillo: Colegio de Postgraduados.
- Varela F., L. y Amora L., E., 2010. Los hongos como componentes de la diversidad del suelo. En: *Microbiología agrícola: hongos, bacterias, micro y macrofauna, control biológico y planta-microorganismo*. México: Trillas, p. 568.
- Wang, J. *et al.*, 2006. Single-step microwave digestion with HNO<sub>3</sub> alone for determination of trace elements in coal by ICP spectrometry. *Talanta*, 68:1584-1590.
- Xian-Zhi, L., 2009. Antimicrobial resistance in Salmonella: features and mechanisms. En: L. S. Giordano y M. A. Moretti, edits. *Salmonella infectios: new research*. New York: Nova Biomedical, pp. 1-44.
- Zaidi, A., Khan, M. S. y Ahmad, E., 2014. Microphos: principles, production and application strategies. En: M. Z. Kahn, A. Zaidi y J. Musarrat, edits. *Phosphate solubilizing microorganisms: principles and application of microphos technology*. s.l.:Springer, pp. 1-30.

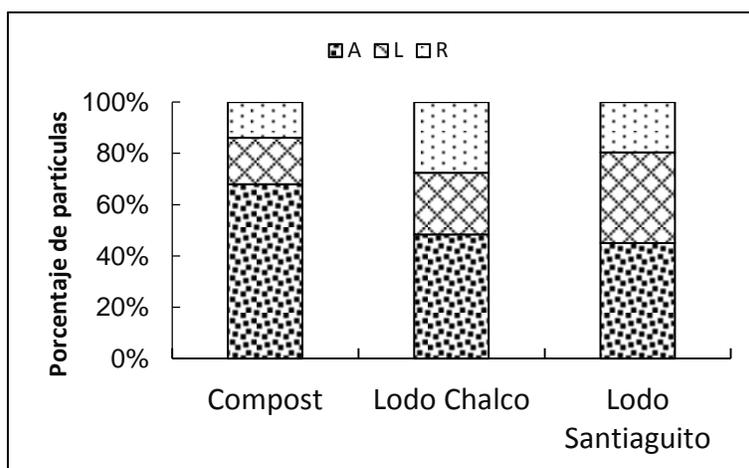
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan los resultados de los análisis físicos, químicos y biológicos realizados a los lodos residuales y compost, así como los cambios en los tepetates por efecto de la aplicación de los materiales orgánicos en sus propiedades físicas, químicas y las diferencias en la producción de fitomasa del cultivo de avena.

### Características de los materiales orgánicos

#### Análisis físicos y químicos

Los lodos, comparados con el compost, presentan un alto porcentaje de humedad, entre los lodos el correspondiente a la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Santiaguito es el que contiene el menor porcentaje de sólidos totales (19 %). En cuanto a proporción de arenas, limos y arcillas, el compost presenta una alta proporción de arenas, 68%; contra 48 y 45 de los lodos de Chalco y Santiaguito, respectivamente (Figura 8); por lo que, al clasificarlos como si se tratara de un suelo, el compost equivale a un suelo franco arenoso, el lodo de Chalco a un franco arcillo arenoso y el de Santiaguito a uno franco (Thompson y Troeh, 1988).



**Figura 8.** Proporción de A) arenas, L) limos y R) arcillas presentes en compost y lodos de Chalco y Santiaguito.

El pH del compost y el lodo de Santiaguito son neutros, no así el de Chalco, que se clasifica como fuertemente alcalino adoptando la terminología para la clasificación de un suelo (Hazelton y Murphy, 2007); no obstante, se encuentra entre los rangos de normalidad para lodos residuales (Singh y Agrawal, 2008) (Cuadro 8).

El contenido de materia orgánica es de 10, 6 y 4.4 en el orden, lodo de Chalco, lodo de Santiaguito y compost (Cuadro 8), lo que representa valores bajos comparando con los reportados para lodos residuales (Singh y Agrawal, 2008) de entre 19 y 43 %. Sin embargo, puede considerarse como rango normal, ya que puede variar considerablemente (Whitacre, 2011).

El contenido de nitrógeno encontrado en el lodo de Chalco, compost y lodo de Santiaguito, varió de 1.16, 1.04 y 0.89%, respectivamente (Cuadro 8); que se clasifican como contenidos pobres para biosólidos, que varían de 1.8 a 4.8 %.

Los niveles de fósforo detectados en las muestras de 0.05 a 0.42%, al igual que los de nitrógeno son bajos ya que se reportan niveles de 1 a 3 %. El potasio para las muestras de compost y lodo de Chalco, se ubican como valores normales que van de 0.2 a 0.4%, no así el de Santiaguito que presenta niveles bajos con 0.04% (Epstein, 2002; Singh y Agrawal, 2008).

**Cuadro 8.** Características físicas y químicas de los materiales orgánicos.

<b>Materiales orgánicos</b>				
<b>Características</b>		<b>Compost</b>	<b>Lodos Chalco</b>	<b>Lodos Santiaguito</b>
Humedad	%	40	168	440
Sólidos totales	%	72	44	19
Textura		Franco arenoso	Franco arcillo arenoso	Franco
pH	(1:5)	7.27	9.00	7.24
CE	(mS cm <sup>-1</sup> )	10.06	34.80	3.92
MO	%	4.47	10.06	6.04
N (Total)	%	1.04	1.16	0.89
P (Total)	%	0.42	0.05	0.16
K (Total)	%	0.37	0.34	0.04

En cuanto al contenido de elementos potencialmente tóxicos (EPTs), los niveles detectados de As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn (Cuadro 9) totales en los lodos y compost, están muy por debajo de los límites establecidos por la NOM-004-SEMARNAT-2002 y la EPA/625/K-95/001, por lo que se consideran materiales de buena calidad para uso agrícola.

**Cuadro 9.** Concentración de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) totales en los materiales orgánicos y límites establecidos en la legislación de México, Estados Unidos y la Unión Europea para su uso en suelo agrícola. NA = No analizado; NE= No especificado; \* Concentración máxima

Característica	Materiales orgánicos			MEX NOM-004- SEMARNAT-2002		USA EPA/625/K- 95/001*	EU 86/278/CE E*
	Compost	Lodos Chalco	Lodos Santiaguito	Clase A	Clase B	Clase A	
As	10	12	10	41	75	75	NE
Cd	12	12	12	39	85	85	40
Cr	22	32	60	1200	3000	3000	NE
Cu	57	55	305	1500	4300	4300	1750
Hg	NA	NA	NA	17	57	57	25
Ni	31	25	40	420	420	420	400
Pb	69	36	75	300	840	840	1200
Zn	218	124	983	2800	7500	7500	4000

## Análisis Biológicos

### Huevos de helmintos

En los materiales analizados no se detectaron huevos de helmintos (Cuadro 10) contrario a lo reportado por Rivera-Vázquez *et al.*, (2007) que encontraron de 1.6 a 5 HH L<sup>-1</sup> en muestras de agua de los ríos Chapingo, San Bernardino y Texcoco en los cuales se vierten aguas de drenaje. Lo que se puede atribuir al tamaño de muestra usado en el procedimiento de concentración (Schuh *et al.*, 1990) o bien, a particularidades de los lodos, ya que en el caso de los de Santiaguito, se colectaron en un estanque de tratamiento primario, con condiciones anaerobias (Cabirol *et al.*, 2002), donde los sólidos

permanecen por temporadas largas; en el caso del lodo de Chalco, el pH es un factor de reducción, razón por la cual se usa cal como tratamiento de lodos (Schuh *et al.*, 1990). El riesgo por la presencia de huevos de parásitos es alto considerando que un solo huevo es suficiente para infectar al hospedero (Andreoli *et al.*, 2007), sin embargo los hábitos sanitarios son decisivos para adquirir la infección, como ejemplo se tiene la rara incidencia de infecciones intestinales por *T. solium* en grupos musulmanes, judíos ortodoxos y vegetarianos que se distinguen por no consumir carne de cerdo (Beeching y Geoff, 2014).

### **Coliformes totales**

Se realizó un conteo de coliformes totales (Cuadro 10), en el cual se detectaron valores superiores a los indicados en la NOM-004-SEMARNAT-2002, que indica los niveles permitidos en lodos destinados a la agricultura. La norma se refiere a coliformes fecales que se distinguen de los totales por su capacidad de los primeros para desarrollarse a  $44.5 \pm 0.5$  °C (Henry y Heinke, 1999). No obstante, su presencia en el suelo puede ser independiente a la aplicación de lodos o alguna otra fuente de coliformes, en particular en suelos de las regiones tropicales, ya que pueden permanecer en suelo siempre que cuenten con alguna fuente de nutrientes (Byappanahalli y Fujioka, 1998), mientras que en suelo con aplicaciones de lodos, estos desaparecen en un plazo menor a cien días, especialmente en condiciones de sequedad del suelo, debido a que estos microorganismos no cuentan con mecanismos de resistencia, y a la competencia con otros microorganismos (García *et al.*, 2003).

### **Salmonela**

También se detectó presencia de salmonela solo en el lodo de la PTAR de Santiaguito, en valores muy por encima de lo marcado por la norma NOM-004-SEMARNAT-2002 (Cuadro 10). Lue-Hing *et al.*, (1995), refieren una concentración mínima de  $0.41 \times 10^4$  UFC g<sup>-1</sup> y una media de  $6.4 \times 10^8$  por gramo de peso seco en lodos provenientes de plantas de tratamiento primario y supervivencia en condiciones de humedad al 20%, pH entre 5.5 a 9, con temperaturas de entre 10 y 45 °C.

En suelo, la salmonela sobrevive por periodos cortos de tiempo, debido a factores como la temperatura, textura (por su influencia en la humedad del suelo) y la presencia de microorganismos nativos. Se ha determinado la supervivencia en suelo en 6 días, lo que no necesariamente se refleja en infecciones en la población. Considerando que la dosis infectiva es de  $10^5$  a  $10^{10}$  organismos, la probabilidad de ingestión de estas cantidades es baja (Lue-Hing *et al.*, 1995), lo que solo ocurre debido al consumo de alimentos y agua contaminados (Romero C., 2007).

La supervivencia de enterobacterias en el suelo se define por las condiciones naturales de un suelo de exposición a la radiación solar, la temperatura ambiente y la precipitación que son adversas a los coliformes, esto aunado al efecto de la materia orgánica que se aporta con los lodos, por su influencia en las propiedades físicas como la porosidad, lo que mejora el paso del agua y del aire y repercute a su vez, en la reducción de microorganismos patógenos (Fuccz-Gamboa *et al.*, 2007) e inclina la balanza en favor de su uso, aun con la certeza que pueden contener bacterias patógenas. Un factor adicional de reducción en el suelo es la presencia de otros microorganismos no patógenos que por mecanismos de competencia por nutrientes, inhibición por antibióticos producidos o bien por predación. Adicionalmente, los límites establecidos por las normas, se modifican para hacerlas menos estrictas para este rubro, debido a la dificultad para cumplir con los criterios. (Dumontet *et al.*, 1999 y Lue-Hing *et al.*, 1995).

## **Bacterias**

De las enmiendas, en el compost se contó una mayor cantidad de bacterias totales 82 unidades formadoras de colonias (UFC)  $g^{-1} \times 10^5$  (Cuadro 10), seguido de los lodos de Santiaguito con 66 y al final los lodos de Chalco con 9 UFC  $g^{-1} \times 10^5$ . La diferencia de los resultados se atribuye a la naturaleza de los materiales, en el caso del compost, se trata de un material poroso con pH neutro, mientras que en los lodos de Chalco el pH es de 9 y los de Santiaguito presentan un elevado contenido de humedad, factores que limitan su supervivencia (Gómez C. y Corlay C., 2010). Lue-Hing *et al.*, (1995), refieren que en un gramo de suelo seco se puede contabilizar un rango de entre 17 y  $35 \times 10^5$  UFC cultivables en agar nutritivo, el valor menor corresponde a un pantano, en el que se

pueden presentar condiciones de humedad similares a los lodos y el mayor a un suelo agrícola potenciado por la labranza y el efecto de la rizósfera de los cultivos.

