



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO**

**Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas**

**MAESTRÍA EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE DE ZONAS  
ÁRIDAS**

**MANEJO INTEGRAL DE BIOSÓLIDOS PARA SU APROVECHAMIENTO  
AGRÍCOLA EN LA COMARCA LAGUNERA**

**TESIS**

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO  
AMBIENTÉ EN ZONAS ÁRIDAS**

**Presenta:**

**Q.F.B. SANDRA PATRICIA MACIEL TORRES**



**Bajo la supervisión de:**

**DR. URIEL FIGUEROA VIRAMONTES**

DIRECCION GENERAL ACADEMICA  
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES  
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

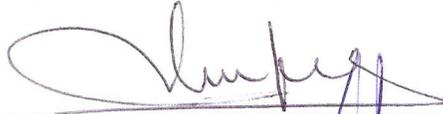
Bermeillo, Durango, mayo de 2017



La presente tesis de Maestría titulada “MANEJO INTEGRAL DE BIOSÓLIDOS PARA SU APROVECHAMIENTO AGRÍCOLA EN LA COMARCA LAGUNERA” fue realizada por la Q.F.B Sandra Patricia Maciel Torres, ha sido revisada y aprobada por el Comité Asesor como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO  
AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS**

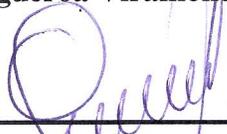
**COMITÉ ASESOR:**



**DIRECTOR:**

**Dr. Uriel Figueroa Viramontes**

**CO-DIRECTOR:**



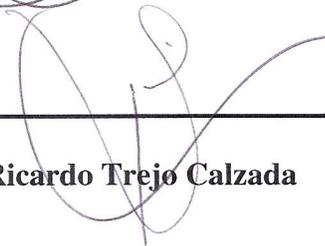
**Dr. Aurelio Pedroza Sandoval**

**ASESOR:**



**M.C. María del Rosario Jacobo Salcedo**

**ASESOR:**



**Dr. Ricardo Trejo Calzada**

## ÍNDICE

DEDICATORIAS .....	xi
AGRADECIMIENTOS .....	xii
DATOS BIOGRÁFICOS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT .....	xiv
CAPITULO 1 .....	15
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	15
JUSTIFICACIÓN.....	17
OBJETIVO GENERAL .....	18
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
HIPÓTESIS .....	18
LITERATURA CITADA .....	19
CAPITULO 2 .....	23
CARACTERIZACIÓN DE BIOSÓLIDOS PARA SU APROVECHAMIENTO AGRÍCOLA .....	23
RESUMEN .....	23

SUMMARY .....	24
INTRODUCCIÓN.....	25
MATERIALES Y MÉTODOS .....	27
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
CONCLUSIONES.....	36
LITERATURA CITADA .....	36
CAPÍTULO 3 .....	40
ESTIMACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE NITRÓGENO PROVENIENTE DE DOS TIPOS DE BIOSÓLIDOS EN PLANTAS DE HIGUERILLA ( <i>Ricinus communis L.</i> ) .....	40
RESUMEN .....	40
ABSTRACT .....	40
INTRODUCCIÓN.....	42
MATERIALES Y MÉTODOS .....	43
RESULTADOS .....	47
DISCUSIÓN.....	52
CONCLUSIÓN .....	54
LITERATURA CITADA.....	54

CAPITULO 4 .....	59
CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS MENORES EN PLANTAS DE HIGUERILLA ( <i>Ricinus communis L.</i> ) FERTILIZADA CON BIOSÓLIDOS .....	59
RESUMEN .....	59
ABSTRACT .....	59
INTRODUCCIÓN.....	60
MATERIALES Y MÉTODOS .....	62
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	65
CONCLUSIONES.....	72
LITERATURA CITADA.....	73
CAPITULO 5 .....	76
RESPUESTA DE LA HIGUERILLA ( <i>Ricinus communis L.</i> ) A DIFERENTES DOSIS DE ARSÉNICO .....	76
RESUMEN .....	76
ABSTRACT .....	77
INTRODUCCIÓN.....	78
MATERIALES Y MÉTODOS .....	79
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	82

CONCLUSIÓN .....	89
LITERATURA CITADA.....	89

## Índice de cuadros Capítulo 2

<b>Cuadro 1.</b> Parametros de caracterización de Biosolidos.....	29
<b>Cuadro 2.</b> Carga Microbiológica en muestras de biosólidos. en condición húmeda y en seco. NMP/4gST= Numero Más Probable por 4 g de Solidos Totales. h/4gST=Huevos de Helminto por 4 g de Solidos Totales. Las letras diferentes entre filas indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). .....	34
<b>Cuadro 3.</b> Evaluación de Toxicidad de biosólidos. PGR%=Porcentaje de Germinación Relativo CRR% = Crecimiento Relativo de Radícula y IG= Índice de Germinación.....	36

## Índice de figuras capítulo 2

<b>Figura 1.</b> Porcentaje de Materia Orgánica (MO), Nitrógeno TotalKjeldahl (NTK) y Fósforo (P) de los biosólidos panta norte (BPN) y planta oriente (PBO). Las letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). Las barras indican la desviación estándar de tres réplicas..	31
<b>Figura 2.</b> Concentración ( $\text{mg k}^{-1}$ ) de los macronutrientes presentes en biosólidos planta norte (BPN) y planta oriente (PBO). Las letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). Las barras indican la desviación estándar de tres réplicas. ....	32
<b>Figura 3.</b> Concentración ( $\text{mg k}^{-1}$ ) de los micronutrientes en biosólidos panta norte (BPN) y planta oriente (PBO). Las letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). Las barras indican la desviación estándar de tres réplicas. ....	33
<b>Figura 4.</b> Concentración ( $\text{mg k}^{-1}$ ) de metales pesados en biosólidos panta norte (BPN) y planta oriente (PBO). Las letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). Las barras indican la desviación estándar de tres réplicas. ....	34

### Índice de cuadros capítulo 3

<b>Cuadro 1.</b> Caracterización química de biosólidos empleados. Biosólidos de lagunas de oxidación (BLO), biosólidos de lodos activados (BLA), Conductividad Eléctrica (C.E.), Materia Orgánica (MO) y Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) .....	45
<b>Cuadro 2.</b> Dosis de fertilizante y biosólidos aplicadas a Higuierilla. ....	45
<b>Cuadro 3.</b> Medias y contrastes ortogonales, de materia seca, en los diferentes órganos de Higuierilla en respuesta a dosis de Sulfato de Amonio (SA), biosólidos de lagunas de oxidación (BLO) y biosólidos de lodos activados (BLA). ns= diferencia no significativa, *P ≤ 0.05 y **P ≤ 0.01 .....	47
<b>Cuadro 4.</b> Medias y contrastes ortogonales, Nitrógeno (N), y Nitrógeno extraído en los diferentes órganos de Higuierilla en respuesta a dosis de Sulfato de Amonio (SA) y Biosólidos de lagunas de Oxidación (BLO) y Biosólidos de Lodos Activados (BLA). ns = diferencias no significativas, *P ≤ 0.05 y **P ≤ 0.001 .....	50

### Índice de figuras capítulo 3

<b>Figura 1.</b> Materia seca de los diferentes órganos de Higuierilla, en los diferentes tratamientos con Sulfato de Amonio (SA), biosólidos de lagunas de oxidación (BLO) y biosólidos de lodos activados (BLA).....	48
<b>Figura 2.</b> Respuesta de la Materia Seca Total (MST) a dosis de Sulfato de Amonio (SA) y Biosólidos de lodos activados (BLA) Y Biosólidos de Lagunas de Oxidación (BLO) .....	49
<b>Figura 3.</b> Distribución de N extraído en los diferentes órganos de higuierilla.....	51
<b>Figura 4.</b> Disponibilidad de nitrógeno para el cultivo de Higuierilla.....	52

#### **Índice de cuadros capítulo 4**

<b>Cuadro 1.</b> Características de los biosólidos empleados. ....	63
<b>Cuadro 2.</b> Dosis de fertilizante y biosólidos aplicadas a Higuera. ....	64
<b>Cuadro 3.</b> Dosis de fertilizante y aportación de micronutrientes.....	64
<b>Cuadro 4.</b> Medias y contrastes ortogonales del rendimiento de materia seca y aceite. ....	66
<b>Cuadro 5.</b> Medias y efectos principales de microelementos en suelo después de la cosecha.....	68
<b>Cuadro 6.</b> Medias y contrastes ortogonales de elementos menores en los diferentes órganos de higuera fertilizada con biosólidos. ....	71

#### **Índice de figuras capítulo 4**

<b>Figura 1.</b> Porcentaje de aceite en semillas de higuera con diferentes fuentes de fertilizante, en dosis baja, media y alta de nitrógeno (letras diferentes a la misma dosis indican diferencia significativa, de acuerdo al método LSMEANS de SAS).....	67
---	----

#### **Índice de cuadros capítulo 5**

<b>Cuadro 1.</b> Características de los biosólidos empleados. ....	81
<b>Cuadro 2.</b> Medias de los pesos y alturas de las plantas de higuera expuestas a diferentes dosis de arsénico y biosólidos de lagunas de oxidación (BLO) y biosólidos de lodos activados (BLO). ....	83
<b>Cuadro 3.</b> Factor de translocación y bioacumulación de la planta higuera. ....	87
<b>Cuadro 4.</b> Medias y diferencias significativas de macro y micronutrientes en las hojas de higuera en respuesta a dosis arsénico y Biosólidos de lagunas de Oxidación (BLO) y Biosólidos de Lodos Activados (BLA). ....	88

## Índice de Figuras capítulo 5

<b>Figura 1.</b> Concentración As en hoja, tallo y raíz en los tratamientos con Biosólidos de lodos activados (BLA) y Biosólidos de Lagunas de Oxidación (BLO) .....	85
--	----

## DEDICATORIAS

A **Dios** que guía y cuida cada uno de mis pasos.

### *A mis padres:*

José Maciel y Virginia Torres son el motor y pilar de mi vida, ya que siempre están ahí apoyándome incondicionalmente. Papi, siempre me has enseñado a luchar por mis sueños y nunca desistir de ellos por más difícil que sea el camino. Mami, eres un ejemplo de amor y bondad que nunca me deja caer. Los amo infinitamente.

### *A mis hermanos:*

Pepe y Pame recuerden que “nacimos del mismo árbol y aunque nuestras ramas crezcan en distinta dirección, siempre nos unirán nuestras raíces”

A **Rubén**, que hemos pasado momentos inolvidables durante esta aventura.

A mis **amigos** por formar parte de mi vida y ser un apoyo durante este proceso.

## AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por darme las herramientas necesarias para lograr un objetivo más en mi vida.

A mi director de tesis el **Dr. Uriel Figueroa Viramontes** por confiar en mí y brindarme su apoyo, orientación y conocimiento en todo momento, quien se ha ganado mi admiración y respeto.

A la **M.C. Rosario Jacobo** que más que una asesora, una gran amiga con un espíritu de lucha y superación, que me comparte su conocimiento sin recelo, además por permitirme realizar mi proyecto de tesis en el CENID-RASPA

Al **Dr. Aurelio Pedroza Sandoval** por estar al pendiente desde el inicio hasta el final de mis estudios de postgrado.

Al **Dr. Trejo Calzada** por sus comentarios y sugerencias durante el desarrollo de esta investigación.

Al **Dr. Meza** y al **Dr. Cirelli** por confiar en mí, y apoyarme a realizar una estancia en la Universidad de Catania, y así reforzar mis estudios de posgrado.

A **Rubén**, por su apoyo durante el análisis de muestras en el laboratorio.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por el apoyo como becario durante este periodo. También agradezco al **INIFAP** por la infraestructura de sus laboratorios y recursos monetarios necesarios para el completo desarrollo de esta tesis bajo el proyecto No. 12294732544 “Diagnostico y evaluación de alternativas para el manejo de efluentes y residuos pecuarios y creación de librerías en espectroscopia de infrarrojo para el análisis de biosólidos”.

## **DATOS BIOGRÁFICOS**

La C. Sandra Patricia Maciel Torres, nació el 15 de abril 1990, es originaria de Cd. Lerdo, Dgo. Concluyó sus estudios de preparatoria en el Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios No.4, obteniendo el título de Técnico laboratorista clínico (cédula profesional 6329248). Es Lic. Químico Farmacéutico Biólogo (cédula profesional 9678403), por la Universidad Juárez del Estado de Durango, egresada en el año 2013.

Su línea de investigación se relaciona al desarrollo sustentable con el proyecto “Manejo integral de biosólidos para su aprovechamiento agrícola en la Comarca Lagunera” por medio del cual logro terminar la presente tesis bajo la supervisión directa de su tutor y asesor Dr. Uriel Figueroa Viramontes.

Participio en una estancia de investigación en el periodo de marzo-junio del 2016 en la “Università degli Studi di Catania” con sede en Catania, Italia, a cargo del Dr. Giuseppe Luigi Cirelli, participando en el proyecto: “Tratamiento de agua residual por humedales construidos para su reutilización en la agricultura”, bajo el patrocinio de Becas Mixtas CONACYT.

# MANEJO INTEGRAL DE BIOSÓLIDOS PARA SU APROVECHAMIENTO AGRÍCOLA EN LA COMARCA LAGUNERA

## INTEGRAL MANAGEMENT OF BIOSOLIDS FOR AGRICULTURAL USE IN THE COMARCA LAGUNERA

Maciel-Torres Sandra Patricia<sup>1</sup>, Figueroa-Viramontes Uriel<sup>2</sup>

### RESUMEN

El agua residual genera un material semisólido, conocido como lodo residual, que posterior a una estabilización se denomina biosólidos. El riesgo para la salud humana y para los agroecosistemas depende de la solubilidad y biodisponibilidad de los metales pesados presentes en los biosólidos manejados. En la Comarca Lagunera suelos con escasos nutrientes son escasos que requieren ser mejoramiento para aumentar la productividad de los cultivos como la higuera (*Ricinus communis* L). Por lo que una alternativa ecológica y económicamente viable es el uso de biosólidos. El objetivo del estudio fue evaluar las características de los biosólidos producidos por los sistemas de lodos activados (BLA) y lagunas de oxidación (BLO) para el desarrollo y crecimiento de higuera, así como evaluar el potencial de fitoextracción de esta planta. Los métodos analíticos se desarrollaron de acuerdo a las Normativas vigentes, por otro lado, se empleó el método de equivalencia de fertilizante para evaluar el nitrógeno disponible para el cultivo. La NOM-004-SEMARNAT-2002 indica una clasificación de los biosólidos de acuerdo a diferentes parámetros, en donde los biosólidos empleados se categorizaron de tipo excelente y clase C. En base al método de equivalencia de fertilizante la disponibilidad de N para higuera fue de 40.4 y 34.8% para los BLA y BLO respectivamente. A pesar de que la extracción de nitrógeno fue mayor en los tratamientos con sulfato de amonio la materia seca fue similar entre las fuentes de N, lo cual indica que es posible sustituir el fertilizante químico por los biosólidos. A pesar de que la higuera no mostro un potencial como planta fitoextractora presento una tolerancia a la exposición al arsénico, por lo que, puede ser utilizada con éxito en zonas contaminadas por dicho elemento para la producción de biodiesel.

**Palabras clave:** Nitrógeno, micronutrientes, metales pesados, higuera.

<sup>1</sup> Tesista

<sup>2</sup> Director

### ABSTRACT

Wastewater generates a semisolid material, known as residual sludge, which after stabilization is called biosolid. The risk to human health and agroecosystems depends on the solubility and bioavailability of the heavy metals in the managed biosolids. In the Comarca Lagunera there are areas where soils have few nutrients; these marginal soils need to be improved to promote the productivity of some crops like castor bean (*Ricinus communis* L). An ecologically and economically viable alternative is the use of biosolids. The aim of this study was to evaluate the characteristics of biosolids produced by the Activated Sludge (ASB) and oxidation pond (OPB) systems for the development and growth of castor bean, as well as to evaluate the phytoextraction potential of this plant. The analytical methods were developed in accordance with current Mexican standards. On the other hand, the fertilizer equivalence method was used to determine the nitrogen available for the crop. NOM-004-SEMARNAT-2002 indicates a classification of the biosolids according to different parameters, where the biosolids used were categorized as being of the excellent type and class C. Based on the fertilizer equivalence method, N availability for castor bean was 40.4 and 34.8% for ASB and OPB, respectively. Although nitrogen extraction was higher in ammonium sulphate treatments, dry matter was similar among N sources, indicating that it is possible to replace chemical fertilizer with biosolids. Despite the fact that castor bean did not show potential as a phytoextractor plant, it presented reasonable tolerance to arsenic exposure; for this reason it can be used successfully in areas contaminated by this element for biodiesel production.

**Keywords:** Nitrogen, micronutrients, heavy metals, castor bean.

## CAPITULO 1

### INTRODUCCIÓN GENERAL

La creciente importancia que tiene la conservación de los recursos naturales ha motivado al hombre, la búsqueda de métodos para cuidarlos y recuperarlos, con el objetivo de que sean aprovechados de una manera eficiente (Pedroza-Sandoval *et al.*, 2015). Uno de los recursos de vital importancia es el agua y desde el punto de vista ecológico, la carencia de este recurso forma parte de los problemas más frecuentes en el planeta (Delgado-Munevar, 2015).

Dentro de las áreas ambientales prioritarias, está el manejo de agua en general, y de manera específica el de las aguas residuales que se generan en la industria y las zonas urbanas. El tratamiento de aguas residuales tiene múltiples beneficios ecológicos, como la reducción de niveles de contaminación de ríos, lagos y aguas costeras donde las aguas residuales son descargadas (Brenton *et al.*, 2007).

Durante el tratamiento de aguas residuales se genera un material semisólido (USEPA, 1999), conocido como lodo residual considerado biológicamente inestable. Después de un proceso de estabilización físico, químico o biológico se denominan biosólidos (González-Flores *et al.*, 2011). Dependiendo de su origen hay dos tipos de biosólidos, los provenientes de lagunas de estabilización y los procedentes de lodos activados (Lu, He, y Stoffella, 2012). Existen diversas alternativas para la disposición de los mismos, desde depositarlos en rellenos sanitarios, incinerarlos, hasta utilizarlos en la producción agrícola (Figuroa-Viramontes *et al.*, 2010; Martins *et al.*, 2013).

La aplicación de biosólidos a suelos agrícolas proporcionan una fuente importante de nutrientes para los cultivos (Athamenh *et al.* 2015), debido a su contenido de materia orgánica, macronutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), así como algunos micronutrientes (Figuroa-Viramontes *et al.*, 2010; González-Flores *et al.*, 2011)

El cobre (Cu), el zinc (Zn), el hierro (Fe) y el manganeso (Mn) son considerados micronutrientes esenciales para las plantas en bajas concentraciones (Jin *et al.*, 2011). En

contraste, el mercurio (Hg), el cadmio (Cd), el plomo (Pb), y el arsénico (As) no tienen actividades fisiológicas y son denominados metales pesados (Flores-Márgez *et al.*, 2013)

Los metales pesados son elementos potencialmente peligrosos para las plantas, animales y humanos, debido a su toxicidad (Angelovicová *et al.*, 2014). Los cuales tienden a ser bioacumulados y no biodegradados (Stankovic y Stankovic, 2013). El riesgo para la salud humana y para los agro ecosistemas depende de su solubilidad y biodisponibilidad (Khan *et al.*, 2008). Por otra parte, los biosólidos contienen una amplia variedad de microorganismos patógenos (Forster-Carneiro, Riau, y Pérez 2010), los cuales pueden afectar la microbiota del suelo y por consiguiente las propiedades físicas y químicas podrían ser modificadas (Frac *et al.*, 2014).

Los suelos en la Comarca Lagunera, correspondiente al área de estudio, poseen una gran diversidad en nutrientes, pero existen zonas donde la fertilidad es baja, con bajo contenido nutrimental, principalmente en suelos marginales, los cuales requieren un proceso de mejoramiento para aumentar la productividad de ciertos cultivos como la higuerrilla (*Ricinus communis* L). Esta planta, es una oleaginosa y se utiliza para la producción de biodiesel que, presenta capacidad de adaptación y actualmente es cultivada prácticamente en todas las regiones tropicales y subtropicales del mundo, aunque es típica de regiones semiáridas (Rico-Ponce *et al.*, 2011)

El uso de fertilizantes químicos es una opción de mejoramiento nutrimental de suelos (Wu *et al.*, 2014); sin embargo, los altos costos de los agroquímicos los hacen inaccesibles para los productores de bajos ingresos e incrementan los costos de producción de los cultivos. En la actualidad se exploran busca nuevas alternativas eficaces y de bajo costo para la enmienda de suelos, tal es el caso del uso de biosólidos. Esta es una práctica que se realiza en la Comunidad Europea donde los biosólidos son reutilizados en la agricultura (USEPA, 1999).

