



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD**  
**ECOLOGÍA**

**EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE UN ABONO TIPO BOCASHI PREPARADO**  
**CON CENIZA VOLANTE Y BIOSÓLIDOS EN EL CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE**  
**MAÍZ (*Zea mays*)**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

PRESENTA:

**KARLA ELVIRA CORTÉS TELLO**

**TUTOR PRINCIPAL DE TESIS: DR. PABLO FABIÁN JARAMILLO LÓPEZ**  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD, UNAM  
**COMITÉ TUTOR: DRA. MAYRA GAVITO PARDO**  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD, UNAM  
**DR. FRANCISCO JAVIER ÁLVAREZ SÁNCHEZ**  
FACULTAD DE CIENCIAS, UNAM

**MORELIA, MICHOACÁN.**

**FEBRERO, 2019**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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





**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD  
ECOLOGÍA

**EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE UN ABONO TIPO BOCASHI PREPARADO  
CON CENIZA VOLANTE Y BIOSÓLIDOS EN EL CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE  
MAÍZ (*Zea mays*)**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

PRESENTA:

**KARLA ELVIRA CORTÉS TELLO**

**TUTOR PRINCIPAL DE TESIS: DR. PABLO FABIÁN JARAMILLO LÓPEZ**  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD, UNAM  
**COMITÉ TUTOR: DRA. MAYRA GAVITO PARDO**  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD, UNAM  
**DR. FRANCISCO JAVIER ÁLVAREZ SÁNCHEZ**  
FACULTAD DE CIENCIAS, UNAM

**MORELIA, MICHOACÁN.**

**FEBRERO, 2019**

OFICIO CPCB/089/2019

Asunto: Oficio de Jurado para Examen de Grado.

M. en C. Ivonne Ramírez Wence  
Directora General de Administración Escolar, UNAM  
Presente

Por medio de la presente me permito informar a usted, que el Subcomité de Biología Evolutiva y Sistemática, en su sesión ordinaria del día 26 de noviembre de 2018 aprobó el siguiente jurado para la presentación del examen de grado de MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS a la alumna CORTÉS TELLO KARLA ELVIRA, con número de cuenta 307034997, con la tesis titulada: "Evaluación de los efectos de un abono tipo bocashi preparado con ceniza volante y biosólidos en el crecimiento del cultivo de maíz (*Zea mays*)", realizada bajo la dirección del Dr. Pablo Fabián Jaramillo López.

Presidente: Dra. Ana Isabel Moreno Calles  
Vocal: Dr. Francisco Mora Antilla  
Secretario: Dr. Francisco Javier Álvarez Sánchez  
Suplente: Dr. Guillermo Nicolás Murray Tortarolo  
Suplente: Dr. Erick de la Barrera Montpelier

Sin otro particular, quedo de usted.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria, Cd. Mx., a 22 enero de 2019

DR. ADOLFO GERARDO NAVARRO SIGÜENZA  
COORDINADOR DEL PROGRAMA

### **Agradecimientos institucionales**

Agradezco al Posgrado en Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por su apoyo académico y administrativo. A Leonarda Terán Cárdenas por su apoyo en todos los trámites administrativos.

Al programa de becas del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada (CVU/becario: 778463/307034997) y a los apoyos PAEP para el financiamiento de mis estudios de posgrado.

Quiero agradecer a mi asesor, el Dr. Pablo Jaramillo López por la orientación brindada para la elaboración del proyecto.

A los miembros de mi comité tutor la Dra. Mayra Elena Gavito Pardo y el Dr. Francisco Javier Álvarez Sánchez por su confianza y aportaciones durante la realización de esta investigación.

## **Agradecimientos personales.**

A mi familia por apoyarme cuando decidí hacer la maestría en Morelia y por contar siempre con ustedes. ¡Muchas Gracias!

A Rosa por ser un gran apoyo en este trayecto, por ser mi compañera de parranda, por llevarme a Chamela, por darme asilo en su casa y por ser una gran persona y gran amiga. ¡Muchas Gracias Rosa!

A Fani, Omar, Gris, Yadira, Ceci por ser parte de la realización de este proyecto, por su apoyo en las cosechas y por hacer mi estancia en el laboratorio sumamente agradable ¡gracias chicos!

A los miembros del Laboratorio de Agroecología John, Carlos, Paola, El Tigre, Andrea, David, Semi, Venecia, Marce, Dante, Dania, Eleonora, Miguel, Hexon, Ivonne, Rebe, Tsiri, Gerardo por su apoyo, comentarios y compañerismo.

A Jovany, Erandi, Alheli, Jaritzi, Andrés, Saulo por su apoyo en los trabajos pesados y por su amistad, ¡esta tesis es posible gracias a ustedes!

A las personas que conocí a lo largo de la maestría Gus, Ana Silvia, Mayra, Rafa, Ana Carolina, Abbid, Karla por sus consejos y por acompañarme en mis locuras.

Al comité revisor: la Dra. Ana Isabel Moreno Calles, al Dr. Francisco Mora Ardila, al Dr. Guillermo Nicolas Murray Tortarolo y al Dr. Erick de la Barrera Montppelier por sus acertados comentarios para la mejora de esta tesis.

A la M. en C. Maribel Nava Mendoza del Laboratorio de Química Analítica y Metabólica en el Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad de la UNAM por su asesoría en la cuantificación y análisis de nitrógeno y fósforo.

Al Dr. Faustino Juárez Sánchez del Laboratorio de Geomagnetismo y Exploración del Instituto de Geofísica de la UNAM por su asesoría en la cuantificación y análisis de las muestras de elementos en ICP.

A la M. en C. Ana Lidia Sandoval Pérez y al M. en C. César N. Maldonado Cortés del Laboratorio Nacional de Innovación Ecotecnológica para la Sustentabilidad por su apoyo en el procesamiento de las muestras.

A la M. en C. Hilda Rivas Solórzano del Centro de Investigaciones y por el apoyo y préstamo de las instalaciones del laboratorio para realizar las digestiones.

A los trabajadores de la central termoeléctrica de Petacalco, a los trabajadores de la PTAR de Itzúcaros, Morelia, a los trabajadores del OOAPAS, Morelia, en especial al Ing. Nicanor Ruíz por facilitar la obtención de los materiales para realizar este trabajo.

## Índice.

Resumen.....	iii
Abstract .....	iv
1. Introducción .....	1
2. Objetivo general.....	3
2.1. Objetivos particulares .....	3
3. Antecedentes.....	3
3.1 Fertilizantes sintéticos: ventajas y desventajas.....	3
3.2. Bocashi .....	4
3.3. Ceniza volante.....	7
3.4. Biosólidos.....	8
3.5. Metales pesados. ....	9
4. Hipótesis.....	12
5. Materiales y Método .....	13
5.1. Elaboración de Bocashi .....	13
5.1.1. Ceniza volante: obtención, manejo y cálculo de su concentración .....	13
5.1.2. Biosólidos, obtención y procesamiento. ....	14
5.2. Preparación del Bocashi.....	16
5.3. Diseño experimental.....	18
5.4. Desarrollo del experimento.....	19
5.5. Análisis de muestras .....	20

5.6. Análisis estadísticos .....	21
6. Resultados.....	22
6.1. Características físicas del Bocashi .....	22
6.2. Características fisicoquímicas del suelo después de la cosecha .....	23
6.3. Crecimiento del maíz.....	25
7. Discusión.....	34
8. Conclusión.....	37
9. Literatura .....	38
10. Apéndices .....	52
Apéndice I .....	52
Apéndice II .....	53
Apéndice III. ....	54
Apéndice IV.....	55
Apéndice V.....	56

## Resumen.

El uso de fertilizantes sintéticos en la agricultura permitió el incremento en la producción de alimentos, pero su uso desmedido ha provocado múltiples efectos negativos sobre el planeta. Los abonos orgánicos están siendo utilizados nuevamente para sustituir a los fertilizantes sintéticos. Uno de los abonos que se utiliza para mejorar la fertilidad del suelo es el bocashi, donde se promueve la descomposición de los desechos orgánicos a través de añadir microorganismos fermentadores. Los componentes del bocashi convencional son: suelo, estiércol de vaca, rastrojo de maíz, salvado de trigo, levadura, carbón vegetal triturado, agua y piloncillo. En este trabajo en particular se sustituyó el estiércol de vaca por biosólidos y el carbón vegetal se sustituyó por ceniza volante. Se decidió utilizar estos dos elementos ya que se generan en grandes cantidades en todo el mundo y constituyen un problema ambiental en el suelo en cuanto a su disposición final. Adicionalmente estos materiales tienen una alta concentración de nutrientes, sin embargo, por la presencia de metales pesados no han sido utilizados ampliamente. Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar la efectividad de los biosólidos y la ceniza volante procesados con la técnica de fermentación de bocashi como promotores del crecimiento de las plantas de maíz. Para la creación del bocashi se empleó ceniza volante que se obtuvo de una central termoeléctrica en Guerrero, los biosólidos se obtuvieron de una planta de tratamiento de aguas residuales en Morelia. Se empleó suelo agrícola de Undameo, Michoacán. El experimento se desarrolló bajo condiciones de invernadero. Se utilizó 15% de bocashi y 85% de suelo con respecto al peso de la maceta (dos kg) para hacer la mezcla de sustrato. Se comparó con sustrato estéril y no estéril, con tres diferentes enmiendas, Bocashi de biosólidos, Bocashi de estiércol de vaca y fertilizante sintético en dos tiempos de cosecha. Las plantas abonadas con Bocashi de biosólidos presentaron los valores más altos con respecto a los demás tratamientos en las variables de biomasa aérea (49.71 g), biomasa total (69.82 g), concentración de N (241.99% más que el testigo) y concentración de P (94% más que el testigo). No se encontraron concentraciones medibles de Cd y Pb. Estos parámetros demuestran un mejor crecimiento del maíz en comparación con los demás tratamientos. Con este trabajo se puede concluir la efectividad de utilizar los biosólidos y la ceniza volante procesados con la técnica del bocashi que resultó en un incremento en el crecimiento de las plantas de maíz.

## **Abstract**

The use of synthetic fertilizers in agriculture has increased food production worldwide, but the overuse of these products has resulted in various negative effects to the environment. Organic amendments are being used again to replace synthetic fertilizers. An example of an organic amendment, that is used to improve soil fertility, is bocashi. Bocashi fosters the decomposition of organic residues through the activity of fermenting microorganisms. The components of regular bokashi are: soil, cow manure, chipped corn stalks, wheat bran, yeast, crushed charcoal, water and brown sugar. For this research, cow manure was replaced with biosolids and charcoal was replaced with fly ash. These two components were included in this research because they are generated in large amounts all over the world and represent an environmental pollution problem because of their final disposal. Additionally, these materials have high concentrations of nutrients, but they have not been widely used because they also contain heavy metals. Because of this, the main objective of this research was to evaluate the feasibility of using biosolids and fly ash, processed through the bocashi fermentation process, as growth promoters of maize plants. To generate bocashi for these experiments, fly ash was obtained from a Thermoelectric plant in the State of Guerrero, Mexico and the biosolids were obtained from the sewage treatment plant of Morelia, Mexico. Agricultural soil from an agricultural plot in the locality of Santiago Undameo, Michoacán, Mexico was used for the experiments as well. The experiments were carried out under greenhouse conditions. Fifteen percent bocashi and 85% soil w/w were mixed, and pots (2 kg) were filled with the mixtures. Sterile and non-sterile soil mixtures with three amendments (bocashi with biosolids, bokashi with cow manure and synthetic fertilizers) were compared at two harvest times. The plants that were grown in the bocashi with biosolids treatment had the highest values in aerial biomass (49.71 g), total biomass (69.82 g), N concentration (241.99 % higher than the control) and P concentration (94% higher than the control). Cadmium and Lead concentrations were below the detection limits. These parameters show improved maize growth when compared with the other treatments. With the information produced in this research, we can conclude that biosolids and fly ash processed using the bocashi technique resulted in improved growth of maize plants.

## 1. Introducción

El uso de fertilizantes sintéticos, principalmente nitrógeno (N) y fósforo (P), han permitido un incremento en la producción de alimentos para abastecer la demanda de alimentación de la creciente población humana a nivel mundial (Galloway y Cowling 2002).

Sin embargo, su uso ha sido desmedido y ha traído consecuencias negativas en varios aspectos. El suelo, se ve afectado por la lixiviación de nutrientes, la pérdida de fertilidad y la baja productividad (Parr y Hornick 1992).

También ha afectado los sistemas naturales, contaminando las aguas subterráneas, incrementando la pérdida de hábitat y biodiversidad tanto de sistemas terrestres como marinos, así como la eutroficación de los sistemas acuáticos (Vollenweider et al. 1992; Howarth et al. 1996; Rabalais et al. 2001; Turner et al. 2003; Díaz y Rosenberg 2008)

Ante el impacto que han generado los fertilizantes sintéticos, se busca regresar a las enmiendas orgánicas compuestas de materia orgánica que otorgan al suelo, el mantenimiento de sus funciones y su calidad como es el almacenar y generar nutrientes importantes para el crecimiento de las plantas (Karlen et al. 1997).