### **Hongos totales**

En el conteo de hongos (Cuadro 10), el compost obtuvo un valor elevado comparado con los lodos. A razón de 45-3-1 UFC  $g^{-1} \times 10^4$  respectivamente para el compost, lodos Chalco y lodos Santiaguito. Al igual que las bacterias, los hongos prefieren condiciones de pH neutro y aireación, por lo que los lodos que presentan un alto contenido de humedad no son un sustrato que prefieran para desarrollarse (Herrera y Ulloa, 1998; Varela F. y Amora L., 2010). Los hongos son de importancia en el suelo por su función en la cementación de agregados debido el efecto mecánico de polisacáridos extracelulares y la red de micelio que forman (Metzger *et al.*, 1987). El efecto se ve favorecido con la aplicación de materia orgánica fresca que al descomponerse provee sustancias cementantes (Lue-Hing *et al.*, 1995).

### **Actinomicetos**

Los lodos de Chalco fueron los que mostraron mayor contenido de actinomicetos (Cuadro 10), con  $7 \times 10^3$  UFC  $g^{-1}$ , seguido del compost con  $6 \times 10^3$ , mientras que en los lodos de Santiaguito no se detectó su presencia. En cuanto a suelo, los actinomicetos prefieren los secos y cálidos, más que los fríos y húmedos y la superficie más que la profundidad (Lue-Hing *et al.*, 1995), lo que explica los resultados obtenidos. Estos organismos participan en la descomposición de una gran variedad de compuestos nitrogenados y carbonados, y en cultivos artificiales se ha demostrado producen sustancias con efecto antibiótico sobre bacterias y hongos (Lue-Hing *et al.*, 1995), por lo que su presencia en los lodos además de contribuir al enriquecimiento microbiano de los tepetates, resulta útil para controlar enterobacterias aportadas por lodos.

### **Solubilizadores de fosfatos**

En el lodo de Santiaguito se identificó la mayor cantidad de microorganismos solubilizadores de fosfatos (Cuadro 10),  $2 \times 10^4$  UFC  $g^{-1}$  en base seca, mientras que en los lodos de Chalco y el compost el conteo reportó  $1 \times 10^4$ . El resultado confirma lo sugerido por Dévai *et al* (1988) que reportan la presencia de fosfina, un compuesto de fósforo reducido que producen algunas bacterias en presencia de fósforo inorgánico en plantas de tratamiento de aguas, lo que sugiere la presencia de microorganismos con capacidad de solubilizar fosfatos en lodos residuales.

### **Celulolíticos**

Se identificó la presencia de microorganismos degradadores de celulosa en los tres materiales usados como enmienda (Cuadro 10), en mayor cantidad en el lodo de Chalco  $7 \times 10^6$  UFC  $g^{-1}$  seguido por el compost con 4 y el sustrato más pobre fue el lodo de Santiaguito en el que solo se identificó 1. Comparativamente, se considera un valor bajo, considerando que el recuento en un compost en su etapa final de fermentación (113 días) fue de  $100 \times 10^6$  UFC  $g^{-1}$  (Pepe *et al.*, 2013), no obstante, dado que el conteo en el compost utilizado es similar, se considera que los lodos presentan abundancia de este grupo microbiano.

### **Fijadores de nitrógeno de vida libre**

En compost se identificó el número más alto con  $15 \times 10^4$  UFC  $g^{-1}$  (Cuadro 10), seguida de los lodos de Chalco y en los lodos de Santiaguito el valor más bajo. El resultado puede indicar la dominancia de microorganismos facultativos en compost (Stewart, 1975). El conteo en compost resulta bajo comparado con una compost en su etapa final de fermentación, no obstante considerando lo que reporta Santamaría-Romero *et al.*, (2001), de la disminución de estos microorganismos en un 71 % con respecto al inicio del proceso. Existe la posibilidad de que durante el almacenamiento estas poblaciones continúen su decaimiento, tal sería el caso del compost evaluado.

## Sideróforos

El conteo más alto de células productoras de sideróforos se realizó en compost ( $22 \times 10^3$  UFC  $g^{-1}$  Cuadro 10), en segundo lugar la muestra de lodo de Chalco y en la muestra de lodo de la PTAR de Santiaguito se identificó el valor más bajo. Lo que se explica por el carácter aeróbico de los microorganismos que producen estos quelatos (Catfield *et al.*, 2005).

Los resultados en general, muestran que en cuanto a huevos de helmintos detectados, no hay diferencia entre los lodos y compost. En cuanto a organismos enteropatógenos que incluye coliformes totales y salmonella, se detectaron en mayor cantidad en los lodos de Santiaguito, mientras que por grupo taxonómico, se identificó una mayor cantidad de bacterias totales y hongos en compost, mientras que los actinomicetos abundaron en mayor cantidad en los lodos de Chalco. En cuanto a grupos funcionales, en compost prevalecen fijadores de nitrógeno de vida libre (FLN) y bacterias productoras de sideróforos, en los lodos de Chalco imperan celulolíticos y degradadores de fuentes de carbono y los de Santiaguito destacan por la presencia de solubilizadores de fosfatos.

**Cuadro 10.** Características biológicas de los materiales orgánicos. HH= huevos de helmintos, CT= coliformes totales, S= salmonella, BT= bacterias totales, H= hongos totales, A= actinomicetos, SP= solubilizadores de fosfatos, C= celulolíticos, FLN= fijadores de nitrógeno de vida libre, SD= sideróforos, DC= Diversidad de degradadores de compuestos carbonados medidos con el índice de Shannon-Weaver. IS-W= índice de Shannon-Weaver. \*NMP  $g^{-1}$  (peso seco) para la clase A,  $\infty$  por  $g$  de lodo seco,  $\ast < 1$  en  $4 g$  de lodo seco.  $\bullet < 3$  en  $4 g$  lodo seco,

Característica	Enmienda	MEX			USA	EU			
		NOM-004-SEMARNAT-2002					EPA/625/K-95/001*	(Dumontet et al., 1999)	
		Composta	Lodos Chalco	Lodos Santiagu			Clases		
			A	B	C				
HH	HH $g^{-1}$	< 1	< 1	< 1	< 1	< 10	< 35	< 0.25*	
CT	$x 10^4$	6	0.3	14	< 0.1	< 0.1	< 200	< 0.1	< 0.1
S	$x 10^4$	< 0.01	< 0.01	2	< 3 $\bullet$	< 3 $\bullet$	< 300 $\bullet$	< 3 *	0
BT	$x 10^5$	82	9	66					
H	$x 10^4$	45	3	1					
A	$x 10^3$	6	7	0					
SP	$x 10^4$	1	1	2					
C	$x 10^6$	4	7	1					
FLN	$x 10^4$	15	4	1					
SD	$x 10^3$	22	13	3					
DC	IS-W	3.18	3.8	3.1					

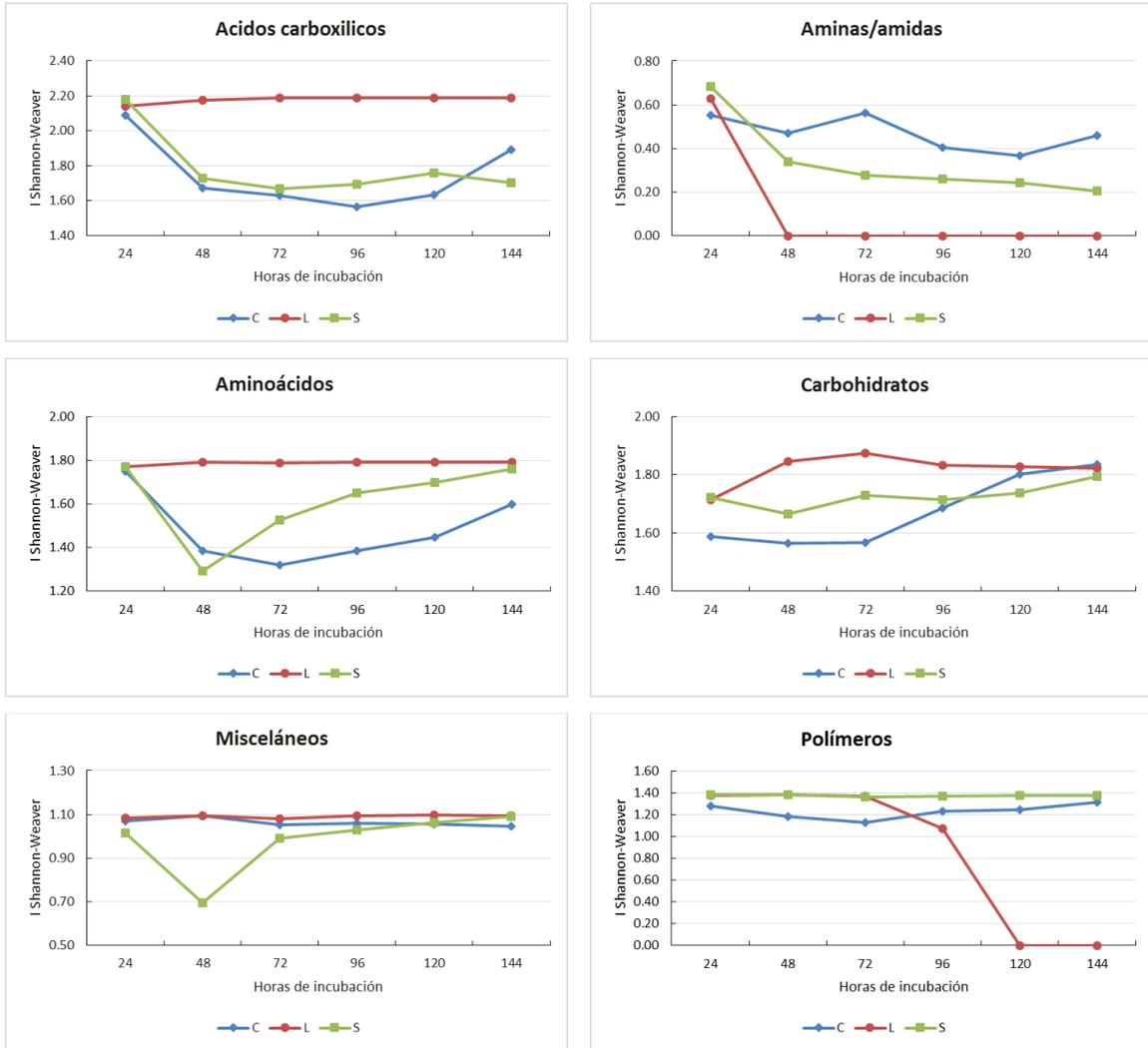
## Degradadores de carbono

Con un valor del índice de Shannon-Weaver de 3.8 (Cuadro 10), en el resultado general, la muestra de lodos de Chalco, se identifica como la poseedora de mayor diversidad en cuanto a bacterias degradadoras de fuentes de carbono. En los valores por grupo de sustratos presentó mayor diversidad en cuatro de los seis representados (Figura 9) (ácidos carboxílicos, aminoácidos, carbohidratos y misceláneos) en el resultado final y a través del tiempo. En el grupo degradadoras de amidas y aminos, presentó decaimiento a partir de la segunda lectura, mientras que en el de polímeros, mostró un decaimiento a partir de la hora 72 que corresponde a la tercera lectura de la densidad óptica (DO).

El compost presentó mayor diversidad en el grupo de degradadoras de amidas/amidas, en el de misceláneos fue similar al lodo de Chalco.

En la muestra de Santiaguito, destaca la presencia de bacterias que degradan polímeros, en todas las lecturas fue ligeramente superior a la muestra de compost, mientras que la muestra lodos de Chalco presentó un descenso en la curva a partir de la lectura de las 72 horas.

El resultado del índice de Shannon-Weaver, muestra valores son comparativamente más altos que los que obtuvieron Frac *et al.*, (2012) al evaluar muestras de suelo con diferentes tratamientos, uno enmendado con lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales lácteas y suelo no intervenido (Cuadro 11).