En Estados Unidos, Castillo *et al.* (2011) evaluaron la aplicación de biosólidos en *Pennisetum purpureum* Schum, y obtuvieron rendimientos similares en comparación con el uso de fertilizante inorgánico. En México, se han encontrado efectos positivos de los biosólidos sobre la humedad, los nutrimentos del suelo y la producción de forraje en

pastizales (Jurado *et al.*, 2007). En Chihuahua, Flores-Márgez *et al.* (2010) determinaron la mineralización de nitrógeno de biosólidos. Sin embargo, es indispensable mencionar que actualmente existen escasos estudios en la Comarca Lagunera que demuestren la eficacia y/o el daño ecológico del uso de biosólidos en suelos agrícolas. Por lo cual el objetivo de este estudio fue evaluar las características físicas, químicas y microbiológicas de biosólidos producidos por los sistemas de tratamiento de lodos activados y lagunas de estabilización para el desarrollo y crecimiento de higuera.

## JUSTIFICACIÓN

A medida que la urbanización y la industrialización aumentan, la presión sobre los recursos hídricos incrementa, especialmente en las regiones áridas y semiáridas. Por lo que el tratamiento y reciclado de aguas residuales es una alternativa para mitigar dicha problemática. Por consecuencia, la generación de grandes cantidades de lodos residuales durante el tratamiento de agua es inevitable.

Debido al riesgo que significa para la salud humana y el medio ambiente, los lodos residuales deben eliminarse adecuadamente. En este contexto, la aplicación de biosólidos en suelos agrícolas es una alternativa para subsanar el requerimiento de nutrientes por los cultivos, ya que la mayoría de los suelos no cuentan con la cantidad de nutrientes necesarios.

La FAO (2016) estimó un consumo mundial de fertilizantes ( $N + P_2O_5 + K_2O$ ) en el 2015 de 186.6 millones de toneladas, con un crecimiento del 1.6% anual, y se prevé que alcanzará 199 millones de toneladas a finales de 2019. Además, se estima que la demanda mundial de N, P y K aumentará anualmente en 1.2, 2.0 y 2.5%, respectivamente, en el periodo 2015-2019. Sin embargo, los precios de los fertilizantes convencionales van en aumento por su alto requerimiento de materias primas, particularmente gas natural, roca fosfórica y sales de potasio (Blanco, 2011).

De acuerdo con Blanco (2011), para sostener la población mundial se necesitarán más fertilizantes, lo que generará preocupaciones sobre la disponibilidad futura de nutrientes NPK y la escasez de recursos potenciales. Por lo anterior, se busca que la fertilización de

suelos sea mediante la reutilización de materiales de desecho como los biosólidos, los cuales son ricos en nutrientes, además de que se mitiga el problema de la disposición final de biosólidos mediante un uso adecuado en suelos agrícolas. Este estudio, es una contribución al conocimiento de los beneficios y riesgos por el uso de biosólidos en suelos agrícolas, al ser utilizados en la producción de higuera *Ricinus communis* L.

### **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar las características de biosólidos producidos por los sistemas de tratamiento de lodos activados y lagunas de estabilización, considerando la aportación de nutrientes y la acumulación de metales pesados en plantas de higuera.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar física, química y microbiológicamente los biosólidos provenientes de un sistema de lodos activados y de lagunas de estabilización.
- Determinar la disponibilidad de nitrógeno para el cultivo de higuera de dos tipos de biosólidos, como una herramienta para estimar dosis de aplicación.
- Determinar la absorción y distribución de micronutrientes en plantas de higuera aplicar dos tipos de biosólidos.
- Evaluar la absorción y distribución de arsénico, así como su relación con la tolerancia a este elemento, en plantas de higuera fertilizadas con dos tipos de biosólidos.

### **HIPÓTESIS**

- Las características físico-químico-biológicas de los biosólidos de las plantas tratadoras de la Comarca Lagunera cumplen con la norma de calidad actual, por lo que son adecuados para usarse como abono orgánico en suelos agrícolas.
- La higuera es una planta fitoextractora de arsénico que permite disminuir el impacto ambiental de este elemento.

## LITERATURA CITADA

- Angelovicová, L., Lodenius, M., Tulisalo, E., & Fazekasová, D. (2014). Effect of heavy metals on soil enzyme activity at different field conditions in middle spis mining area (Slovakia). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 93(6), 670–675. <http://doi.org/10.1007/s00128-014-1397-0>
- Athamenh, B., Salem, N., Et-Zuraiqi, S., Suleiman, W., & Rusan, M. (2015). Combined land application of treated wastewater and biosolids enhances crop production and soil fertility. *Desalination and Water Treatment*, 53(12), 3283–3294. <http://doi.org/10.1080/19443994.2014.933037>
- Blanco, M. (2011). Supply of and access to key nutrients NPK for fertilizers for feeding the world in 2050. *Universidad Politécnica de Madrid*, 3–39. Retrieved from [https://www.researchgate.net/profile/Maria\\_Blanco7/publication/236272173\\_Supply\\_of\\_and\\_access\\_to\\_key\\_nutrients\\_NPK\\_for\\_fertilizers\\_for\\_feeding\\_the\\_world\\_in\\_2050/links/02bfe511e5f39575f7000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Maria_Blanco7/publication/236272173_Supply_of_and_access_to_key_nutrients_NPK_for_fertilizers_for_feeding_the_world_in_2050/links/02bfe511e5f39575f7000000.pdf)
- Brenton, C. M., Fish, E. B., & Mata-González, R. (2007). Macronutrient and trace element leaching following biosolids application on semi-arid rangeland soils. *Arid Land Research and Management*, 21(2), 143–156. <http://doi.org/10.1080/15324980701267783>
- Castillo, M. S., Sollenberger, L. E., Vendramini, J. M. B., Woodard, K. R., Connor, G. A. O., Silveira, M. L., & Sartain, J. B. (2011). Incorporation of Municipal Biosolids Affects Organic Nitrogen Mineralization and Elephantgrass Biomass Production. *Agronomy Journal*, 103(3), 899–905. <http://doi.org/10.2134/agronj2010.0497>
- Delgado-Munevar, G. W. (2015). Gestión y valor económico del del recurso hídrico. *Revista Finanzas Y Política Económica*, 7(2), 279–298.
- FAO. (2016). World fertilizer trends and outlook to 2019. *Food and Agriculture Organization of the United Nations - Rome*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i5627e.pdf>

- Figueroa-Viramontes, U., Flores-Ortiz, M. A., Palomo-Rodríguez, M., Corral-Díaz, B., & Flores-Margez, J. P. (2010). Uso de biosólidos estabilizados con cal como fertilizante orgánico en algodónero para el Valle de Juárez, Chihuahua. *Ciencia En La Frontera: Revista de Ciencia Y Tecnología de La UACJ*, 8(1), 35–43. Retrieved from <http://bva.colech.edu.mx/xmlui/bitstream/handle/1/1482/rs014.pdf?sequence=1>
- Flores-Márgez, J. P., Assadian, N. W., Giovanni, G. D. Di, Pérez-casio, F., & Shukla, M. K. (2013). Heavy Metals in Oat and Soil Treated with Lime-Stabilized Biosolids and Reclaimed Wastewater. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 03(04), 1–9. <http://doi.org/10.4172/2161-0525.S6-001>
- Flores-Márgez, J. P., Poncio-acosta, M. Z., Salas-galván, E., Pérez-casio, F., Corral-avitia, A. Y., & Idilio, H. (2010). Mineralización de nitogeno en biosólidos estabilizados con cal. *Terra Latinoamericana*, 28(4), 307–317. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-57792010000400002&lng=es&tlng=pt](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792010000400002&lng=es&tlng=pt).
- Forster-Carneiro, T., Riau, V., & Pérez, M. (2010). Mesophilic anaerobic digestion of sewage sludge to obtain class B biosolids: Microbiological methods development. *Biomass and Bioenergy*, 34(12), 1805–1812. <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.07.010>
- Fraç, M., Oszust, K., Lipiec, J., Jezierska-Tys, S., & Nwaichi, E. O. (2014). Soil microbial functional and fungal diversity as influenced by municipal sewage sludge accumulation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(9), 8891–8908. <http://doi.org/10.3390/ijerph110908891>
- González-Flores, E., Tornero-Campante, M. A., Sandoval-Castro, E., Pérez-Magaña, A., & Gordillo-Martínez, A. J. (2011). Biodisponibilidad y fraccionamiento de metales pesados en suelos agr??colas enmendados con bios??lidos de origen municipal. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 27(4), 291–301. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992011000400002&lng=es&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992011000400002&lng=es&tlng=en)

- Jin, V. L., Johnson, M. V. V, Haney, R. L., & Arnold, J. G. (2011). Potential carbon and nitrogen mineralization in soils from a perennial forage production system amended with class B biosolids. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 141(3-4), 461–465. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.016>
- Jurado, P., Arredondo, T., Flores, E., & Olalde, V. (2007). PASTIZALES SEMIÁRIDOS Effect of Biosolids on Soil Moisture , Nutrients and Forage Yield in a Semiarid Rangeland. *Terra Latinoamericana*, 25(2), 211–218.
- Khan, S., Cao, Q., Zheng, Y. M., Huang, Y. Z., & Zhu, Y. G. (2008). Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing , China. *Environmental Pollution*, 152, 686–692. <http://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.056>
- Lu, Q., He, Z. L., & Stoffella, P. J. (2012). Land application of biosolids in the USA: A review. *Applied and Environmental Soil Science*, 2012. <http://doi.org/10.1155/2012/201462>
- Martins, A. E., Pereira, M. S., Jorgetto, A. O., Martines, M. A. U., Silva, R. I. V, Saeki, M. J., & Castro, G. R. (2013). The reactive surface of Castor leaf [*Ricinus communis* L.] powder as a green adsorbent for the removal of heavy metals from natural river water. *Applied Surface Science*, 276, 24–30. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.02.096>
- Pedroza-Sandoval, A., Yáñez-Chávez, L. G., Sánchez-Cohen, I., & Samaniego-Gaxiola, J. A. (2015). Efecto del hidrogel y vermicomposta en la producción de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(4), 375–381. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-73802015000400005&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802015000400005&lng=es&nrm=iso). ISSN 0187-7380.
- Rico-Ponce, H. R., Tapia-Vargas, L. M., Teniente-Oviedo, R., González-Avila, A., Hernández-Martínez, M., Solís-Bonilla, J. L., & Zamarripa-Colmenero, A. (2011). *Guía para cultivar higuierilla (Ricinus communis L.) en Michoacán*. (1st ed.).

Apatzingán, Michoacán, México.

Stankovic, S., & Stankovic, A. R. (2013). *Green Materials for Energy, Products and Depollution* (Vol. 3). <http://doi.org/10.1007/978-94-007-6836-9>

Wu, J., Wu, M., Li, C., & Yu, G. (2014). Long-term fertilization modifies the structures of soil fulvic acids and their binding capability with Al. *PLoS ONE*, 9(8), 1–8. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0105567>

## **CAPITULO 2**

### **CARACTERIZACIÓN DE BIOSÓLIDOS PARA SU APROVECHAMIENTO AGRÍCOLA**

#### **Characterization of Biosolids for Agricultural Uses**

**Sandra Patricia Maciel-Torres,<sup>1</sup> María del Rosario Jacobo-Salcedo<sup>2\*</sup>, Uriel  
Figueroa-Viramontes<sup>3</sup>, Aurelio Pedroza-Sandoval<sup>1</sup>, Ricardo Trejo- Calzada<sup>1</sup>,  
Lourdes Lucia López-Romero<sup>2</sup>.**

<sup>1</sup>URUZA-Chapingo. Unidad Regional de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo. Bermejillo, Durango. C.P. 35230.

<sup>2</sup> INIFAP. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Agua-Suelo-Planta-Atmosfera. Margen Derecha Canal de Sacramento, Gómez Palacio, Durango. C. P. 35140.

<sup>3</sup>INIFAP Centro de Investigación Regional Norte Centro. Matamoros Coahuila, Blvd. José Santos Valdés No. 1200, Centro. CP. 27440.

\*e-mail:jacobo.rosario@inifap.gob.mx

#### **RESUMEN**

El objetivo del presente estudio fue realizar una caracterización química, biológica y toxicológica de biosólidos provenientes de dos sistemas de tratamiento de aguas residuales de la Comarca Lagunera para su aprovechamiento agrícola. Las muestras de biosólidos fueron colectadas de las Plantas Tratadoras de Aguas Residuales (PTAR) Norte y Oriente de la ciudad de Gómez Palacio, Durango, México. Las determinaciones químicas se realizaron por triplicado, de acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002 y Recommended methods of manure analysis (A3769). En el análisis de los biosólidos la conductividad eléctrica (C.E), Materia orgánica (MO), Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK), P, Ca, Mg, Na, presentaron diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) entre los dos tipos de biosólidos. Por el contrario, pH y K no presentaron diferencia significativa entre los biosólidos planta norte

(BPN) y biosólidos planta oriente (BPO). Los dos biosólidos presentaron pH ligeramente básico, la cantidad de MO contenida en los biosólidos fue de 38.01 y 56.83 % en los BPN y BPO, respectivamente. El porcentaje de NTK fue de 1.23 y 2.24%. El fósforo total fue mayor en los BPO ( $P < 0.05$ ). La concentración de metales pesados (Cd y Pb), están por debajo de los límites máximos permisibles según la NOM-004-SEMARNAT-2002. Las concentraciones de coliformes y huevos de helminto están dentro de los límites estipulados por la norma; sin embargo, las concentraciones de *Salmonella spp.* Rebasan los límites permisibles. El Índice de Germinación (IG) presentó una variación significativa entre los dos tipos de biosólidos, aunque no hubo diferencia estadística significativa en porcentaje relativo de germinación (PRG) y crecimiento radicular relativo (CRR). Lo anterior hace factible el uso de los biosólidos en la agricultura, con el beneficio nutricional consecuente para el suelo y la planta. La información fue analizada empleando el software SPSS versión 22, se realizó una transformación logarítmica por la anormalidad de los datos (Shapiro-Wilk,  $P < 0.05$ ).

**Palabras clave:** aguas residuales, contaminación ambiental, fertilización orgánica, metales pesados.

## SUMMARY

The aim of this study was to conduct a chemical characterization of biosolids from different treatment sewage systems in the Comarca Lagunera to determine their use in the agriculture. The biosolids samples were collected from the Waste Water Treatment Systems (WWTS) Northern East of Gomez Palacio, Dgo. The chemical determinations were performed by triplicate according to the NOM-004-SEMARNAT-2002 and Recommended methods of manure analysis (A3769). In the analysis of biosolids the electrical conductivity (EC), organic matter (OM), total Kjeldahl nitrogen (TKN), P, Ca, Mg, Na, presented significant difference ( $P < 0.05$ ) between the two types of biosolids. On the other hand, pH y K did not show significant difference between the North plant

biosolids (NPB) and East plant biosolids (EPB). Both biosolids presented pH slightly basic pH. The amount of OM in the biosolids was 38.01 y 56.83 % in NPB and EPB respectively. The percentage of TKN was 1.23 and 2.24%. The total phosphorus was higher in WPB ( $P < 0.05$ ). The concentration of heavy metals (Cd and Pb) were below the maximum permissible limits according to NOM-004-SEMARNAT-2002. The concentrations of coliforms and helminth eggs found were in the limit of the Norm; however, concentrations of *Salmonella spp.* exceed the allowable concentrations. The IG presented a significant variation between the two types of biosolids, but not statistically significant difference was found into PRG and CRR. This makes possible the use of biosolids in agriculture, with the consequent nutritional benefit to the soil and plant. The information was analyzed using SPSS version 22 software, a logarithmic transformation was performed because of the non-normality of the data (Shapiro-Wilk,  $P < 0.05$ ).

**Key words:** wastewater, environment contamination, organic fertilizers, heavy metals.

## INTRODUCCIÓN

El deterioro de los mantos acuíferos está afectando la producción agrícola en la zona norte del país, en donde sin lugar a duda se encuentra un dinamismo económico importante basado en la agricultura y la ganadería. Ambas actividades económicas manifiestan un uso importante del recurso hídrico, en conjunto éstas representan cerca del 75% de la extracción total del agua (SAGARPA, 2009). La Comarca Lagunera es una zona económica importante ubicada entre los inmersa en los estados de Durango y Coahuila, donde se genera una extracción de  $642.49 \text{ Mm}^3$  donde solo se produce una recarga de  $518 \text{ Mm}^3$ , lo anterior produce un déficit de  $-123.59 \text{ Mm}^3$ . La demanda de agua en el sector agrícola es cada vez mayor y por lo tanto la extracción de agua subterránea es a mayor profundidad.

Derivado de lo anterior, Actualmente se está promoviendo por el uso de aguas residuales tratadas para riego agrícola restringido, con el propósito de disminuir la cantidad de agua subterránea extraída a grandes profundidades, con la consecuente alta contaminación por metales pesados.

La Organización de las Naciones Unidas ha estimado que al menos 50 países riegan una superficie cercana a 20 millones de hectáreas con aguas residuales sin tratar, tratadas parcialmente y/o diluidas. Lo anterior representa alrededor del 10% del total de las tierras de regadío. Alrededor de 525,000 ha son regadas con agua residuales. A pesar de que se ha progresado en el control de la contaminación de las aguas residuales municipales, aun se sigue regando con aguas residuales sin tratar (Bahri, 2009; Jimenez y Asano, 2008; Mackie *et al.*, 2009).

Durante el tratamiento de aguas residuales se genera un material semisólido, conocido como lodo residual considerado biológicamente inestable (USEPA, 1999). Después de un proceso de estabilización físico, químico o biológico se denominan biosólidos, dependiendo de su origen hay dos tipos de biosólidos, los provenientes de lagunas de estabilización y los procedentes de lodos activados (Lu *et al.*, 2012). Existen diversas alternativas para la disposición final de los mismos, desde apilarlos sobre el terreno, depositarlos en rellenos sanitarios, incinerarlos, hasta utilizarlos provechosamente en la producción agrícola (Figuroa-Viramontes *et al.*, 2010). La aplicación de biosólidos a suelos agrícolas proporcionan una fuente importante de nutrientes para los cultivos (Athamenh *et al.*, 2015), debido a su contenido de materia orgánica, macronutrientes como nitrógeno (N), fosforo (P) y potasio (K), así como algunos micronutrientes cobre (Cu), zinc (Zn), hierro (Fe) y manganeso (Mn) (Figuroa-Viramontes *et al.*, 2010). Por otra parte, el contenido y la disponibilidad de metales pesados es uno de los principales factores que pueden restringir el empleo de biosólidos como enmiendas de suelos (O'Connor *et al.*, 2005); adicionalmente al alto contenido de microorganismos patógenos, como coliformes fecales y huevos de helmintos.

La susceptibilidad microbiológica a la cual se pueden exponer los usuarios de biosólidos debe ser considerada por el potencial de los mismos para la generación de enfermedades que principalmente se presentan en el sistema gastrointestinal. El tratamiento de los biosólidos antes de ser empleados es muy importante para reducir el riesgo de propagación de enfermedades, así como fomentar las buenas prácticas de higiene y así prevenir posibles enfermedades.

Los biosólidos dependiendo de su origen pueden estar constituidos por compuestos que generan toxicidad a plantas y/o animales que tengan contacto con ellos, por lo cual es necesario evaluar el nivel de toxicidad de estos productos, así como la posible interferencia de éstos en los índices de germinación de ello depende en gran medida su uso para diversos cultivos que pudieran presentar sensibilidad a algunos agentes químicos que lo constituyan. Los bioensayos de toxicidad con semillas de especies vegetales permiten evaluar los efectos fitotóxicos de compuestos puros o mezclas complejas que pueden generar efectos perjudiciales en el proceso de germinación de las semillas y en el desarrollo de las plántulas durante los primeros días de crecimiento (Gariglio *et al.*, 2002). El objetivo de este estudio fue caracterizar química y biológicamente los biosólidos provenientes de los sistemas de lodos activados y de lagunas de estabilización para identificar potencialidad en el uso agricultura.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

El presente estudio se realizó en el laboratorio INIFAP CENID-RASPA, así como en el laboratorio de INIFAP-CIRNOC. Las muestras de biosólidos se colectaron de las plantas tratadoras región Norte (25°38'22.99" latitud Norte y 103°28'38.19" longitud Oeste) y región Oriente (25°36'45.78" latitud Norte y 103°26'7.81" longitud Oeste) de la Ciudad de Gómez Palacio, Durango, de acuerdo a las indicaciones de la NOM-004-SEMARNAT-2002.