Como ejemplo de las enmiendas orgánicas tenemos las compostas, los abonos verdes, los residuos vegetales, el estiércol de animales de granja y el bocashi (Singh et al. 2011; Wezel et al. 2014; Scotti et al. 2015).

El bocashi es un abono orgánico de origen japonés que se produce mediante la descomposición de los desechos animales o vegetales a través de un proceso aeróbico de fermentación (Shintani et al. 2000). La ventaja del bocashi es que no existe una receta estricta y se puede acoplar a los materiales locales (Ramos-Agüero y Terry-Alfonso 2014).

Cabe resaltar que los materiales que se utilizan para el Bocashi pasaran a la planta y es por ello por lo que estos materiales deben ser evaluados previamente (Brechelt 2004).

Es por ello que se aprovecharon los biosólidos y la ceniza volante que son desechos industriales que se generan en grandes cantidades y se caracterizan por presentar una gran cantidad de nutrientes para el crecimiento de las plantas, sin embargo suelen tener concentraciones importantes de metales pesados que limitan su uso en la agricultura (Castaldi et al. 2006; Gupta y Sinha 2008; Farasat y Namli 2016).

## **2. Objetivo general**

- Evaluar la efectividad del uso de los biosólidos y la ceniza volante procesados con la técnica de fermentación de Bocashi como promotores del crecimiento de la planta de maíz.

### 2.1. Objetivos particulares

1. Determinar la acidez y la conductividad eléctrica de los biosólidos y de la ceniza volante.
2. Generar el Bocashi con biosólidos y ceniza volante, y determinar si existen diferencias en la acidez y la conductividad eléctrica en los sustratos comparados entre el fertilizante sintético y el Bocashi de estiércol de vaca.
3. Evaluar si existen diferencias en el crecimiento de las plantas nutridas con Bocashi de biosólidos y ceniza volante, fertilizante mineral o Bocashi de estiércol de vaca en sustratos con diferente esterilidad.

## **3. Antecedentes**

### 3.1 Fertilizantes sintéticos: ventajas y desventajas

Los fertilizantes sintéticos han permitido incrementar la producción de alimentos en los últimos 40 años, pasando de alimentar a 4 millones a 6,000 millones de personas a nivel mundial (Cohen 1995) reduciendo la hambruna e incrementando la nutrición para un mejor desarrollo de la sociedad (Waggoner 1995).

Sin embargo, el abuso de fertilizantes sintéticos en la agricultura ha provocado alteraciones a nivel global en los ciclos del nitrógeno (N) y el fósforo (P) (Vitousek et al. 1997; Bouwman et al. 2013). En los sistemas acuáticos ha ocasionado la lixiviación de nitratos hacia los mantos acuíferos, afectando la productividad de los sistemas por el incremento de la

población de las algas que consumen el oxígeno causan la muerte de los demás seres vivos (Vollenweider et al. 1992; Howarth et al. 1996; Rabalais et al. 2001; Turner et al. 2003; Díaz y Rosenberg 2008).

También han alterado las emisiones de N en la atmósfera como el aumento de amonios, óxidos nitrosos y óxidos nítricos que de acuerdo con el Panel internacional del Cambio Climático (IPCC) tiene un efecto directo sobre el incremento de los gases de efecto invernadero y el cambio climático (Byrnes 1990; Tilman 1999).

En los sistemas agrícolas los fertilizantes sintéticos han provocado la pérdida y lixiviación de nutrientes, la erosión y degradación del suelo, y con esto la consecuente reducción en la productividad agrícola (Parr y Hornick, 1992). Lo que hace que se utilicen más fertilizantes causando un aumento en la demanda y promoviendo el incremento de los costos de los fertilizantes y de la producción de alimentos (Larios-Guzmán et al. 2011).

Por ello se ha buscado volver a las técnicas que integran materia orgánica a los suelos, ya que brindan protección a la erosión, lixiviación y degradación del suelo (Parr y Hornick, 1992). Algunos ejemplos de materiales ricos en materia orgánica y N lábil son el estiércol de animales de granja (vacuno, ovino, porcino), gallinaza, vermicomposta, abonos verdes, residuos agrícolas, compostas, aguas residuales y Bocashi (Cegarra et al. 1993; Soto 2003; Lamsfus et al. 2003; Brechelt 2004).

### 3.2. Bocashi

El Bocashi es un abono orgánico de origen japonés, que se produce mediante la descomposición de los desechos animales o vegetales a través de un proceso aeróbico de fermentación (Shintani et al. 2000). A diferencia de la composta, el proceso de descomposición es más acelerado debido a la adición de “organismos efectivos” (Pei-Sheng y Hui-Lian 2002; Jenkins y Daly 2005).

Mediante la aplicación del Bocashi, se ha demostrado un incremento en la biomasa y en la actividad de los microorganismos en el suelo, la mejora de las características físicas del suelo y un incremento en la nutrición de las plantas (Formowitz et al. 2007; Jaramillo et al. 2015; Murillo-Amador et al. 2015).

No existe una fórmula exclusiva para la elaboración del Bocashi, lo que le da la ventaja de ajustarse a los componentes y materiales existentes en el sitio donde se desea hacer (Restrepo 2010). La siguiente tabla (Tabla 1) contiene los ingredientes más comunes para crear Bocashi en México:

Tabla 1. Composición del Bocashi en México (Modificado de Ramos-Agüero y Terry-Alonso, 2014).

<b>Componente</b>	<b>Descripción</b>
Suelo	Es el sustrato base y contiene los microorganismos benéficos de interés
Estiércol de vaca	Fuente de nutrientes, especialmente N
Ceniza	Fuente de nutrientes y micronutrientes
Rastrojo de maíz	Da estructura al abono y es fuente de carbono (C)
Salvado de trigo	Fuente de nutrientes, especialmente C
Levadura	Produce enzimas que promueven la descomposición de la materia orgánica
Carbón vegetal triturado	Mejora características físicas del suelo y es fuente de C
Agua	Elemento esencial para la actividad microbiana y para que se den las reacciones de descomposición
Piloncillo	Fuente de energía (C)

La composición química del Bocashi varía según los materiales utilizados en su elaboración (Uribe 2003; Cerrato et al. 2007; Jorge y Olivia 2007; Restrepo 2010). Aprovechando que

no existe una receta estricta de Bocashi, en este proyecto creará un Bocashi único con ceniza volante y biosólidos como materia prima, cuyas características de dichos materiales se describen a continuación:

### 3.3. Ceniza volante

La ceniza volante (CV) es uno de los subproductos de la combustión del carbón mineral que se utiliza para generar energía eléctrica (Sarkar et al. 2012). Las propiedades físicas y químicas de la CV dependen de la naturaleza del carbón parental y de las condiciones bajo las cuales se realizó la combustión (Karapanagioti y Atalay 2001; Pandey y Singh 2010) y suelen presentar valores tanto ácidos como alcalinos (pH de 4.5 a 12; Jala y Goyal 2006).

La CV está compuesta principalmente de sílice (Si), aluminio (Al), Hierro (Fe) y óxidos de calcio (Ca), además de contener, en menor cantidad, sodio (Na), fósforo (P), potasio (K) y azufre (S) (Singh et al. 2014) y en cantidades aún menores cadmio (Cd), plomo (Pb), cobre (Cu), cobalto (Co), molibdeno (Mo), zinc (Zn), boro (B), fluor (F) (Tripathi et al. 2004; Gupta y Sinha 2008).

Este material se genera en grandes cantidades a través en todo el mundo y se ha vuelto un problema ambiental, ya que se concentra en un lugar específico lo que provoca que contaminen el suelo donde se dispone y los mantos acuíferos por la lixiviación de metales pesados (Kishor et al. 2010).

Sin embargo, por sus características físicas y químicas, la CV puede ser utilizada como enmienda de suelo. Por ejemplo, se han observado efectos positivos en la actividad microbiana del suelo (Pati y Sahu 2004) y en el ciclo del N y P (Lai et al. 1999). Además, la CV ha sido utilizada como enmienda de suelo para incrementar el pH debido a la presencia de Ca y la movilidad de  $-OH$ , característica que favorece el crecimiento bacteriano (SurrIDGE et al. 2009).

Aunque, también hay evidencia que altas concentraciones de CV presentan efectos negativos sobre la disponibilidad del amonio, el nitrato, el N total, el carbón orgánico, MO, y disponibilidad de P y CIC (Singh y Agrawal 2010; Singh et al. 2012).

Dadas todas las condiciones arriba mencionadas, el buen uso de la ceniza volante como enmienda depende de las características específicas del carbón parental de la ceniza volante resultante y, además, se debe tomar en cuenta las condiciones iniciales del suelo que se desea enmendar (Chang et al. 1977; Jala y Goyal 2006).

#### 3.4. Biosólidos.

Los biosólidos (BS) se definen como lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales (NOM-004-SEMARNAT 2002) son una fuente rica en materia orgánica y nutrientes para las plantas (Castaldi et al 2006, Farasat y Namli 2016).

En México el tratamiento de aguas residuales es muy eficiente y genera una gran cantidad de biosólidos, en promedio 640 mil toneladas al año a nivel del país (CONAGUA 2010). Tan solo en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en la localidad de Atapaneo, Michoacán se producen 40 toneladas de biosólidos al día, provocando un costo elevado en su transportación y confinamiento.

En el país, estos lodos han representado un problema ambiental dado que son depositados en rellenos sanitarios, terrenos aledaños a las plantas, tiraderos de basura a cielo abierto, o bien descargados al drenaje o incinerados (Campos et al. 1997; Alves et al. 2006).

Como consecuencia, han provocado la infiltración de elementos tóxicos hasta alcanzar los mantos freáticos, proliferación de moscas y roedores, diseminación de olores desagradables, y contaminación de suelo, agua y aire (Gavalda et al. 2005; Robledo-Santoyo 2012).

Sin embargo, se ha observado que los biosólidos pueden utilizarse como abono en la agricultura y silvicultura (Thomas et al. 2000; Alves et al. 2006), ya que, por sus características físicas y químicas, mejoran la fertilidad del suelo y la retención de humedad,

que trae consigo un beneficio económico por la reducción del uso de fertilizantes sintéticos (Tester 1990; Walter et al. 2005).

El color de los BS varía entre el pardo y el gris, su olor es a menudo desagradable, puesto que contienen productos de fácil fermentación que comienzan a descomponerse. También contienen diferentes cantidades de materia seca y compuestos volátiles (Robledo-Santoyo 2012). Estas características específicas deben tomarse en cuenta en el momento de reutilizar los BS ya sea como enmienda de suelo o como ingrediente de un abono.

La composición química de los BS varía dependiendo de su origen y método de tratamiento (Girovich 1996). Sus principales componentes son:

1. **Materia orgánica:** que varía de 60 a 85% de la materia seca
2. **Elementos nutritivos:** contenido de N total, P y K.
3. **Contaminantes orgánicos:** productos químicos (detergentes o medicinas) que pueden afectar negativamente a los procesos agrícolas.
4. **Contaminantes minerales:** elementos químicos minerales que, en pequeñas cantidades, pueden favorecer a la planta como Fe, Cu, Mn, Zn, Ni y otros que no favorecen a la planta como Pb, Cd, Hg.

### 3.5. Metales pesados.

Los metales pesados son aquellos elementos de la tabla periódica que tienen un peso atómico mayor que el hierro (Fe) (55.85 g/mol). Sin embargo, con esta característica varios elementos quedan fuera porque su peso atómico es mayor o no son considerados metales, por eso algunos autores prefieren llamarles “elementos traza”. Existen 17 elementos que en altas concentraciones son considerados como muy tóxicos y a su vez son elementos disponibles fácilmente en los suelos (Galán-Huertos y Romero-Baena 2008; Kabata-Pedias 2011).

Sin embargo, muchos de estos elementos se encuentran en pequeñas cantidades en los seres vivos y son esenciales para su crecimiento (Siegel 2002). Aunque existe un estrecho margen para que las concentraciones de estos elementos sean consideradas como deficientes o tóxicas (Plant et al. 2001; Rautaray et al. 2003).

Estos elementos tienen dos fuentes de origen, el origen geogénico son aquellos elementos que se encuentran en la roca madre y que son liberados al suelo por la degradación de la roca; y el origen antropogénico que tienen diferentes fuentes entre las que se encuentran el uso de fertilizantes sintéticos, la generación de energía eléctrica y los lodos residuales de las plantas residuales (IHOB, 1993; Plumlee 1994). Las concentraciones de los metales pesados de origen geogénico son insignificantes en comparación con los metales pesados de origen antropogénico (Galán-Huertos y Romero-Baena 2008).