**Figura 9.** Diversidad medida con el índice de Shannon-Weaver para identificar la presencia de bacterias degradadoras de diferentes fuentes de carbono (clasificadas en seis grupos) en tres materiales; C=compost, L= lodos de Chalco y S= lodos de Santiaguito.

**Cuadro 11.** Índice de Shannon-Weaver calculado para cada material orgánico (C=compost, L=lodos de Chalco y S= lodos de Santiaguito) en función de la degradación de las fuentes de carbono agrupadas por grupo funcional tomando como base la densidad óptica (DO) para identificar la diversidad por muestra cada 24 horas.

Tiempo de incubación (hr)	Muestra	Sustratos					
		Ácidos carboxílicos	Aminas/ Amidas	Aminoácidos	Carbohidratos	Misceláneos	Polímeros
24	C	2.09	0.55	1.75	1.59	1.07	1.28
	L	2.14	0.63	1.77	1.72	1.08	1.37
	S	2.18	0.68	1.77	1.72	1.02	1.38
48	C	1.67	0.47	1.39	1.57	1.09	1.18
	L	2.18	0	1.79	1.85	1.09	1.38
	S	1.73	0.34	1.29	1.67	0.7	1.38
72	C	1.63	0.56	1.32	1.57	1.05	1.12
	L	2.19	0	1.79	1.87	1.08	1.37
	S	1.67	0.28	1.53	1.73	0.99	1.36
96	C	1.57	0.4	1.38	1.69	1.06	1.23
	L	2.19	0	1.79	1.83	1.09	1.07
	S	1.7	0.26	1.65	1.71	1.03	1.37
120	C	1.63	0.37	1.45	1.8	1.06	1.24
	L	2.19	0	1.79	1.83	1.1	0
	S	1.76	0.24	1.7	1.74	1.06	1.38
144	C	1.89	0.46	1.6	1.84	1.05	1.31
	L	2.19	0	1.79	1.82	1.1	0
	S	1.7	0.21	1.76	1.79	1.09	1.37

## **Variables evaluadas en los experimentos de aplicación de materiales orgánicos en tepetates**

### **Efecto de los tratamientos en las propiedades físicas de los suelos**

Los cambios en las propiedades físicas de los suelos a diferentes profundidades para cada tratamiento se presentan en el cuadro 12.

#### **Densidad aparente (Da)**

De los valores obtenidos por sitio (Cuadro 12), Tequexquinahuac presenta los más bajos y San Pablo Ixayoc los más altos en los dos niveles de profundidad. La diferencia de textura de los sitios explica en parte esta situación, ya que en Tequexquinahuac con una textura franco arcillosa, se tiene una mayor proporción de materiales finos que influyen en la porosidad. Un suelo de textura franca con Da de 1.6 presenta cierto grado de compactación, tal es el caso de los sitios de San Pablo Ixayoc y San Miguel Tlaixpan (Hazelton y Murphy, 2007), aun para un tepetate bajo labranza, que presenta rangos 1.12 a 1.24 g cm<sup>-3</sup> después de un año de su roturación (Fetcher-Escamilla y Flores G., 1997).

Para el sitio San Pablo Ixayoc (I) en los 10 cm superficiales, el tratamiento con 5 t de compost ha<sup>-1</sup> presenta el nivel más alto de densidad, 1.7 g cm<sup>-3</sup>, propia de un horizonte endurecido muy compacto, y con 3 t de lodos de Santiaguito ha<sup>-1</sup> el más bajo correspondiente a un horizonte ligeramente compacto (Hazelton y Murphy, 2007), situación que se invierte en el nivel de 10 a 20, donde este tratamiento presenta el nivel más alto mientras que es el tratamiento testigo sin planta el valor más bajo de densidad con 1.49 g cm<sup>-3</sup>. La variación de Da en la capa superficial en este sitio se podría explicar más por la variación espacial de esta propiedad que por el propio tratamiento ya que las cantidades de material orgánico aplicado son bajas y el tiempo de aplicación es corto (Hunt, 1997)

En el sitio Tequexquinahuac (T) al igual que en el sitio San Pablo Ixayoc, de 0-10 cm, el valor más bajo corresponde al tratamiento con 3 t de lodos de Santiaguito ha<sup>-1</sup> (1.07 g cm<sup>-3</sup>) situado en el mismo nivel que el testigo con planta, y el más alto al tratamiento con 5 t de lodos de Chalco ha<sup>-1</sup> (1.42 g cm<sup>3</sup>). Destaca que al aumentar la aplicación del

material orgánico (C, L y S) en la capa superficial en lugar de disminuir, la Da aumenta ligeramente lo que puede atribuirse a la variación espacial de esta propiedad y al método de determinación (parafina) ya que si se hubiera utilizado el método del cilindro con muestras inalteradas, posiblemente los cambios se habrían identificado (Matus, *et al.*, 2002).

De 10 a 20 cm, la densidad más alta corresponde al tratamiento con 5 t de compost ha<sup>-1</sup> (1.47 g cm<sup>3</sup>) y entra en la clasificación de ligeramente compacto y la más baja con 3 t de lodos de Santiaguito ha<sup>-1</sup> (0.93 g cm<sup>3</sup>) corresponde a un nivel satisfactorio para su textura (Hazelton y Murphy, 2007). La diferencia entre tratamientos posee significancia estadística de acuerdo a la prueba LSD.

En San Miguel Tlaixpan, de 0 a 10 cm presenta mayor variación entre tratamientos, el valor más alto lo presentó el tratamiento con 3 t de lodos de Chalco ha<sup>-1</sup> (1.67 g cm<sup>3</sup>) clasificado como muy compacto y el menor el testigo sin planta (1.23 g cm<sup>3</sup>) con un grado satisfactorio de compactación (Hazelton y Murphy, 2007), y la diferencia de acuerdo a la prueba LSD es estadísticamente significativa. Destaca que al aplicar mayor cantidad de lodos de Chalco, la Da disminuye, lo cual es de esperarse con las adiciones de material orgánico.

Los resultados en general muestran un efecto favorable en el tratamiento con 3 t de lodos de Santiaguito ha<sup>-1</sup>, que registro los valores más bajos en dos sitios tanto en el nivel 0 a 10, como en el de 10 a 20 cm. Se reportan, para tepetate de la región, valores desde 1.04 g cm<sup>-3</sup> para el tepetate roturado y con manejo durante 4 años hasta 1.50 cm para tepetate inalterado (Prat *et al.*, 2003), rangos similares a los identificados en los sitios, no obstante se esperaba valores más bajos para el sitio San Pablo Ixayoc, el cual es objeto de laboreo frecuente. Esto permite concluir que el laboreo asociado con la adición de materiales orgánicos, tendrá su efecto en la reducción de la Da.

### **Porcentaje de humedad Capacidad de Campo (CC)**

De los tres sitios, los valores más altos se identificaron en Tequexquinahuac, seguido de San Miguel Tlaixpan y los valores más bajos corresponden a San Pablo

Ixayoc (Cuadro 12), situación que concuerda con el tipo de textura que posee cada uno de los tepetates.

En San Pablo Ixayoc, en 0 a 10 cm, con 3 t de compost ha<sup>-1</sup> presentó un valor más alto con 27.14 % y el más bajo de 21.99 % el testigo sin planta. En 10 a 20 cm, el valor más alto fue con 3 t de lodos de Santiaguito ha<sup>-1</sup> y el testigo sin planta, con 21.33 %, fue el más bajo.

En Tequexquihuac, en el nivel de 0 a 10 cm, el tratamiento L5 destacó con 41.27%, valor similar al registrado para S5 y todos fueron superiores al tratamiento testigo sin planta con 36.01%. De 10 a 20 cm, los tratamientos con 3 t de lodos de Santiaguito, con 3 y 5 t de lodos de Chalco y con 3 t de compost ha<sup>-1</sup> superaron al resto con una diferencia estadística significativa.

El tratamiento con 3 t de lodos de Chalco ha<sup>-1</sup> en San Miguel Tlaixpan, destaca en el nivel de 0 a 10 cm de profundidad, mientras que en el nivel de 10 a 20 cm, es el testigo con planta el que registró el valor más alto (34.81%).

No hay una clara evidencia de la efectividad de un material orgánico o una dosis, sin embargo, existe una ligera tendencia a incrementar la capacidad de campo de los suelos a medida que aumenta el material orgánico aplicado de diferentes fuentes, esto coincide con los datos reportados por Prat *et al.*, (2003) quienes reportaron valores de porcentajes de humedad de suelo a capacidad de campo similares para un ensayo donde aplicaron dosis crecientes de estiércol durante cuatro años en San Miguel Tlaixpan

### **Porcentaje de humedad a punto de marchitamiento permanente (PMP)**

Esta variable se comporta de forma similar al de capacidad de campo entre los sitios (Cuadro 12) El de Tequexquihuac (T) presenta los valores más altos y San Pablo Ixayoc (I) los más bajos. Por sitio, en San Pablo Ixayoc, el tratamiento con 3 t de compost ha<sup>-1</sup> destacó en 0 a 10 cm de profundidad con 16.74 %, mientras que el menor lo presentó el testigo con planta (1.98). Para 10 a 20 cm, destaca el tratamiento con 5 t de lodos de Chalco ha<sup>-1</sup> con 17.20% y el menor es para el testigo sin planta con 13.69%. En

Tequexquinahuac, en 10 a 20 cm destaca con 3 t de lodos de Santiaguito (33.88) y el más bajo es con 3 t de lodos de Chalco con 27.85%. En 10 a 20 cm, el mejor fue con 3 t de lodos de Santiaguito (33.58%) y el menor fue el testigo sin planta con 30.35%. En San Miguel Tlaixpan no se observa diferencia entre tratamientos; no obstante, en 0 a 10 cm, el tratamiento con 5 t de compost presenta el valor más alto (22.43%) y el menor fue con 3 t de lodos de Santiaguito  $\text{ha}^{-1}$  (20.59 %). En 10 a 20 cm, el más alto fue con 5 t de lodos de Chalco  $\text{ha}^{-1}$  (22.89%) y con un valor de 20.02%, el testigo sin planta fue el menor.

Aun cuando no se marca una diferencia clara por un tratamiento, en general, los testigos presentan los valores menores. En el sitio Tequexquinahuac, debido a la textura, se retiene una mayor cantidad de agua en las partículas, que no estará disponible para las plantas, mientras que en San Pablo Ixayoc, es mayor la cantidad de agua que se puede almacenar.

Para esta variable, en un ensayo realizado en tepetates de la región Prat *et al.*, (2003), obtuvieron valores menores a los obtenidos en los tres sitios, lo que posiblemente se deba al efecto de los tratamientos que consistieron en aplicar diferentes dosis de estiércol con una dosis inicial de 20 t  $\text{ha}^{-1}$  y al tiempo del ensayo que duró 4 años. En periodos menores, es difícil realizar cambios en las propiedades físicas.

### **Conductividad hidráulica (K)**

Al igual que con la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente, el sitio Tequexquinahuac presenta los valores más altos e Ixayoc los más bajos en conductividad hidráulica (Cuadro 12) y sin embargo no se aprecia el impacto del tipo de material orgánico y de las dosis aplicadas en el incremento de K como era de esperarse. Esto se puede explicar por la variabilidad espacial de esta propiedad en el perfil y por el grado de compactación de los suelos y por el método de estimación empleado (Barreto F., *et al.*, 2003).

Para San Pablo Ixayoc, el tratamiento con 3 t  $\text{ha}^{-1}$  de lodos de Chalco presenta los valores más altos en el nivel de 0 a 10 cm y con 3 t de lodos de Santiaguito los más bajos. Mientras que de 10 a 20 cm, el testigo sin planta destaca por el valor más alto y con 5 t de

lodos de Chalco  $\text{ha}^{-1}$  reportaron valores más bajos. Lo anterior corresponde al sitio con mayor manejo agrícola de los tres evaluados. Cabe destacar que en este sitio, los valores de K en los tratamientos fueron similares a los de los testigos con y sin planta, lo que indica que la aplicación de materiales orgánicos no tuvo efecto a ninguna de las dos profundidades evaluadas. Lo anterior, puede deberse a que es precisamente este sitio el que recibe año con año mayor cantidad de abonos orgánicos.