Las evaluaciones nutrimentales se realizaron por triplicado, de acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT 2002) y Recommended methods of manure analysis (A3769). La determinación de pH se realizó por el método del potenciómetro; conductividad eléctrica (CE) mediante un conductivímetro; el contenido de materia orgánica (MO) por el método de ignición, el fósforo total por el método de Molibdato-vanadato. El nitrógeno total (Nt) se determinó por el método de Kjeldahl. Nitratos (N-NO<sub>3</sub> y amonio (N-NH<sub>4</sub>) por arrastre de vapor en presencia de óxido de magnesio y aleación de Devarda. Tanto los macroelementos (Ca, Mg, Na, K), microelementos (Cu,

Mn, Zn, Fe) y metales pesados (As, Pb, Cd) se analizaron por Espectrofotometría de Absorción Atómica.

Las determinaciones microbiológicas se realizaron con base en la NOM-004-SEMARNAR-2002 (anexo III, IV y V) y las determinaciones de Coliformes y *Salmonella spp.* se desarrollaron por el protocolo de Número Más Probable mediante dilución en tubo. Este método permite determinar la concentración de microorganismos viables presentes en las muestras. La evaluación de Huevo de Helminto se desarrolló basado en los principios de flotación y sedimentación, considerando la densidad del sulfato de zinc teniendo como base las características particulares de los huevos de cada especie de parásitos.

Para evaluar la fitotoxicidad, se realizaron bioensayos de acuerdo a Zucconi *et al.*, (1981) en semillas de rábano (*Raphanussativus* L.) se usó un diseño completamente al azar con tres repeticiones. En cada caja Petri con papel filtro se colocaron 10 semillas, se humedecieron con 8 ml del extracto acuoso de biosólidos en relación 1:5 (biosólidos, agua destilada). Se dejaron a temperatura ambiente durante 120 horas. Para el grupo testigo se utilizó agua destilada. Se contaron las semillas germinadas en cada caja Petri para determinar el porcentaje de germinación relativo (PGR) y se midió la longitud de la raíz para establecer el crecimiento de la radícula relativo (CRR). El índice de germinación (IG) se obtuvo con las siguientes formulas:

$$PGR = \frac{\text{No. de semillas germinadas en el extracto}}{\text{No. de semillas germinadas en el testigo}} \times 100$$

$$CRR = \frac{\text{Longitud de la radícula en el extracto}}{\text{Longitud de la radícula en el testigo}} \times 100$$

$$IG = \frac{(PGR)(CRR)}{100}$$

Para los análisis estadísticos y por la anormalidad de los datos (Shapiro-Wilk,  $P < 0.05$ ), se realizó su transformación correspondiente (Zar 1999). Se efectuó una prueba t de

student para evaluar significancia entre los sitios de muestreo evaluados, la cual se llevó a cabo con el paquete estadístico SPSS versión 22.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización de los biosólidos parte de la necesidad de evaluar su capacidad nutrimental para su uso en áreas agrícolas, sin dejar de lado su potencial contaminante y la posible propagación de patógenos. El presente provee evidencia suficiente para la generación de recomendaciones agronómicas puntuales que permitan de acuerdo al cultivo generar una mejor productividad.

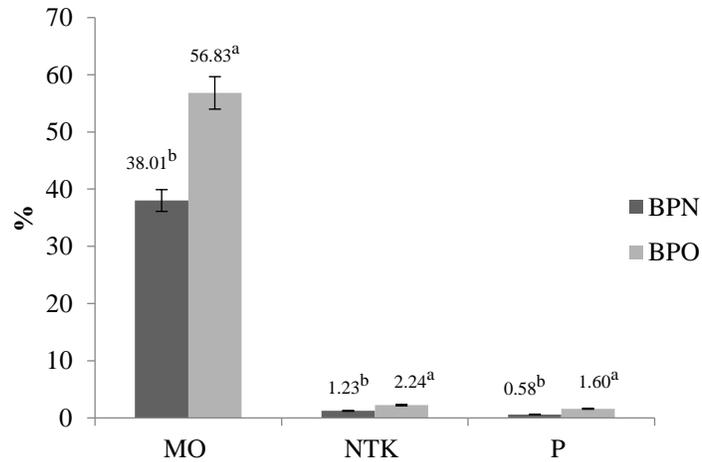
Los biosólidos evaluados presentaron un pH ligeramente alcalino, teniendo una media de 7.56 en los BPN y 7.53 en los BPO los cuales no presentaron diferencia significativa ( $t=0.63$ ,  $gl=4$ ,  $P=0.560$ ) (Cuadro 1). Los BPO presentaron mayor MO con una media de 56.83% mientras que en los BPN una media de 38.01%, esta diferencia fue estadísticamente significativa ( $t=-59.72$ ,  $gl=4$ ,  $P<0.001$ ), lo anterior, favorece que la MO se una a las arcillas del suelo formando agregados que le dan estabilidad y aumenta la retención de agua así como de nutrientes en donde suelos arenosos se ven mayormente favorecidos (Figuroa-Viramontes *et al.*, 2010; Julca-Otiniano *et al.*, 2006). En estudios anteriores se determinaron valores del 32.6% en sólidos deshidratados de lagunas de estabilización (Jurado-Guerra *et al.*, 2004), lo cual permite visualizar que la proporción de MO depende del tipo de tratamiento de agua del cual provengan dichos biosólidos.

**Cuadro 1.** Parametros de caracterización de Biosolidos

	BPO	BPN
pH	7.56	7.537
Conductividad (dS m <sup>-1</sup> )	2.53	3.65

Después del contenido de C, H y O, principales constituyentes de la materia orgánica, el N es el elemento más abundante en los biosólidos (Figueroa-Viramontes *et al.*, 2010). Éste es considerado el nutrimento más importante para el crecimiento vegetal porque forma parte estructural de aminoácidos y proteínas. La incorporación de biosólidos al suelo mejora la calidad del suelo por la incorporación de la MO, además de que proporciona una concentración de N importante como se observa en los BPN con una media de 1.23% y en los BPO de 2.24% (Figura 1), los cuales mostraron una diferencia estadística significativa ( $t=-22.78$ ,  $gl=4$ ,  $P<0.001$ ) (Figura 1). Lo anterior coincide con lo reportado por Torres-Lozada *et al.*, (2009) y Pino *et al.*, 2012) quienes reportaron 2.25% y 2.1 % de N, respectivamente.

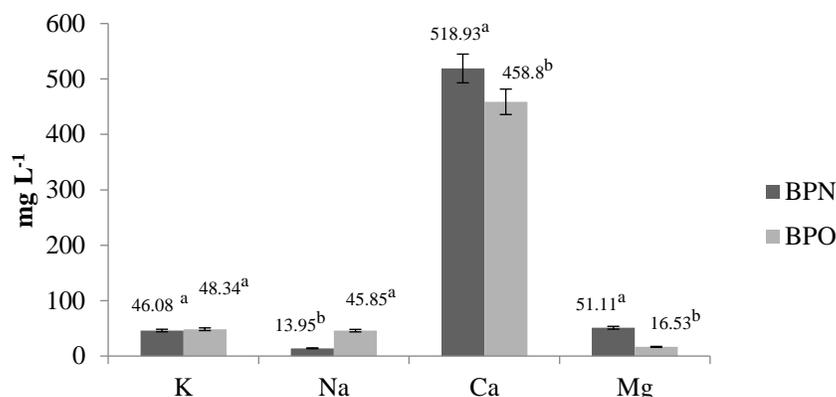
El P es un componente primario de los sistemas responsables de la captación, almacenamiento y transferencia de energía en las plantas, además es componente básico en las estructuras de macromoléculas de interés crucial, tales como ácidos nucleídos y fosfolípidos (Fernández, 2007). Se observó diferencia significativa ( $t=-33.68$   $gl=4$ ,  $P<0.001$ ) en la cantidad de P entre los dos tipos de biosólidos, siendo los BPO los que tienen mayor cantidad con una media de 1.60% mientras que los BPN poseen 0.58%. Grajales *et al.* (2006) reportaron 0.60 % de P total en los biosólidos evaluados, resultado similar al de los BPN, por otra parte, Jurado-Guerra *et al.* (2004) determinaron 1.96 %, similar a lo reportado en este estudio para BPO.



**Figura 1.** Porcentaje de Materia Orgánica (MO), Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) y Fósforo (P) de los biosólidos planta norte (BPN) y planta oriente (BPO). Las letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). Las barras indican la desviación estándar de tres réplicas.

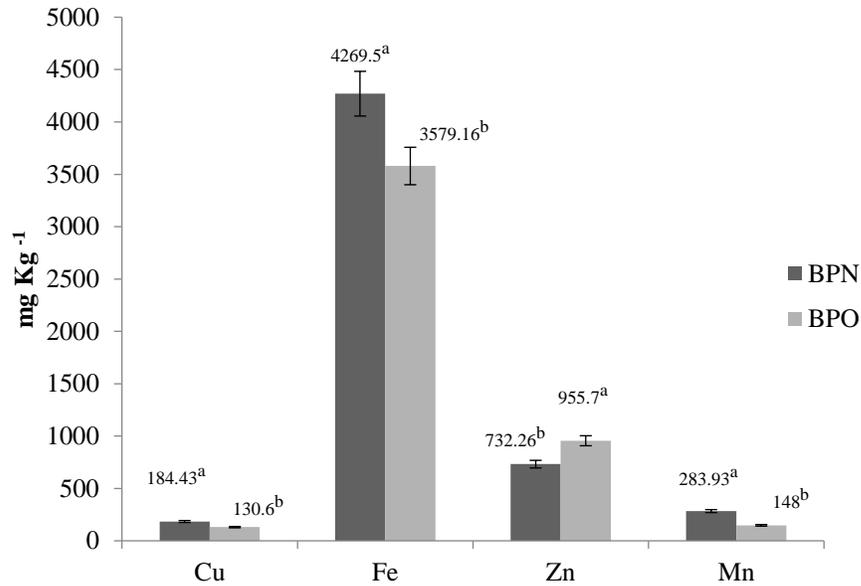
El K es un catión esencial en las plantas ya que participa en el establecimiento de la presión de turgencia y mantiene la electroneutralidad celular es por ello la importancia de la evaluación de dicho elemento (Taiz y Zeiger, 2006). Los biosólidos analizados generan un aporte medio de  $46.08 \text{ mg L}^{-1}$  y de  $48.34 \text{ mg L}^{-1}$  en la planta norte y oriente respectivamente, los cuales no presentaron diferencia significativa ( $t=-0.52$ ,  $gl=4$ ,  $P=0.627$ ). Robledo-Santoyo *et al.* (2010) reportaron  $6.5 \text{ mg L}^{-1}$  mientras que Grajales *et al.* (2006) obtuvieron  $43 \text{ mg L}^{-1}$  lo cual muestra la variabilidad de dicho elemento de acuerdo al tipo de tratamiento así como la naturaleza del agua residual que se trató.

Los elementos Na, Ca, y Mg mostraron una diferencia estadística significativa ( $P < 0.001$ ); la concentración de Na fue mayor en los BPO con una media de  $45.84$ , y en el caso de Ca y Mg se presentaron en mayor concentración en los BPN con una media de  $518$  y  $51.11 \text{ mg L}^{-1}$  respectivamente (Figura 2). Figueroa *et al.*, (2008) obtuvieron  $21.9 \text{ mg L}^{-1}$  de Ca y  $40.80 \text{ mg L}^{-1}$  de Na, Jurado-Guerra *et al.* (2012) cuantificaron  $3412.00 \text{ mg L}^{-1}$  de Ca y Mata-González, *et al.* (2006) determinaron  $7.7 \text{ g kg}^{-1}$  de Mg. Dichos reportes muestran datos muy similares a los obtenidos en esta investigación.



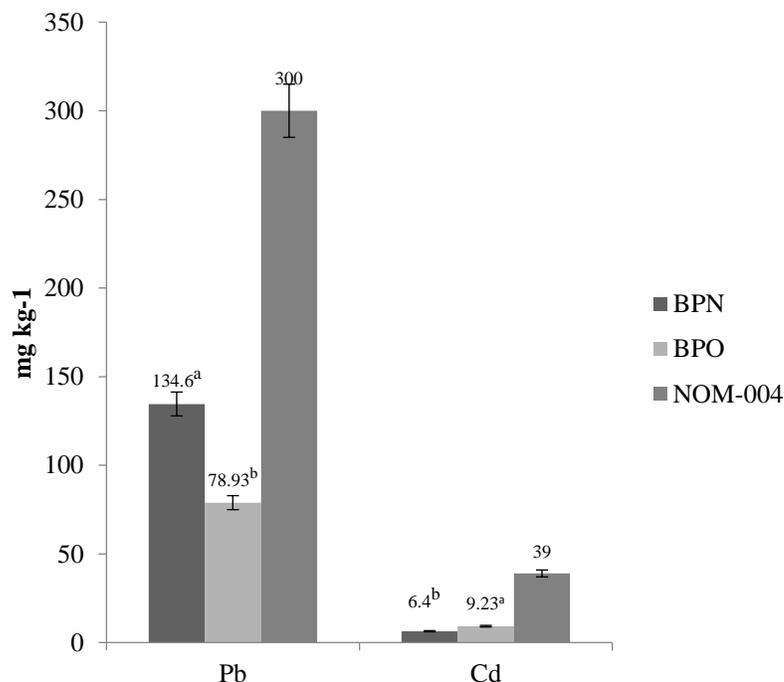
**Figura 2.** Concentración de K, Na, Ca y Mg en biosólidos planta norte (BPN) y biosólidos planta oriente (BPO). Prueba de Tukey (( $p < 0.05$ ), cifras con letras diferentes indican diferencias significativas.

El cobre, hierro, manganeso y zinc son metales esenciales en el metabolismo vegetal, ya que son activadores de enzimas (Taiz y Zeiger, 2006). Se encontró una diferencia significativa en la concentración de estos micronutrientes en los dos biosólidos estudiados ( $P < 0.05$ ). El Cu, Fe y Mn se presentan en mayor concentración en los BPN con una media de  $184.43 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $4269.5 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $283.93 \text{ mg kg}^{-1}$ , a diferencia del Zn elemento que es mayor en los BPO con una media de  $955.70 \text{ mg kg}^{-1}$  (Figura 3). Se tienen reportes de niveles de Cu desde  $171\text{-}266 \text{ mg kg}^{-1}$  (Athamenh *et al.* 2015; Flores-Félix *et al.* 2014), de Zn de  $899 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $855 \text{ mg kg}^{-1}$  (Flores-Félix *et al.*, 2014; Grajales, *et al.*, 2006), de Mn de  $193 \text{ mg kg}^{-1}$  (Athamenh *et al.*, 2015) y de Fe de  $8564 \text{ mg kg}^{-1}$  (Jurado *et al.*, 2007). Dichos datos coinciden con los obtenidos en esta investigación con la diferencia en la concentración de Fe en donde se determinó el 50% de lo reportado con anterioridad.



**Figura 3.** Concentración (mg kg<sup>-1</sup>) de los micronutrientes en biosólidos planta norte (BPN) y planta oriente (BPO). Prueba de Tukey ((p < 0.05), cifras con letras diferentes indican diferencias significativas.

Por otra parte, el Pb y Cd son metales pesados considerados nocivos para las plantas; sin embargo, en los biosólidos evaluados están por debajo de los límites permisibles que establece la NOM 004 SEMARNAT 2002, lo cual permite su incorporación a suelos agrícolas. Los metales presentaron diferencia significativa, siendo mayor la concentración de Pb en los BPN con una media de 134.6mg kg<sup>-1</sup>, por el contrario, en el caso del Cd los niveles más elevados se presentaron en los BPO con una media de 9.23 mg kg<sup>-1</sup>. (Figura 4). Jurado-Guerra *et al.*, (2004) cuantificaron 245 mg kg<sup>-1</sup> de Pb y 9 mg kg<sup>-1</sup> de Cd, con lo que es posible observar una ligera diferencia en los niveles de plomo.



**Figura 4.** Concentración ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) de metales pesados en biosólidos planta norte (BPN) y planta oriente (BPO). Prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ), cifras con letras diferentes indican diferencias significativas. Las barras indican la desviación estándar de tres réplicas.

La NOM-004-SEMARNAT-2002 indica una clasificación de los biosólidos de acuerdo a la carga microbiológica y el contenido de metales. El aprovechamiento de los biosólidos se establece en función del tipo (Excelente o Bueno) y la clase (A, B o C). La carga microbiológica disminuyó bajó significativamente con el proceso de secado; sin embargo, los límites son superiores a los sugeridos por esta clasificación en el caso de *Salmonella spp*; la concentración de bacterias coliformes y los huevos de helminto en base sólida, permite colocar estos biosólidos en la categoría de C y B respectivamente (Cuadro 2). En el caso de los huevos de helminto, el proceso de molienda favoreció para generar una disminución en la concentración de los mismos en los biosólidos.

**Cuadro 2.** Carga Microbiológica en muestras de biosólidos en condición húmeda y en seco.

		<b>BPN</b>	<b>BPO</b>
Coliformes	Húmedo	111000 a	110000 a
NMP/4gST	Seco	46000 a	24000 b
Salmonella	Húmedo	150000 b	240000 a
NMP/4gST	Seco	2400 a	1100 b
Huevos de	Húmedo	16 a	13 b
Helminto h/4gST	Seco	5 a	4 a

NMP/4gST= Numero Más Probable por 4 g de Sólidos Totales. h/4gST=Huevos de Helminto por 4 g de Sólidos Totales. Prueba de Tukey (( $p < 0.05$ ), cifras con letras diferentes indican diferencias significativas.

Otro de los parámetros de evaluación sumamente necesarios es la determinación de toxicidad. La naturaleza de los biosólidos permite concentrar a su vez sustancias nocivas para las plantas. En esta determinación se evaluó la tasa de germinación de especies sensibles como lo puede ser el rábano o la lechuga, generando de esta manera su aceptación o rechazo para su uso agrícola.

De acuerdo con Emino Warman (2004), el criterio de interpretación para el índice de germinación establece que, si el índice de germinación tiene valores menores al 50% indican una alta fitotoxicidad del material, si está entre el 50 y el 80% la fitotoxicidad es moderada y si su valor es superior al 80% el material no presenta fitotoxicidad.

La evaluación de toxicidad implica la evaluación de estos tres parámetros. En el Cuadro 3 se observa que no hubo diferencia estadísticamente significativa en el PGR y en CRR, en contraste, la determinación del IG mostró diferencia significativa siendo mayor en los BPN. Por lo que se puede determinar que dichos biosólidos pueden ser empleados en el área agrícola sin tener el riesgo de generar toxicidad en los cultivos.

**Cuadro 3.** Evaluación de Toxicidad de biosólidos. PGR% = Porcentaje de Germinación Relativo CRR% = Crecimiento Relativo de Radícula e IG = Índice de Germinación.

	<b>BPN</b>	<b>BPO</b>
<b>PGR %</b>	100 a	90 a
<b>CRR %</b>	100.12 a	78.21 a
<b>IG</b>	100.12 a	70.39 b

### CONCLUSIONES

Los biosólidos evaluados de manera general se pueden clasificar como excelentes en los parámetros de metales pesados, y clase C respecto a carga microbiológica, siendo necesario un tratamiento para disminuir la población de *Salmonella spp.*

De acuerdo al contenido nutrimental y el bajo contenido de metales pesados, los biosólidos evaluados pueden ser usados en el sector agrícola, ya sea como abono orgánico o como un mecanismo mejorador del suelo.

De acuerdo a los parámetros CRR, PGR e IG, los biosólidos evaluados en este estudio, resultaron no tener riesgo de toxicidad en la agricultura.

### LITERATURA CITADA

Athamenh, B., Salem, N., Et-Zuraiqi, S., Suleiman, W., & Rusan, M. (2015). Combined land application of treated wastewater and biosolids enhances crop production and soil fertility. *Desalination and Water Treatment*, 53(12), 3283–3294. <http://doi.org/10.1080/19443994.2014.933037>

Bahri, A. (2009). Managing the other side of the water cycle: Making wastewater an asset.

*Global Water Partnership, 13.*

Emino, E. R., & Warman, P. R. (2004). Biological assay for compost quality. *Compost. Science & Utilization, 12*(4), 342–348.

Figueroa-Viramontes, U., Flores-Ortiz, M. A., Palomo-Rodríguez, M., Corral-Díaz, B., & Flores-Margez, J. P. (2010). Uso de biosólidos estabilizados con cal como fertilizante orgánico en algodónero para el Valle de Juárez, Chihuahua. *Ciencia En La Frontera: Revista de Ciencia Y Tecnología de La UACJ, 8*(1), 35–43. Retrieved from <http://bva.colech.edu.mx/xmlui/bitstream/handle/1/1482/rs014.pdf?sequence=1>

Flores-Félix, E., Moreno-Casillas, H., Figueroa-Viramontes, U., & Potisek-Talavera, M. d. C. (2014). Disponibilidad de nitrógeno y desarrollo de avena forrajera (avena sativa L.) con aplicación de biosólidos. *Terra Latinoamericana, 32*(2), 99–105.