El riesgo de que se acumule los metales pesados en plantas y animales depende de la concentración presente en el suelo, de su disposición y su movilidad (Castro et al. 2009), por si solo, el suelo cuenta con una capacidad para contener los efectos negativos de los metales pesados, que pueden ser por la neutralización, precipitación y disolución, que depende de las propiedades fisicoquímicas del suelo (Cheng et al. 2001).

Los microorganismos del suelo también cuentan con mecanismos que les permiten contener los metales pesados del suelo, lo realizan principalmente con la activación de enzimas dentro de la célula como fuera de ella (Colin et al. 2012). Los microorganismos pueden transformar los metales pesados en compuestos menos tóxicos (Carlot et al. 2002) y también pueden influir reduciendo la absorción de metales pesados por parte de la planta (Vivas et al. 2006).

4.

#### **4. Hipótesis**

1. Si la técnica de Bocashi favorece la estabilidad de la acidez y conductividad eléctrica de los biosólidos y la ceniza volante con ayuda de los microorganismos agregados, entonces estos desechos se transformarán en una enmienda favorable para el suelo y el crecimiento de las plantas.
2. Si los microorganismos del suelo desempeñan un papel en la absorción de metales pesados, entonces se esperaría que en presencia de microorganismos del suelo hubiese menor concentración de metales pesados en las plantas.
3. Si la técnica de Bocashi permite una mineralización más rápida de los biosólidos y la ceniza volante, entonces se dará una mejor respuesta en el crecimiento del maíz en comparación con el Bocashi de estiércol de vaca y el fertilizante sintético.

## 5. Materiales y Método

### 5.1. Elaboración de Bocashi

Para el presente proyecto se preparó un Bocashi único, que utilizó biosólidos en lugar de estiércol de vaca y ceniza volante de una central termoeléctrica como sustituto de la ceniza vegetal. Este Bocashi recibirá el nombre de “Bocashi de biosólidos”. Para su elaboración lo primero que se hizo fue conseguir estos materiales.

#### *5.1.1. Ceniza volante: obtención, manejo y cálculo de su concentración*

Se obtuvieron 300 kg de ceniza volante de la central termo eléctrica “Presidente Plutarco Elías Calles” ubicada en el municipio de Petacalco, Guerrero, México. Dicha ceniza se colectó en botes con tapa, ya que el material es muy volátil y se almacenó en un lugar seco hasta su uso.

Para conocer la cantidad de ceniza que había que agregar al Bocashi, se realizó un experimento en invernadero en el cual se agregaron diferentes dosis de ceniza, 0, 3, 9 y 12% teniendo dos dosis pequeñas y dosis altas para conocer el comportamiento de la biomasa aérea y de la biomasa de la raíz en el maíz.

Con base en los resultados de este ensayo, se determinó que el 12% de ceniza era adecuado para el crecimiento del maíz, ya que presentó mayor biomasa aérea ( $11.87 \pm 0.46$  g) y mayor biomasa de raíz ( $1.03 \pm 0.08$  g) con respecto a los demás tratamientos (Figura 1, Apéndice V).

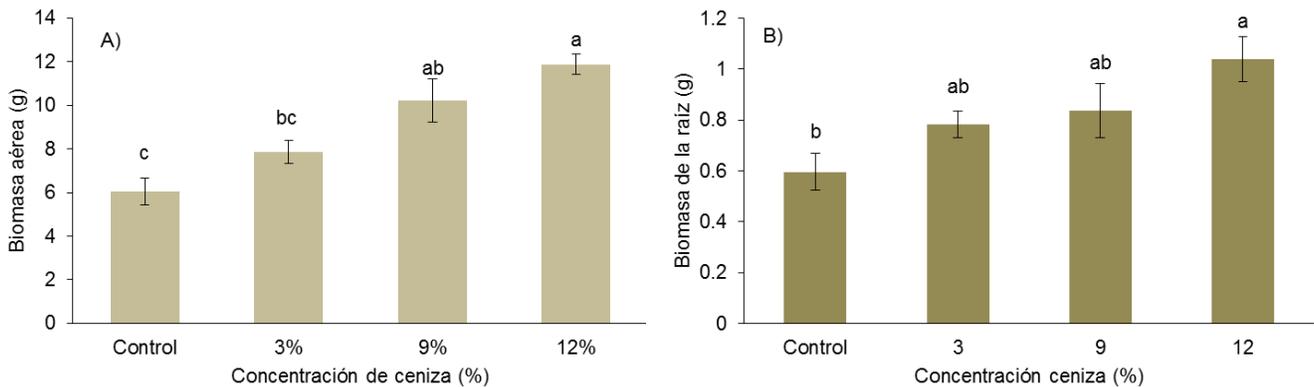


Figura 1. A) Promedio ( $\pm$  EE) de la biomasa de la parte aérea en las diferentes dosis de ceniza B) Promedio ( $\pm$  EE) de la biomasa de la raíz en las diferentes dosis de ceniza. Letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ;  $n = 10$ ).

#### 5.1.2. Biosólidos, obtención y procesamiento.

En febrero del 2017, con permiso del OOAPAS (Organismo Operador de Aguas Potables, Alcantarillado y Saneamiento de Morelia) se obtuvieron tres toneladas de biosólidos húmedos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de San Juanito Itzícuaros, ubicada al oeste de Morelia, Michoacán, México. Posteriormente, los biosólidos se transportaron a las instalaciones de la UNAM campus Morelia, al sur de la ciudad. Para eliminar la humedad restante, los biosólidos se extendieron sobre lonas al sol durante dos semanas y se cubrían diariamente para evitar que se mojaran con la lluvia.

Ya secos y por su dureza, los 300 kg de los biosólidos resultantes se trituraron mediante procesos mecánicos y se pasaron a través de un tamiz con abertura de 2 cm para obtener una partícula fina que pudiera entrar en contacto con los demás ingredientes del Bocashi de manera homogénea (Figura 2). Los biosólidos se encostalaron y se almacenaron en un lugar fresco y seco hasta su uso.

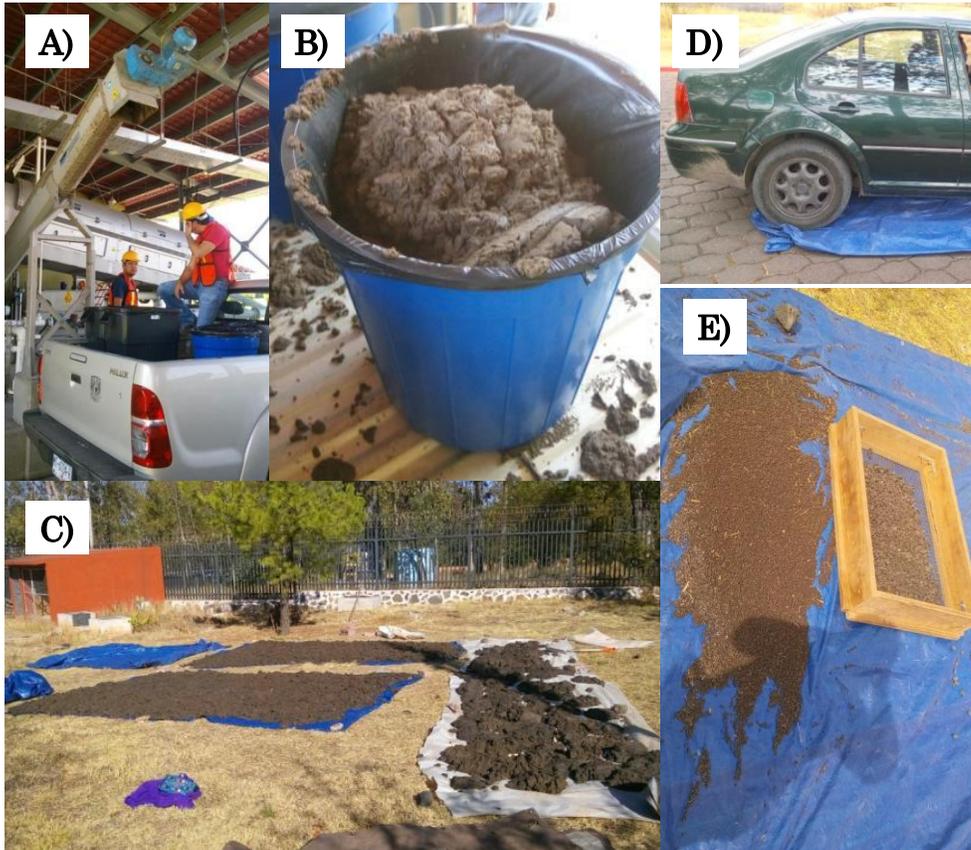


Figura 2. A) Obtención de biosólidos de la PTAR. Colección y transporte B) Bote de 80 kg para transportar los biosólidos C) Secado de biosólidos D) Triturado de biosólidos E) Tamizado de biosólidos.

## 5.2. Preparación del Bocashi.

Una vez que se obtuvieron las cenizas y los biosólidos, se prosiguió a conseguir los demás materiales para el Bocashi. Los materiales y cantidades para la preparación del Bocashi se basaron en la receta publicada por Jaramillo-López et al. (2015) reemplazando el estiércol de vaca por biosólidos y la ceniza vegetal por ceniza volante. Los materiales y sus cantidades se presentan en la Tabla 3. El suelo que se utilizó fue de la localidad de Santiago Undameo, Michoacán, México, cuyas características son un alto porcentaje de limo (67.24%), catalogado como un suelo franco limoso, con un valor de pH de 5.64, 2.83 % de MO y 0.002 g kg<sup>-1</sup> de P extraído por método de Bray.

Tabla 3. Materiales utilizados para la preparación del Bocashi de biosólidos, comparado con las proporciones basadas en Jaramillo-López et al. (2015) para el Bocashi de estiércol de vaca. El porcentaje de ceniza que se utilizó fue de 12% con respecto al peso total del Bocashi.

<b>Material</b>	<b>Bocashi de vaca (kg)</b>	<b>Bocashi de biosólidos (kg)</b>
Estiércol/Biosólidos	1,000	350
Suelo	1,200	420
Ceniza volante	-	111
Rastrojo de maíz	300	105
Carbón vegetal	100	35
Salvado de trigo	25	9
Piloncillo	4	1.5
Levadura	1	0.350
<b>Total</b>	<b>2,630</b>	<b>1,032</b>

El procedimiento para la preparación del Bocashi fue el siguiente: se agregaron los materiales por capas comenzando con el suelo, biosólidos, rastrojo, carbón, ceniza y una nueva capa de todos los ingredientes anteriores. Luego se agregó el salvado de trigo y se hidrató con agua. Por separado, se diluyó el piloncillo con agua caliente (~40°C) y se agregó

la levadura. Esta mezcla se agregó paulatinamente mientras el resto de los materiales se volteaban con ayuda de palas. La mezcla se volteó cuatro veces hasta quedar homogénea. El Bocashi se apiló y se cubrió con lonas (Figura 3).



Figura 3. Montículo de Bocashi preparado con biosólidos

El montículo de una tonelada, se volteó con dos personas con ayuda de palas, dos veces al día durante 10 días, para bajar la temperatura, debido a que alcanzaba temperaturas superiores a los 70°C y mantener con vida a los organismos fermentadores de la materia orgánica. Además, dada la alta concentración de compuestos amoniacales, el abono tuvo que ser extendido y expuesto al sol por tres días para eliminar los olores. Una vez que se enfrió, el montículo se volteó una vez al día hasta alcanzar una temperatura de 30°C. Se extendió para su secado durante una semana y posteriormente se guardó en costales y fue puesto en un lugar seco hasta su uso.

### 5.3. Diseño experimental

El diseño experimental fue factorial con tres factores, excepto para las variables altura y diámetro que solo fue de dos factores. El primer factor fue la esterilidad del sustrato, con dos niveles: estéril y no estéril. El segundo factor fue la enmienda compuesta por cuatro niveles: testigo (sustrato sin enmienda), Bocashi de estiércol de vaca, Bocashi de biosólidos y fertilizante sintético.

Y el tercer factor fue el tiempo de cosecha, con dos niveles: la primera cosecha fue a la sexta semana de crecimiento del maíz y la segunda cosecha durante la décima (Tabla 2). En el caso de la altura y el diámetro las medidas fueron tomadas cada semana. Se prepararon seis repeticiones por tratamiento para tener un total de 96 unidades experimentales.

Tabla 2. Diseño experimental de experimento en invernadero.

<b>Factor</b>	<b>Nivel</b>
Esterilidad	-Estéril -No estéril
Enmienda	-Testigo -Bocashi de vaca -Bocashi de biosólidos -Fertilizante sintético
Tiempo	-6 semanas (T1) -10 semanas (T2)

#### 5.4. Desarrollo del experimento

El suelo utilizado de la localidad de Santiago Undameo, Michoacán, México fue secado, triturado y mezclado con arena de río en una proporción 1:1 p/p para obtener una textura del suelo adecuada. La mitad del sustrato se esterilizó por tres días en una esterilizadora eléctrica de suelo PRO-GROW modelo SS30 hecha en Brookfield, Wisconsin.