Para Tequexquinahuac, con la aplicación de 3 t de lodos de Santiaguito destaca para 0 a 10 cm y de 10 a 20 cm. Mientras que con 5 t de lodos de Santiaguito y con 5 t de lodos de Chalco  $\text{ha}^{-1}$  se observaron los valores más bajos en el mismo orden. En San Miguel Tlaixpan, con aplicación de 3 t de lodos de Santiaguito y con 5 t de Chalco  $\text{ha}^{-1}$  destacan para 0 a 10 cm de profundidad. De 10 a 20 cm, los tratamientos con 5 y 3 t de lodos de Chalco  $\text{ha}^{-1}$  presentaron valores bajos.

En esta prueba, el tratamiento con 3 t de lodos de Santiaguito  $\text{ha}^{-1}$  destaca en dos sitios a dos niveles de profundidad, lo que sugiere un efecto benéfico en los tepetates para esta variable. Tomando en cuenta la textura, los valores para San Pablo Ixayoc son bajos ya que lo normal en suelo, es un flujo de 60 a 120  $\text{mm h}^{-1}$ . Los valores de San Miguel Tlaixpan corresponden al rango normal y para Tequexquinahuac los valores son elevados, pues de 20 a 70  $\text{mm h}^{-1}$  sería lo esperado. Lo anterior indica que en este sitio donde las propiedades físicas del suelo se conservan de manera más natural se favorece la infiltración y el movimiento de agua en el suelo (Hazelton y Murphy, 2007). Mientras que los valores no son tan diferentes de los reportados para tepetates de la región (Prat *et al.*, 2003), determinados en un rango de 4.5 para un tepetate sin manejo y 62.1  $\text{mm h}^{-1}$  un suelo agrícola.

En concordancia con los rangos de K reportados por Hunt y Gilkes (1992), valores menores a 20  $\text{mm h}^{-1}$ , pueden ocasionar erosión superficial en eventos de lluvia moderados y en suelos con pendientes mayores de 20%. Este es el caso de algunos tratamientos en el sitio de San Pablo Ixayoc (testigo sin planta, lodos de Santiaguito con 3 y 5 t  $\text{ha}^{-1}$  y lodos de Chalco con 5 t  $\text{ha}^{-1}$ ). Así mismo, estos autores mencionan que valores de K mayores de 20  $\text{mm h}^{-1}$ , pueden soportar un evento de precipitación fuerte sin que haya erosión superficial, ya que estos valores son indicadores de buena porosidad e infiltración.

Sin embargo, este elevado flujo de agua puede traer como consecuencia el movimiento acelerado de iones o elementos potencialmente tóxicos a los horizontes más profundos, e inclusive, a los mantos freáticos. Tal es el caso de los sitios de Tequexquihuac y San Miguel Tlaixpan, en los que en la mayoría de los tratamientos y en las dos profundidades, los valores de K están por arriba de 20 mm h<sup>-1</sup>.

**Cuadro 12.** Propiedades físicas evaluadas en los diferentes sitios y tratamientos. I=San Pablo Ixayoc, T=Tequexquihuac y TI= San Miguel Tlaixpan. TSP= testigo sin planta. TCP= testigo con planta. S3= lodo de Santiaguito (3 t materia seca (MS) ha<sup>-1</sup>). S5= lodo de Santiaguito (5 t MS ha<sup>-1</sup>). L3= lodo de Chalco (3 t MS ha<sup>-1</sup>). L5= lodo de Chalco (5 t MS ha<sup>-1</sup>). C3= compost (3 t MS ha<sup>-1</sup>). C5= compost (5 t MS ha<sup>-1</sup>). Las letras diferentes a la derecha del número indican diferencia estadística significativa (LSD SAS).

VARIABLE	SITIO	PROFUNDIDAD	TRATAMIENTO							
			TSP	TCP	S3	S5	L3	L5	C3	C5
Da (g cm <sup>3</sup> )	I	0-10	1.57 ba	1.63 ba	1.48 b	1.54 ba	1.58 ba	1.61 ba	1.61 ba	1.74 a
		10-20	1.49 b	1.61 ba	1.68 a	1.65 ba	1.64 ba	1.65 ba	1.64 ba	1.64 ba
	T	0-10	1.24 ba	1.07 b	1.07 b	1.10 ba	1.34 ba	1.42 a	1.18 ba	1.24 ba
		10-20	1.13 bac	1.33 ba	0.93 c	1.00 bc	1.34 ba	0.99 bc	1.20 bac	1.47 a
	TI	0-10	1.23 b	1.43 ba	1.23 ba	1.64 ba	1.67 a	1.40 ba	1.30 ba	1.32 ba
		10-20	1.44 ba	1.46 ba	1.48 ba	1.55 a	1.50 a	1.31 b	1.48 ba	1.44 ba
CC (%)	I	0-10	22.0	25.7	26.7	26.9	26.3	25.4	27.1	25.4
		10-20	22.0	25.7	26.7	26.9	26.3	25.4	27.1	25.4
	T	0-10	36.0 b	38.3 bac	40.3 ba	40.6 a	37.0 ba	41.3 a	39.1 bac	38.6 bac
		10-20	35.8 ba	40.0 ba	40.4 a	39.3 ba	40.7 a	41.4 a	41.0 a	39.2 ba
	TI	0-10	30.1 ba	31.9 ba	27.3 b	30.0 ba	32.4 a	31.7 ba	31.1 ba	30.4 ba
		10-20	27.7 b	34.8 a	28.7 b	32.8 ba	33.0 ba	32.4 ba	29.5 ba	30.8 ba
PMP (%)	I	0-10	13.3 ba	12.0 b	14.2 ba	14.8 ba	15.8 ba	14.3 ba	16.7 a	14.7 ba
		10-20	13.7 b	15.8 ba	16.7 ba	16.2 ba	15.7 ba	17.2 a	14.6 ba	15.9 ba
	T	0-10	28.8 c	30.0 bc	33.9 a	31.9 ba	27.8 c	29.8 bc	28.6 c	29.9 bc
		10-20	30.3	32.9	33.6	31.3	31.7	33.8	33.3	32.5
	TI	0-10	22.0	20.7	20.6	20.6	21.6	21.3	21.4	22.4
		10-20	20.0	22.0	20.7	19.4	20.7	22.9	21.5	20.4
K (mm hr)	I	0-10	18.37	35.85	12.37	20.54	58.63	20.00	42.11	31.65
		10-20	35.35	21.71	9.32	16.48	5.94	4.52	28.88	22.93
	T	0-10	71.84 b	112.92 ba	155.79 a	65.69 b	75.85 b	105.60 ba	87.73 b	117.46 ba
		10-20	94.74 bac	62.86 c	164.96 a	54.31 c	54.18 c	81.59 bc	106.07 bac	135.77 ba
	TI	0-10	65.12	54.54	113.41	98.26	40.35	59.82	37.76	106.18
		10-20	45.70 ba	76.22 ba	78.20 ba	57.47 ba	22.27 b	100.33 a	33.34 ba	44.46 ba

## **Efecto de la aplicación de materiales orgánicos en las propiedades químicas del tepetate**

### **Conductividad Eléctrica (CE)**

En el sitio San Pablo Ixayoc se presentan los valores más altos de CE (Cuadro 13), lo cual puede estar asociado a que en estos terrenos el productor realiza incorporaciones constantes de abonos orgánicos (principalmente estiércol bovino). En ambas profundidades los valores fueron similares al comparar las medias de los tratamientos. En la fracción de 0 a 10 cm, el tratamiento con 3 t de compost ha<sup>-1</sup> obtuvo el valor más alto con significancia estadística. En el sitio San Miguel Tlaixpan se presentaron valores similares entre tratamientos y entre profundidades.

En el sitio Tequexquihuac se presentaron los valores más bajos, lo que también se relaciona con el manejo, ya que en este no se practican labores culturales. Es precisamente el testigo sin planta el que obtuvo el valor más bajo de todos los tratamientos. El valor más alto en la profundidad de 0 a 10 cm se atribuye a la aplicación de 3 t de compost ha<sup>-1</sup>, mientras que en el nivel 10 a 20 cm de profundidad es con 5 t de compost ha<sup>-1</sup>.

Para los tres sitios se observaron diferencias estadísticas significativas (LSD) tanto entre tratamientos como en profundidad. El efecto debido a los tratamientos es diferenciado entre los sitios y entre profundidades. Para el sitio San Pablo Ixayoc a una profundidad de 0 a 10 cm, el valor más alto se obtuvo con la aplicación de 5 t de compost ha<sup>-1</sup>, mientras que con 3 t de lodos de Chalco se presentó el valor más alto para la profundidad de 10 a 20 cm. Es también en este sitio que se observaron los valores menores.

De acuerdo a Hazelton y Murphy, 2007, cuando los valores son menores a 2 mS cm<sup>-1</sup> el suelo se considera no salino, tal es el caso del tepetate. Dado que solo los lodos de Chalco fueron los únicos que presentaron valores elevados de pH y CE, se observó que las cantidades aplicadas no influyeron en la CE.

## Materia orgánica (MO)

En el sitio San Miguel Tlaixpan se encontraron los valores más bajos (Cuadro 13), en ambas profundidades, mientras que en el sitio Tequexquinahuac se identifican los valores más altos (similares a los de San Pablo Ixayoc), pero solo de 0 a 10 cm de profundidad. A mayor profundidad se encuentran valores similares a los del testigo sin planta, lo anterior indica que el efecto de los materiales orgánicos aplicados fue más evidente en la capa superficial.

En San Pablo Ixayoc, los contenidos de materia orgánica fueron los más altos de los 3 sitios a ambas profundidades. A mayor profundidad se encuentran valores menores a 0.5% de materia orgánica. No se presentaron diferencias entre tratamientos en ninguna de las dos profundidades para este sitio. Lo anterior indica que la capa más superficial en este sitio posee altos contenidos de materia orgánica, los cuales, no se deben a la aplicación de materiales orgánicos realizada durante este experimento. No destaca un tratamiento en particular; sin embargo, con 3 t de lodos de Santiaguito, con 3 t de compost y con 5 t de compost  $\text{ha}^{-1}$  reportaron los valores más altos. Los valores más bajos fueron de los testigos con y sin planta.

De acuerdo a los contenidos de materia orgánica para un suelo, los niveles detectados en los tres sitios corresponden a suelos con muy bajos niveles de materia orgánica que se relacionan con estructuras pobres y de baja estabilidad (Hazelton y Murphy, 2007), en tanto que se reportan valores de 0.32 para tepetates sin manejo y 2.52% para tepetate manejados durante cuatro años con aplicación de 20 t de estiércol  $\text{ha}^{-1}$  (Prat *et al.*, 2003).

En los sitios de San Pablo Ixayoc y Tequexquinahuac, los valores de materia orgánica son adecuados para el crecimiento de los cultivos. En el primer sitio, estos contenidos se deben a la aplicación anual de estiércoles que realiza el productor, mientras que en Tequexquinahuac se debe a las condiciones naturales del sitio, a la casi nula labranza, que impide la mineralización de los residuos orgánicos que se producen (Liu *et al.*, 2006). De manera contraria, en el sitio de San Miguel Tlaixpan, los valores de materia orgánica son muy bajos, lo que permite que las aplicaciones de materia orgánica, en

todas sus formas, provoquen una respuesta en el suelo. Esta respuesta, se puede ver reflejada en mayores rendimientos del cultivo establecido.