Gariglio, N. F., Buyatti, M. A., Pilatti, R. A., Gonzalez-Rossia, D. E., & Acosta, M. R. (2002). Use of a germination bioassay to test compost maturity of willow ( *Salix sp* .) sawdust. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 30*, 135–139. <http://doi.org/10.1080/01140671.2002.9514208>

Grajales, S. J., Monsavale, J. A., & Castaño, J. M. (2006). Programa de manejo integral de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de la universidad tecnológica de pereira. *Scientia et Technica, 31*, 285–290.

Jimenez, B., & Asano, T. (2008). Water Reuse: An International Survey of current practice, issues and needs. *Water Intelligence Online*. Retrieved from <https://search.proquest.com/docview/19501750?accountid=33563>

Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., & Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencias de uso en la agricultura. *Idesia (Chile), 24*(1), 49–61. <http://doi.org/10.4067/S0718-34292006000100009>

Jurado, P., Arredondo, T., Flores, E., & Olalde, V. (2007). PASTIZALES SEMIÁRIDOS Effect of Biosolids on Soil Moisture , Nutrients and Forage Yield in a Semiarid

Rangeland. *Terra Latinoamericana*, 25(2), 211–218.

Jurado-Guerra, P., Dominguez-Caraveo, H., Melgoza-Castillo, A., & Morales-Nieto, C. (2012). Emergencia y crecimiento del zacate banderilla [*Bouteloua curtipendula* (Michx.) Torr.] con biosólidos en condiciones de sequía. *Tecnociencia Chihuahua*, VI(1), 57–67.

Jurado-Guerra, P., Luna-Luna, M., & BarreteroHernández, R. (2004). Aprovechamiento de biosólidos como abonos orgánicos en pastizales áridos y semiáridos. *Téc Pecu Méx*, 42(3), 379–395.

Lu, Q., He, Z. L., & Stoffella, P. J. (2012). Land application of biosolids in the USA: A review. *Applied and Environmental Soil Science*, 2012. <http://doi.org/10.1155/2012/201462>

Mackie, A., Woszczyński, M., Farmer, H., Walsh, M. E., & Gagnon, G. A. (2009). Water Reclamation and Reuse. *Water Environment Research*, 81(10), 1406–1418. <http://doi.org/10.2175/106143009X12445568399811>

Mata-González, R., Sosebee, R. E., & Wan, C. (2006). Effect of types of biosolids and cattle manure on desert grass growth. *Rangeland Ecology & Management*, 59(6), 664–667.

O'Connor, G. A., Elliott, H. A., Basta, N. T., Bastian, R. K., Pierzynski, G. M., Sims, R. C., & Smith, J. E. (2005). Sustainable Land Application : An Overview. *Journal of Environment Quality*, 37, 7–17.

Pino, A. D. E. L., Casanova, O., Barbazán, M., Mancassola, V., Rodríguez, J., Arló, L., ... Passeggi, M. (2012). Caracterización y evaluación de biosólidos producidos por digestión anaerobia de residuos agroindustriales. *Ciencia Del Suelo (Argentina)*, 30(2), 129–136. Retrieved from <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v30n2/v30n2a09.pdf>

Robledo-Santoyo, Espinosa Hernández, V., Maldonado Torres, R., Rubiños Panta;, J. E.,

Hernández Acosta, E., Ojeda Trejo, E., & Corlay Chee, L. (2010). Sales Solubles Y Metales Pesados En Suelos Tratados Con Biosólidos. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 16(2), 241–252. <http://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.04.021>

SEMARNAT. (2002). NOM-004-SEMARNAT-2002 Protección ambiental .- Lodos y biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. *Diario Oficial de La Federación*, 18–61.

Taiz, L., & Zeiger, E. (2006). *Fisiología vegetal* (10th ed.). Universitat Jaume I.

Torres-Lozada, P., Madera, C. A., & Silva-Leal, J. A. (2009). Eliminación de patógenos en biosólidos por estabilización alcalina. *Acta Agronómica*, 58(3), 197–205.

Zar, J. H. (1999). *Bioestadistical análisis*. (4th ed.). Prentice Hall.

Zucconi, F., Pera, A., Forte, M., & De Bertoldi, M. (1981). Evaluating toxicity of immature compost. *Biocycle*, 22(2), 54–57.

## CAPÍTULO 3

### ESTIMACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE NITRÓGENO PROVENIENTE DE DOS TIPOS DE BIOSÓLIDOS EN PLANTAS DE HIGUERILLA (*Ricinus communis L.*)

#### RESUMEN

Un criterio para estimar dosis de aplicación de biosólidos en suelos agrícolas es el nitrógeno disponible para el cultivo de los biosólidos. El objetivo de este estudio fue determinar la disponibilidad de nitrógeno en biosólidos. Los tratamientos evaluados consistieron en tres fuentes de nitrógeno (N) y tres dosis de cada una, además de un testigo. Las fuentes de N fueron: sulfato de amonio (SA), biosólidos de lagunas de oxidación (BLO) de la planta Norte y biosólidos de lodos activados (BLA) de la planta oriente. Se usó un diseño experimental de bloques al azar con cuatro repeticiones, donde la unidad experimental fue una planta por maceta en 24 kg. Las dosis de N fueron de 0, 3.79, 5.65 y 7.52 g maceta<sup>-1</sup>, que corresponden al 67%, 100% y 133% del requerimiento de N del cultivo (RNC), respectivamente. La disponibilidad de nitrógeno se estimó mediante el método de Equivalencia de Fertilizante (EF). La materia seca (MS) fue estadísticamente similar entre los tratamientos nitrogenados, siendo diferentes del testigo ( $P < 0.05$ ). La MS y la extracción de N mostraron una respuesta cuadrática en función a las dosis de N aplicado. La disponibilidad de N fue de 40.4 y 34.8% para los BLA y BLO, respectivamente. La extracción de N fue mayor en el fertilizante químico, sin embargo, la materia seca fue estadísticamente igual entre fuentes de fertilización, lo cual sugiere la sustitución de fertilizante por biosólidos.

**Palabras clave:** nutrición vegetal, fertilización orgánica, extracción de nitrógeno, equivalencia de fertilizante.

#### ABSTRACT

A criterion that establishes the dose of application of biosolids in agricultural soils is the nitrogen available for plants. The objective of this study was to determine the plant

available nitrogen (PAN) of biosolids. The treatments evaluated consisted of three nitrogen (N) sources and three doses of each one, in addition to a control. The sources of N were: ammonium sulfate (SA), oxidation pond biosolids (BLO) and activated sludge biosolids (BLA). The study was set up under an experimental design of random blocks with four replicates, where the experimental unit was at 24 kg pot. The N doses were 0, 3.79, 5.65 and 7.52 g pot<sup>-1</sup>, corresponding to 67%, 100% and 133% of the N requirement of the crop (RNC). The PAN was estimated using the Fertilizer Equivalence (EF) method. The dry matter (DM) was statistically similar between the nitrogen treatments, being different from the control ( $P < 0.05$ ). MS and N extraction showed a quadratic response as a function of the doses of N applied. The PAN was 40.4 and 34.8% for BLA and BLO, respectively. N extraction was higher in chemical fertilizer; however, dry matter was statistically the same among fertilization sources, suggesting the substitution of fertilizer for biosolids.

**Key words:** Nitrogen in plant, nitrogen extraction, fertilizer equivalence

## INTRODUCCIÓN

En México, en el 2014 existían 2337 plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) lo cual permitió alcanzar una cobertura nacional de tratamiento de aguas residuales municipales del 52.7%. En el municipio de Gómez Palacio se cuenta con 11 PTAR de las cuales dos son las principales, ya que son las que tienen mayor capacidad para tratar agua residual, con  $500 \text{ L s}^{-1}$  mediante lodos activados, y  $100 \text{ L s}^{-1}$  por lagunas de estabilización (CONAGUA 2015).

Durante estos procesos se genera un sub producto llamado lodo residual. Para reducir los efectos negativos al ambiente, los lodos son sometidos a tratamientos de estabilización microbiológica. Hay diferentes tipos de tratamiento para los lodos residuales, entre ellos: a) mecánicos, como el secado térmico, al sol o al aire; b) químico, mediante la adición de cal o aluminio; y c) biológico, por el cual los lodos pueden ser digeridos anaeróbica o aeróbicamente (Rigby *et al.*, 2016). Existen diversas alternativas para la disposición de los lodos, desde depositarlos en rellenos sanitarios, incinerarlos, hasta utilizarlos provechosamente en la producción agrícola (Figuroa-Viramontes *et al.*, 2010).

Aplicar los biosólidos a suelos agrícolas es el método de disposición más económico y ecológico por el reciclaje de la materia orgánica (MO) y nutrientes como nitrógeno (N) fosforo (P) y potasio (K) (Kumar *et al.*, 2014). Esto genera un efecto positivo sobre la fertilidad del suelo y el crecimiento de los cultivos (Lu, He, y Stoffella 2012; Pritchard *et al.*, 2010).

Después de la MO, el N es el componente más abundante en los biosólidos. Este elemento es también el nutriente de mayor requerimiento por parte de los cultivos. La mineralización de nitrógeno es el proceso biológico mediante el cual el nitrógeno orgánico es transformado a las formas inorgánicas amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), las cuales forman el nitrógeno disponible para las plantas y los microorganismos del suelo (Bettiol y Camargo 2008).

Diversos estudios han demostrado que el uso de biosólidos tiene un efecto positivo sobre el cultivo. Flores-Félix *et al.* (2014), obtuvieron un mayor rendimiento de materia seca

(MS) de avena forrajera con la aplicación de biosólidos, con respecto al fertilizante sintético  $8.4 \text{ Mg ha}^{-1}$  y  $6.7 \text{ Mg ha}^{-1}$  respectivamente. Shaheen y Tsadilas (2012) reportaron que la aplicación de biosólidos aumenta la biomasa de canola. No obstante, el uso excesivo de biosólidos puede generar problemas ambientales, por ello se recomienda un buen uso de los mismos.

Uno de los criterios utilizados para calcular la dosis de biosólidos a aplicar en el cultivo, es evaluar la cantidad de nitrógeno disponible para el cultivo (NDC) (Silva, Torres, y Mosquera, 2013). Sin embargo, la USEPA (1995) establece que las dosis de aplicación de biosólidos, expresadas en  $\text{kg ha}^{-1}$  de N, no debe exceder el requerimiento de N por el cultivo (RNC).

El NDC a partir de los biosólidos, se puede estimar mediante diferentes metodologías (Mamo, Rosen, y Halbach 1999; Torstensson y Aronsson 2000; Pu *et al.*, 2008). Un método es a partir de la estimación de equivalencia de fertilizante; ésta se calcula partir de la respuesta del cultivo (en términos de rendimiento o extracción de N) a dosis crecientes de N en los biosólidos y el N inorgánico del fertilizante (Barbarick y Ippolito 2007).

Es importante destacar que el método de estabilización que se utiliza para producir los biosólidos afectará a la disponibilidad de N y otros nutrientes ( Smith, Woods, y Evans 1998; Morris *et al.*, 2003; Pu *et al.*, 2008). Sin embargo, la información sobre el NDC a nivel regional es escasa; por lo tanto, el objetivo de este estudio fue determinar la disponibilidad de N para el cultivo de Higuierilla (*Ricinus communis* L.) de dos tipos de biosólidos.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

El experimento se llevó a cabo en las instalaciones del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (CENID-RASPA), del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en la

Cd. de Gómez Palacio, Durango, México (25°35'21.85" N, 103°27'9.65" O y 1100 msnm). El clima de esta región corresponde a BWhw, que se caracteriza por ser muy seco o desértico, semicálido con invierno fresco, y precipitación media anual de 240 mm, la temperatura media anual a la sombra es de 25°C, con rangos de -1°C en invierno a 44°C en verano (Santamaría-César *et al.*, 2006). El suelo utilizado presentó una textura arenofrancisca, un contenido de nitrógeno inorgánico de 49.18 mg kg<sup>-1</sup>, un pH de 8.74 y una conductividad eléctrica (CE) de 0.66 dS m<sup>-1</sup>.

Los biosólidos utilizados fueron colectados de dos plantas de tratamiento de la Ciudad de Gómez Palacio Dgo., las cuales trabajan con dos procesos diferentes de tratamiento: la Planta Norte opera con lagunas de Oxidación, en tanto que la Planta Oriente tiene un proceso de lodos activados. Ambos biosólidos fueron caracterizados de acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002; con base en esta norma fueron clasificados como Excelentes por el contenido de metales pesados y de Clase C por el contenido de patógenos (Maciel-Torres *et al.*, 2015), lo que permite usarlos en el sector agrícola, ya sea como abono orgánico o como un mejorador del suelo.

El experimento se estableció en macetas de plástico de 24 L de capacidad. Las semillas de higuera utilizadas fueron de la variedad K 8SS, evaluada en el Campo Experimental Valle del Guadiana del INIFAP, en Durango, Dgo. Los tratamientos evaluados consistieron en tres fuentes de nitrógeno (N) y 3 dosis de cada una, además de un testigo sin N. Las fuentes de N fueron: sulfato de amonio (SA), biosólidos de lagunas de oxidación (BLO) de la planta Norte y biosólidos de lodos activados (BLA) de la planta oriente. La caracterización nutrimental de los biosólidos se presenta en el Cuadro 1.

Las dosis de N fueron de 0, 3.79, 5.65 y 7.52 g maceta<sup>-1</sup>, que corresponden al 67%, 100% y 133% del requerimiento de N del cultivo (RNC); para calcular el RNC se tomó como referencia una dosis de 80 kg ha<sup>-1</sup> para cubrir 100 del RNC (Rico-Ponce *et al.* 2011) y considerando un 40% de eficiencia por tratarse de un suelo arenoso, es decir, la dosis de N al 100% del RNC fue de 200 kg ha<sup>-1</sup>. En el Cuadro 2 se anotan las cantidades de fertilizante y biosólidos aplicados por tratamiento.

Los tratamientos se arreglaron en un diseño experimental de bloques al azar con cuatro repeticiones, donde la unidad experimental fue una maceta.

**Cuadro 1.** Caracterización química de biosólidos empleados.

Parámetro	BLO	BLA
pH	7.56	7.53
C.E. (dS m <sup>-1</sup> )	2.53	3.65
MO (%)	38.01	56.83
P (%)	0.58	1.60
NTK (%)	1.23	2.24
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	184.43	130.60
Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	4269.50	3579.16
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	732.26	955.70
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	283.93	148.00

Biosólidos de lagunas de oxidación (BLO), biosólidos de lodos activados (BLA), Conductividad Eléctrica (C.E.), Materia Orgánica (MO) y Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK)

**Cuadro 2.** Dosis de fertilizante y biosólidos aplicadas a Higuerrilla (*Ricinus communis* L.).

Fuente de N	Concentración de N	g de N maceta <sup>-1</sup>		
		3.79	5.65	7.52
		g maceta <sup>-1</sup> del producto		
Sulfato de amonio	20.5	18.5	27.6	36.7
Biosólidos de lagunas de oxidación	1.23	308.0	459.7	611.5
Biosólidos de lodos activados	2.25	168.4	251.3	334.3

La siembra se realizó en suelo húmedo a capacidad de Campo (CC), se depositaron tres semillas por maceta y cuando las plantas alcanzaron de 20 a 25 cm se dejó una planta por maceta.

La cosecha se realizó a los 113 días después de la siembra. Las plantas se fraccionaron en los diferentes órganos: raíz, tallo, hoja y semilla. Los especímenes se lavaron con agua destilada para eliminar posibles contaminantes; posteriormente se dejaron secar al aire y finalmente en estufa de aire forzado a 65 °C, hasta llegar a peso constante para el estimar la Materia Seca (MS) total.

Para evaluar la concentración de N total en planta, los diferentes órganos de la misma se molieron y se pasaron por un tamiz de 1 mm (molino Thomas Wiley, modelo Mini-Mill, con tamiz integrado). La determinación de N se realizó por el método de combustión (TruSpec CHN, LECO). La extracción de Nitrógeno por la planta se calculó multiplicando la materia seca por la concentración de nitrógeno total en planta (Barbarick e Ippolito, 2007)

Para estimar el NDC en los biosólidos con relación al SA, se utilizó el método de Dosis de equivalencia de fertilizante (DEF), de acuerdo con (Barbarick y Ippolito 2007; Cusick *et al.*, 2006; Motavalli, Kelling, y Converse 1989). Se realizaron análisis de regresión entre las dosis de N aplicado como fertilizante químico o como biosólidos *versus* el N extraído por el cultivo; se seleccionaron ecuaciones cuadráticas por presentar mayor valor de  $R^2$  (Cusick *et al.*, 2006) Con las ecuaciones obtenidas se calculó el valor de N extraído en los tratamientos con biosólidos a la dosis de RNC = 100% ( $5.655 \text{ g maceta}^{-1}$ ); luego se calculó el valor de DEF, que es la dosis de fertilizante que produce el mismo valor de N extraído que una dosis dada de N total en los biosólidos. EL NDC proveniente de los biosólidos se obtiene al dividir la dosis de N total de biosólidos entre la dosis de N del fertilizante, que produce el mismo valor de N extraído por el cultivo.

Los datos fueron analizados con el paquete estadístico SAS University Edition, mediante ANOVA y contrastes ortogonales.

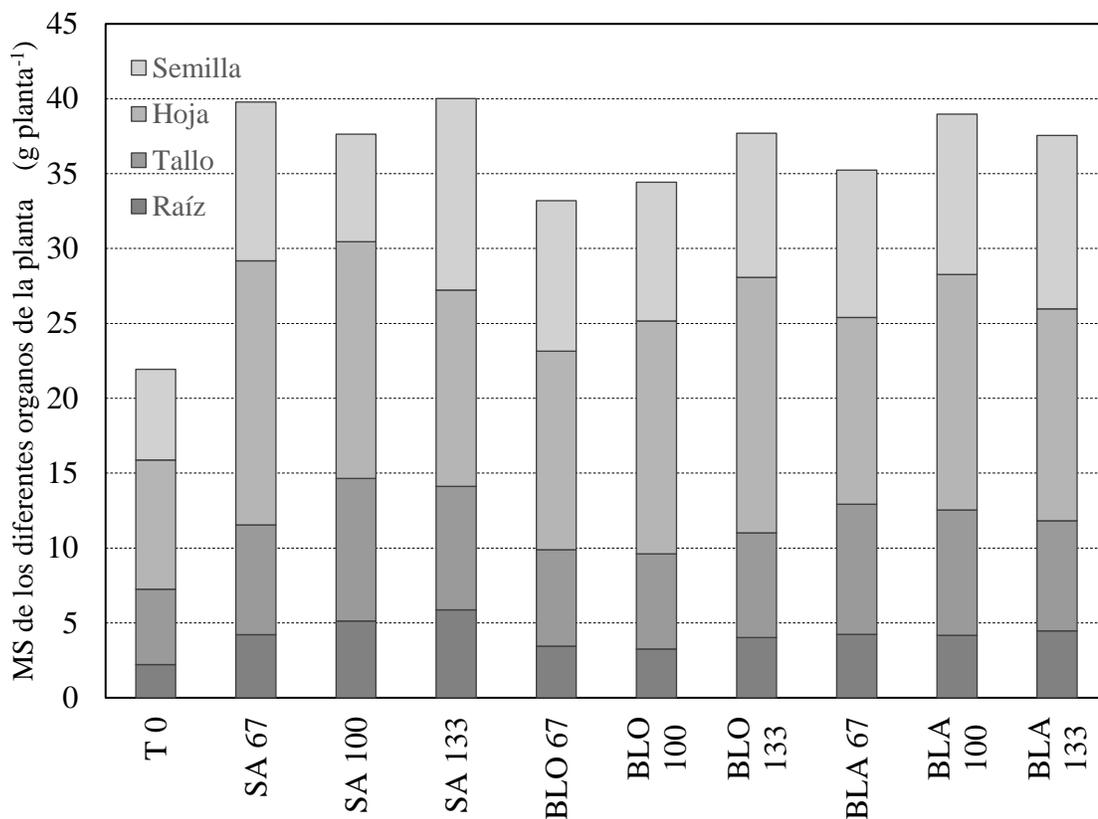
## RESULTADOS

La materia seca (MS) mostró diferencia significativa entre el testigo y los tratamientos nitrogenados ( $P < 0.01$ ); sin embargo, al comparar entre tipo de fertilizante la diferencia estadística no fue representativa (Cuadro 3). El mayor porcentaje de MS con base en los diferentes órganos de la planta corresponde a las hojas, con una variación del 33 al 45%, seguido por la semilla (19 - 32%), siendo la raíz el órgano con una menor proporción de MS (9.5 - 15%), (Figura 1).

**Cuadro 3.** Medias y contrastes ortogonales, de materia seca, en los diferentes órganos de Higuierilla (*Ricinus communis* L.) en respuesta a dosis de Sulfato de Amonio (SA), biosólidos de lagunas de oxidación (BLO) y biosólidos de lodos activados (BLA).