Para los tratamientos con Bocashi de vaca y Bocashi de biosólidos, se agregó y mezcló 15% de Bocashi y 85% de sustrato, porcentajes que se calcularon con respecto al peso de la maceta (2 kg).

El tratamiento con fertilizante sintético que se utilizó se encuentra detallado en el apéndice I. Destaca su contenido de fosfato de potasio (10 ml), sulfato de potasio (11.4 ml) y nitrato de amonio (5.7 ml), este último fue agregado una vez a la semana hasta la cosecha.

El proyecto se desarrolló en las instalaciones del Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad de la UNAM campus Morelia, en condiciones de invernadero. El experimento se montó de mayo a septiembre de 2017. Se utilizó semilla de maíz híbrido PUMA de la marca ASGROW en cada maceta se colocaron 3 semillas para asegurar el crecimiento de la planta, una vez establecidas las plántulas, se quitaron las restantes para tener 1 planta por maceta.

Se escogió la planta de maíz porque es uno de los cereales más importantes en el mundo (Aydinsakir et al. 2013). En México es una planta muy importante en aspectos políticos, económicos y culturales, además de cubrir la mitad de la superficie sembrada en el país (SIAP 2007, SIAP 2011). Asimismo, la variedad híbrida permite un control en la variación del crecimiento de las plantas.

Las macetas se colocaron en bloques de las repeticiones con los tratamientos al azar que se rotaban cada semana para reducir el efecto de borde y las diferencias de iluminación; todas las macetas se mantuvieron a capacidad de campo.

#### 5.5. Análisis de muestras

Se determinó el pH y la conductividad (CE) de los biosólidos, la ceniza volante, el suelo, el Bocashi de biosólidos, el Bocashi de vaca y de todos los tratamientos después de la cosecha con ayuda del conductímetro marca LAQUA WATER QUALITY METER pH/ION/COND METER (F-74) HORIBA Scientific.

Las variables vegetativas medidas en la planta de maíz fueron: longitud, desde la base hasta la punta de la hoja más larga, y diámetro a 2 cm del suelo. Se midió cada semana a partir de la tercera semana hasta la sexta semana o décima, en que se realizó la última cosecha. Además, después de cosechar se obtuvo la biomasa de las hojas y las raíces, luego de ser secadas en el horno a 80°C hasta lograr un peso constante.

Las hojas de todos los tratamientos se molieron y tamizaron en malla de 40 micras. Para la cuantificación de N y P, el material tuvo una digestión húmeda con el método de MicroKjeldahl (Murphy y Riley 1962, ver apéndice III) y la cuantificación de los elementos se realizó con autoanalizador SEAL Analytical marca BRAN+LUEBBE modelo AA3.

Posterior a la cosecha, en las hojas y sustrato tanto del testigo como de la enmienda de Bocashi de biosólidos, se midió la concentración de micronutrientes (Ca, Cu, K, Mg, Mn, Mo, Zn) y metales pesados (Cd y Pb). Para esto se hizo una digestión total (Apéndice IV) y la cuantificación de los elementos se determinó en el laboratorio de Geomagnetismo y Exploración en la UNAM, CDMX en el equipo ICP-OES marca Perkin Elmer modelo 400 hecha en Brookfield, Wisconsin.

## 5.6. Análisis estadísticos

Se analizó la relación de pH, CE, concentración de Cd, Pb, micronutrientes en el sustrato así como los resultados de biomasa aérea, biomasa de la raíz, biomasa total, N y P totales respecto a los factores de esterilidad, enmienda y tiempo, que fueron analizados con un ajuste del modelo lineal generalizado, mientras que las variables altura y diámetro se ajustaron modelos lineales generalizados mixtos dada la presencia de medidas repetidas. En éstos, la planta fue incluida como un factor aleatorio con efecto sobre el intercepto del modelo. Los modelos incluyeron todas las interacciones posibles. Para evaluar los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza se realizó un análisis visual de los residuos. La inferencia estadística se hizo a través de pruebas de hipótesis de tipo anova marginales (Anova Tipo II), empleando el estadístico de Ji-cuadrada.

Todos los análisis estadísticos se hicieron con el software R versión 3.4.3 (2017-11-30). Para los modelos lineales se utilizó la función "lm". Los modelos mixtos fueron ajustados empleando la función "lme" de la librería "nlme" (Pinheiro et al. 2017). Las pruebas de hipótesis se realizaron empleando la función "Anova" de la librería "car" (Fox y Weisberg 2011). Se calcularon las medias y los errores estándar marginales empleando la función "lsmeans" de la librería "lsmeans" (Lenth 2016).

## 6. Resultados.

### 6.1. Características físicas del Bocashi

Los valores de pH y conductividad eléctrica (CE) de los materiales del Bocashi se muestran en la tabla 4. La ceniza fue el material que tuvo el valor de pH más alto (9.2), mientras que el suelo y los biosólidos presentaron los valores de pH más bajos (6). Sin embargo, se puede observar que, al mezclar los materiales, el Bocashi de biosólidos presentó un valor de pH ligeramente básico (7.65). En el caso de la CE, se observa que los biosólidos presentaron el valor más alto ( $1.15 \text{ mS cm}^{-1}$ ) respecto a los demás tratamientos, sin embargo, al ser manejados con la técnica de fermentación, la CE del Bocashi de biosólidos ( $0.4 \text{ mS cm}^{-1}$ ) alcanzó niveles similares al Bocashi de vaca ( $0.35 \text{ mS cm}^{-1}$ ).

Tabla 4. Promedio ( $\pm$ EE) de los valores de pH y CE de los materiales y del Bocashi de biosólidos.

Muestra	pH	CE ( $\text{mS cm}^{-1}$ )
Biosólidos	6 ( $\pm 0.05$ )	1.15 ( $\pm 0.05$ )
Bocashi de biosólidos	7.65 ( $\pm 0.05$ )	0.4 ( $\pm 0.19$ )
Bocashi de vaca	6.5 ( $\pm 0.03$ )	0.35 ( $\pm 0.24$ )
Cenizas	9.2 ( $\pm 0.1$ )	0.22 ( $\pm 0.05$ )
Suelo	6 ( $\pm 0.17$ )	0.012 ( $\pm 0.1$ )

En cuanto a los elementos presentes en los biosólidos, la PTAR proporcionó una tabla con las concentraciones de los elementos. Dichos valores se encuentran por debajo de la NOM-004-SEMARNAT-2002 (Apéndice V).

## 6.2. Características fisicoquímicas del suelo después de la cosecha

Después de la cosecha, los valores de pH de los sustratos mostraron diferencias significativas únicamente entre las enmiendas, siendo la enmienda de Bocashi de vaca la que presentó el valor promedio más alto ( $6.98 \pm 0.03$ ), mientras que la enmienda con fertilizante sintético presentó el valor promedio de pH más bajo ( $5.94 \pm 0.06$ ). Para el caso de la CE, se observó que hubo una interacción significativa entre el tipo de enmienda y el tiempo. El valor promedio más alto del tratamiento se registró con el fertilizante sintético que aumentó en la segunda cosecha ( $0.79 \pm 0.06 \text{ mS cm}^{-1}$ ), mientras que en los demás tratamientos disminuyó o no cambió en T2 y el testigo presentó el menor valor promedio de CE ( $0.13 \pm 0.003 \text{ mS cm}^{-1}$ , Figura 4).

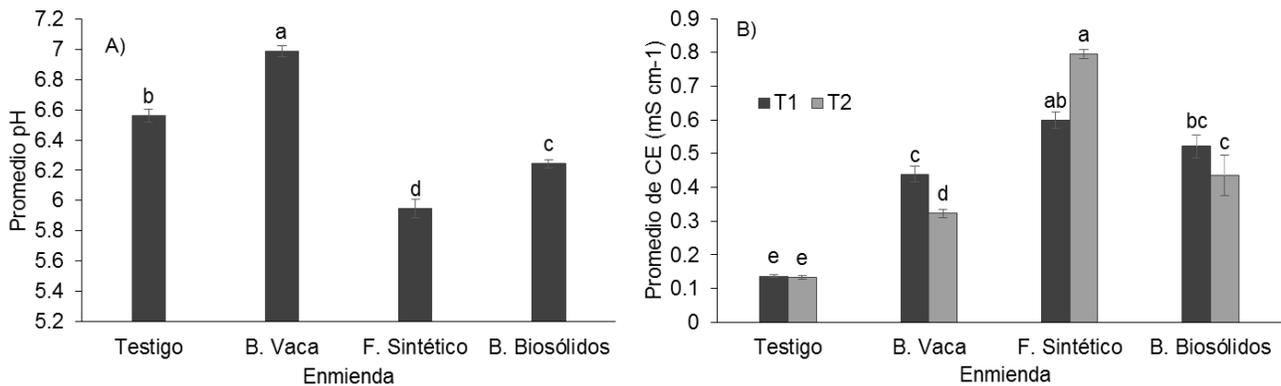


Figura 4. A) Promedio ( $\pm$ EE) de los valores de pH de las diferentes enmiendas (n=24) B) Promedio ( $\pm$ EE) de los valores de CE de la interacción de los tipos de enmiendas con respecto al tiempo. Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo a una prueba de Ji-cuadrada ( $p < 0.05$ ; n=12).

Las concentraciones promedio de micronutrientes en el suelo mostraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) únicamente en el factor enmienda, en los factores esterilidad y tiempo de cosecha no se observaron diferencias significativas. Los valores detectados de Cd y Pb estuvieron por debajo de los límites medibles (Tabla 5).

Tabla 5. Promedio ( $\pm$ EE) de las concentraciones de Cd, Pb, micronutrientes en el sustrato del testigo y de la enmienda de Bocashi de biosólidos.

	<b>Testigo (mg g<sup>-1</sup>)</b>	<b>Biosólidos (mg g<sup>-1</sup>)</b>
Ca*	5.35 (0.06)	3.36 (0.21)
Cd	< L.M	<L.M
Cu*	0.02 (0.00)	0.04 (0.00)
K*	27.16(0.14)	24.10(0.51)
Mg*	10.06(0.05)	9.45(0.08)
Mn*	0.97(0.01)	0.95(0.03)
Mo*	0.36 (0.02)	0.20(0.01)
Pb	<L.M	<L.M
Zn*	2.26 (0.31)	0.82(0.18)

\*Valor más alto y con diferencias significativas con la prueba de Ji-cuadrada. L.M. Límites medibles.

### 6.3. Crecimiento del maíz

Las plantas tuvieron un mayor crecimiento en la enmienda de Bocashi de biosólidos, ya que todas las variables medidas fueron superiores en esta enmienda en comparación con las demás enmiendas.

La biomasa aérea y la concentración de P fueron las variables donde la triple interacción resultó significativa ( $p < 0.05$ ), es decir que esas variables fueron alteradas por los factores que son enmienda, esterilidad y tiempo de cosecha (Tabla 6). Las demás variables tuvieron interacciones significativas ( $p < 0.05$ ) entre dos de los otros factores.

Tabla 6. Valores de P asociados a los diferentes factores con respecto a todas las variables medidas de la planta de maíz.

	Biomasa aérea	Biomasa raíz	Biomasa Total	Altura	Diámetro	N	P
Enmienda-Esterilidad	**	0.69	0.19	**	**	**	**
Enmienda-Tiempo	**	**	**	**	**	**	**
Esterilidad-Tiempo	**	**	**	*	0.22	*	**
Enmienda-Esterilidad-Tiempo	*	0.62	0.18	*	0.31	0.13	*

\* < 0.05, \*\* < 0.01.

Las plantas incrementaron su biomasa aérea entre T1 y T2 en todas las combinaciones de esterilidad y enmienda. En cuanto a los biosólidos siempre tienen la mayor biomasa aérea con respecto a la combinación de tiempo y esterilidad, el testigo tiene los valores de biomasa más pequeños y las enmiendas de Bocashi de vaca y fertilizante sintético son similares.

La esterilidad no muestra efectos importantes en T1 dentro de las enmiendas, sin embargo en T2 hay efectos que dependen de la enmienda, donde disminuye la biomasa en el testigo y en el Bocashi de vaca, mientras que en las enmiendas de fertilizante sintético y Bocashi de biosólidos permanece igual (Figura 5).