### **Nitrógeno (N)**

El contenido de nitrógeno total es variable para los tres sitios (Cuadro 13), mientras que en San Pablo Ixayoc se identifican valores bastante altos, en Tequexquinahuac son muy bajos y en San Miguel Tlaixpan muy variables (Hazelton y Murphy, 2007). En San Pablo Ixayoc los niveles corresponden con la aplicación regular de abono, mientras que en Tequexquinahuac se corresponde a la nula aplicación. En San Pablo Ixayoc y San Miguel Tlaixpan, se evidencia el efecto de los tratamientos con los niveles más altos de enmienda, si bien ese efecto es más notorio en la superficie. En tepetates de afloramiento natural de la región, se determinó valores de entre 0.01 y 0.04 % (Etchevers B. y Brito, 1997), dado el resultado, y tomando en cuenta los diferentes grados de manejo de los sitios, los valores encontrados son adecuados.

### **Fósforo total (P)**

Para el sitio San Pablo Ixayoc (Cuadro 13) se identificó un contenido aceptable de fósforo (Kass, 1996), lo cual se asocia a las aplicaciones constantes de abonos (estiércol bovino), contrario a lo anterior, en el sitio San Miguel Tlaixpan, donde no es una práctica recurrente, los valores fueron muy bajos. Mientras que para el Tequexquinahuac no se detectó con la metodología empleada.

Se observó un ligero efecto de los tratamientos por la aportación de materia orgánica. Cabe señalar que el fósforo disponible es alrededor de 45 % del total (Kass, 1996).

**Cuadro 13.** Propiedades químicas evaluadas en los diferentes sitios y tratamientos. I=San Pablo Ixayoc, T=Tequexquihuac y TI= San Miguel Tlaixpan. TSP= testigo sin planta. TCP= testigo con planta. S3= lodo de Santiaguito (3 t materia seca (MS) ha<sup>-1</sup>). S5= lodo de Santiaguito (5 t MS ha<sup>-1</sup>). L3= lodo de Chalco (3 t MS ha<sup>-1</sup>). L5= lodo de Chalco (5 t MS ha<sup>-1</sup>). C3= compost (3 t MS ha<sup>-1</sup>). C5= compost (5 t MS ha<sup>-1</sup>). Las letras diferentes a la derecha del número indican diferencia estadística significativa (LSD SAS).

VARIABLE	SITIO	PROFUNDIDAD	TRATAMIENTO								
			TSP	TCP	S3	S5	L3	L5	C3	C5	
CE (mS cm <sup>-1</sup> )	I	0-10	0.23 ba	0.26 ba	0.27 ba	0.24 ba	0.26 ba	0.22 b	0.29 a	0.26 ba	
		10-20	0.29 bac	0.31 bac	0.26 bc	0.26 bc	0.35 ba	0.34 ba	0.22 c	0.37 a	
	T	0-10	0.08 d	0.14 bc	0.11 cd	0.13 bcd	0.13 bcd	0.18 ba	0.10 cd	0.23 a	
		10-20	0.12 b	0.12 b	0.16 ba	0.14 ba	0.12 b	0.28 a	0.17 ba	0.14 ba	
	TI	0-10	0.21	0.18	0.22	0.19	0.19	0.22	0.18	0.20	
		10-20	0.19 ba	0.16 b	0.18 ba	0.17 b	0.19 ba	0.19 ba	0.17 b	0.22 a	
	MO (%)	I	0-10	0.53 b	0.67 ba	0.64 ba	0.63 ba	0.62 ba	0.62 ba	0.72 a	0.77 a
			10-20	0.54	0.62	0.64	0.55	0.58	0.52	0.69	0.59
		T	0-10	0.51	0.58	0.59	0.66	0.55	0.68	0.79	0.65
			10-20	0.31	0.26	0.48	0.47	0.28	0.43	0.34	0.37
TI		0-10	0.18 ba	0.09 b	0.31 a	0.29 ba	0.25 ba	0.29 ba	0.20 ba	0.31 a	
		10-20	0.15 ba	0.08 b	0.23 a	0.19 ba	0.23 a	0.13 ba	0.16 ba	0.10 ba	
N (%)		I	0-10	0.29 c	0.86 bc	2.22 bac	3.70 a	1.85 bac	2.42 bac	0.29 c	2.85 ba
			10-20	0.19 d	1.40 cd	1.66 bcd	4.06 a	0.21 d	3.22 ba	1.99 bc	1.75 bcd
		T	0-10	0.09 ba	0.08 b	0.09 b	0.12 ba	0.10 ba	0.14 a	0.08 b	0.09 ba
			10-20	0.04 bc	0.04 bc	0.07 bac	0.09 a	0.08 ba	0.11 a	0.04 bc	0.03 c
	TI	0-10	0.03 b	0.06 b	0.07 b	1.13 ba	1.09 ba	1.86 ba	0.05 b	2.53 a	
		10-20	0.02	0.03	0.04	0.05	1.09	0.05	0.03	0.48	
	P (mg kg <sup>-1</sup> )	I	0-10	244.66 bc	264.40 bac	373.44 a	318.63 ba	359.00 ba	188.21 c	302.68 bac	363.78 a
			10-20	236 b	268.3 b	331.40 ba	255.6 b	318.9 ba	291.1 ba	475.3 a	346.9 ba
		T	0-10	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
			10-20	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
TI		0-10	0.07	32.89	28.17	44.40	49.22	45.49	27.72	11.24	
		10-20	< 0.01	< 0.01	2.97	< 0.01	< 0.01	0.23	1.28	7.26	

## **Efecto de la aplicación de materiales orgánicos en la presencia de contaminantes potenciales en tepetate**

### **Nitratos (NO<sub>3</sub>)**

Los nitratos son una forma de nitrógeno fácilmente disponible para las plantas. Los contenidos detectados en suelo son muy variables, niveles cercanos a 30 mg kg<sup>-1</sup> son adecuados en suelo, no obstante los ciclos naturales pueden elevar el nivel hasta 300 mg kg<sup>-1</sup> (Hazelton y Murphy, 2007).

Los niveles detectados en los sitios experimentales son variables ente sitios y a las diferentes profundidades (Cuadro 14). En Tequexquinahuac, los valores son más altos para los tratamientos con 5 t de lodos de Santiaguito y con 3 y 5 t de lodos de Chalco ha<sup>-1</sup>, para los dos niveles de profundidad. Los valores bajos corresponden a los testigos con y sin planta. Para San Pablo Ixayoc, los valores más altos corresponden a 5 t de lodos de Santiaguito y de compost ha<sup>-1</sup>, en 0 a 10 cm de profundidad. Para este último, se detectó también un nivel alto para 10 a 20 cm de profundidad. De acuerdo a (Hazelton y Murphy, 2007), los niveles detectados están en la normalidad.

De acuerdo a Hazelton y Murphy (2007), con una concentración de 7 a 15 mg kg<sup>-1</sup> de suelo, la probabilidad de adsorción por las plantas es del 100%, por lo que a concentraciones mayores se incrementa la probabilidad de lixiviación. Dado que el tepetate inalterado, tal como se encuentra bajo la capa de labranza, presenta conductividad hidráulica baja (4.5 mm hr<sup>-1</sup>) (Prat, *et al.*, 2003), y el movimiento del agua en estos materiales, en mayor medida, es superficial, los nitratos se moverán junto con el agua a sitios más bajos, con pocas posibilidades de que se filtren a los acuíferos a través del tepetate.

### **Cu**

En el sitio San Pablo Ixayoc a las dos profundidades se observan los valores más altos de Cu total (Cuadro 14). Lo anterior se asocia a la aplicación continua de abonos

orgánicos que realiza el productor. En San Miguel Tlaixpan y Tequexquihuac los valores se encuentran bajos. La cantidad del elemento aportada por los lodos aplicados no eleva la concentración de este en los terrenos ya que las medias son similares entre los tratamientos con aplicación de diferentes dosis de lodos y los aportes hechos por el compost. Al respecto, la tendencia es similar en los sitios de Tequexquihuac y San Miguel Tlaixpan. De acuerdo a Hazelton y Murphy (2007), niveles de 2 a 100 mg kg<sup>-1</sup> son rangos normales en suelos, mientras que la concentración normal en los lodos es de 50 a 8000 mg kg<sup>-1</sup> y la Unión Europea, considera una concentración máxima de 140 mg kg<sup>-1</sup> en suelo. Los valores encontrados en este estudio no rebasan estos límites máximos permisibles.

### **Zinc**

No se observa diferencia entre los tratamientos ni a las diferentes profundidades, y solo se presentan valores ligeramente mayores en el sitio San Pablo Ixayoc en la capa superficial (0 a 10 cm) (Cuadro 14), lo anterior indica que no hay acumulación de este elemento en ninguno de los tres sitios atribuible a la aplicación de los lodos residuales o del compost. Lo anterior porque las medias son similares en los testigos con y sin planta y los tratamientos con aplicación de materiales orgánicos. Los niveles detectados son más altos a los normales en un suelo determinado en 20 mg kg<sup>-1</sup>. Los lodos pueden aportar desde 90 a 49,000 mg kg<sup>-1</sup> (Hazelton y Murphy, 2007). Por otro lado, la Unión Europea limita a 300 mg kg<sup>-1</sup> la concentración en suelo cultivado.

**Cuadro 14.** Contaminantes potenciales evaluados en los diferentes sitios y tratamientos. I=San Pablo Ixayoc, T=Tequexquinahuac y TI= San Miguel Tlaixpan. TSP= testigo sin planta. TCP= testigo con planta. S3= lodo de Santiaguito (3 t materia seca (MS) ha<sup>-1</sup>). S5= lodo de Santiaguito (5 t MS ha<sup>-1</sup>). L3= lodo de Chalco (3 t MS ha<sup>-1</sup>). L5= lodo de Chalco (5 t MS ha<sup>-1</sup>). C3= compost (3 t MS ha<sup>-1</sup>). C5= compost (5 t MS ha<sup>-1</sup>). Las letras diferentes a la derecha del número indican diferencia estadística significativa (LSD SAS).

VARIABLE	SITIO	PROFUNDIDAD	TRATAMIENTO							
			TSP	TCP	S3	S5	L3	L5	C3	C5
NO <sub>3</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	I	0-10	36.62 b	57.22 b	55.11 b	157.04 a	64.74 b	159.67 a	131.38 a	178.67 a
		10-20	51.68 ba	56.71 ba	75.45 ba	47.33 b	28.58 b	31.08 b	71.44 ba	196.5 a
	T	0-10	24.68 c	19.58 c	47.10 bc	171.23 ba	224.10 a	199.48 a	21.63 c	172.42 ba
		10-20	18.51	19.20	55.16	69.66	158.22	191.50	24.19	21.77
	TI	0-10	84.73 bc	123.66 a	95.08 ba	83.49 bc	57.79 c	111.61 ba	104.78 ba	90.18 bac
		10-20	79.60	108.93	57.47	92.86	118.31	102.24	81.28	118.31
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	I	0-10	10.67 ba	9.34 ba	10.87 ba	15.68 a	11.69 ba	7.16 b	8.79 b	11.17 ba
		10-20	8.08	12.07	9.89	12.32	9.42	9.16	12.78	10.13
	T	0-10	3.06	2.49	2.37	3.25	3.18	2.91	3.33	2.45
		10-20	2.34 ba	1.72 b	2.80 ba	5.99 a	2.19 b	2.08 b	1.85 b	1.89 b
	TI	0-10	4.25 b	4.72 ba	3.80 b	5.74 a	4.65 ba	4.06 b	3.58 b	4.54 ba
		10-20	3.04 b	3.62 ba	3.43 ba	4.52 ba	5.62 a	4.18 ba	3.80 ba	3.73 ba
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	I	0-10	44.22 ba	42.62 bac	44.32 ba	43.79 bac	42.01 bac	35.74 c	36.91 bc	45.54 a
		10-20	34.36 b	39.77 ba	40.21 ba	38.09 ba	38.12 ba	41.28 ba	45.31 a	41.35 ba
	T	0-10	38.65	36.80	34.60	40.31	34.35	37.96	36.75	37.30
		10-20	36.39 ba	32.31 ba	38.56 a	37.51 ba	32.00 ba	31.19 ba	30.63 b	32.20 ba
	TI	0-10	35.64 ba	36.41 ba	36.84 ba	37.75 a	37.00 ba	33.50 ba	32.10 b	34.71 ba
		10-20	30.57 b	30.66 b	34.51 ba	35.60 ba	37.72 a	32.87 ba	32.85 ba	32.27 ba

## **Aplicación de materiales orgánicos y producción de fitomasa aérea**

Con referencia a las medias por tratamiento (Cuadro 15), la mayor producción de avena forrajera en San Pablo Ixayoc correspondió al testigo con planta, seguido del tratamiento con compost a una dosis de  $5 \text{ t ha}^{-1}$ , y los menores correspondieron a los tratamientos con lodos de Santiaguito en las dos dosis manejadas ( $3$  y  $5 \text{ t ha}^{-1}$ , en ese orden). En cuanto a las arvenses, los mejores resultados corresponden a los tratamientos con lodos de Santiaguito con las dos dosis aplicadas y los más bajos se observaron en los testigos sin planta y con planta. En la producción de fitomasa total, los tratamientos con  $3$  y  $5 \text{ t}$  de lodos de Santiaguito  $\text{ha}^{-1}$  presentaron los mejores resultados, lo que corresponde también al mayor crecimiento de arvenses, por lo que se afirma su influencia en esta variable.