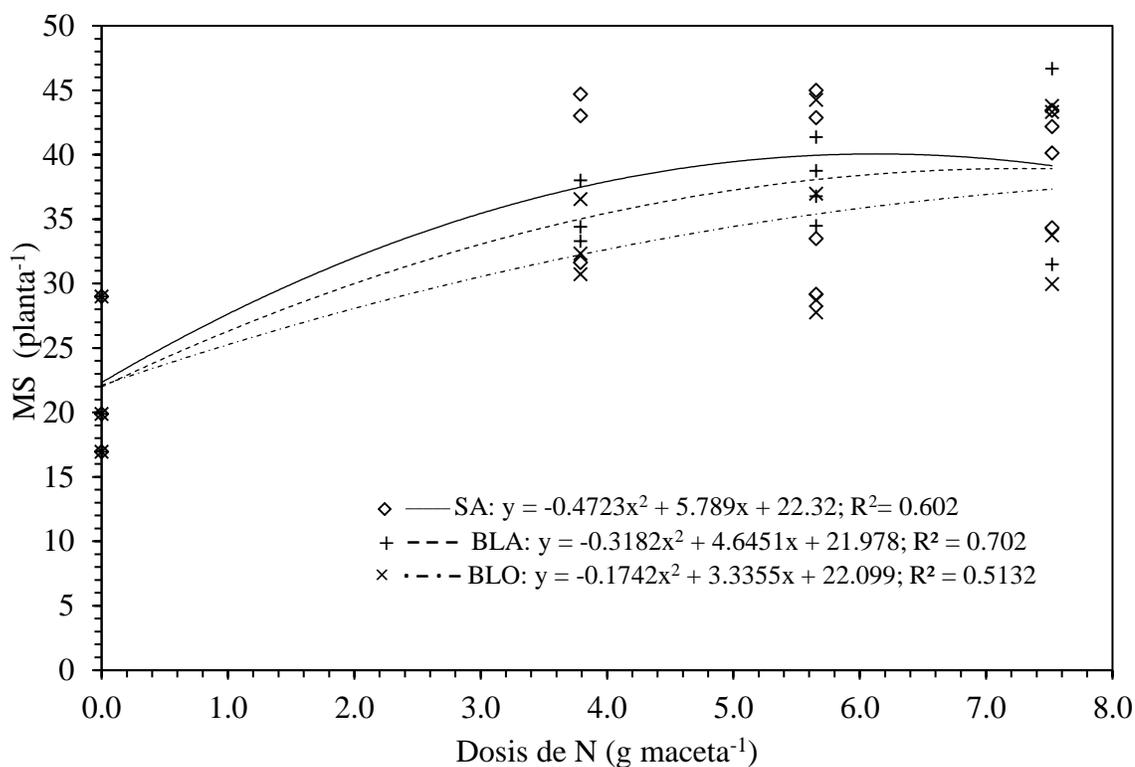
Descripción	Dosis	Materia seca				
		N	Raiz	Tallo	Hoja	Semilla
	kg maceta <sup>-1</sup>	g planta <sup>-1</sup>				
<b>Testigo</b>	0	2.21	5.04	8.62	6.07	21.9
<b>SA</b>	3.79	4.22	7.32	17.6	10.6	39.8
	5.65	5.12	9.54	15.8	7.17	37.6
	7.52	5.88	8.24	13.1	12.8	40.0
	<i>Media</i>		5.07	8.36	15.5	10.2
<b>BLO</b>	3.79	3.44	6.45	13.3	10.1	33.2
	5.65	3.26	6.35	15.6	9.27	34.4
	7.52	4.02	6.99	17.1	9.62	37.7
	<i>Media</i>		3.57	6.60	15.3	9.65
<b>BLA</b>	3.79	4.23	8.70	12.5	9.82	35.2
	5.65	4.16	8.39	15.7	10.7	39.0
	7.52	4.47	7.36	14.1	11.6	37.5
	<i>Media</i>		4.29	8.15	14.1	10.7
<b>Testigo vs resto</b>		*	*	*	*	**
<b>SA vs BLO+BLA</b>		ns	ns	ns	ns	ns
<b>SA vs BLO</b>		*	ns	ns	ns	ns
<b>SA vs BLA</b>		ns	ns	ns	ns	ns
<b>BLO vs BLA</b>		ns	ns	ns	ns	ns

ns= diferencia no significativa, \* $P \leq 0.05$  y \*\* $P \leq 0.01$



**Figura 1.** Materia seca de los diferentes órganos de Higuierilla, en los diferentes tratamientos con Sulfato de Amonio (SA) a diferentes dosis (0, 67, 100 y 133 % del requerimiento de N del cultivo), biosólidos de lagunas de oxidación (BLO) y biosólidos de lodos activados (BLA).

Se observó un comportamiento cuadrático del rendimiento de MS a las dosis de SA ( $R^2 = 0.60$ ), de los BLA ( $R^2 = 0.70$ ) y de los BLO ( $R^2 = 0.51$ ). Con las ecuaciones de regresión ( $y = ax^2 + bx + c$ ) se puede estimar el punto de inflexión que corresponde al valor máximo de MS, mediante la fórmula: valor máximo =  $b / 2a$ . A una dosis de N de SA de 6.13 g maceta<sup>-1</sup> se obtuvo un valor máximo de MS de 40.1 g planta<sup>-1</sup>, mientras que el valor máximo de MS (38.9 g planta<sup>-1</sup>) en los BLA se obtuvo a una dosis de N de 7.29 g maceta<sup>-1</sup>. Por otra parte, se tendría que aplicar una dosis de N de los BLO de 9.57 g maceta<sup>-1</sup> para obtener 38.1 g planta<sup>-1</sup> de MS (Figura 2).



**Figura 2.** Respuesta de la Materia Seca Total (MS) a dosis de Sulfato de Amonio (SA) y Biosólidos de lodos activados (BLA) Y Biosólidos de Lagunas de Oxidación (BLO).

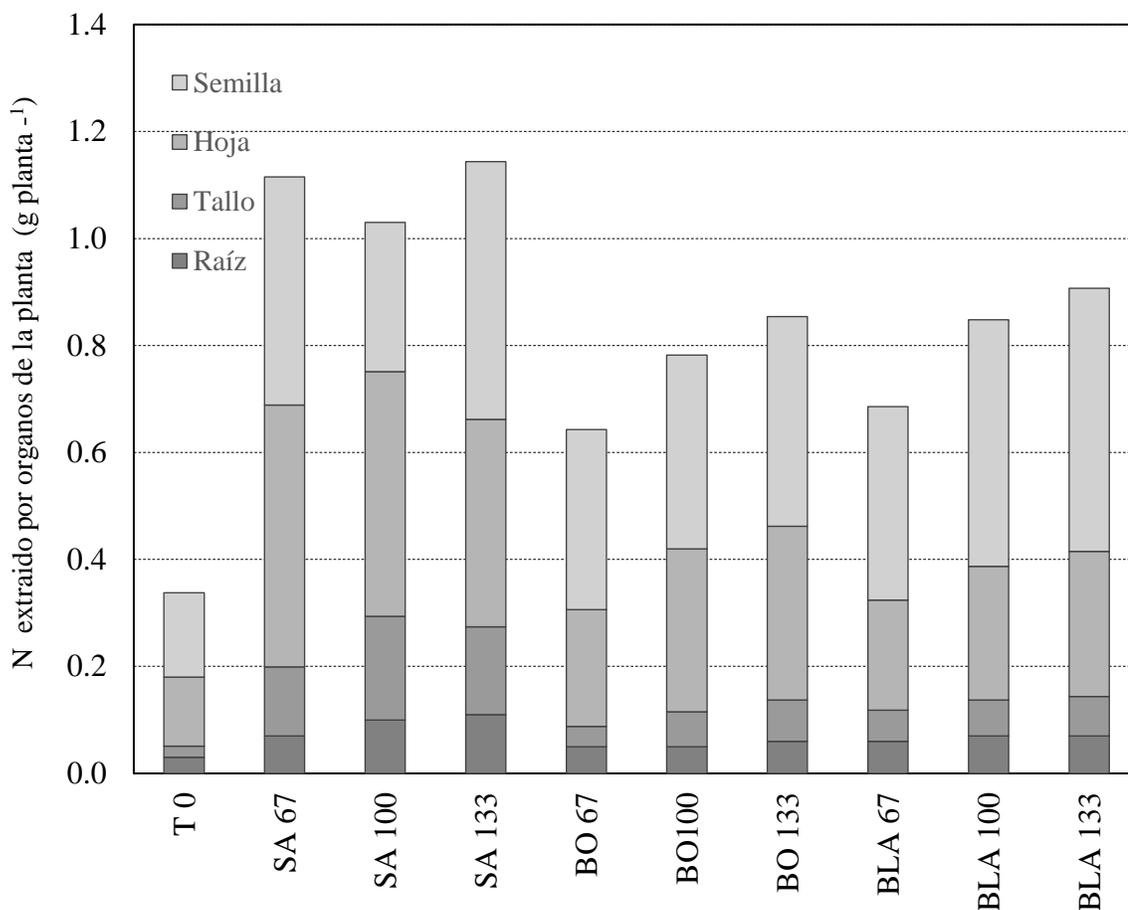
En raíz, tallo, hoja, y semilla la concentración de N fue estadísticamente diferente entre el grupo testigo y el resto de los tratamientos a partir de los contrastes ortogonales realizados. Se observó el mismo comportamiento entre el fertilizante químico y los biosólidos para raíz, tallo y hoja ( $P < 0.001$ ), mientras que en la semilla se obtuvo una  $P > 0.05$ ; sin embargo, este órgano presentó diferencia significativa entre tipos de biosólidos (Cuadro 4).

El nitrógeno extraído total por la higuera mostró una diferencia significativa entre testigo y los demás tratamientos, así como entre el SA y ambos biosólidos ( $P < 0.01$ ); sin embargo, entre tipos de biosólidos no fue estadísticamente diferente de acuerdo al análisis de contrastes ortogonales (Cuadro 2). Cabe mencionar que el N extraído se encontró en una mayor proporción en las semillas en la mayoría de los tratamientos como se puede observar en la figura 3.

**Cuadro 4.** Medias y contrastes ortogonales, Nitrógeno (N), y Nitrógeno extraído en los diferentes órganos de Higuierilla en respuesta a dosis de Sulfato de Amonio (SA) y Biosólidos de Lagunas de Oxidación (BLO) y Biosólidos de Lodos Activados (BLA).

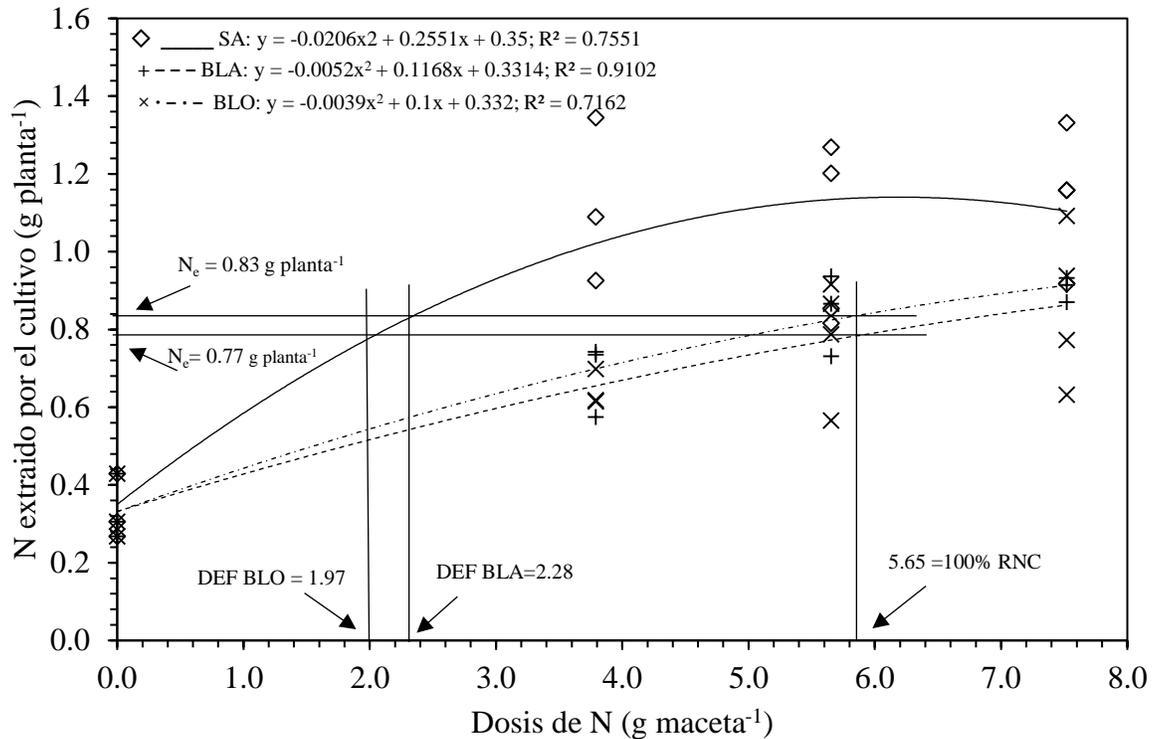
Descripción	Dosis N kg maceta <sup>-1</sup>	Concentración de N				N extraído				Total
		Raíz	Tallo	Hoja	Semilla	Raíz	Tallo	Hoja	Semilla	
		----- % (MS) -----				----- g planta <sup>-1</sup> -----				
<b>Testigo</b>	0	1.19	0.42	1.51	2.67	0.03	0.02	0.13	0.16	0.33
<b>SA</b>	3.79	1.77	1.74	2.81	4.03	0.07	0.13	0.49	0.43	1.12
	5.65	1.90	1.98	2.90	3.87	0.10	0.19	0.46	0.28	1.04
	7.52	1.83	1.97	2.95	3.79	0.11	0.16	0.39	0.48	1.14
	<i>Media</i>		<i>1.83</i>	<i>1.90</i>	<i>2.88</i>	<i>3.89</i>	<i>0.09</i>	<i>0.16</i>	<i>0.44</i>	<i>0.40</i>
<b>BLO</b>	3.79	1.52	0.60	1.64	3.36	0.05	0.04	0.22	0.34	0.64
	5.65	1.56	1.06	1.98	3.86	0.05	0.07	0.31	0.36	0.78
	7.52	1.59	1.11	1.90	4.00	0.06	0.08	0.32	0.39	0.86
	<i>Media</i>		<i>1.56</i>	<i>0.92</i>	<i>1.84</i>	<i>3.74</i>	<i>0.05</i>	<i>0.06</i>	<i>0.28</i>	<i>0.36</i>
<b>BLA</b>	3.79	1.36	0.68	1.65	3.66	0.06	0.06	0.21	0.36	0.68
	5.65	1.57	0.82	1.60	4.35	0.07	0.07	0.25	0.46	0.84
	7.52	1.56	1.06	2.02	4.24	0.07	0.07	0.27	0.49	0.91
	<i>Media</i>		<i>1.50</i>	<i>0.85</i>	<i>1.76</i>	<i>4.08</i>	<i>0.07</i>	<i>0.07</i>	<i>0.24</i>	<i>0.44</i>
<b>Testigo vs resto</b>		*	**	**	**	*	*	**	*	**
<b>SA vs BLO+BLA</b>		*	**	**	ns	*	**	**	ns	**
<b>SA vs BLO</b>		*	**	**	ns	*	**	**	ns	**
<b>SA vs BLA</b>		ns	**	**	ns	*	**	**	ns	**
<b>BLO vs BLA</b>		ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns

ns = diferencias no significativas, \*P ≤ 0.05 y \*\*P ≤ 0.001



**Figura 3.** Distribución de N extraído en los diferentes órganos de higuera (*Ricinus communis* L.) en los diferentes tratamientos con Sulfato de Amonio (SA) a diferentes dosis (0, 67, 100 y 133 % del requerimiento de N del cultivo), biosólidos de lagunas de oxidación (BLO) y biosólidos de lodos activados (BLA).

Por otra parte, la extracción de nitrógeno mostró una respuesta cuadrática en función al N aplicado (Figura 4), tanto con fertilizante químico ( $R^2 = 0.75$ ), con BLA ( $R^2 = 0.91$ ) y con BLO ( $R^2 = 0.71$ ). Para estimar el NDC, primero se calcula el N extraído en los tratamientos de 100% del RNC con biosólidos, utilizando las ecuaciones de regresión; con BLA se obtuvo un valor de  $0.82 \text{ g planta}^{-1}$ , y con BLO fue de  $0.77 \text{ g planta}^{-1}$ . Posteriormente, se calculó la DEF, que en el caso de BLA fue de  $2.28 \text{ g maceta}^{-1}$ , mientras que con BLO fue de  $1.97 \text{ g maceta}^{-1}$ . El NDC obtenido con los valores anteriores fue de 40 y 37% para los BLA y BLO, respectivamente.



**Figura 4.** Nitrógeno extraído ( $N_e$ ) por el cultivo de Higuierilla (*Ricinus communis* L.) y dosis de equivalencia de fertilizante (DEF) de biosólidos de lagunas de oxidación (BLO) y biosólidos de lodos activados (BLA).

## DISCUSIÓN

El rango de materia seca de semilla fue de 19-32%, el cual es similar a lo reportado por Reddy y Matcha (2010), quienes indican un porcentaje de materia seca en semilla de higuierilla del 26.4%. Estos mismos autores encontraron que una mayor proporción de biomasa se encuentra en el tallo de las plantas, mientras que en este trabajo la mayor proporción se registró en hojas (Cuadro 3). La materia seca de la semilla se incrementó en 58, 91 y 110% en la dosis de N más alta con respecto al testigo, al utilizar BLO, BLA y SA, respectivamente. Resultados similares fueron registrados en el trabajo realizado por Reddy y Matcha, (2010), en la dosis alta de fertilización aplicada.

La producción de MS se incrementó en función de la dosis de N; se observó incluso que, en el tratamiento más alto de las diferentes fuentes de N, la curva de respuesta en

rendimiento tiende a disminuir y ajustarse a una regresión cuadrática; lo anterior es una respuesta típica a dosis crecientes de N (González-Torres *et al.*, 2009) o de abonos orgánicos (López-Calderón *et al.*, 2015). Cuando se observa este tipo de respuesta, es posible estimar la dosis de N para maximizar el rendimiento, que corresponde al punto de inflexión de la curva; en el caso del sulfato de amonio, el valor máximo de MS de 40.1 g planta<sup>-1</sup> se obtuvo con 7.29 g maceta<sup>-1</sup> de N, mientras que con BLA y BLO la dosis requerida para obtener el máximo rendimiento fue de 7.29 y 9.57 g planta<sup>-1</sup>, respectivamente. Varvel *et al.* (2007) utilizan estas funciones de regresión cuadrática para generar dosis de recomendación de fertilización, considerando el requerimiento de N para obtener un 90 a 95% del rendimiento relativo máximo.

El N es el principal nutrimento para la producción de semillas y forraje (Mengel, Hütsch, y Kane 2006). Con respecto a la extracción de N por la higuera, en el presente trabajo se observó mayor respuesta a la aplicación de SA. En otros estudios similares con biosólidos se ha registrado que no hay diferencia significativa entre el fertilizante químico y el biosólido empleado en un cultivo de *Avena sativa* (Flores-Félix *et al.*, 2014).

La absorción y extracción de nitrógeno tiende a decrecer con rangos de fertilización elevados (Motavalli, Kelling, y Converse, 1989), por lo que las curvas tienen un comportamiento cuadrático. Los valores estimados de NDC son similares a los reportados por algunos autores. Rigby *et al.* (2010) investigaron el NDC a partir de tres tipos de biosólidos aplicados a un suelo arenoso ácido, en un clima mediterráneo en el oeste de Australia; los valores obtenidos fueron de 65.1%, 63.9% y 39.4% de NDC en biosólidos estabilizados con cal, biosólidos tratados con aluminio ( $K \cdot Al(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ ) y biosólidos deshidratados digeridos anaeróbicamente, respectivamente. Este último fue similar a los BLA que presentaron un NDC de 40.4%. Por otra parte, los BLO mostraron un NDC de 34.90%, en contraste a lo reportado por Cogger *et al.* (2004), quienes determinaron que la disponibilidad de nitrógeno para el cultivo de biosólidos provenientes de lagunas se presentaron en un rango de 8-25%.

La disponibilidad de N para su absorción por el cultivo en suelos mejorados con biosólidos depende de las formas de N, contenido de N inorgánico y la disponibilidad del N orgánico

presente. Cabe mencionar que el PAN está influenciado por diversos factores como el tipo de tratamiento de agua residual, las características del agua a tratar, el tipo de suelo al que fue aplicado, así como al tipo de tratamiento de los lodos que originan los biosólidos finales (Al-Dhumri *et al.*, 2013; Hannah Rigby *et al.*, 2016). La utilidad de conocer el NDC en abonos orgánicos como los biosólidos, es que permite estimar dosis de aplicación acorde al requerimiento de N de los cultivos, con lo cual se evitan aplicaciones excesivas y se reducen los riesgos de contaminación ambiental.