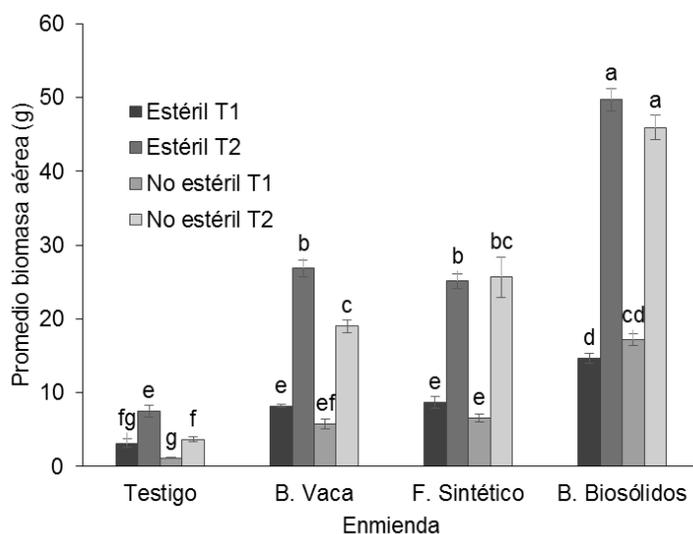


Figura 5. Promedio ( $\pm$ EE) de la biomasa aérea de la planta de maíz con las cuatro enmiendas, en suelo estéril y no estéril, en la primera (T1) y segunda cosecha (T2) de todas las interacciones. Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo con una prueba de Ji-cuadrada ( $p < 0.05$ ;  $n=6$ ).

Se observa que las enmiendas de fertilizante sintético, Bocashi de vaca y de biosólidos son similares sin importar el tiempo pero mayores que el testigo en ambos tiempos. Además, claramente se observa que en todos los sustratos las raíces tuvieron una mayor biomasa de raíz en T2 (Figura 6A). En cuanto a la esterilidad del suelo, T2 fue mayor tanto en suelo estéril como en suelo no estéril con respecto a T1. También se observa que hubo un mayor crecimiento en el sustrato estéril (Figura 6B).

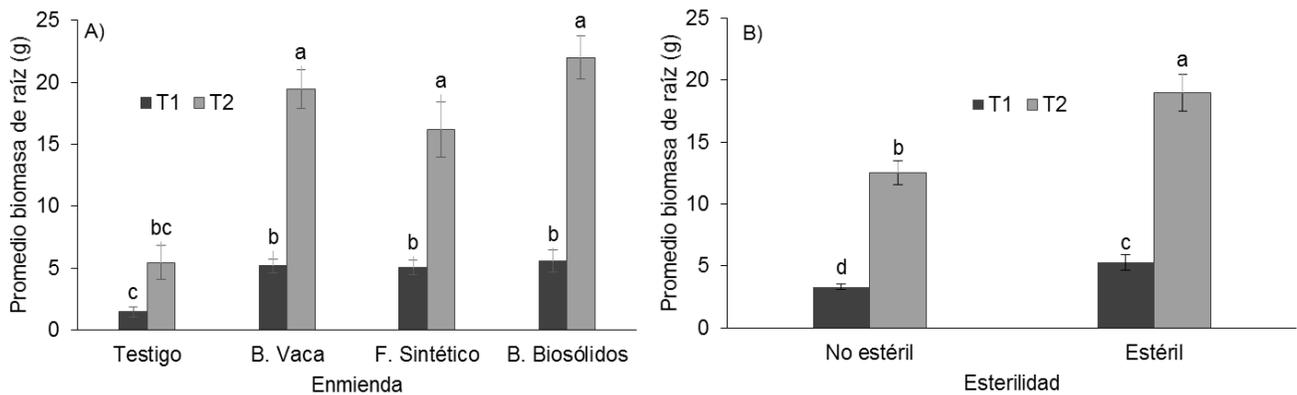


Figura 6. A) Promedio ( $\pm$ EE) de la biomasa de la raíz de la planta de maíz de los diferentes sustratos en los dos tiempos (n=12) B) Promedio ( $\pm$ EE) de la biomasa de la raíz de la planta de maíz en los diferentes tipos de suelo en los dos tiempos (n=24). Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo con una prueba de Ji-cuadrada ( $p < 0.05$ ).

Observando la biomasa total, claramente resalta que la enmienda de biosólidos tuvo mayor biomasa en ambos tiempos de cosecha en comparación con el resto de los las enmiendas (Figura 7A). En cuanto a la esterilidad, se observa un patrón similar a la biomasa de raíz, donde el sustrato estéril presentó una mayor biomasa en ambos tiempos en comparación con el sustrato no estéril (Figura 7B).

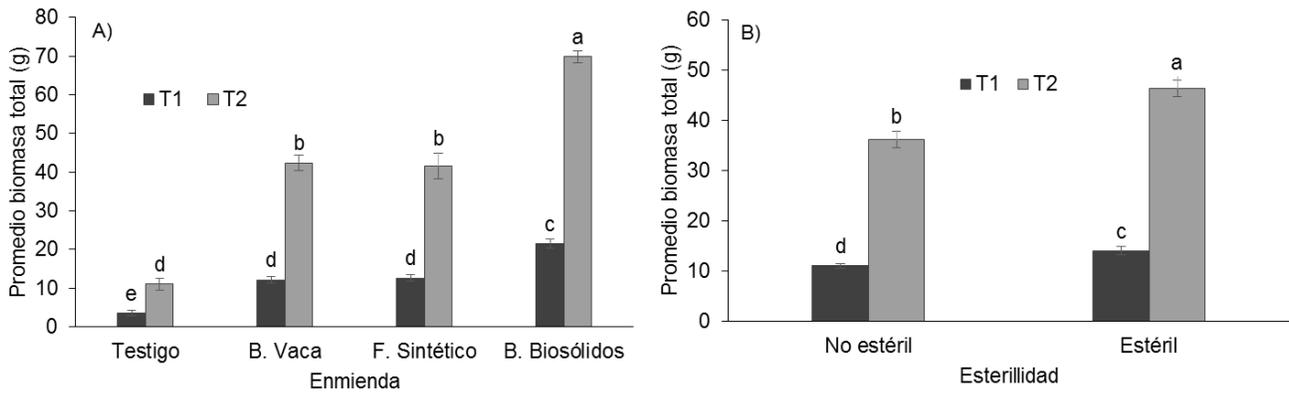


Figura 7. A) Promedio ( $\pm$ EE) de la biomasa total de la planta de maíz de los diferentes tipos de suelo en los dos tiempos (n=24) B) Promedio ( $\pm$ EE) de la biomasa total de la planta de maíz de los diferentes sustratos en los diferentes tiempos (n=12). Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo con una prueba de Ji-cuadrada ( $p < 0.05$ ).

En el caso de la altura, la enmienda de Bocashi de biosólidos genera mayor crecimiento en comparación con las enmiendas de Bocashi de vaca y fertilizante sintético, estos últimos al parecer tienen un comportamiento similar. Además, se observa una mayor altura en el sustrato estéril (Figura 8).

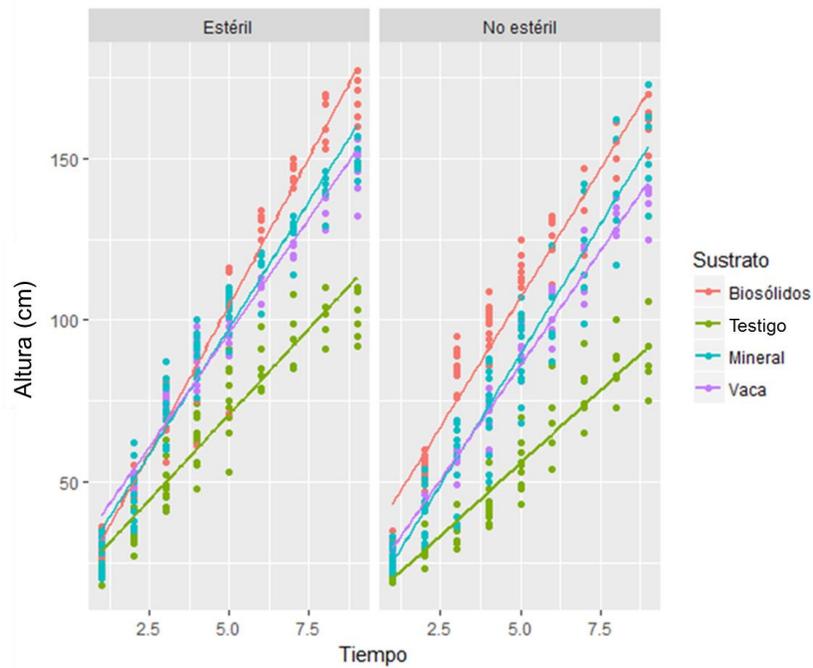


Figura 8. Cambios en la altura a través del tiempo bajo diferentes tratamientos experimentales.

En el caso del diámetro de las plantas de maíz la enmienda de Bocashi de biosólidos genera un mayor grosor de la planta en comparación con las enmiendas fertilizante sintético y Bocashi de vaca. Asimismo, se observa un mayor desarrollo del diámetro en el sustrato estéril con respecto al no estéril (Figura 9). Sin embargo, puede ser que las líneas rectas no describan adecuadamente el comportamiento del diámetro a través del tiempo.

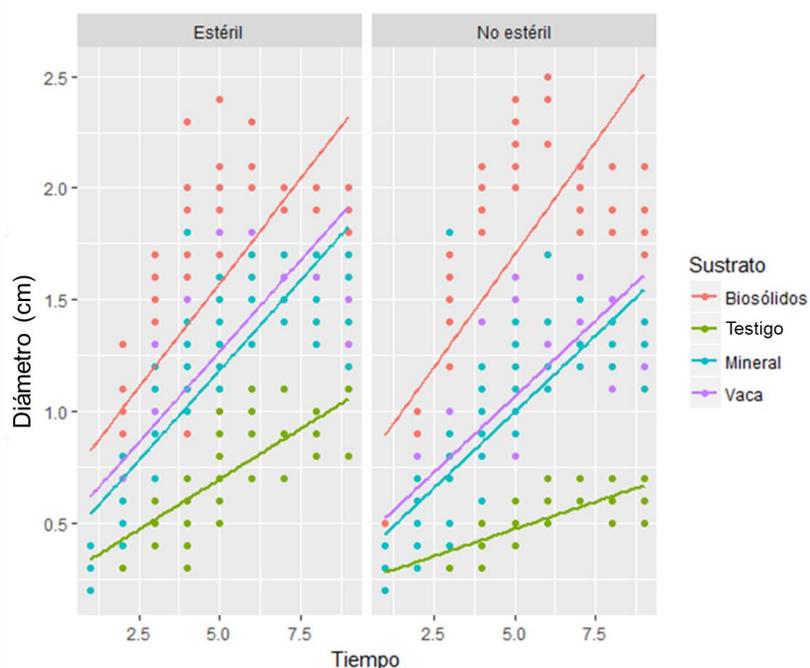


Figura 9. Cambios en el diámetro basal a través del tiempo bajo diferentes tratamientos experimentales.

Claramente se observa una mayor concentración de N en la enmienda de Bocashi de biosólidos en T1 con respecto a los demás tratamientos. Sin embargo, la concentración de N en T2 de la enmienda de Bocashi de biosólidos disminuye más que los demás tratamientos. Además, también se observa una disminución de la concentración de N de T1 a T2 en todas las combinaciones de esterilidad y enmienda excepto en el fertilizante sintético que se mantiene más estable. En cuanto a la esterilidad del sustrato, permanecen iguales en las diferentes enmiendas (Figura 10).

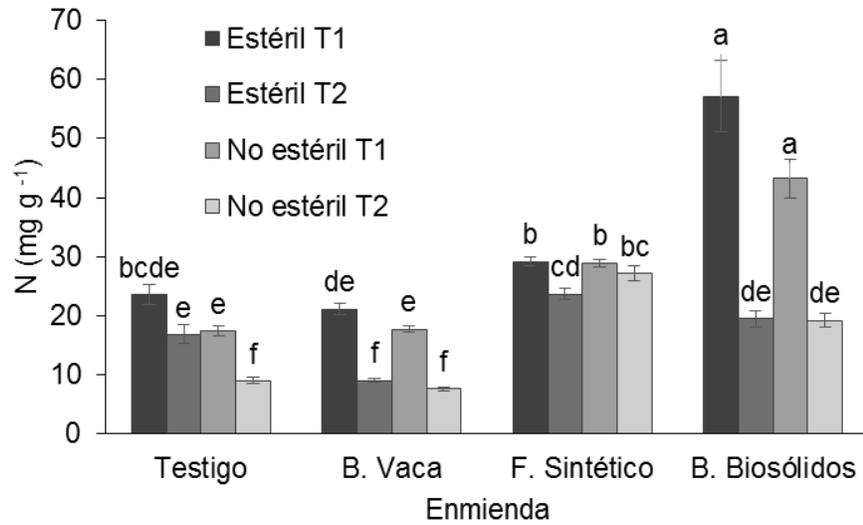


Figura 10. Promedio ( $\pm$ EE) de la concentración de N de las diferentes enmiendas en los sustratos estéril y no estéril en T1 y T2. Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo con una prueba de Ji-cuadrada ( $p < 0.05$ ;  $n=6$ ).