En este sitio se aprecia el efecto de competencia de las arvenses y la avena en la producción de fitomasa total. El desarrollo acelerado que presentan las arvenses les permite ocupar los espacios y de esta forma interferir en la captación de luz y nutrientes (Zindahl, 2004) por la avena; es decir, en los tratamientos con  $3$  y con  $5 \text{ t}$  de lodos de Santiaguito  $\text{ha}^{-1}$  las arvenses tuvieron mejores condiciones para desarrollarse que en el resto de los tratamientos.

El comportamiento expresado por las arvenses puede explicarse por la presencia de carbono y nitrógeno aprovechable en los lodos de Santiaguito.

En el sitio Tequexquinahuac, la avena no se desarrolló debido al efecto de la fauna silvestre. Las arvenses presentaron los valores más bajos de los tres sitios y si bien no se determinó diferencia estadística significativa, en los tratamientos con lodos de Chalco en las dos dosis empleadas ( $3$  y  $5 \text{ t ha}^{-1}$ ) se obtuvieron producciones de biomasa más altas, mientras que en el testigo sin planta se obtuvo el menor. Cabe la posibilidad de que la fauna silvestre también afectó el registro de estas plantas debido a que por efecto de los tratamientos, se desarrollaron plantas jóvenes de avena antes que aparecieran plantas en las áreas aledañas (por efecto del material orgánico y del riego inicial aplicado).

La producción de biomasa en San Miguel Tlaixpan fueron intermedios comparativamente con los otros dos sitios. En la producción de forraje de avena no se observó diferencia significativa entre los tratamientos, pero si con respecto a los testigos. El valor más alto corresponde al tratamiento con lodos de Santiaguito a una dosis de 3 t ha<sup>-1</sup>, seguido por el tratamiento con lodos de Chalco a la misma dosis.

El resultado más alto observado para el tratamiento con 3 t de lodos de Santiaguito ha<sup>-1</sup> coincide con el observado en el sitio San Pablo Ixayoc.

Los dos mejores resultados en el crecimiento de arvenses, se obtuvieron en los mismos tratamientos a los que corresponden los más altos registrados para avena, en esta variable se observó diferencia estadística significativa (LSD) con respecto al resto de los tratamientos. En el testigo sin planta se presentó el valor más bajo.

En el resultado de fitomasa total, como se esperaría, debido a lo observado para la producción de avena forrajera y arvenses, se registró en los tratamientos con 3 t de lodos de Santiaguito y de Chalco, en ese orden, con diferencia estadística significativa con respecto al resto de los tratamientos. De acuerdo a lo esperado, en los testigos se registraron los rendimientos menores.

Comparativamente, la producción de fitomasa total en los tres sitios, los menores se obtuvieron en los testigos, mientras que los más altos se distribuyeron entre los tratamientos con las dos fuentes de lodos y compost, por lo que no se puede atribuir efecto a un tipo de enmienda que se haya destacado en los 3 sitios de experimentación.

Se puede apreciar la variabilidad de los resultados por tratamiento, lo que a la postre, no se manifiesta como un efecto definido. Para ensayos realizados con tepetate rehabilitado de segundo año, (Benitez y Navarro, 1996) reportan incremento del 5.5 % en fitomasa de maíz por efecto residual del estiércol aplicado el año previo a la siembra. Por lo que es posible que los efectos de aplicación de enmiendas orgánicas sean visibles sólo hasta el segundo año.

**Cuadro 15.** Producción de materia seca ( $\text{g MS m}^{-2}$ ) obtenido en los tres sitios experimentales I) San Pablo Ixayoc, T) Tequexquinahuac y TI) San Miguel Tlaixpan. TSP= testigo sin planta. TCP= testigo con planta. S3= lodo de Santiaguito (3 t materia seca (MS)  $\text{ha}^{-1}$ ). S5= lodo de Santiaguito (5 t  $\text{MS ha}^{-1}$ ). L3= lodo de Chalco (3 t  $\text{MS ha}^{-1}$ ). L5= lodo de Chalco (5 t  $\text{MS ha}^{-1}$ ). C3= compost (3 t  $\text{MS ha}^{-1}$ ). C5= compost (5 t  $\text{MS ha}^{-1}$ ). Las letras diferentes en la misma columna indican diferencia estadística significativa (LSD SAS).

TRATA MIENTO	AVENA		ARVENSES			FITOMASA AEREA TOTAL		
	$\text{g m}^{-2}$							
	I	TI	I	T	TI	I	T	TI
<b>TSP</b>	0.0 c	0.0 b	296.8 c	44.4	95.2 b	296.8 b	44.4	95.2 c
<b>TCP</b>	742.1 a	156.8 ba	323.9 bc	28.2	121.9 ba	958.1 a	28.2	278.7 bc
<b>S3</b>	210.2 bc	357.8 a	750.8 a	44.4	270.0 a	961.0 a	44.4	627.8 a
<b>S5</b>	317.3 bac	286.0 a	709.5 a	41.2	231.2 ba	1026.7 a	41.2	517.3 ba
<b>L3</b>	414.6 bac	351.3 a	603.6 bac	59.4	252.7 a	1018.2 a	59.4	603.9 a
<b>L5</b>	419.0 bac	331.5 a	605.7 bac	61.8	190.9 ba	1024.8 a	61.8	522.5 ba
<b>C3</b>	392.5 bac	312.8 a	630.5 ba	42.4	186.3 ba	1022.9 a	42.4	499.1 ba
<b>C5</b>	485.1 ba	346.6 a	579.8 bac	55.9	237.5 ba	1064.9 a	55.9	584.1 ba

Ixayoc

S5 1065.9	L5 1121.6	C3 1156.4	TCP 1143.5	TSP .
S3 1004.1	S5 979.3	TSP 167.2	C5 806.4	L3 973.2
S3 650.5	L5 850.6	C3 905.6	L3 749.5	TCP 216.0
C3 1006.8	C5 1301.2	S5 1035.0	L3 1331.9	TSP 361.6
TSP 361.6	S3 1228.3	C5 1087.2	TCP 1514.6	L5 1102.1

Tequexquihuac

S5 26.5	L5 125.5	C3 41.9	TCP 18.4	TSP .
S3 41.4	S5 70.7	TSP 65.4	C5 81.0	L3 65.3
S3 48.7	L5 35.5	C3 37.5	L3 55.4	TCP 12.1
C3 47.7	C5 44.3	S5 26.4	L3 57.6	TSP 23.4
TSP .	S3 43.2	C5 42.5	TCP 54.0	L5 24.4

Tlaixpan

S5 294.4	L5 223.9	C3 449.9	TCP 246.4	TSP 145.6
S3 245.0	S5 516.8	TSP 42.5	C5 541.0	L3 728.4
S3 858.6	L5 742.4	C3 645.4	L3 683.5	TCP 251.5
C3 401.9	C5 681.3	S5 740.6	L3 399.9	TSP 124.7
TSP 67.8	S3 779.8	C5 529.8	TCP 338.2	L5 601.0

**Figura 10.** Producción de fitomasa total en materia seca ( $\text{g MS m}^{-2}$ ). En verde el tratamiento con la producción más alta y en naranja la más baja.

## CONCLUSIONES

Los lodos evaluados presentan características físicas y químicas adecuadas para su uso como enmiendas. El contenido de elementos potencialmente tóxicos, factor limitante para su uso, está muy por debajo de las concentraciones máximas indicadas por las normas nacionales e internacionales.

En cuanto a las características biológicas, se encontró una cantidad de microorganismos patógenos alta de acuerdo a las normas, aunque es importante recordar que pueden estar presentes en el suelo independientemente del uso de lodos debido a que no son exclusivas de humanos. Un elemento a favor es la presencia de microorganismos con funciones importantes para la fertilidad del suelo y el desarrollo de plantas, los cuales son parte de un suelo fértil.

De acuerdo a su análisis físico, químico y biológico, se considera que los lodos residuales son convenientes para su uso como enmiendas.

El tepetate presenta limitaciones físicas, de nutrientes y microbiológicas para el desarrollo de plantas, que se pueden solventar con el uso de lodos residuales.

En la prueba de producción de avena forrajera, no se identificó diferencia entre los materiales orgánicos aplicados, por lo que se considera que los lodos residuales tienen un efecto positivo en la producción de este cultivo, al igual que el compost.

## **RECOMENDACIONES**

Tomando en cuenta que los lodos son un recurso potencial desaprovechado, el promover su uso para mejorar suelo es la mejor opción considerando que en caso de no usarse son un contaminante potencial.

Dado que los lodos presentan características de las aguas de las que proceden y estas son variables según la fuente de origen, es necesario establecer pruebas rápidas que indiquen si son adecuados para su uso, especialmente por la concentración de elementos potencialmente tóxicos ya que se pueden concentrar en el suelo. Una opción es el monitoreo de microorganismos presentes en estos.

## REFERENCIAS

- Andreoli, C. V., Von Sperling, M. y Fernandes, F. edits., 2007. Biological wastewater treatment. Sludge treatment and disposal. London: IWA Publishing.
- Barreto F., F. L., Carvalho G., H. O. y Gheyi, H. R., 2003. Conductividad hidráulica en un suelo aluvial en respuesta al porcentaje de sodio intercambiable. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7(2):403-407
- Beeching, N. y Geoff, G. edits., 2014. *Lecture notes: Tropical medicine*. 7th ed. s.l.:John Wiley and Sons.
- Benitez, D. y Navarro, H., 1996. Rendimiento de maíz-frijol en un tepetate en el segundo año de rehabilitación agrícola. En: C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo , edits. *Suelos volcanicos endurecidos*. III Simposio Internacional. Quito: ORSTOM, pp. 287-295.
- Byappanahalli, M. N. y Fujioka, R. S., 1998. Evidence that tropical soil environment can support the growth of *Escherichia coli*. *Pergamon*, 38(12):171-174.
- Cabirol, N., Rojas O., M. y Noyola, A., 2002. Removal of helminth eggs and fecal coliforms by anaerobic termophilic sludge digestion. *Water Science and Technology*, 45(10):269-274.
- Catfield, D., Thamdrup, B. y Kristensen, E., 2005. *Aquatic geomicrobiology*. San Diego: Elsevier Academic Press.
- Dévai, I., Felföldy, L., Wittner, I. y Plósz, S., 1988. Detection of phosphine: new aspects of the phosphorus cycle in the hydrosphere. *Nature*, 333:343-345.
- Dumontet, S., Diné, H. y Baloda, S. B., 1999. Pathogen Reduction in Sewage Sludge by Composting and Other Biological: A Review. *Biological Agriculture & Horticulture: An International Journal for Sustainable Production Systems*, 16(4):409-430.
- Epstein, E., 2002. *Land application of sewage sludge and biosolids*. Boca Raton : CRC Press.
- Etchevers B., J. D. y Brito, H., 1997. Levantamiento nutrimental de los tepetates de México y Tlaxcala. En: C. Zebrowski, P. Quantin & G. Trujillo, edits. *Suelos volcanicos endurecidos*. III Simposio Internacional. Quito: ORSTOM, pp. 202-212.
- Fetcher-Escamilla, U. y Flores G., G., 1997. Propiedades físicas de suelos volcánicos endurecidos (tepetate t3) después de su rehabilitación, en Tlaxcala (México). En:

- M. D. Villamar, ed. Memorias del III Simposio Internacional sobre Suelos volcánicos endurecidos. Quito: ORSTOM, pp. 162-169.
- Fraç, M., Oszust, K. y Lipiec, J., 2012. Community Level Physiological Profiles (CLPP), characterization and microbial activity of soil Amended with dairy sewage sludge. *Sensors*, 12:3253-3268.
- Fuccz-Gamboa, J., Gómez-Moreno, R., Cárdenas G., M. y Campos-Pinilla, C., 2007. Comportamiento de coliformes fecales como indicadores bacterianos de contaminación fecal en diferentes mezclas de biosólido y estériles utilizados para la restauración ecológica de la cantera Soratama, Bogotá. *Universitas Scientiarum*, 12:111-120.
- García O., F. y otros, 2003. Efecto del riego sobre la supervivencia de coliformes en suelos degradados enmendados con lodo de depuradora. *Edafología*, 10(2):191-195.
- Gryta, A., Fraç, M. y Oszust, K., 2014. The Application of the Biolog EcoPlate approach in ecotoxicological evaluation of dairy sewage sludge. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 174:1434–1443.
- Hazelton, P. y Murphy, B., 2007. Interpreting soil test results. What do all de numbers mean?. Melbourne: CSIRO Publishing.
- Henry, J. G. y Heinke, G. W., 1999. Ingeniería Ambiental. Segunda ed. Naucalpan de Juárez, México: Prentice Hall.
- Hunt, N. y Gilkes, B., 1992. Farm monitoring handbook. Australia: University of Western Australia.
- Hunt, L. E., 1997. Geostatistical modeling of species distributions: implications for ecological and biogeographical studies. En: A. O. Soares, J. J. Gómez-Hernández y R. Froidevaux, edits. *geoENV I — Geostatistics for Environmental Applications: Proceedings of the Geostatistics for Environmental Applications Workshop*, Lisbon, Portugal, 18–19 November 1996. s.l.:Springer Netherlands, pp. 427-438.
- Kass, D. C. L., 1996. Fertilidad de suelos. Costa Rica: EUNED.
- Landa S., P. *et al.*, 2013. Persistencia de Salmonella Tiphymurium en nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(2):147-153.
- Leiton S., J. S., 1985. Riego y drenaje. Costa Rica: EUNED.
- Liu, X. *et al.*, 2006. Effects of agricultural management on soil organic matter and carbon transformation. A review. *Plant Soil and Environment*, 52(12):531-543.

- Lue-Hing, C., Zenz, D. R. y Kuchenrither, R. edits., 1995. Municipal sewage sludge management: processing and disposal. Lancaster (Pennsylvania): Technoving Publishing C.
- Matus, F. *et al.*, 2002. Efecto del manejo y algunas propiedades del suelo sobre la densidad aparente. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 2(1):7-15.
- Metzger, L., Levanon, D. y Mingelgrin, U., 1987. The effect of sewage sludge on soil structural stability: microbiological aspects. *Soil Science Society of America Journal*, 51:346-351.
- Ortiz S., C. A., 2010. Edafología. Octava ed. Texcoco: Universidad Autónoma Chapingo.
- Pepe, O., Ventrino, V. y Blaiotta, G., 2013. Dynamic of functional microbial groups during mesophilic composting of agro-industrial wastes and free-living (N<sub>2</sub>)-fixing bacteria application. *Waste Management*, 33:1616-1625.
- Prat, C., Ordaz Ch., V. y Rugama U., J. A., 2003. Impacto de la roturación y del manejo agronómico de un tepetate sobre su estructura. *Terra*, 21(1):109-115.
- Rivera-Vázquez , R. *et al.*, 2007. Contaminación por coliformes y helmintos en los rios Texcoco, Chapingo y San Bernardino tributarios de la parte oriental de la cuenca del Valle de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 23(2):69-77.
- Romero C., R., 2007. Microbiología y parasitología humana: Bases etiologicas de las enfermedades infecciosas y parasitarias. Tercera ed. México: Editorial Médica Panamericana.
- Santamaría-Romero, S. *et al.*, 2001. Dinámica y relaciones de microorganismos, C-orgánico y N-total durante el composteo y vermicomposteo. *Agrociencia*, 35:377-384.
- Schuh, S., Philipp, W. y Strauch, D., 1990. Influence of sewage sludge with and without lime treatment on the development of ascaris suum eggs. En: *Inactivation of microorganisms in sewage sludge by stabilisation processes*. Brussels: CRC Press, pp. 59-65.
- Singh, R. P. y Agrawal, M., 2008. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management*, 28:347-358.
- Stewart, W. D. P. ed., 1975. Nitrogen fixation by free-living micro-organisms. Great Britain: Cambridge University Press.
- Thompson, L. M. y Troeh, F. R., 1988. Los suelos y su fertilidad. Cuarta ed. Barcelona: Reverté.

- U.S. EPA, 1995. Process design manual: Land application of sewage sludge and domestic septage. Washington D.C.: USEPA/625/R-95/001.
- Whitacre, D. M. ed., 2011. Reviews of environmental contamination and toxicology. New York: Board.
- Zindahl, R. L., 2004. Weed-crop competition: A review. Second ed. Iowa: Blackwell Publishing.

## ANEXO 1. DENSIDAD OPTICA DE LAS PLACAS BIOLOG ECOPLATE

Lectura de densidad óptica medida a las 24 horas.

C\* = compost, L\*= lodos de Chalco y S\*= lodos de Santiaguito.

C*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0.061	0.075	0.069	0.087	0.051	0.085	0.082	0.081	0.048	0.082	0.080	0.083
B	0.098	0.297	0.126	0.074	0.105	0.299	0.139	0.084	0.078	0.291	0.137	0.177
C	0.104	0.087	0.077	0.072	0.130	0.080	0.075	0.072	0.102	0.073	0.078	0.082
D	0.125	0.117	0.086	0.088	0.105	0.083	0.087	0.084	0.213	0.141	0.087	0.074
E	0.082	0.115	0.103	0.077	0.079	0.082	0.139	0.092	0.097	0.075	0.093	0.078
F	0.088	0.108	0.145	0.079	0.076	0.079	0.090	0.088	0.080	0.118	0.087	0.081
G	0.112	0.101	0.128	0.098	0.075	0.112	0.104	0.087	0.161	0.131	0.205	0.176
H	0.150	0.210	0.102	0.067	0.069	0.087	0.170	0.079	0.082	0.078	0.105	0.075

L*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0.173	0.442	0.367	0.336	0.218	0.374	0.373	0.317	0.191	0.341	0.340	0.405
B	0.382	0.873	0.442	0.309	0.359	0.878	0.429	0.274	0.350	0.840	0.416	0.334
C	0.272	0.304	0.278	0.297	0.294	0.298	0.276	0.302	0.298	0.296	0.281	0.394
D	0.303	0.265	0.288	0.262	0.306	0.284	0.284	0.255	0.320	0.295	0.299	0.323
E	0.313	0.313	0.310	0.268	0.257	0.400	0.328	0.355	0.366	0.407	0.350	0.407
F	0.331	0.327	0.512	0.342	0.327	0.341	0.370	0.328	0.375	0.350	0.255	0.340
G	0.405	0.562	0.323	0.318	0.533	0.288	0.271	0.307	0.361	0.335	0.274	0.327
H	0.355	0.377	0.325	0.361	0.454	0.286	0.301	0.267	0.420	0.308	0.284	0.787

S*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0.050	0.085	0.071	0.078	0.047	0.082	0.186	0.141	0.048	0.147	0.134	0.146
B	0.154	0.375	0.178	0.121	0.385	0.400	0.197	0.115	0.134	0.373	0.188	0.139
C	0.210	0.123	0.145	0.132	0.151	0.128	0.140	0.116	0.152	0.143	0.142	0.136
D	0.140	0.110	0.116	0.109	0.135	0.122	0.134	0.119	0.144	0.116	0.133	0.140
E	0.136	0.137	0.153	0.128	0.150	0.132	0.159	0.138	0.150	0.135	0.178	0.193
F	0.156	0.140	0.173	0.147	0.142	0.150	0.178	0.167	0.177	0.165	0.181	0.210
G	0.125	0.152	0.163	0.137	0.126	0.122	0.163	0.117	0.110	0.120	0.161	0.131
H	0.259	0.127	0.157	0.183	0.153	0.107	0.104	0.120	0.162	0.126	0.275	0.157

**Lectura de densidad óptica medida a las 48 horas.**

C*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0.056	0.080	0.074	0.359	0.060	0.185	0.091	0.082	0.052	0.088	0.092	0.083
B	0.880	0.298	0.128	0.076	1.115	0.293	0.138	0.085	0.080	0.295	0.137	1.829
C	0.110	0.378	0.082	0.077	0.658	0.509	0.081	0.074	0.590	0.077	0.085	0.726
D	0.164	1.833	0.090	0.088	0.420	0.087	0.843	0.104	0.726	1.856	0.460	0.073
E	0.085	0.962	0.706	0.084	0.082	0.083	0.859	1.920	0.721	0.076	0.782	0.078
F	0.093	1.757	0.088	0.080	0.082	0.079	0.969	0.077	0.083	1.901	0.548	0.081
G	0.134	0.107	0.135	0.129	0.080	1.651	0.113	0.089	0.243	0.466	0.232	0.186
H	0.157	0.247	0.164	0.075	0.077	1.568	0.109	1.194	1.539	0.080	0.589	0.077

L*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0.520	0.407	0.374	0.340	0.988	0.386	0.387	0.321	0.974	0.368	0.342	0.411
B	0.387	0.845	0.449	0.308	0.370	0.863	0.429	0.274	0.363	0.821	0.383	0.357
C	0.268	0.302	0.289	0.302	0.292	0.309	0.296	0.311	0.305	0.302	0.309	0.425
D	0.302	0.272	0.295	0.280	0.305	0.298	0.296	0.266	0.316	0.333	0.314	0.253
E	0.321	0.322	0.337	0.270	0.263	0.415	0.345	0.358	0.391	0.438	0.375	0.368
F	0.396	0.331	0.568	0.346	0.355	0.342	0.387	0.336	0.387	0.328	0.260	0.352
G	0.428	0.475	0.330	0.335	0.562	0.291	0.294	0.327	0.368	0.328	0.292	0.349
H	0.364	0.356	0.295	0.393	0.473	0.284	0.270	0.273	0.442	0.307	0.291	2.282

S*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0.053	0.518	0.076	0.090	0.050	0.123	0.194	0.149	0.049	0.151	0.138	0.159
B	0.289	0.374	0.178	0.124	2.356	0.406	0.197	0.133	0.305	0.379	0.189	0.158
C	0.502	0.134	0.145	0.145	0.507	0.145	0.141	0.128	0.244	0.150	0.142	0.141
D	0.606	0.128	0.116	0.122	0.387	0.134	0.135	0.132	0.365	0.299	0.134	0.147
E	1.014	0.151	0.247	0.129	0.376	0.151	0.159	0.150	0.150	0.146	0.186	0.222
F	0.241	0.231	0.173	0.148	0.627	0.164	1.049	0.257	0.347	0.187	0.194	1.782
G	0.159	0.294	0.160	0.138	0.166	0.143	0.171	0.118	0.649	0.137	0.161	0.132
H	1.876	0.343	1.387	2.048	0.677	0.147	0.103	0.207	0.242	0.164	1.730	0.166