## CONCLUSIÓN

La aplicación de N de fuente química y biosólidos generó una respuesta cuadrática de la materia seca en función a la dosis de N aplicado. Con base en el método de equivalencia de fertilizante, la disponibilidad de N para higuierilla fue de 40.4 y 34.8% para los BLA y BLO, respectivamente. A pesar de que la extracción de nitrógeno fue mayor en los tratamientos con SA, la materia seca fue similar entre las fuentes de N, lo cual indica que es posible sustituir el fertilizante químico por los biosólidos.

## LITERATURA CITADA

- Al-Dhumri, S., Beshah, F. H., Porter, N. A., Meehan, B., & Wrigley, R. (2013). An assessment of the guidelines in Victoria, Australia, for land application of biosolids based on plant-available nitrogen. *Soil Research*, 51(6), 529–538. <http://doi.org/10.1071/SR13191>
- Barbarick, K. A., & Ippolito, J. A. (2007). Nutrient assessment of a dryland wheat agroecosystem after 12 years of biosolids applications. *Agronomy Journal*, 99(3), 715–722. <http://doi.org/10.2134/agronj2006.0221>
- Bettiol, W., & Camargo, O. (2008). A disposição de lodo de esgoto em solo agrícola. In *Lodo de esgoto impactos ambientais na agricultura. Jaguariúna: EMBRAPA*, (2nd ed., pp. 25–36).

- Cogger, C. G., Bary, A. I., Sullivan, D. M., & Myhre, E. A. (2004). Biosolids Processing Effects on First- and Second-Year Available Nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, 68(1), 162–167. <http://doi.org/10.2136/sssaj2004.1620>
- CONAGUA. (2015). Inventario Nacional De Plantas Municipales De Potabilización Y De Tratamiento De Aguas Residuales En Operación. Diciembre 2014. *Comisión Nacional Del Agua*, 308.
- Cusick, P. R., Kelling, K. a, Powell, J. M., & Muñoz, G. R. (2006). Estimates of residual dairy manure nitrogen availability using various techniques. *Journal of Environmental Quality*, 35(6), 2170–2177. <http://doi.org/10.2134/jeq2005.0287>
- Figueroa-Viramontes, U., Flores-Ortiz, M. A., Palomo-Rodríguez, M., Corral-Díaz, B., & Flores-Margez, J. P. (2010). Uso de biosólidos estabilizados con cal como fertilizante orgánico en algodónero para el Valle de Juárez, Chihuahua. *Ciencia En La Frontera: Revista de Ciencia Y Tecnología de La UACJ*, 8(1), 35–43. Retrieved from <http://bva.colech.edu.mx/xmlui/bitstream/handle/1/1482/rs014.pdf?sequence=1>
- Flores-Félix, E., Moreno-Casillas, H., Figueroa-Viramontes, U., & Potisek-Talavera, M. d. C. (2014). Disponibilidad de nitrógeno y desarrollo de avena forrajera (avena sativa L.) con aplicación de biosólidos. *Terra Latinoamericana*, 32(2), 99–105.
- González-Torres, A., Figueroa-Viramontes, U., Delgado, J. A., Núñez-Hernández, G., Cueto-Wong, J. A., Preciado-Rangel, P., & Arturo Palomo-Gil. (2009). SPAD-502 Calibration to Evaluate Nitrogen Requirements in Forage Corn. *Terra Latinoamericana*, 27, 303–309.
- Kumar, K., Hundal, L. S., Cox, A. E., & Granato, T. (2014). Nitrogen Mineralization from Anaerobically Digested Centrifuge Cake and Aged Air-Dried Biosolids. *Water Environment Research*, 86(9), 828–834. <http://doi.org/10.2175/106143014X14062131177872>
- López-Calderón, M. J., Figueroa-Viramontes, U., Fortis-Hernandez, G., Ochoa-Martinez, E., & Sanchez-Duarte, J. I. (2015). Evaluación de dosis equivalentes de fertilizante

y estiércol en la producción de maíz forrajero ( *Zea mays* ) Fertilizer and manure equivalent rates on forage corn production ( *Zea mays* ). *Botanica Experimental Int.*, 84, 8–13.

Lu, Q., He, Z. L., & Stoffella, P. J. (2012). Land application of biosolids in the USA: A review. *Applied and Environmental Soil Science*, 2012. <http://doi.org/10.1155/2012/201462>

Maciel-Torres, S. P., Jacobo-salcedo, M. R., Figueroa-viramontes, U., Pedroza-sandoval, A., Trejo-, R., & López-romero, L. L. (2015). Caracterización de biosólidos para su aprovechamiento agrícola. *Agrofaz*, 15(2), 49–58.

Mamo, M., Rosen, C. J., & Halbach, T. R. (1999). Nitrogen Availability and Leaching from Soil Amended with Municipal Solid Waste Compost. *Journal Environment Quality*, 28, 1074–1082. <http://doi.org/10.2134/jeq1999.00472425002800040003x>

Mengel, K., Hütsch, B., & Kane, Y. (2006). Nitrogen fertilizer application rates on cereal crops according to available mineral and organic soil nitrogen. *European Journal of Agronomy*, 24, 343–348. <http://doi.org/10.1016/j.eja.2005.12.001>

Morris, R., Smith, S. R., Bellett-Travers, D. M., & Bell, J. N. B. (2003). Reproducibility of the nitrogen response and residual fertiliser value of conventional and enhanced-treated biosolids. In *Proceedings of the Joint CIWEM Aqua Enviro Technology Transfer 8th European Biosolids and Organic Residuals Conference, 24–26 November, Wakefield, UK*.

Motavalli, P., Kelling, K., & Converse, J. (1989). First-year nutrient availability from injected dairy manure. *Journal of Environment Quality*, 18, 180–185.

Pritchard, D. L., Penney, N., McLaughlin, M. J., Rigby, H., & Schwarz, K. (2010). Land application of sewage sludge (biosolids) in Australia: Risks to the environment and food crops. *Water Science and Technology*, 62(1), 48–57. <http://doi.org/10.2166/wst.2010.274>

- Pu, C., Bell, M., Barry, G., & Want, P. (2008). Fate of applied biosolids nitrogen in a cut and remove forage system on an alluvial clay loam soil. *Soil Research*, *46*, 703–709. <http://doi.org/10.1071/SR08127>
- Reddy, K. R., & Matcha, S. K. (2010). Quantifying nitrogen effects on castor bean (*Ricinus communis* L.) development, growth, and photosynthesis. *Industrial Crops and Products*, *31*(1), 185–191. <http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.10.004>
- Rico-Ponce, H. R., Tapia-Vargas, L. M., Teniente-Oviedo, R., González-Avila, A., Hernández-Martínez, M., Solís-Bonilla, J. L., & Zamarripa-Colmenero, A. (2011). Guía para cultivar higuerilla (*Ricinus communis* L.) en Michoacán. *Technical Brochure*, 1–43.
- Rigby, H., Clarke, B. O., Pritchard, D. L., Meehan, B., Beshah, F., Smith, S. R., & Porter, N. A. (2016). A critical review of nitrogen mineralization in biosolids-amended soil, the associated fertilizer value for crop production and potential for emissions to the environment. *Science of the Total Environment*, *541*, 1310–1338. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.089>
- Rigby, H., Pritchard, D., Collins, D., Walton, K., Allen, D., & Penney, N. (2010). Improving Guidelines for the Plant Available Nitrogen Value of Biosolids from Wastewater Treatment. *Journal of Residuals Science & Technology*, *7*(1), 13–19.
- Santamaría-César, J., Reta-Sánchez, D., Chávez-González, J. F. J., Cueto-Wong, J. A., & Romero-Paredes, R. J. I. (2006). *Caracterización del medio físico en relación a cultivos forrajeros alternativos para la Comarca Lagunera. Libro Técnico No. 2* (Primera Ed). INIFAP-CIRNOC-CELALA. Matamoros, Coah., México.
- Shaheen, S. M., & Tsadilas, C. D. (2013). Utilization of Biosolids in Production of Bioenergy Crops II: Impact of Application Rate on Bioavailability and Uptake of Trace Elements by Canola. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *44*(1-4), 243–258. <http://doi.org/10.1080/00103624.2013.741773>
- Silva, J. A., Torres, P., & Mosquera, J. (2013). Evaluación de la mineralización de

biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola E Ambiental*, 17(4), 434–442. <http://doi.org/10.1590/S1415-43662013000400012>

Smith, S. R., Woods, V., & Evans, T. D. (1998). Nitrate dynamics in biosolids-treated soils. I. Influence of biosolids type and soil type. *Bioresource Technology*, 66(2), 139–149.

Torstensson, G., & Aronsson, H. (2000). Nitrogen leaching and crop availability in manured catch crop systems in Sweden. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 56, 139–152. <http://doi.org/10.1023/A:1009821519042>

Varvel, G. E., Wilhelm, W. W., Shanahan, J. F., & Schepers, J. S. (2007). An Algorithm for Corn Nitrogen Recommendations Using a Chlorophyll Meter Based Sufficiency Index. *Agronomy Journal*, 99, 701–706. <http://doi.org/10.2134/agronj2006.0190>

## CAPITULO 4

### CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS MENORES EN PLANTAS DE HIGUERILLA (*Ricinus communis L.*) FERTILIZADA CON BIOSÓLIDOS

#### RESUMEN

Los suelos alcalinos y calcáreos, típicos de las zonas áridas, limitan la disponibilidad a las plantas de los elementos menores nativos del suelo. El objetivo de presente trabajo fue evaluar el contenido de elementos menores en suelo y en planta de higuierilla fertilizada con dos tipos de biosólidos. Los tratamientos consistieron en tres fuentes de fertilización y tres dosis de cada una, además de un testigo sin fertilizante. Las fuentes de N fueron: sulfato de amonio (SA), biosólidos de lagunas de oxidación (BLO) de la planta norte y biosólidos de lodos activados (BLA) de la planta oriente. Las dosis de N fueron de 0, 134, 200 y 260 kg ha<sup>-1</sup>. Se utilizó un diseño experimental de bloques al azar con cuatro repeticiones. El rendimiento de materia seca, semilla y aceite se incrementaron en los tratamientos fertilizados; sin embargo, entre fuente de N no hubo diferencia significativa. La concentración Cu y Fe, en suelo después de la cosecha fue mayor en los tratamientos con BLO, con una media de Cu de 0.98 mg kg<sup>-1</sup> de Fe 5.20 mg kg<sup>-1</sup>. Estos resultados indican que los biosólidos aportaron los micronutrientes necesarios para un desarrollo adecuado de higuierilla (*Ricinus communis L.*), sin riesgos de contaminación.

**Palabras clave:** Nutrición de las plantas, microelementos, contenido de aceite fertilidad de suelos.

#### ABSTRACT

Soil fertilization is the key to achieving an adequate production of agricultural production, in addition to nitrogen, the biosolids also provide macro and micronutrients The aim of this work was to evaluate the amount of micronutrients in soil and castor bean plants fertilized with two kinds of biosolids. The treatments were three nitrogen (N) sources and

three doses of each one, and one control without N. The sources were: ammonium sulfate (AS), oxidation ponds biosolids (OPB) of the plant north and activated sludge biosolids (ASB) of the eastern plant. The doses were 0, 134, 200 and 260 kg ha<sup>-1</sup>. An experimental design of random blocks with four replicates was used. The yield of dry mater, seeds and oil increased in the fertilized treatments whit AS and both types of biosolids. The concentration of Cu, Fe and in soil after the harvest was higher in the OPB treatments with a mean of Cu of 0.98 mg kg<sup>-1</sup> and 5.20 mg kg<sup>-1</sup> of Fe. The amount of microelement in biosolids contributed to the development of castor bean. These results suggest that biosolids are effective to provide micronutrients to the plant without any risk of contamination or toxicity.

**Key words: plant nutrition, microelements, oil content**

## INTRODUCCIÓN

El suelo fértil es la clave para la producción equilibrada de cultivos a escala comercial. Muy pocos suelos agrícolas tienen un contenido suficiente de nutrientes para satisfacer los requerimientos nutrimentales de los cultivos, de tal manera que la mayoría de los suelos son dependientes de la aplicación de fertilizantes.

La adición de fertilizantes químicos es la principal forma de mantener la fertilidad debido a su uniformidad y facilidad de aplicación en el suelo (Shaheen y Tsadilas, 2012). Actualmente, el agotamiento de los recursos naturales es evidente e inminente, por lo que existe la necesidad de generar mecanismos y medios para el uso eficiente y efectivo de los mismos. Así mismo, es necesario desarrollar formas de reutilizar los residuos. En la actualidad, se ha incrementado la atención en los biosólidos por su alta producción a partir de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, considerando que la eliminación y disposición de los mismos es un grave problema ambiental (Kominko, Gorazda, y Wzorek, 2017).

Desde los 90's emergió el uso de biosólidos para diferentes usos, entre los que se destaca la fertilidad de suelos, así como su uso como mejoradores de suelo: no obstante, su uso se limitó por la carga biológica y de metales pesados administrados irracionalmente. Las normativas generadas en años posteriores permitieron mediar las condiciones mínimas indispensables para su correcto manejo principalmente en el sector agrícola y ambiental.

La aplicación de biosólidos para la producción agrícola se ha convertido en una práctica mundial destacada y se considera una eliminación eficaz de los biosólidos y una técnica de reciclaje de nutrientes (Lu, He, y Stoffella, 2012). Los biosólidos son ricos en macro y micronutrientes, por lo tanto, sirven como una buena fuente de nutrientes para las plantas (Ozores-Hampton y Peach, 2002).

En la producción agrícola en los últimos años ha tomado relevancia la generación de cultivos que provean de biomasa adecuada para la producción de biocombustibles. Al respecto, una de las especies altamente prometedoras es la higuera (*Ricinus communis* L.), la cual es una planta perteneciente a la familia *Euphorbiaceae*. Es un cultivo no alimentario, resistente a la sequía, remediadora de metales pesados y una importante oleaginosa (Baudhh, *et al.*, 2015). El aceite que se extrae de las semillas de higuera tiene versatilidad en la industria, ya que se ha determinado más de 700 usos en el campo de cosméticos, plásticos, lubricantes, medicamentos y especialmente para la producción de biodiesel. El contenido de aceite oscila entre el 35% y el 60%, dependiendo de la variedad de semillas y el ambiente de crecimiento (Danlami, *et al.*, 2015).

No existe información suficiente sobre la aportación de micronutrientes en los biosólidos y su aprovechamiento por cultivos como la higuera. Los micronutrientes como Cu, Fe, Zn, Mn y B están implicados en prácticamente todas las funciones bioquímicas y fisiológicas de las plantas, como el metabolismo energético, el metabolismo primario y secundario, la regulación de genes de biosíntesis de proteínas y diversos procesos de señalización y transducción celular (Mochida y Shinozaki, 2017).

A pesar de que las plantas requieren en bajas cantidades de microelementos, en suelos calcáreos alcalinos típicos de las zonas áridas del Norte de México, estos micronutrientes presentan una baja disponibilidad a los cultivos, debido a que forman compuestos poco

solubles en el suelo (Miller y Donahue, 1995). Algunos estudios demuestran que la adición de biosólidos incrementa el rendimiento de los cultivos. (Akdeniz *et al.* (2006) evaluaron dosis de 4.5 a 19 t ha<sup>-1</sup> de biosólidos; en sus resultados encontraron que la dosis de 19 t ha<sup>-1</sup> obtuvo rendimientos similares a la dosis de 80 kg ha<sup>-1</sup> de N, con 12.8 y 10.0 t ha<sup>-1</sup> de grano, respectivamente.

Respecto a micronutrientes, la aplicación de biosólidos incrementó la concentración de Cu y Zn en el suelo, y la concentración de Ni y Zn en las hojas, pero dentro del rango de suficiencia (Jones *et al.*, 1991). Adair *et al.* (2014) estudiaron el efecto de biosólidos en los cultivos para producción de biodiesel a partir de canola y camelina; la dosis alta de biosólidos (316 kg ha<sup>-1</sup> de N) incrementó el rendimiento en ambos cultivos, así como el contenido de Fe, Mn y Cu en la pasta de aceite. Lange *et al.* (2005) observaron que la deficiencia de microelementos no permite el adecuado desarrollo de este cultivo, limitando así la producción del mismo. El objetivo del presente estudio fue evaluar el desarrollo del cultivo de higuera, así como la absorción de micronutrientes al utilizar dos tipos de biosólidos como fuente de fertilizante.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

El estudio se llevó a cabo en las instalaciones del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (CENID-RASPA), del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en la Cd. de Gómez Palacio, Durango, México (25°35'21.85" N, 103°27'9.65" O y 1100 msnm). Esta región presenta un clima BWhw, que se caracteriza por ser muy seco o desértico, semicálido con invierno fresco, y precipitación media anual de 240 mm, la temperatura media anual a la sombra es de 25°C, con rangos de -1°C en invierno a 44°C en verano (Santamaría-César *et al.*, 2006).

Los biosólidos utilizados fueron colectados de dos plantas de tratamiento de la Ciudad de Gómez Palacio Durango las cuales trabajan con dos procesos diferentes de tratamiento: la Planta Norte opera con lagunas de Oxidación, en tanto que la Planta Oriente tiene un proceso de lodos activados. Ambos biosólidos fueron caracterizados de acuerdo a la

NOM-004-SEMARNAT-2002 (Cuadro 1). Con base en esta norma fueron clasificados como Excelentes por el contenido de metales pesados y de Clase C por el contenido de patógenos, lo que permite usarlos en el sector agrícola, ya sea como abono orgánico o como un mejorador del suelo (NOM-004-SEMARNAT-2002)

**Cuadro 1.** Características químicas y biológicas de los biosólidos usados para las producción de aceite de higuera (*Ricinus communis* L.).

Parámetro	BLO	BLA
pH	7.56	7.53
C.E. (dS m <sup>-1</sup> )	2.53	3.65
MO (%)	38.01	56.83
NTK (%)	1.23	2.24
P (%)	0.58	1.60
K (%)	0.46	0.48
Na (%)	0.14	0.45
Ca (%)	5.18	4.58
Mg (%)	0.51	0.17
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	184.43	130.60
Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	4269.5	3579.16
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	732.26	955.70
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	283.93	148.00
Pb (mg kg <sup>-1</sup> )	134.6	78.93
Cd (mg kg <sup>-1</sup> )	6.40	9.23
As (mg kg <sup>-1</sup> )	17.3	12.6
Coliformes (NMP/4gST)	46000	24000
Salmonella (NMP/4gST)	2400	1100
Huevos de helminto (h/4gST)	5	4

El suelo utilizado presentó una textura areno-francosa, un contenido de Nitrógeno inorgánico de 49.18 mg kg<sup>-1</sup>, un pH de 8.74 y una conductividad eléctrica (CE) de 0.66 dS m<sup>-1</sup>. El experimento se estableció en macetas de plástico de 24 L de capacidad. Se utilizó la variedad de higuera K 8SS, proporcionada por el Campo Experimental Valle del Guadiana, del INIFAP, en Durango, Dgo.

Los tratamientos evaluados consistieron en tres fuentes de fertilizante y tres dosis de cada uno (baja, normal, alta), además de un testigo sin fertilizante. Los tratamientos se arreglaron en un diseño experimental de bloques al azar con cuatro repeticiones, donde la unidad experimental fue una maceta. Las fuentes de fertilizante fueron: sulfato de amonio (SA), biosólidos de lagunas de oxidación (BLO) de la planta norte y biosólidos de lodos activados (BLA) de la planta oriente, ambas del municipio de Gómez Palacio, Dgo.

Las tres fuentes de fertilizantes se utilizaron las dosis de 3.79, 5.65 y 7.52 g maceta<sup>-1</sup> de N que corresponden al 67%, 100% y 133% del requerimiento de N del cultivo (RNC), respectivamente. Para calcular el RNC se tomó como referencia una dosis de 80 kg ha<sup>-1</sup> (Rico-Ponce *et al.*, 2011), además de considerar un 40% de eficiencia por tratarse de un suelo arenoso, es decir, la dosis de N al 67% fue de 134 kg ha<sup>-1</sup>, al 100% del RNC fue de 200 kg ha<sup>-1</sup> y al 133% fue de 266 kg ha<sup>-1</sup>. En el Cuadro 2 se anotan las cantidades de fertilizante y biosólidos aplicados por tratamiento, mientras que en el Cuadro 3 se presentan las cantidades de micronutrientes aportadas por los biosólidos.