En cuanto a la concentración de P, claramente se observa que la enmienda de Bocashi de biosólidos es superior a las demás enmiendas. Asimismo, el testigo, la enmienda de Bocashi de vaca y el fertilizante sintético presentan un aumento de la concentración de P en el sustrato no estéril en comparación con el sustrato estéril. También se observa una disminución de la concentración de P de T1 a T2 en todas las combinaciones de enmienda y esterilidad a excepción del testigo (Figura 11).

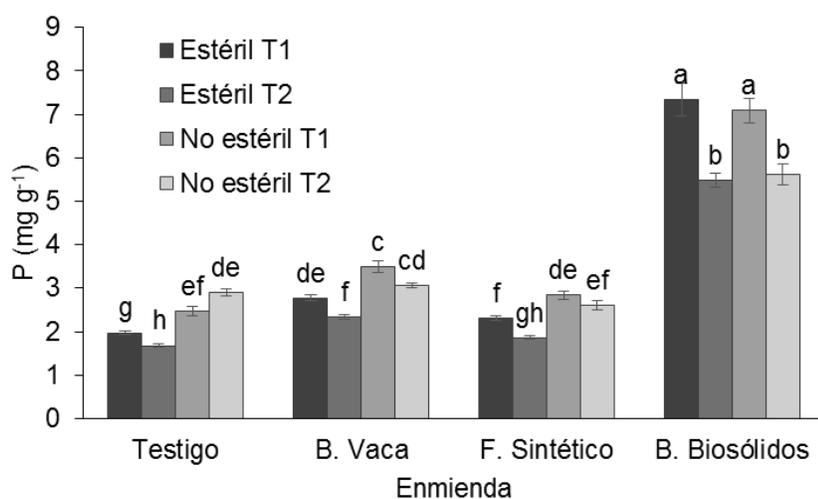


Figura 11. Promedio ( $\pm$ EE) de la concentración de P de las diferentes enmiendas en los sustratos estéril y no estéril en los dos tiempos. Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo con una prueba de Ji-cuadrada ( $p < 0.05$ ;  $n=6$ ).

Los resultados obtenidos para la concentración de Cd, Pb, micro nutrientes presentes en las plantas después de las cosechas se presentan en la tabla 7. El ANOVA demostró que solo hubo diferencias significativas en el factor enmienda.

Tabla 7. Promedio ( $\pm$ EE) de las concentraciones de Cd, Pb, micro nutrientes en el maíz en el testigo y en la enmienda de Bocashi de biosólidos.

	<b>Testigo (mg g<sup>-1</sup>)</b>	<b>Biosólidos (mg g<sup>-1</sup>)</b>
Ca*	2.99 (0.36)	1.96 (0.22)
Cd	<L.M	<L.M
Cu*	0.003 (0.00)	0.014 (0.00)
K*	6.67 (0.12)	6.21 (0.05)
Mg*	1.20 (0.09)	0.78 (0.16)
Mn*	0.34 (0.00)	0.38 (0.02)
Mo	0.09 (0.01)	0.10 (0.009)
Pb	<L.M	<L.M
Zn*	0.006 (0.00)	0.048 (0.00)

\*Valor más alto y con diferencias significativas con la prueba de Ji-cuadrada. L.M. Límites medibles.

## **7. Discusión.**

Con el tratamiento de bocashi se aceleró el proceso de mineralización y se normalizaron los parámetros de pH y CE de los biosólidos y de la ceniza volante, promovidos por el metabolismo de los microorganismos del suelo (Sasikala y Ramana 1998; Larimer et al. 2004; Hädicke et al. 2011; Faria-Oliveira et al. 2015).

Está característica promueve la disponibilidad de nutrientes, el incremento en la tasa de mineralización de la materia orgánica por parte de la actividad de los microorganismos del suelo y el crecimiento adecuado de las plantas (Wiedenhoeft 2006; Lambers et al. 2008).

A diferencia de los valor altos de CE y acidez que presentaron los sustratos enmendados con fertilizante sintético, reforzando la premisa de que los fertilizantes sintéticos alteran las características de los suelos hasta degradarlos causando perdida y lixiviación de los nutrientes en el suelo (Yamada et al. 2001; Zhou et al. 2010).

Tanto la ceniza volante como los biosólidos se han utilizado individualmente como enmiendas de suelo y se han observado resultados positivos sobre el crecimiento de diferentes plantas sin contaminar el suelo con metales pesados (Schutter y Fuhrmann 2001; Cuevas y Walter 2004; Kishor et al. 2010; Carlile et al. 2013; González-Flores et al. 2017). También hay trabajos donde ocupan ambos materiales y obtienen los mismos resultados (Jaramillo-López et al. 2011; Brännvall et al. 2015).

Los resultados de los análisis de las concentraciones de micronutrientes en el sustrato y en la planta presentaron mayor concentración en el sustrato testigo comparado con los biosólidos, sin embargo no se ve reflejado en los parámetros de crecimiento medidos en la planta de maíz.

Excepto en el Cu, Mn, y el Zn, que su concentración es mayor en las plantas enmendadas con Bocashi de biosólidos, esto puede deberse a que estos elementos son activadores de enzimas involucradas con el crecimiento vegetal (Wiedenhoeft 2006; Roca et al. 2007; Alcántar-González y Trejo-Téllez 2012).

De acuerdo con la PTAR de Itzúcaros, los biosólidos contenían una pequeña cantidad de Cd y Pb, además de que la literatura menciona que en la ceniza volante se pueden encontrar concentraciones de estos elementos (Tripathi et al. 2004; Girovich 1996), sin embargo, no se encontraron ni en la planta ni en los sustratos a los que se les añadió Bocashi de biosólidos. Por esta razón, no se pudo comprobar si los microorganismos del suelo cumplieron una función filtrante entre la planta y los metales pesados en el suelo.

En general, los parámetros de crecimiento del maíz y las concentraciones de N y P, fueron superiores en el sustrato enmendado con Bocashi de biosólidos en comparación con resto de las enmiendas, incluso para el fertilizante sintético, a excepción del crecimiento de la raíz, que fue igual en todos los tratamientos excepto en el testigo. Esto puede deberse a la limitante del espacio en la maceta.

Se esperaba un mayor crecimiento en plantas enmendadas con Bocashi de biosólidos, principalmente por la cantidad de materia orgánica y nutrientes que están presentes en los biosólidos (Castaldi et al. 2006; Farasat y Namli 2016) y en las cenizas (Lai et al. 1999; Singh et al. 2014), además de que la técnica de Bocashi mejora la disponibilidad de nutrientes (Yamada et al. 1996; Murillo-Amador et al. 2015).

Asimismo, se presentó un mayor crecimiento en todas las variables medidas de la planta en el sustrato estéril, que podría estar ligado a la baja competencia por los nutrientes entre la planta y los microorganismos del suelo (Kabata-Pedias 2011) así como de la eliminación de patógenos que ataquen a la planta (Gianinazzi et al. 2010).

Excepto la concentración de P, que en el suelo no estéril se observa una mayor concentración en todos los sustratos, que podría estar ligado a los microorganismos del suelo, en este caso los HMA que favorecen la absorción de P (Bolan 1991; Bucher 2007; Smith y Read 2008). A excepción del Bocashi de biosólidos, donde tampoco se observaron en las raíces estructuras de los HMA.

También se pudo observar que las plantas enmendadas con Bocashi de vaca presentaron crecimiento muy parecidos a las plantas que se nutrieron con fertilizante sintético. Mostrando que la técnica de Bocashi es igual de eficiente que el fertilizante sintético, además que mejora las propiedades del suelo por la entrada de materia orgánica (Parr y Hornick, 1992; Brechelt 2004; Černý et al. 2010).

Sería interesante conocer el comportamiento del Bocashi de biosólidos en condiciones de campo en términos del suelo en cuanto a la degradación, actividad de los microorganismos y dinámica de nutrientes y metales pesados; así como la respuesta de la planta ante esta enmienda. Aunque ya existen investigaciones en campo que presentan un mejor crecimiento de las plantas y baja concentración de metales pesados en el suelo con el uso de biosólidos (Wong et al. 1996; Cuevas y Walter 2004; Brännvall et al. 2005; Jaramillo-López et al. 2011; Kabirinejad y Hoodaji 2012; Jaramillo y Powell 2013).

Con estas investigaciones ya se podría conocer perfectamente las características del uso de Bocashi de biosólidos en los campos de cultivo o restauración de suelo y de esta manera se podrían crear fábricas de creación de Bocashi cerca de las plantas tratadoras y de las centrales eléctricas para crear la enmienda y hacer un manejo adecuado de estos desechos siendo utilizados para la integración de materia orgánica a los suelos agrícolas degradados por el uso excesivo de fertilizante sintético.

## **8. Conclusión**

La técnica de Bocashi favoreció la estabilidad de la acidez y la conductividad eléctrica de los biosólidos y la ceniza volante con ayuda de los microorganismos agregados, transformándolos en una enmienda adecuada para el crecimiento de las plantas y el suelo.

La técnica de Bocashi al permitir una mineralización más rápida de los nutrientes disponibles en los biosólidos y la ceniza volante, se observó un mayor crecimiento en las plantas de maíz comparadas con los demás tratamientos.

## 9. Literatura

- Alcántar-González, G. y Trejo-Téllez, L.I., 2012. *Nutrición de cultivos*. México: Biblioteca básica de agricultura.
- Alves, M.C., González, A.P., Colodro, G., Perecin, H.Jr. y Vidal-Vázquez, E., 2006. Influence of Biosolids Rate on Chemical Properties of an Oxisol in São Paulo, Brazil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 37(15–20): 2481–2493.
- Aydinsakir, K., Erdal, S., Buyuktas, D., Bastug, R. y Toker, R. 2013. The influence of regular deficit irrigation applications on water use, yield, and quality components of two corn (*Zea mays* L.) genotypes. *Agricultural Water Management*, 128: 65-71.
- Bolan, N., 1991. A critical review on the effect of mycorrhizal fungi on the uptake of phosphorus by plants. *Plant and Soil*, 134:189–207.
- Bouwman, L., Goldewijk, K. K., Van Der Hoek, K. W., Beusen, A. H. W., Van Vuuren, D. P., Willems, J., Rufino, M. C. y Stehfest, E., 2013. Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900-2050 period. *Proceeding of the National Academy of Science*, 110(52):20882-20887.
- Brännvall, E., Wolters, M., Sjöblom, R. y Kumpiene, J., 2015. Elements availability in soil fertilized with pelletized fly ash and biosolids. *Journal of Environmental Management*, 159: 27-36.
- Brechelt, A., 2004. *Manejo ecológico del suelo*. República Dominicana: Red de Acción en Plaguicidas y sus Alternativas para América Latina.
- Bucher, M., 2007. Functional biology of plant phosphate uptake at root and mycorrhiza interfaces. *The New Phytologist*, 173(1):11-26.

- Byrnes, B.H., 1990. Environmental effects of N fertilizer use - An overview. *Fertilizer Research*, 26: 209–15.
- Campos, M.R.G., Jiménez, P.G., Rodríguez, A.I., Arévalo, D.C. y Jiménez, C.B., 1997. Producción de biosólidos a partir de los lodos de una planta de tratamiento primario avanzado. En: Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias ambientales A. C. Memorias técnicas del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. México, D.F. Tomo II. 320-325.
- Carlile, C., Nadiger, S. y Burken, J. 2013. Effect of fly ash on growth of mustard and corn. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 10(2):551-557
- Carlot, M., Giacomini, A., Casella, S., 2002. Aspects of plant-microbe interactions in heavy metal polluted soil. *Acta Biotechnologica*, 22(1-2).
- Castaldi P., Santona L., Melis, P. 2006. Evolution of heavy metals mobility during municipal solid waste composting. *Fresenius Environmental Bulletin*, 15(9):1133–1140.
- Castro, E., Mañas, P. y De las Heras, J. 2009. A comparison of the application of different waste products to a lettuce crop: effects on plant and soil properties. *Scientia Horticulture*, 123(2):148-155.
- Cegarra, J.A., Roig, A.F., Navarro, M.P., Bernal, M., Abad, M., Climent, D. y Aragón, P. 1993. Características, compostaje y uso agrícola de residuos sólidos urbanos. En: *Memorias Jornadas de Recogidas Selectivas en Origen y Reciclaje*. Córdoba, España: Ed Mundi - Prensa. pp. 46-55.