**Lectura de densidad óptica medida a las 72 horas.**

C*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0.053	0.081	0.077	0.824	0.207	0.494	0.093	0.084	0.054	0.092	0.094	0.088
B	1.581	0.402	0.180	0.100	1.428	0.309	0.140	0.087	0.085	0.402	0.149	1.984
C	0.240	0.720	0.083	0.090	0.853	0.748	0.102	0.076	0.745	0.127	0.125	1.178
D	0.273	2.926	0.133	0.108	0.699	0.159	1.254	0.190	1.034	2.386	0.724	0.077
E	0.090	1.423	1.214	0.171	0.086	0.133	1.450	2.558	0.967	0.080	1.157	0.082
F	0.190	2.363	0.097	0.135	0.089	0.082	1.191	0.080	0.104	2.399	1.061	0.084
G	0.231	0.142	0.131	0.626	0.087	2.203	0.112	0.093	0.342	2.176	0.263	0.188
H	0.204	0.310	0.274	0.236	0.100	1.897	0.086	1.629	2.076	0.083	1.803	0.229

L*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0.552	0.369	0.377	0.331	0.604	0.382	0.388	0.325	0.756	0.366	0.352	0.389
B	0.393	0.829	0.448	0.304	0.367	0.846	0.427	0.277	0.356	0.808	0.386	0.346
C	0.268	0.308	0.304	0.304	0.29	0.308	0.304	0.317	0.343	0.302	0.318	0.411
D	0.297	0.281	0.304	0.26	0.301	0.282	0.311	0.264	0.307	0.361	0.317	0.259
E	0.324	0.337	0.363	0.271	0.265	0.428	0.351	0.367	0.396	0.434	0.396	0.371
F	0.464	0.329	0.402	0.355	0.453	0.357	0.399	0.347	0.398	0.331	0.26	0.346
G	0.413	0.426	0.339	0.351	0.538	0.298	0.301	0.333	0.373	0.332	0.298	0.359
H	0.358	0.346	0.297	0.381	0.452	0.289	0.272	0.283	0.431	0.289	0.291	2.475

S*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0.051	0.773	0.079	0.106	0.052	0.461	0.201	0.176	0.05	0.154	0.14	0.297
B	0.391	0.37	0.181	0.131	2.516	0.399	0.198	0.329	0.58	0.373	0.19	0.442
C	0.69	0.246	0.149	0.365	0.744	0.283	0.143	0.29	0.506	0.139	0.148	0.146
D	1.007	0.37	0.126	0.302	0.515	0.283	0.133	0.284	0.503	0.761	0.14	0.216
E	1.737	0.288	0.571	0.136	0.826	0.312	0.169	0.429	0.156	0.271	0.222	0.581
F	1.024	0.604	0.18	0.172	0.961	0.394	2.079	0.879	1.163	0.342	0.309	2.18
G	0.503	0.653	0.151	0.147	0.496	0.396	0.177	0.125	1.285	0.337	0.157	0.136
H	2.457	0.662	2.637	2.394	1.164	0.436	0.116	0.532	0.489	0.451	1.87	0.175

**Lectura de densidad óptica medida a las 96 horas.**

C*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0.051	0.079	0.077	1.248	0.363	0.906	0.091	0.082	0.052	0.098	0.093	0.173
B	1.383	0.579	0.270	0.186	1.640	0.405	0.152	0.087	0.104	0.562	0.277	2.070
C	0.397	0.975	0.135	0.173	1.089	1.057	0.158	0.090	0.992	0.208	0.188	1.387
D	0.464	3.164	0.186	0.420	0.770	0.603	1.493	0.860	1.301	2.649	0.953	0.077
E	0.102	1.614	1.559	0.247	0.085	0.208	1.930	2.694	1.180	0.078	1.660	0.077
F	1.031	2.663	0.137	0.209	0.211	0.083	1.499	0.076	0.250	2.696	1.540	0.080
G	0.401	0.198	0.125	0.967	0.173	2.651	0.107	0.090	0.831	2.732	0.294	0.187
H	0.414	0.404	0.416	0.589	0.271	2.107	0.082	1.820	2.267	0.079	2.088	1.204

L*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0.616	0.368	0.378	0.331	0.703	0.390	0.398	0.326	0.806	0.377	0.360	0.369
B	0.398	0.823	0.452	0.305	0.375	0.835	0.426	0.278	0.366	0.800	0.388	0.354
C	0.266	0.311	0.307	0.310	0.288	0.309	0.307	0.318	0.409	0.302	0.321	0.417
D	0.296	0.280	0.305	0.266	0.296	0.285	0.312	0.272	0.303	0.357	0.319	0.259
E	0.321	0.336	0.361	0.275	0.263	0.430	0.351	0.365	0.396	0.452	0.514	0.371
F	1.093	0.327	0.407	0.355	1.442	0.355	0.401	0.346	0.398	0.332	0.262	0.346
G	0.414	0.435	0.338	0.350	0.514	0.297	0.301	0.332	0.380	0.347	0.298	0.360
H	0.362	0.344	0.358	0.388	0.453	0.288	0.273	0.283	0.438	0.291	0.294	2.548

S*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0.049	1.351	0.079	0.526	0.051	0.709	0.204	0.431	0.048	0.154	0.140	0.653
B	1.127	0.375	0.182	0.160	2.953	0.401	0.199	0.705	1.385	0.373	0.190	0.808
C	1.271	0.529	0.149	0.688	1.238	0.507	0.144	0.593	0.795	0.298	0.145	0.158
D	1.815	0.682	0.135	0.541	0.829	0.542	0.138	0.515	0.897	1.208	0.144	0.589
E	2.064	0.632	1.053	0.136	1.734	0.555	0.163	0.796	0.161	0.308	0.576	0.951
F	1.518	1.083	0.251	0.165	1.531	0.676	2.412	2.034	1.920	0.565	0.590	2.568
G	1.564	1.236	0.159	0.145	1.401	0.815	0.155	0.125	2.724	0.641	0.149	0.131
H	2.698	1.113	2.869	2.541	1.468	0.863	0.114	0.906	1.974	0.777	2.167	0.167

**Lectura de densidad óptica medida a las 120 horas.**

C*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0.057	0.123	0.085	1.553	0.473	1.179	0.100	0.089	0.057	0.158	0.101	0.331
B	1.518	0.864	0.401	0.317	1.627	0.697	0.268	0.137	0.231	0.773	0.455	2.309
C	0.769	1.126	0.239	0.234	1.362	1.282	0.293	0.175	1.189	0.513	0.376	1.572
D	0.771	2.715	0.244	0.596	0.933	1.294	1.742	1.774	1.559	2.766	1.064	0.194
E	0.168	1.854	1.812	0.354	0.128	0.376	2.291	2.725	1.476	0.139	1.995	0.088
F	1.263	2.842	0.223	0.341	0.427	0.156	1.681	0.084	0.444	2.793	1.887	0.088
G	0.710	0.265	0.133	1.239	0.406	2.878	0.118	0.099	1.850	2.917	0.361	0.187
H	0.510	0.589	0.454	1.104	0.437	2.221	0.092	2.074	2.454	0.091	2.404	1.753

L*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0.674	0.378	0.387	0.339	0.636	0.396	0.407	0.336	0.831	0.365	0.361	0.370
B	0.405	0.819	0.465	0.309	0.373	0.830	0.428	0.285	0.365	0.792	0.394	0.369
C	0.271	0.316	0.315	0.313	0.293	0.314	0.317	0.327	0.543	0.315	0.336	0.419
D	0.324	0.286	0.313	0.266	0.301	0.293	0.316	0.274	0.308	0.322	0.333	0.270
E	0.328	0.343	0.368	0.275	0.270	0.440	0.360	0.382	0.407	0.469	0.532	0.379
F	1.715	0.361	0.424	0.361	2.062	0.363	0.412	0.357	0.409	0.348	0.264	0.357
G	0.419	0.446	0.345	0.359	0.524	0.304	0.310	0.346	0.394	0.362	0.311	0.371
H	0.361	0.350	0.347	0.387	0.520	0.296	0.282	0.292	0.339	0.301	0.282	2.491

S*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0.052	1.688	0.083	0.534	0.053	0.893	0.202	0.667	0.053	0.194	0.145	1.181
B	1.526	0.379	0.185	0.157	2.582	0.396	0.201	1.393	1.952	0.376	0.192	0.913
C	1.979	0.922	0.152	0.896	1.890	0.648	0.146	0.623	1.292	0.474	0.150	0.227
D	2.600	0.650	0.163	0.622	1.257	0.947	0.158	0.810	1.453	1.368	0.170	0.934
E	1.945	0.726	1.361	0.140	2.250	0.871	0.337	0.808	0.178	0.308	0.759	1.355
F	1.790	1.248	0.287	0.153	1.517	1.001	2.609	2.789	2.507	0.704	0.722	2.541
G	2.301	1.951	0.177	0.151	2.336	1.144	0.154	0.138	2.377	0.761	0.165	0.137
H	2.474	1.541	2.345	2.262	1.951	1.090	0.123	1.733	2.342	0.779	1.497	0.178

**Lectura de densidad óptica medida a las 144 horas.**

C*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0.063	0.227	0.093	1.664	0.542	1.360	0.112	0.096	0.063	0.241	0.113	0.528
B	1.175	1.274	0.537	0.557	1.401	0.932	0.395	0.187	0.335	1.038	0.579	1.919
C	1.321	1.124	0.807	0.294	1.599	0.981	0.510	0.235	1.374	0.933	0.776	1.654
D	1.325	2.614	0.588	1.466	0.923	1.610	1.577	2.132	1.692	2.706	0.865	0.388
E	0.279	1.881	1.644	0.498	0.192	0.719	1.705	2.059	1.362	0.289	1.622	0.102
F	1.374	1.897	0.496	0.532	0.758	0.253	1.404	0.097	0.981	1.820	2.086	0.116
G	1.020	0.327	0.168	1.332	0.981	2.311	0.145	0.112	2.064	2.179	0.477	0.202
H	0.733	0.765	0.496	1.683	0.617	1.875	0.370	1.547	2.443	0.116	2.444	2.140

L*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0.672	0.381	0.393	0.346	0.644	0.395	0.423	0.345	0.803	0.375	0.370	0.367
B	0.411	0.817	0.415	0.320	0.385	0.827	0.436	0.293	0.377	0.789	0.407	0.370
C	0.276	0.323	0.327	0.322	0.299	0.370	0.328	0.336	0.750	0.327	0.353	0.416
D	0.370	0.297	0.323	0.277	0.307	0.304	0.325	0.286	0.314	0.329	0.344	0.284
E	0.336	0.354	0.379	0.288	0.279	0.454	0.371	0.393	0.419	0.481	0.569	0.391
F	1.921	0.445	0.449	0.374	2.192	0.377	0.424	0.370	0.421	0.360	0.276	0.368
G	0.426	0.455	0.357	0.372	0.539	0.317	0.323	0.360	0.413	0.385	0.326	0.383
H	0.370	0.360	0.403	0.378	0.535	0.310	0.297	0.307	0.339	0.314	0.296	2.475

S*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0.056	2.088	0.087	1.126	0.056	1.553	0.211	1.032	0.053	0.224	0.162	1.845
B	2.172	0.379	0.189	0.183	3.017	0.397	0.205	2.382	2.518	0.375	0.196	2.077
C	2.479	1.554	0.157	1.205	2.421	1.088	0.150	1.168	1.866	0.717	0.154	0.503
D	2.184	1.333	0.263	0.863	1.633	1.456	0.159	1.304	1.822	1.919	0.179	1.377
E	2.358	1.222	2.399	0.144	2.532	1.369	0.481	1.190	0.195	0.418	1.128	2.219
F	2.418	1.714	0.410	0.150	1.839	2.542	2.834	3.062	3.087	1.096	1.003	2.835
G	2.704	2.865	0.219	0.155	2.829	1.911	0.211	0.149	2.775	1.134	0.194	0.140
H	2.784	2.065	2.837	2.632	2.367	2.419	0.158	2.654	2.291	1.706	2.678	0.170