**Cuadro 2.** Dosis de fertilizante y biosólidos aplicadas a Higuierilla.

Fuente de N	g maceta <sup>-1</sup> del producto		
	Baja	Normal	Alta
SA	18.5	27.6	36.7
BLO	308.0	459.7	611.5
BLA	168.4	251.3	334.3

**Cuadro 3.** Dosis de fertilizante y aportación de micronutrientes

	BLA			BLO		
	Baja	Normal	Alta	Baja	Normal	Alta
	mg maceta <sup>-1</sup>					
Cu	57	85	113	22	33	44
Fe	1315	1963	2611	603	899	1197
Zn	226	337	448	161	240	319
Mn	87	131	174	25	37	49

La siembra se realizó en suelo húmedo a capacidad de Campo (CC), se depositaron tres semillas por maceta y cuando las plantas alcanzaron de 20 a 25 cm se dejó una planta por maceta. La cosecha se realizó a los 113 días después de la siembra, las plantas se fraccionaron en los diferentes órganos: raíz, tallo, hoja y semilla. Los especímenes se

lavaron con agua destilada para eliminar posibles contaminantes; posteriormente se dejaron secar al aire y finalmente en estufa de aire forzado a 65 °C, hasta llegar a peso constante para el estimar la Materia Seca (MS) total.

Para determinar el porcentaje de aceite de la semilla se pesaron 5g de semilla, las cuales se trituraron y se colocaron en un extractor Soxhlet con 200 ml de etanol durante 4 horas (Danlami, Arsad, y Zaini 2015). Después de la extracción el etanol se evaporó a su punto de ebullición hasta una completa eliminación del solvente. Posteriormente, se colocó en estufa de secado a 65°C para eliminar la residualidad del solvente y finalmente se pesó para conocer la cantidad de aceite obtenido y calcular el porcentaje en base al peso de la muestra. El contenido de micronutrientes en suelo al final del experimento se realizó con extracción de DTPA, de acuerdo a la NOM 021 SEMARNAT 2000.

Los diferentes órganos de la planta se molieron, para lo cual se usó un molino Thomas Wiley, modelo Mini-Mill, con tamiz integrado de 1 mm de abertura. Posteriormente, se determinó la concentración de Cu, Fe, Zn y Mn por espectrofotometría de absorción atómica (AA 700, Perkin Elmer). Los datos fueron analizados con el paquete estadístico SAS University Edition donde se realizaron análisis de varianza y diferencia mínima de medias (DMS), así como análisis de contraste ortogonales.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Producción de materia seca**

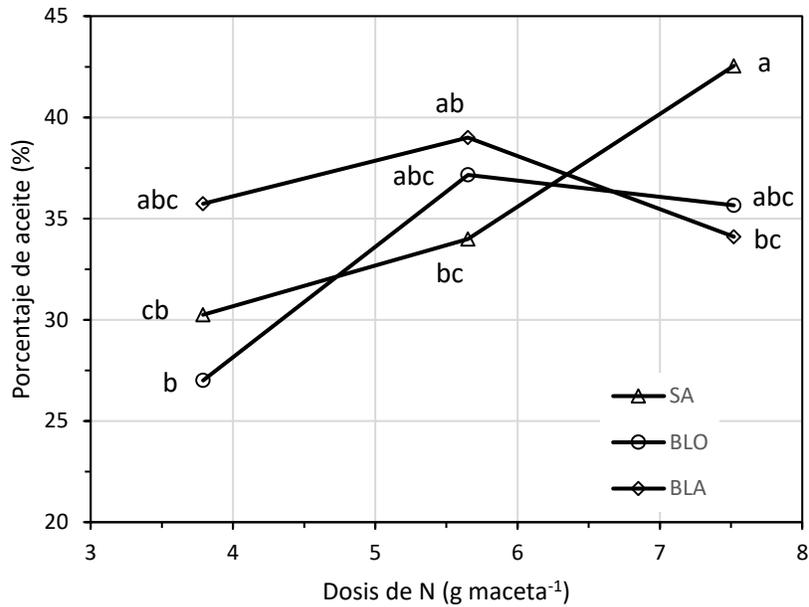
De acuerdo al análisis de varianza y contrastes ortogonales, la producción de materia seca de la planta, la producción de semilla y el porcentaje de aceite en la semilla, fueron superiores en los tratamientos con fertilizante (Cuadro 4). La materia seca por planta en los tratamientos con fertilizante tuvo un promedio de 28g ( $\pm 3.7$ ), en tanto que la producción de semilla promedio 10 g ( $\pm 3.6$ ) por planta; es decir, al fertilizar las plantas de higuera se incrementó en 71% en la MS de la planta y de 64% la MS de la semilla, con respecto al testigo. El porcentaje de aceite promedió 35% en los tratamientos con fertilizante, lo que representó un incremento de 16% con respecto al testigo (Cuadro 4).

Lo anterior difiere con lo obtenido en el trabajo de Adair *et al.* (2014) quienes encontraron que la adición de biosólidos no afectó el contenido de aceite en semillas de canola con respecto al control, ya que ambos grupos presentaron una media de 41 % del contenido de aceite. Los valores obtenidos en este estudio con respecto al porcentaje de aceite son menores por los reportados por Danlami *et al.*, (2015) y Perdomo *et al.*, (2013) con una media de 53.4 % y 48.8 %, respectivamente. Al analizar la interacción fuente\*dosis, solo el porcentaje de aceite mostró un efecto significativo. En la Figura 1 se puede apreciar que las plantas con SA tuvieron el mayor porcentaje de aceite en la dosis alta, mientras que, las plantas con BLO a dosis baja mostraron un menor contenido de aceite.

**Cuadro 4.** Medias y contrastes ortogonales del rendimiento de materia seca y aceite.

Descripción	Dosis	Materia seca (g planta <sup>-1</sup> )		Aceite (%)
		Planta	Semilla	
Testigo		16.33	6.07	30.11
	Baja	32.12	9.04	30.25
SA	Normal	27.42	7.17	33.98
	Alta	26.32	12.8	42.55
	Baja	22.62	10.1	27.00
BLO	Normal	23.76	9.27	37.16
	Alta	27.1	9.62	35.65
	Baja	28.31	9.82	35.75
BLA	Normal	30.72	10.7	39.00
	Alta	33.63	11.6	34.11
Contrastes ortogonales				
	Testigo vs resto	**	*	*
	SA vs (BLO + BLA)	ns	ns	ns

\*= P < 0.05, \*\*= P < 0.01 significancia del modelo de acuerdo al análisis de varianza



**Figura 1.** Porcentaje de aceite en semillas de higuera con diferentes fuentes de fertilizante, en dosis baja, media y alta de nitrógeno (Valores seguidos por la misma letra no difieren significativamente, de acuerdo al método LSMEANS-Tukey en SAS)

### Concentración de nutrientes en el suelo

Al analizar los micronutrientes en el suelo después de la cosecha, se observó que la concentración de estos elementos fue superior en el suelo tratado con biosólidos, los BLO tuvieron mayor concentración de Cu y Fe, menor de Zn y similar de Mn (Cuadro 5). Las diferencias anteriores son congruentes con la composición química de los biosólidos (Cuadro 1). En consecuencia, la concentración de los micronutrientes en el suelo se incrementó al aumentar la dosis de baja, normal a alta (Cuadro 4). Es importante mencionar que de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000, la concentración de Fe y Zn fue deficiente y marginal, respectivamente, de acuerdo con la misma normativa (Cuadro 5). Lo anterior destaca la ventaja del uso de biosólidos como abono orgánico para reabastecer suelos de zonas áridas con este tipo de nutrientes.

**Cuadro 5.** Medias y efectos principales de microelementos en suelo después de la cosecha.

Descripción	Dosis N	Cu	Fe	Zn	Mn
		(mg kg <sup>-1</sup> )			
Testigo		0.28	0.815	0.554	3.933
	Baja	0.322	0.917	0.524	3.669
SA	Normal	0.335	1.177	0.585	3.663
	Alta	0.301	1.210	0.471	3.872
	Baja	0.869	4.218	3.909	4.239
BLO	Normal	1.008	4.969	5.235	4.799
	Alta	1.078	6.412	6.549	5.122
	Baja	0.359	1.746	4.512	4.338
BLA	Normal	0.414	2.726	6.967	4.961
	Alta	0.467	3.422	8.417	5.418
Efectos principales					
	SA	0.32 c	1.10 c	0.53 c	3.73 b
	BLO	0.98 a	5.20 a	5.23 b	4.72 a
	BLA	0.41 b	2.63 b	6.63 a	4.91 a
	Baja	0.52 b	2.29 c	2.98 c	4.08 b
	Normal	0.59 a	2.96 b	4.26 b	4.47 ab
	Alta	0.62 a	3.68 a	5.15a	4.80 a
	Valor critico bajo*	< 0.2	< 2.5	< 0.5	< 1.0

Las letras diferentes entre filas indican diferencias significativas ( $P < 0.05$ ).

\*NOM-021-SEMARNAT-2000.

### Concentración de nutrimentos en la planta

La concentración de micronutrientes es diferente en cada órgano de la planta debido a la su función en la misma. En este estudio el Cu se concentró en mayor proporción en raíz (promedio de 20.3 mg kg<sup>-1</sup>), seguido por tallo (9.3 mg kg<sup>-1</sup>) y finalmente en hoja (2.3 mg kg<sup>-1</sup>); la concentración en hoja no fue estadísticamente diferente entre fuentes ni entre

dosis de fertilizante aplicado. La fertilización con BLO fue la que mostró mayor absorción de Cu en raíz y tallo (Cuadro 6), debido a que los BLO tienen mayor concentración de este elemento. También se observa que, a mayor dosis de aplicación, mayor concentración de Cu en la raíz, pero no así en tallo y hoja (Cuadro 6). No se encontró en la literatura rangos de suficiencia para esta planta; sin embargo, Marschner (2012) menciona que  $6 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cu en hojas, es un valor promedio para un adecuado crecimiento de plantas. Es probable que la higuierilla tenga un bajo requerimiento de Cu y por eso limita su transporte de la raíz a las hojas; lo anterior con lo reportado por Lavres Junior *et al.*, (2012), quienes encontraron concentraciones en hoja de higuierilla de 2.7 a  $5.2 \text{ mg kg}^{-1}$ , cultivadas en solución nutritiva y diferentes concentraciones de Cu.

El Fe en raíz tuvo una concentración promedio de  $1,183 \text{ mg kg}^{-1}$ , la cual fue cinco veces mayor que en hoja ( $230 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y 40 veces mayor que en tallo ( $30 \text{ mg kg}^{-1}$ ). La concentración de Fe en raíz fue mayor en el testigo, sin ninguna fuente de fertilización (Cuadro 6), a pesar de que la concentración en el suelo de este tratamiento fue la más baja (Cuadro 5). La concentración de Fe en hoja no fue diferente entre fuentes de fertilización, mientras que la dosis normal tuvo la concentración más alta (Cuadro 6). Marschner (2012) señala que una concentración foliar de  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  como valor promedio para un adecuado crecimiento de plantas, aunque hay cultivos como el algodón con un rango de suficiencia de 40 a  $300 \text{ mg kg}^{-1}$  (Jones, Wolf, and Mills 1991).

En promedio el Zn se encontró en mayor cantidad en la hoja en la mayoría de los tratamientos, excepto aquéllos tratados con BLA, donde la mayor concentración de Zn se determinó en tallo. En general, las diferencias en concentración en los diferentes órganos son menores que en los demás micronutrientes (Cuadro 6). La aplicación de biosólidos incrementó significativamente la concentración de Zn en los tres órganos evaluados; a mayor dosis de aplicación se aprecia una mayor concentración de Zn en raíz y tallo, pero no en las hojas (Cuadro 6). Otros estudios, como el de Lavres-Junior *et al.*, (2012), observaron que el Zn se concentró en mayor cantidad en raíz ( $62.3 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y hoja ( $59.2 \text{ mg kg}^{-1}$ ). En el presente estudio, la concentración promedio en hoja fue  $73 \text{ mg kg}^{-1}$ ; de acuerdo con Marschner (2012), una concentración foliar de  $20 \text{ mg kg}^{-1}$  es un promedio

adecuado en plantas, mientras que el algodón tiene un rango de suficiencia de 20 a 100 mg kg<sup>-1</sup> (Jones *et al.*, 1991).

La concentración de Mn fue en promedio casi el doble en hoja (268 mg kg<sup>-1</sup>) que en raíz (141 mg kg<sup>-1</sup>), mientras que la concentración en tallo (20 mg kg<sup>-1</sup>) fue 14 veces menor que en la hoja. La aplicación de biosólidos incrementó la concentración en los tres órganos, con respecto al SA, y a mayor dosis se aprecia una mayor concentración de Mn en los tres órganos (Cuadro 6). El mismo comportamiento se pudo observar en el estudio realizado por Lavres-Junior *et al.*, (2012), donde el Mn predomina en hoja seguido por raíz y finalmente tallo. La concentración de Mn en hojas es mayor al valor adecuado de 50 mg kg<sup>-1</sup> que menciona Marschner (2012), aunque cultivos como algodón tienen un rango de suficiencia de 30 a 300 mg kg<sup>-1</sup> (Jones *et al.*, 1991).

**Cuadro 6.** Medias y contrastes ortogonales de elementos menores en los diferentes órganos de higuera fertilizada con biosólidos.

Descripción	Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )	Cu (mg kg <sup>-1</sup> )			Fe (mg kg <sup>-1</sup> )			Zn (mg kg <sup>-1</sup> )			Mn (mg kg <sup>-1</sup> )		
		Raíz	Tallo	Hoja	Raíz	Tallo	Hoja	Raíz	Tallo	Hoja	Raíz	Tallo	Hoja
Testigo	0	16.3	8.28	3.10	1379	29.7	173	38.7	20.5	50.3	61.8	4.28	97.0
	134	14.9	10.1	1.73	1070	32.2	211	28.0	13.2	52.2	51.0	5.43	65.2
SA	200	13.2	9.60	1.73	1056	12.3	441	28.2	14.7	52.6	46.1	5.70	78.1
	266	14.0	7.10	1.98	1074	27.7	156	26.3	12.9	46.2	50.4	8.95	108.6
BLO	134	27.2	9.05	1.75	1215	26.5	237	84.9	43.6	97.2	240.1	21.1	435.6
	200	24.3	13.1	2.33	1008	40.8	177	65.2	76.2	88.3	122.4	35.0	605.4
	266	36.2	16.1	3.13	1340	41.3	213	109.3	98.2	110.8	301.2	55.0	659.4
BLA	134	17.0	9.73	1.90	1113	27.8	213	71.3	79.7	71.5	98.6	10.7	147.3
	200	22.0	4.90	3.53	1275	46.0	214	87.4	124.0	92.6	158.0	27.2	223.7
	266	17.8	4.73	1.83	1302	14.8	265	107.0	103.5	65.9	278.0	24.4	255.2
Efectos principales													
	SA	14.6 b	8.8 b	2.1	1144.9b	25.4	245.1	30.3 b	15.3 c	50.3 c	52.3 b	6.1c	87.2 c
	BLO	25.9 a	11.6 a	2.6	1235.3ab	34.5	199.9	74.5 a	59.6 b	86.6 a	181.4 a	28.9 a	449.4 a
	BLA	18.2 b	6.9 b	2.6	1267.1a	30.7	216.3	76.1 a	81.9 a	70.1 b	149.1 a	16.6 b	180.8 b
	Testigo	16.3 b	8.3	3.1	1379.0 a	29.7	173.0 b	38.7 c	20.5 c	50.3 b	61.8 b	4.3 c	97.0 dc
	Baja	19.7 ab	9.6	1.8	1132.7 b	28.8	220.3 ab	61.4 b	45.5 b	73.6 a	129.9 b	12.4 b	216.0 b
	Normal	19.8 ab	9.2	2.5	1112.9 b	33.0	277.3 a	60.3 b	71.6 a	77.8 a	108.8 b	22.6 a	302.4 ab
	Alta	22.7 a	9.3	2.3	1238.7 b	27.9	211.3 ab	80.9 a	71.5 a	74.3 a	209.9 a	29.5 a	341.1 a

Letras diferentes entre filas indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

## **Riesgo de contaminación**

Los biosólidos utilizados fueron de calidad Excelente por el contenido de metales pesados, de acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002. La norma de los Estados Unidos (US-EPA, 1994) marca los mismos límites permisibles para Cu y Zn, entre otros metales pesados; sin embargo, la US-EPA incluye además límites máximos de incorporación por año y acumulado de metales en suelos que reciben biosólidos. Así, el valor límite anual para Cu y Zn es de 75 y 140 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, respectivamente, mientras el límite acumulado es de 1500 y 2800 kg ha<sup>-1</sup>, para cada caso. En el presente estudio, en la dosis más alta para aportar 266 kg ha<sup>-1</sup> de N, se aplicó el equivalente a 21.6 y 11.9 ton ha<sup>-1</sup> de BLO y BLA, lo que significa 4.0 y 1.6 kg ha<sup>-1</sup> de Cu con BLO y BLA, en tanto que de Zn fueron 15.8 y 11.3 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Todos los valores anteriores están dentro del límite anual permitido. Con los valores anteriores de incorporación anual, en el caso de BLO, se requerirían 176 años para alcanzar el valor límite acumulado de Zn, mientras que con BLA serían 246 años. En el caso de Cu se requerirían más años, 376 y 967 años para BLO y BLA. Sin embargo, si se considera la incorporación de otros metales, los BLO alcanzarían el valor límite acumulado de Pb (300 kg ha<sup>-1</sup>) en 103 años, mientras que en los BLA el Zn sigue siendo el más limitante en este sentido, con 246 años para alcanzar el valor límite acumulado.

Se recomienda realizar la aplicación de nutrientes conforme la demanda de N del cultivo y analizar periódicamente la acumulación de metales en el suelo; sin embargo, de acuerdo a la concentración de metales en los biosólidos evaluados, en las dosis aplicadas, y con base en la norma de la US-EPA, es seguro el uso de estos biosólidos en el largo plazo.

## **CONCLUSIONES**

La aplicación de biosólidos generó un rendimiento de materia seca y porcentaje de aceite similar a la fertilización química, por lo que es factible sustituir el fertilizante químico por biosólidos, independientemente las fuentes probadas en este estudio.

Los microelementos que aportaron los biosólidos contribuyeron al óptimo desarrollo de higuierilla debido a que no se observaron características de deficiencia y/o toxicidad de los mismos a lo largo del desarrollo del cultivo.

La concentración de elementos menores remanentes en suelo fue adecuada, lo cual se refleja en la disminución en la aplicación de estos elementos en cultivos posteriores.

### LITERATURA CITADA

- Adair, K. L., Wratten, S., Barnes, A. M., Waterhouse, B. R., Smith, M., Lear, G., ... Boyer, S. (2014). Effects of biosolids on biodiesel crop yield and belowground communities. *Ecological Engineering*, 68, 270–278.  
<http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.083>
- Akdeniz, H., Yilmaz, I., Bozkurt, M. A., & Keskin, B. (2006). The Effects of Sewage Sludge and Nitrogen Applications on Grain Sorghum Grown ( *Sorghum vulgare L.* ) in Van-Turkey. *Polish Journal of Environmental Studies*, 15(1), 19–26.
- Bauddh, K., Singh, K., Singh, B., & Singh, R. P. (2015). Ricinus communis: A robust plant for bio-energy and phytoremediation of toxic metals from contaminated soil. *Ecological Engineering*, 84, 640–652. <http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.038>
- Danlami, J. M., Arsad, A., & Zaini, M. A. A. (2015). Characterization and process optimization of castor oil (*Ricinus communis L.*) extracted by the soxhlet method using polar and non-polar solvents. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 47, 99–104. <http://doi.org/10.1016/j.jtice.2014.10.012>
- Jones, J. B., Wolf, B., & Mills, H. A. (1991). *Methods of Plant Analysis and Interpretation*. Micro - Macro Publishing, Inc.
- Kominko, H., Gorazda, K., & Wzorek, Z. (2017). The Possibility of Organo-Mineral Fertilizer Production from Sewage Sludge. *Waste and Biomass Valorization*, 0(0), 0. <http://doi.org/10.1007/s12649-016-9805-9>

- Lange, A., Martines, A. M., & Antonio, M. (2005). Efeito de deficiência de micronutrientes no estado nutricional da mamoneira cultivar Iris. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 40(1), 61–67.
- Lavres Junior, J., Cabral, C. P., Rossi, M. L., Nogueira, T. A. R., Nogueira, N. de L., & Malavolta, E. (2012). Deficiency symptoms and uptake of micronutrients by castor bean grown in nutrient solution. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 36(1), 233–242. <http://doi.org/10.1590/S0100-06832012000100024>
- Lu, Q., He, Z. L., & Stoffella, P. J. (2012). Land application of biosolids in the USA: A review. *Applied and Environmental Soil Science*, 2012. <http://doi.org/10.1155/2012/201462>
- Marschner, P. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed.). Academic Press, Elsevier.
- Miller, R. W., & Donahue, R. L. (1995). *Soils in our environment* (Prentice h).
- Mochida, K., & Shinozaki, K. (2011). Advances in Omics and Bioinformatics Tools for Systems Analyses of Plant Functions. *Plant and Cell Physiology*, 52(12), 2017–2038. <http://doi.org/10.1093/pcp/pcr153>
- Ozores-Hampton, M., & Peach, D. R. A. (2002). Biosolids in Vegetable Production Systems. *HortTechnology*, 12(3), 336–340.
- Perdomo, F. A., Acosta-Osorio, A. A., Herrera, G., Vasco-Leal, J. F., Mosquera-Artamonov, J. D., Millan-Malo, B., & Rodriguez-Garcia, M. E. (2013). Physicochemical characterization of seven Mexican *Ricinus communis* L. seeds & oil contents. *Biomass and Bioenergy*, 48, 17–24. <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.10.020>
- Rico-Ponce, H. R., Tapia-Vargas, L. M., Teniente-Oviedo, R., González-Avila, A., Hernández-Martínez, M., Solís-Bonilla, J. L., & Zamarripa-Colmenero, A. (2011).