- Černý, J., Balík, J., Kulhánek, M., Časová, K. y Nedvěd, V., 2010. Mineral and organic fertilization efficiency in long-term stationary experiments. *Plant, Soil and Environment*, 56(1):28-36.
- Cerrato, M.E., Leblanc, H.A. y Kameko, C., 2007. Potencial de mineralización de nitrógeno de Bokashi, compost y lombricompost producidos en la Universidad Earth. *Tierra Tropical*, 3(2):183-197.
- Chang, A.C., Lund, L.J., Page, A.L. y Warneke, J.E., 1977. Physical properties of fly ash amended soils. *Journal of Environmental Quality*, 6: 267–270.
- Cheng, H.M., Zheng, C.R., Tu, C. y Zhou, D.M., 2001. Studies on loading capacity of agricultural soils for heavy metals and its applications in China. *Applied Geochemistry*, 16(11-12):1397-1403.
- Cohen, J.E., 1995. *How Many People Can the Earth Support?* Norton, New York.
- Colin, V.L., Villegas, L.B. y Abate, C.M. 2012. Indigenous microorganisms as potential bioremediators for environments contaminated with heavy metals. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 69:28-37.
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua, 2010. *Estadísticas del agua en México*. México, D.F.
- Cuevas, G., y Walter, I., 2004. Metales pesados en maíz (*Zea mays* L.) cultivado en un suelo enmendado con diferentes dosis de compost de lodo residual. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 20(2): 59–68.
- Diaz, R.J y Rosenberg, R., 2008. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 321:926–929.

- Farasat S., Namli A. 2016. Evaluating effects of sewage sludge on soil biochemical properties amounts (incubation experiment), *Fresenius Environmental Bulletin*, 25(5):1484–1493.
- Faria-Oliveir, F., Diniz, R.H.S., Godoy-Santos, F., Piló, F.B., Mezadri, H., Castro, I.M., Brandão R. L. 2015. The role of yeast and lactic acid bacteria in the production of fermented beverages in South America. En: A. Amer (ed). *Food Production and Industry*. InTech, CC BY, pp: 107-135.
- Formowitz, B., Elango, F., Okumoto, S., Müller, T. y Buerkert, A. 2007. The role of "effective microorganisms" in the composting of banana (*Musa ssp.*) residues. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 170(5):649-656.
- Fox, J. y Weisberg, S., 2011. An {R} Companion to Applied Regression, Second Edition. Thousand Oaks CA: Sage.: <http://socserv.socsci.mcmaster.ca/fox/Books/Companion>. Consultado el 18 de marzo de 2018.
- Galán-Huertos, E. y Romero-Baena, A., 2008. Contaminación de suelos por metales pesados. *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, 10:48-60.
- Galloway, J.N., Cowling, E.B., 2002. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change. *AMBIO: A Journal of the Human Environmet*, 31(2):64–72.
- Gavalda, D., Scheiner, J.D., Revel, J.S., Merlina, G., Kaemmerer, M., Pinnelli, E. y Giresse, M., 2005. Agronomic and environmental impacts of a single application of heat-dried sludge on an Alfisol. *Science Total Environment*, 343:97-109.

- Gianinazzi S., Gollotte A., Marie-Noëlle B., Diederik van T., Redecker D. y Wipf D., 2010. Agroecology: the key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. *Mycorrhiza*, 20(8):519-530.
- Girovich, M., 1996. *Biosolids treatment and management: processes for beneficial use*. Estados Unidos: Marcel Dekker.
- González-Flores, E., Ramos-Barragán, J.E, Tornero-Campante, M.A. y Murillo-Murillo, M., 2017. Evaluación de dosis de biosólidos urbanos en maíz bajo condiciones de invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(1):117–30.
- Gupta, A.K. y Sinha, S., 2008. Decontamination and/or revegetation of fly ash dykes through naturally growing plants. *Journal of Hazardous Materials*, 153:1078–1087.
- Hädicke, O., Grammel, H. y Klamt, S., 2011. Metabolic network modeling of redox balancing and biohydrogen production in purple nonsulfur bacteria. *BMC Systems Biology*, 5:150.
- Howarth, R.W., Billen, G., Swaney, D., Townsend, A., Jaworski, N., Lajtha, K., Downing, J.A., Ragnar-Elmgren, Caraco, N., Jordan, T., Berendse, F., Freney, J., Kudeyarov, V., Murdoch, P., y Zhu, Z.L., 1996. Regional nitrogen budgets and riverine N and P fluxes of the drainages to the North Atlantic Ocean: Natural and human influences. *Biogeochemistry*, 35:2235–2240.
- IHOBE, 1993. *Investigación de la contaminación del suelo. Vol. 8. Calidad del suelo. Valores indicativos de evaluación*. Departamento de Urbanismo, Vivienda y Medio Ambiente. Gobierno Vasco.

- Jala, S. y Goyal, D., 2006. Fly ash as a soil ameliorant for improving crop production—a review. *Bioresource Technology*, 97:1136–1147.
- Jaramillo-López, P.F. y Powell, M.A., 2013. Application of stabilized biosolids and fly ash mixtures as soil amendments and their impact on free living nematodes and carrot (*Daucus carota*). *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 2(22): 2-10.
- Jaramillo-López, P.F., Powell, M.A. y Hayden, D.B., 2011. The influence of soil amendments (fly ash and stabilized biosolids) on *Meloidogyne hapla* in microplots planted with tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Nematropica*, 41(1):141-149.
- Jaramillo-López, P.F., Ramírez, M.I. y Pérez-Salicrup, D.R., 2015. Impacts of Bokashi on survival and growth rates of *Pinus pseudostrobus* in community reforestation projects. *Journal of Environmental Management*, 150:48-56.
- Jenkins, T.A. y Daly, M., 2005. Solid fermented material (Bokashi) as a biofertilizer for potting media using Effective Microorganisms (EM), *Researching Sustainable Systems: Proceedings of the First Scientific Conference of the International Society of Organic Agriculture Research (ISO FAR)*. 2:66-69.
- Jorge, R.H. y Olivia, R.P., 2007. El compostaje y su utilización en agricultura. Dirigido a pequeños(as) productores(as) pertenecientes a la Agricultura Familiar Campesina. 1da ed. Chile: Salviat Impresores.
- Kabata-Pedias, A., 2011. *Trace Elements in Soils and Plants*. 4ta edición. Florida, Estados Unidos: Taylor & Francis Group.

- Kabirinejad, S. y Hoodaji, M., 2012. The effects of biosolid application on soil chemical properties and *Zea mays* nutrition. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 1:4.
- Karapanagioti, H.K. y Atalay, A.S. 2001. Laboratory evaluation of ash materials as acid disturbed land amendments. *Glob Nest International Journal*, 3(1):11-21
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F. y Shuman, G.E., 1997. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 61(1): 4-10.
- Kishor, P., Ghosh, A.K. y Kumar, D., 2010. Use of flyash in agricultura: a way to improve soil fertility and its productivity. *Asian Journal of Agricultural Research*, 4(1):1-14.
- Lai, K.M., Ye, D.Y., Wong, J.W.C., 1999. Enzyme activities in a sandy soil amended with sewage sludge and coal fly ash. *Water, Air & Soil Pollution*, 113:261–272.
- Lambers, H., Pons, Thijs L., Chapin, F.S., 2008. *Plant physiological ecology*. 2da edicon Australia:Springer.
- Lamsfus, C., Lasa, B., Aparicio, T.P.M. e Irigoyen, I., 2003. *Implicaciones ecofisiológicas y agronómicas de la nutrición nitrogenada: La ecofisiología vegetal: una ciencia de síntesis*. 1ª ed. España: Paraninfo. pp. 361-386.
- Larimer, F.W., Chain, P., Hauser, L., Lamerdin, J., Malfatti, S., Do, L., Land, M.L., Pelletier, D.A., Beatty, J.T., Lang, A.S., Tabita, F.R., Gibson, J.L., Hanson, T.E., Bobst, C., Torres, J.L., Peres, C., Harrison, F.H., Gibson, J. y Harwood, C.S., 2004. Complete genome sequence of the metabolically versatile photosynthetic bacterium *Rhodospseudomonas palustris*. *Nature Biotechnology*, 22(1):55 – 61.

- Larios A., Vidales, I., Tapia, L.M., Mendoza, M., Guillen, H. y Hernández, A., 2011. *Cultivo agroecológico del aguacate una opción sana y competitiva*. 1ra edición. Alemania:Lap-Lambert.
- Lenth, R.V., 2016. Least-Squares Means: The R Package lsmeans. *Journal of Statistical Software*, 69(1): 1-33.
- Murillo-Amador, B., Morales-Prado, L.E., Troyo-Diéguez, E., Córdoba-Matson, M.V., Hernández-Montiel, L.G., Rueda-Puente, E.O., Nieto-Garibay, A., 2015. Changing environmental conditions and applying organic fertilizers in *Origanum vulgare* L. *Frontiers in Plant Science*, 6:549.
- Murphy, J. y Riley, J.P., 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27:31-36.
- Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental.- Lodos y biosólidos-especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. 2003. [pdf] México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en: <  
<http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2251.pdf>  
> Consultado 22 octubre 2016.
- Pandey, V.C. y Singh, N. 2010. Impact of fly ash incorporation in soil systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 136:16–27.
- Parr, J.F. y Hornick, S.B. 1992. Agricultural use of organic amendments: A historical perspective. *American Journal of Alternative Agriculture*. 7(4):181-189.

- Pati, S.S. y Sahu, S.K., 2004. CO<sub>2</sub> evaluation and enzyme activities (dehydrogenase, protease and amylase) of fly ash amended soil in presence and absence of earthworms (Under laboratory condition). *Geoderma*, 118: 289–301.
- Pei-Sheng, Y. y Hui-Lian, X. 2002. Influence of EM Bokashi on Nodulation, Physiological Characters and Yield of Peanut in Nature Farming Fields. *Journal of Sustainable Agriculture*, 19(4):105-112.
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D. y R Core Team, 2017. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-131, <<https://CRAN.R-project.org/package=nlme>>.
- Plant, J., Smith, D., Smith, B. y Williams, L., 2001. Environmental geochemistry at the global scale. *Applied Geochemistry*, 16:1291-1308.
- Plumlee, G., 1994. Environmental geology models of mineral deposits. *SEG Newsletter*, (16):5-6.
- Rabalais, N.N., Turner, R.E., y Wiseman, W.J., Jr., 2001. Hypoxia in the Gulf of Mexico. *Journal of Environmental Quality*, 30:320–329.
- Ramos-Agüero D. y Terry-Alfonso E., 2014. Generalidades de los abonos orgánicos: importancia del Bocashi como alternativa nutricional para suelos y plantas. *Cultivos Tropicales*, 35(4): 52-59.
- Rautaray, S.K., Ghosh B.C., y Mitra B.N., 2003. Effect of fly ash, organic wastes and chemical fertilizers on yield, nutrient uptake, heavy metal content and residual fertility in rice-mustard cropping sequence under acid lateritic soils. *Bioresource Technology*, 90: 275-283.

- Restrepo, J., 2010. *A, B, C de la agricultura orgánica y panes de piedra: Abonos orgánicos fermentados*. 1ª ed. Colombia: Feriva S.A.
- Robledo-Santoyo, E., 2012. *Manejo y uso de biosólidos en suelos agrícolas*. Tesis de doctorado. Colegio de Postgraduados.
- Roca, N., Pazos, M.S. y Bech, J. 2007. Disponibilidad de cobre, hierro, manganeso, zinc en suelos del no Argentino. *Ciencia del suelo (Argentina)*, 25(1):31-42.
- Sarkar, A., Singh, A., Agrawal, S.B., 2012. Utilization of fly ash as soil amendments in agricultural fields on North-Eastern gangetic plains of India: potential benefits and risks assessments. *Bulletin of the National Institute of Ecology*, 23(1–2): 9–20.
- Sasikala, C., Ramana, C. V. 1998. Biodegradation and metabolism of unusual carbon compounds by anoxygenic phototrophic bacteria. *Advances in Microbial Physiology*, 39:339–377.
- Schutter, M.E. y Fuhrmann, J.J. 2001. Soil microbial community responses to fly ash amendment as revealed by analyses of whole soils and bacterial isolates. *Soil Biology and Biochemistry*. 33(14):1947-1958.
- Scotti, R., Bonanomi, G., Scelza, R., Zoina, A. y Rao, M.A., 2015. Organic amendments as sustainable tool to recovery fertility in intensive agricultural systems. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15:333-352.
- Shintani, M., Leblac, H. y Tabora, P., 2000. *Tecnología tradicional adaptada para una agricultura sostenible y un manejo de desechos modernos. Guía para uso práctico*. 1ra edición. Guácimo, Costa Rica: Universidad EARTH.

- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2007. *Situación Actual y Perspectivas del Maíz en México 1996 - 2012*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). México, D.F.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2011. Cierre de la producción agrícola por cultivo. Disponible en: [http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com\\_wrapper&view=wrapper&Itemid=215](http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=215). Consultado: 14 de enero 2019.
- Siegel, F.R., 2002. *Environmental geochemistry of potentially toxic metals*. Springer.
- Singh, A. y Agrawal, S.B., 2010. Response of mung bean cultivars to fly ash: growth and yield. *Ecotoxicology Environmental Safety*, 73:1950–1958.
- Singh, A., Sarkar, A. y Agrawal, S.B., 2012. Assessing the potential impact of fly ash amendments on Indian paddy field with special emphasis on growth, yield, and grain quality of three rice cultivars. *Environmental Monitoring Assessment*, 184:4799–814.
- Singh, J.S., Pandey, V.Ch., Singh, D.P., 2011. Efficient soil microorganisms, A new dimension for sustainable agriculture and environmental development. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 140(3-4):339-353.
- Smith S.E. y Read D.J., 2008. *Mycorrhizal symbiosis*. Gran Bretaña: Academic Press in Elsevier.
- Soto, G., 2003. Abonos orgánicos: Definiciones y procesos. **En:** *Abonos orgánicos: principios, aplicaciones e impacto en la agricultura*. San José, Costa Rica: CIA. p.21-51.

- SurrIDGE, A.K.J., Merwe, A. y Kruger, R., 2009. Preliminary microbial studies on the impact of plants and South African fly ash on amelioration of crude oil polluted soils. **En:** World of Coal Ash (WOCA) conference, May 4–7.
- Tester, C.F., 1990. Organic amendment effects on physical and chemical properties of a sand soil. *Soil Science Society of America Journal*, 54(3):827-831.
- Thomas, K.D., Comeau, P.G. Comeau, y Brown, K.R., 2000. The silviculture of hybrid poplar plantations. Extension Note. British Columbia. Ministry of Forests Research Program. PDF <https://www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/docs/en/en47.pdf> Consultado el 1 de diciembre de 2017.
- Tilman, D. 1999. Global environmental impacts of agricultural expansion: The need for sustainable and efficient practices. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96:5995-6000
- Tripathi, R.D., Vajpayee, P., Singh, N., Rai, U.N., Kumar, A., Ali, M.B., Kumar, B. y Yunus, M., 2004. Efficacy of various amendments for amelioration of fly ash toxicity: growth performance and metal composition of *Cassia siamea* Lamk. *Chemosphere*, 54: 1581–1588.
- Turner, R.E., Rabalais, N.N., Justic, D. y Dortch, Q., 2003. Global patterns of dissolved N, P and Si in large rivers. *Biogeochemistry*, 64:297–317.
- Uribe, L.L., 2003. Calidad microbiológica e inocuidad de abonos orgánicos. En: Ed. Meléndez, G. *Abonos orgánicos: principios, aplicaciones e impacto en la agricultura*, San José, Costa Rica : CIA-UCR. 2003. pp. 165-184.

- Vitousek, P.M., Aber, J.D., Howarth, R.W., Likens, G.E., Matson, P.A., Schindler, D.W., Schlesinger, W.H. y Tilman, D.G., 1997. Human Alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications*, 7(3):737-750.
- Vivas, A., Biró, B., Németh, T., Barea, J.M. y Azcón, R., 2006. Nickel-tolerant *Brevibacillus brevis* and arbuscular mycorrhizal fungus can reduce metal acquisition and nickel toxicity effects in plant growing in nickel supplemented soil. *Soil Biology Biochemistry*, 38(9):2694-2704.
- Vollenweider, R.A., Marchetti, R., Viviani, R., eds. 1992. *Marine Coastal Eutrophication*. Amsterdam, Países Bajos:Elsevier.
- Waggoner, P.E., 1995. How much land can ten billion people spare for nature? Does technology make a difference? *Technology in Society*, 17(1):17–34.
- Walter, I., Martínez, F., Cala, V., 2005. Heavy speciation and phytotoxic effects of three representative sewage sludges for agricultural uses. *Environmental Pollution*, 139: 507-514.
- Wezel, A., Casagrande, M., Celette, F. 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(1):1–20.
- Wiedenhoeft, A.C., 2006. *Plant Nutrition*, Nueva York, Estados Unidos:Chelsea House Publishers.
- Wong, J.W.C., Jiang, R.F. y Su, D.C., 1996. Boron availability in ash-sludge mixture and its uptake by corn seedlings (*Zea mays* L). *Soil Science*, 161(3):182-1.

Yamada, K., S., Kato, M., Fujita, H.L., Xu, K., Katase y H. Umemura., 1996. An organic fertilizer inoculated with EM used in nature farming practices. Ann. Asia-Pacific Nature Agriculture Network, Oct. 8-12, Bangkok, Thailan.

Yamada, K. y Xu, H. L., 2001. Properties and applications of an organic fertilizer inoculated with Effective Microorganisms. *Journal of Crop Production*, 3:255-268.

Zhou, Y., Yang, H., Mosler, H.J. y Abbaspour, K.C., 2010. Factors affecting farmers ' decisions on fertilizer use : A case study for the Chaobai watershed in Northern China. *Consilience : The Journal of Sustainable Development*, 4(1): 80-102.

## 10. Apéndices

### Apéndice I

Fórmula de fertilizante mineral utilizado en el experimento. Tomado de la Universidad de Copenhague, Dinamarca. Aplicación por ml de fertilización mineral. Fue aplicado antes de la siembra. El nitrato se aplicó a la tercera semana de siembra y cada semana hasta la cosecha.

<b>Solución</b>	<b>Concentración (g l<sup>-1</sup>)</b>	<b>mg kg<sup>-1</sup> suelo</b>	<b>ml kg<sup>-1</sup> suelo</b>	<b>Aplicación (ml) por maceta de 1,900 g</b>
Sulfato de Potasio K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	61.72	370.31	6	11.4
Cloruro de Calcio CaCl <sub>2</sub> x 2H <sub>2</sub> O	25	75	3	5.7
Micronutrientes				
MnSO <sub>4</sub> x H <sub>2</sub> O	3.5	10.5		
ZnSO <sub>4</sub> x 7H <sub>2</sub> O	1.8	5.4	3	5.7
CuSO <sub>4</sub> x 5H <sub>2</sub> O	0.7	2.1		
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> x 2H <sub>2</sub> O	0.06	0.18		
Nitrato de Amonio NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	95.24	285.71	3	5.7
Fosfato de Potasio KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	43.93	100	10	10
Sulfato de Magnesio MgSO <sub>4</sub> x 7H <sub>2</sub> O	135.14	405.43	3	5.7

## Apéndice II

### Método MicroKjeldahl (Murphy y Riley 1962)

- Colocar y numerar 50 tubos de digestión aforados en la gradilla. Los primeros tubos son los dos blancos.
- Pesar 0.25 g de material vegetal previamente molido y seco en cada tubo, anotar el peso de cada tubo
- Agregar 1.1 g de mezcla digestora de sulfato cúprico  $\text{CuSO}_4$  y sulfosfato de potasio monobásico  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  en proporción 1:10 respectivamente
- Agregar 3 ml de peróxido de hidrógeno al 30% en campana de bloques de 10 tubos
- Esperar 8 minutos; si empieza a reaccionar antes, agregar 7 ml de ácido sulfúrico puro lentamente, tener precaución ya que el tubo se puede calentar.
- Dejar reposar por el resto del día
- Colocar los tubos tapados en el Microkjeldahl a una temperatura de  $375^\circ\text{C}$  por 3.5 h
- Dejar que se enfríen y agregar un 10 ml de agua desoinizada, dejar que se enfríe y aforar
- De formarse una pastilla en el fondo, calentar a  $100^\circ\text{C}$  y disolver la pastilla.
- Agitar los tubos con tapas de hule y verter  $\frac{1}{4}$  del contenido en embudos con filtros whatman con viales en la base.
- Tapar los viales y almacenar en refrigerador.

Para analizar las muestras en el autoanalizador SEAL ANALYTICAL marca BRAN+LUEBRE modelo AA3 se hicieron diluciones de 5 ml de 1:50 y 1:5 para N y P, respectivamente.

### Apéndice III.

#### Digestión total.

Para las digestiones de tejido vegetal, se pesó 0.2 gramos de material y se colocó en vasos de 75 ml, se agregó 1 ml de agua desionizada, 10 ml de ácido nítrico y 1 ml de ácido clorhídrico. En el horno, se subió la temperatura a 180°C en 20 minutos y se mantuvo por 10 minutos, la digestión se aforó con agua desionizada a 100 ml y se almacenó en frascos de plástico en refrigeración a 4°C.

Para la digestión de suelo se pesó 0.5 g de suelo y se colocó en vasos de 75 ml, se agregó 1 ml de agua desionizada, 5 ml de ácido fluorhídrico, 10 ml de ácido nítrico y 1 ml de ácido clorhídrico. Se calentó en horno de microondas marca MARS Xpress. Luego de 20 minutos, se alcanzó 160°C y se mantuvo por 15 minutos, luego se le agregó 5 ml de ácido bórico en campana para neutralizar el ácido fluorhídrico y se subió la temperatura a 170°C en 10 minutos y se mantuvo esta temperatura por 5 minutos. Se utilizó papel filtro de 40 mm y se aforó a 100 ml con agua desionizada para después ser almacenado en refrigeración a 4°C, cabe señalar que las digestiones tienen una caducidad de 2 meses y deben ser analizadas lo más pronto posible.

Apéndice IV.

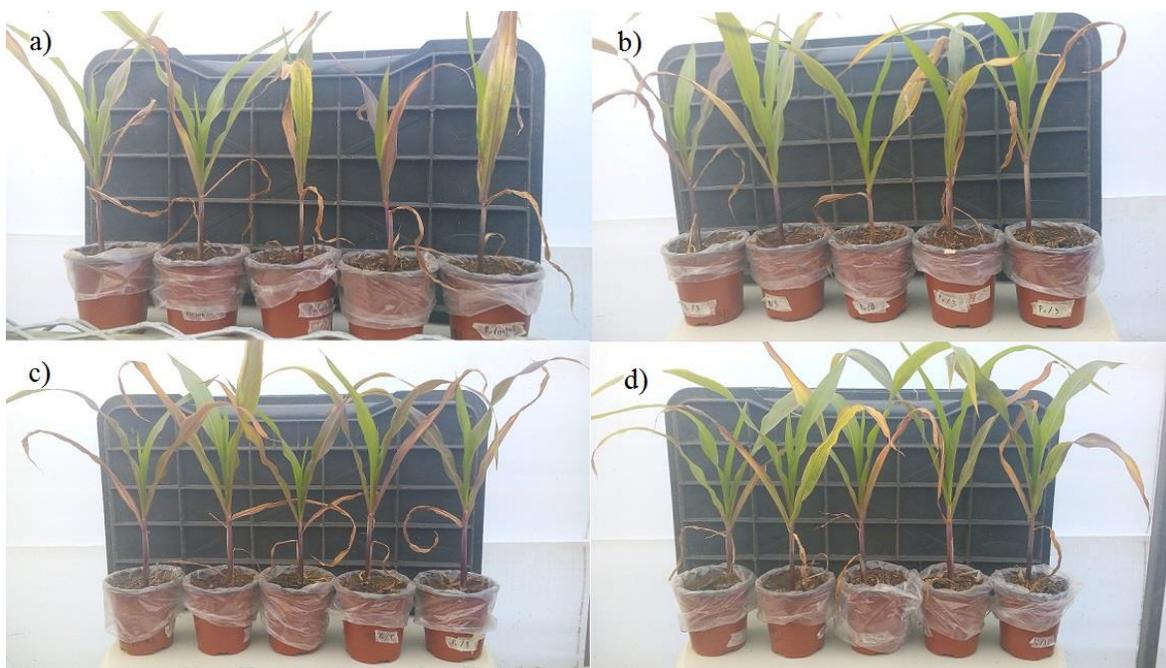
Concentraciones de elementos presentes en los biosólidos y las concentraciones de referencia según la NOM-004.SEMARNAT-2002. Octubre 2016.

mg g <sup>-1</sup>	<b>NOM-004- SEMARNAT- 2002</b>	<b>PTAR</b>
As	0.041	0.0009-0.001
Cd*	0.039	<0.001
Cr	1.5	<0.008
Cu*	1.2	0.074-0.08
Hg	0.017	0.0002
Ni	0.42	<0.007
Pb*	0.3	0.012-0.013
Zn*	2.8	0.55-0.66

\* elementos que se cuantificaron en el proyecto.

Apéndice V.

Fotografías del experimento.



Plantas nutridas con ceniza volante en diferentes concentraciones a) testigo b) 3% c) 9%  
d) 12%.



Sustrato con diferente porcentaje de ceniza, de abajo hacia arriba es testigo, 3%, 9% y 12%.



En la parte superior se observan las plantas de T1 y en la parte inferior están las plantas de T2. El orden de los las enmiendas de izquierda a derecha es: testigo, Bocashi de biosólidos, Bocashi de estiércol de vaca y fertilizante sintético en sustrato estéril y no estéril.