Guía para cultivar higuerilla (*Ricinus communis* L.) en Michoacán. *Technical Brochure*, 1–43.

Santamaría-César, J., Reta-Sánchez, D., Chávez-González, J. F. J., Cueto-Wong, J. A., & Romero-Paredes, R. J. I. (2006). *Caracterización del medio físico en relación a cultivos forrajeros alternativos para la Comarca Lagunera. Libro Técnico No. 2* (Primera Ed). INIFAP-CIRNOC-CELALA. Matamoros, Coah., México.

Shaheen, S. M., & Tsadilas, C. D. (2013). Utilization of Biosolids in Production of Bioenergy Crops II: Impact of Application Rate on Bioavailability and Uptake of Trace Elements by Canola. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44(1-4), 243–258. <http://doi.org/10.1080/00103624.2013.741773>

## CAPITULO 5

### RESPUESTA DE LA HIGUERILLA (*Ricinus communis L.*) A DIFERENTES DOSIS DE ARSÉNICO

#### RESUMEN

La higuera (*Ricinus communis L.*) es una planta que actualmente se utiliza para la producción de biodiesel, entre sus cualidades esta planta tiene la capacidad de eliminar contaminantes de suelos. El objetivo de este estudio fue determinar la capacidad de la higuera para extraer arsénico. Los tratamientos evaluados consistieron en dos fuentes de nitrógeno (N) y cuatro dosis de arsénico (As) cada una. Las fuentes de N fueron: biosólidos de lagunas de oxidación (BLO) de la planta norte y biosólidos de lodos activados (BLA) de la planta oriente. Los tratamientos se arreglaron en un diseño experimental de bloques al azar con cuatro repeticiones. La concentración de arsénico se determinó por ICP-MS. El N total se midió utilizando el método de combustión. La concentración de Ca, Mg, Cu, Mn, Fe y Zn se cuantificó mediante espectroscopia de absorción atómica mientras que K se determinó por emisión atómica. El peso seco y la altura final de higuera no presentaron diferencia estadística. El Factor de translocación (FT) y el Factor de Bioconcentración (FBC) registraron valores de 0.12-0.29 y 0.33-0.55, respectivamente. Las dosis aplicadas de arsénico no afectaron la acumulación de nutrientes en la planta de higuera. La higuera no mostró un potencial como planta fitoextractora, pero presentó una razonable tolerancia a la exposición de este metal. Lo cual la hace un cultivo con potencial para desarrollarse bien en suelos contaminados por arsénico.

**Palabras clave:** Fitorremediación, metales pesados, contaminación, translocación bioconcentración

## ABSTRACT

Castor bean (*Ricinus communis* L.) is a plant that is currently used for the production of biodiesel, among its qualities this plant has the ability to remove contaminants from soils. The objective of this study was to determine the capacity of extracting arsenic by Castor bean. The treatments evaluated consisted of two nitrogen sources (N) and four doses of As each. The N sources were: biosolids of oxidation lagoons (BLO) of the North plant and biosolids of activated sludge (BLA) of the eastern plant. Treatments were arranged in a randomized experimental block design with four replicates. Arsenic concentration was determined by ICP-MS. Total N was determined using the combustion method. The concentration of Ca, Mg, Cu, Mn, Fe and Zn was quantified by atomic absorption spectroscopy while K was determined by atomic emission. The final weight and height of Castor bean were not statistically different. The Translocation Factor (FT) and the Bioconcentration Factor (FBC) resulted in a range of 0.12-0.29 and 0.33-0.55 respectively. The applied doses of arsenic did not affect the accumulation of nutrients by the higuierilla. This plant did not show a potential as a phytoextractor plant but presented a reasonable tolerance to the exposure of this metal so that this plant can be cultivated in soils contaminated by arsenic.

**Palabras clave:** phytoremediation, heavy metals, pollution, translocation, bioconcentration

## INTRODUCCIÓN

El control de la contaminación se ha convertido en un gran reto en el siglo XXI debido a un dramático aumento de los contaminantes resultantes de las actividades humanas (Larue *et al.*, 2010). Con el desarrollo de la industria y el riego agrícola con aguas residuales, una cantidad creciente de metales pesados ha entrado en el ecosistema suelo (Wang *et al.*, 2016).

Los metales pesados pueden causar grandes daños a la salud humana y al medio ambiente, ya que éstos pueden ser absorbidos por las plantas y parte de ellos pueden ser transferidos en la cadena alimenticia a los animales y a las personas. Lo anterior conlleva riesgos a la salud debido a la alta presencia de contaminantes, baja solubilidad de los metales en la biota y posible carcinogenicidad (Carbonell-Barrachina, *et al.* 1995; Diels, *et al.* 2002); los principales metales pesados incluyen mercurio (Hg), cadmio (Cd), cromo (Cr), talio (Tl), plomo (Pb) y arsénico (As),

El arsénico (As) es un oligoelemento natural presente en la corteza terrestre y forma parte de más de 245 minerales (Mandal y Suzuki, 2002). El arsénico en los suelos puede originarse a partir de fuentes naturales (por ejemplo, erosión de rocas y actividad volcánica), así como de fuentes antropogénicas (por ejemplo, plaguicidas, herbicidas, fertilizantes, minería, combustión de combustibles fósiles) (Gonzaga y Santos, 2006). La contaminación del suelo con arsénico puede causar la pérdida de cobertura vegetal y la contaminación de los cuerpos de agua, además de contribuir a la entrada de As en la cadena alimenticia (Tu y Ma, 2002). En la Comarca Lagunera existe un problema de contaminación de As en pozos de agua que se utilizan en actividades agropecuarias. Rosas *et al.*, (1999) realizaron un estudio en siete municipios de esta región y encontraron valores de As total en agua entre 7 y 422  $\mu\text{g L}^{-1}$ , lo cual se reflejó en concentraciones entre 11 y 30  $\text{mg kg}^{-1}$  en el suelo. Estudios recientes han documentado también el problema de As en el agua en la Comarca Lagunera ( Azpilcueta *et al.*, 2017; Cueto, Reta, Gonzalez, Orona, & Estrada, 2005; Martinez, Castellanos, Rivera, Nunez, & Faz, 2006).

La eliminación de metales pesados de los suelos contaminados se ha convertido en un problema urgente. La fitorremediación, que se define como el uso de plantas para eliminar los contaminantes de suelos, ha atraído gran atención porque es un enfoque económico, sin riesgo para el medio ambiente y estéticamente aceptable (Bauddh y Singh, 2012). Sin embargo, esta tecnología es limitada debido a que las plantas hiperacumuladoras conocidas son hierbas raras con biomasa pequeña, que tienen poco valor económico (Linger *et al.*, 2002; Chen *et al.*, 2012). Se ha sugerido una nueva estrategia de uso de cultivos energéticos para acumular metales pesados de suelos contaminados, lo que puede ayudar a resolver dos problemas globales críticos, a saber, la reducción gradual de combustibles fósiles y la contaminación del suelo.

La Higuierilla (*Ricinus communis* L.) es una especie de la familia Euphorbiaceae, que está llamando la atención por su valor económico. El contenido de aceite de la semilla de *R. communis* puede alcanzar el 70% (Vamerali, Bandiera, y Giuliano 2010). *R. communis* tiene la capacidad de adaptarse a condiciones salinidad, sequía y heladas y no requiere condiciones especiales del suelo (Sipos *et al.*, 2013). Además, la planta de higuierilla es un cultivo industrial y no entra en el ciclo alimentario (Rajkumar y Freitas, 2008).

Se ha demostrado que la Higuierilla es una planta de fitorremediación de metales pesados ya que tiene el potencial de tolerar y extraer metales pesados, como Cd (Bauddh y Singh, 2012) y Ni (Adhikari y Kumar, 2012). Sin embargo, existen pocos estudios sobre el potencial de extraer As. Por lo anterior el objetivo de este estudio fue evaluar la capacidad de bioacumulación de As por higuierilla y su impacto en la absorción de nutrientes.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

El experimento se llevó a cabo en las instalaciones del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (CENID-RASPA), del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (INIFAP), ubicado en la Cd. de Gómez Palacio, Durango (25°35'21.85" N, 103°27'9.65" O y 1100 msnm). El clima de esta región corresponde a BWhw, que se caracteriza por ser muy seco o desértico, semicálido con invierno fresco, y precipitación media anual de 240 mm, la temperatura

media anual a la sombra es de 25°C, con rangos de -1°C en invierno a 44°C en verano (Santamaría-César *et al.*, 2006). El suelo utilizado presentó una textura areno-francosa, un contenido de Nitrógeno inorgánico de 49.2 mg kg<sup>-1</sup>, un pH de 8.74 y una conductividad eléctrica (CE) de 0.66 dS m<sup>-1</sup>.

El experimento se estableció en macetas de plástico de 24 L de capacidad. Las semillas de higuierilla utilizadas fueron la variedad K 8SS, proporcionada por el Campo Experimental Valle del Guadiana, del INIFAP, en Durango, Dgo. Los tratamientos evaluados consistieron en dos tipos de biosólidos y cuatro dosis de As. Los tipos de biosólidos fueron: biosólidos de lagunas de oxidación (BLO) de la planta norte y biosólidos de lodos activados (BLA) de la planta oriente. El análisis químico de los biosólidos se presenta en el Cuadro 1. Las dosis de As fueron 0, 25, 50 y 100 mg kg<sup>-1</sup> de suelo. Los tratamientos se arreglaron en un diseño experimental de bloques al azar con cuatro repeticiones, donde la unidad experimental fue una maceta con 30 kg de suelo, con 459.7g y 251.3g de BLO y BLA, respectivamente. Las dosis anteriores se estimaron para aplicar 200 kg ha<sup>-1</sup> de N total y se asumió una tasa de mineralización de 40% (Figuroa *et al.*, 2008). La siembra se realizó en suelo húmedo a capacidad de Campo (CC), se depositaron tres semillas por maceta y cuando las plantas alcanzaron de 20 a 25 cm se dejó una planta por maceta.

**Cuadro 1.** Características químicas y biológicas de los biosólidos usados para la producción de aceite de higuera (*Ricinus communis* L.).

Parámetro	BLO	BLA
pH	7.56	7.53
C.E. (dS m <sup>-1</sup> )	2.53	3.65
MO (%)	38.01	56.83
NTK (%)	1.23	2.24
P (%)	0.58	1.60
K (%)	0.46	1.45
Na (%)	0.14	0.45
Ca (%)	5.18	4.58
Mg (%)	0.51	0.17
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	184.43	130.60
Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	4269.5	3579.16
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	732.26	955.70
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	283.93	148.00
Pb (mg kg <sup>-1</sup> )	134.6	78.93
Cd (mg kg <sup>-1</sup> )	6.40	9.23
As (mg kg <sup>-1</sup> )	17.3	12.6
Coliformes (NMP/4gST)	46000	24000
Salmonella (NMP/4gST)	2400	1100
Huevos de helminto (h/4gST)	5	4

La cosecha se realizó a los 107 días después de la siembra. Las plantas se fraccionaron en los diferentes órganos: raíz, tallo, hoja y semilla. Las muestras se lavaron con agua destilada para eliminar posibles contaminantes, posteriormente se dejaron secar al aire y finalmente en estufa de aire forzado a 65 °C, hasta llegar a peso constante. Después, las muestras se molieron, para lo cual se usó un molino Thomas Wiley, modelo Mini-Mill, con tamiz integrado de 1 mm de abertura. Para el análisis de metales en las muestras de planta, se pesaron 0.5g de muestra y se digirieron con HNO<sub>3</sub> en microondas (Marx 7 Thermo Scientific). La concentración de arsénico se determinó por ICP-MS (Nexion 7, Perkin Elmer). El N total se determinó por el método de combustión, en un analizador elemental (TruSpec CHN, LECO). El P se analizó por colorimetría por el método de metavanadato, mientras que las concentraciones de K, Ca, Mg, Cu, Mn, Fe y Zn se cuantificaron en un equipo de absorción atómica. Con la concentración de As se estimó el factor de translocación (FT) y el factor de bioacumulación (FB), de acuerdo con las formulas siguientes (Melo *et al.*, 2009):

$$FT = [As]_{\text{brote}} / [As]_{\text{raíz}}$$

$$FB = [As]_{\text{brote}} / [As]_{\text{aplicado}}$$

Los datos fueron analizados con el paquete estadístico SAS University Edition, mediante análisis de varianza, comparación múltiple de medias por el método de y diferencia mínima significativa.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### **Producción de biomasa.**

La producción de biomasa y la altura al final de las plantas de higuierilla no mostraron diferencia estadística, lo cual indica que la dosis de As o el tipo de biosólidos no afectaron el desarrollo de la planta. La producción de biomasa promedio fue de 18.6 g planta<sup>-1</sup> en materia seca, mientras que la altura promedió 62 cm (Cuadro 2). Los valores de producción de biomasa encontrados en el presente estudio son similares a los reportados por Lavres Junior *et al.*, (2012). En otros estudios se ha encontrado que metales como el Cd, Cu y Zn en cantidades excesivas, afectan la producción de biomasa de esta especie (Wang *et al.*, 2016).

**Cuadro 2.** Medias de los pesos y alturas de las plantas de higuera expuestas a diferentes dosis de arsénico y biosólidos de lagunas de oxidación (BLO) y biosólidos de lodos activados (BLO).

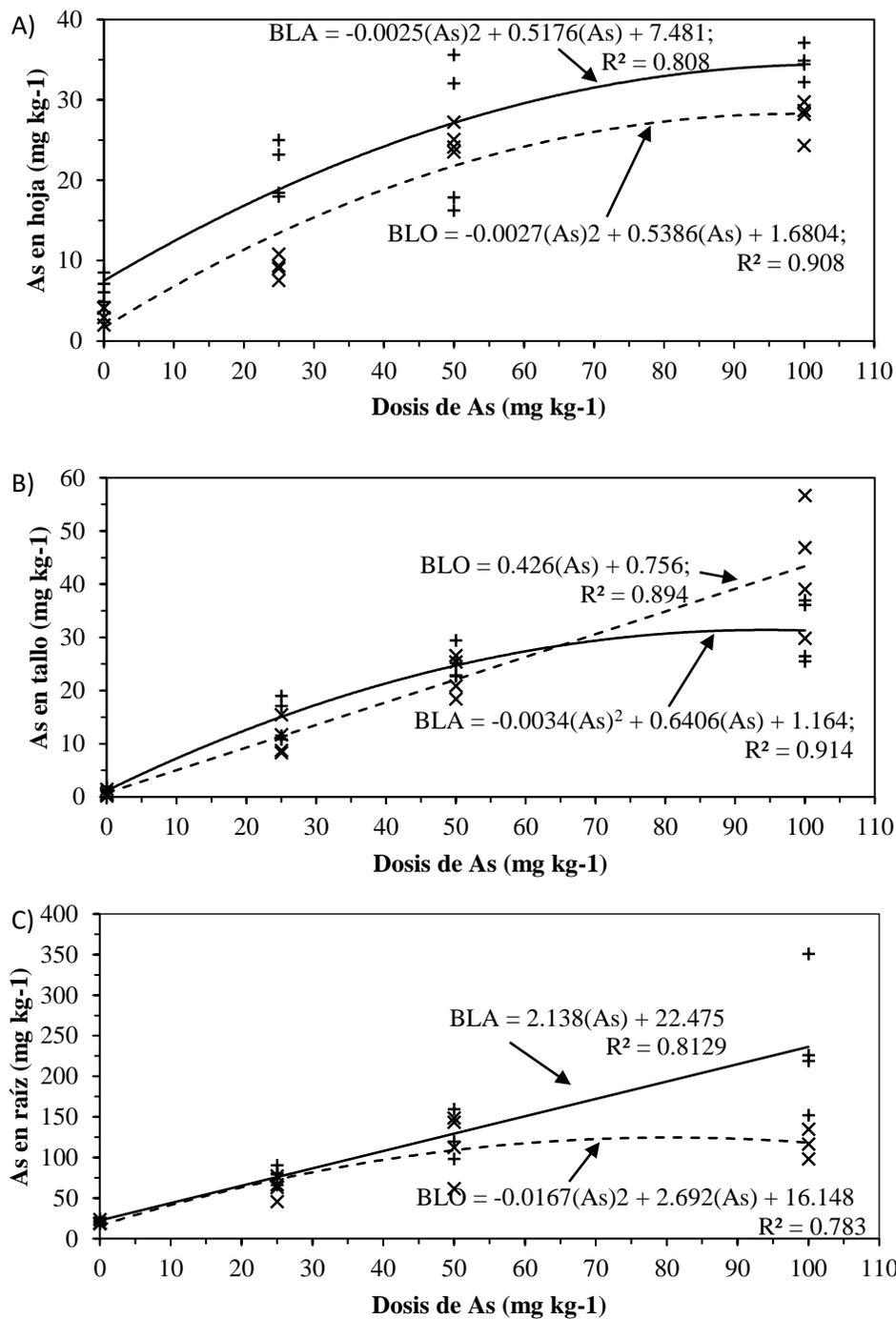
Descripción	Dosis As (mg kg <sup>-1</sup> )	Biomasa (g planta <sup>-1</sup> )	Altura (cm)
BLO	0	18.7 ns	70.8 ns
	25	17.7	55.9
	50	22.4	59.2
	100	17.9	53.2
BLA	0	19.4	67.7
	25	19.4	66.1
	50	16.1	59.6
	100	19.6	60.9

ns = las diferencias entre los valores no fueron estadísticamente significativas

### Absorción de Arsénico

La concentración de As se encontró en mayor concentración en la raíz, con respecto a la parte aérea de la planta, en todos los tratamientos. Los BLA tuvieron mayor concentración de As ( $p < 0.05$ ) en raíz y hoja, en comparación con los BLO. En la Figura 1 se aprecia que la respuesta general de concentración de As en los órganos de la planta se ajustó a una ecuación cuadrática, excepto la concentración en raíz con BLA y en tallo con BLO, cuya respuesta fue lineal. Con respecto a la concentración de As en hoja, los tratamientos con BLA presentaron una  $R^2 = 0.808$ , con una variación de 7 a 35 mg kg<sup>-1</sup>, mientras que los BLO mostraron una  $R^2 = 0.908$ , con un rango de 3 a 30 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 1A). En tallo, en la Figura 1B se puede observar que, en la dosis baja y media de As, la concentración de este elemento fue mayor en los tratamientos con BLA; sin embargo, en la dosis más alta los BLO mostraron una mayor concentración de As, aunque las diferencias no fueron significativas. En raíz, en la dosis baja de As, la concentración de este metal fue similar entre los tratamientos con BLA (20 mg kg<sup>-1</sup>) y BLO (22 mg kg<sup>-1</sup>), pero en la dosis media y alta la cantidad de As, la concentración en raíz tuvo una respuesta lineal cuando se aplicó

BLA, hasta alcanzar un promedio de 237 mg kg<sup>-1</sup>. En el caso de los BLO, la concentración de As en la raíz tuvo una respuesta cuadrática, alcanzado promedios de 116 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 1C). Algunos estudios han documentado que cuando el fósforo (P) es alto en el suelo, se incrementa la absorción de As incrementa, como resultado de competencia por los sitios de adsorción en el suelo (Quaghebeur y Rengel, 2001). Lo anterior pudo haber ocurrido en el presente estudio, ya que la caracterización inicial de los biosólidos (Cuadro 1) indica que los BLA presentaron 1.6 % de P, y son los que presentaron mayor absorción de As, comparados con los BLO que tuvieron 0.6 % de P.



**Figura 1.** Concentración As en hoja, tallo y raíz en los tratamientos con Biosólidos de lodos activados (BLA) y Biosólidos de Lagunas de Oxidación (BLO)

Los valores de factor de translocación (FT), que es la relación entre la concentración de As en hoja y raíz, oscilaron entre el 0.12 y 0.29 y no fue afectado significativamente por

el tipo de biosólidos o dosis de As, aunque sí se detectó una interacción entre ambos factores  $P < 0.05$ ); dicha interacción se explica porque con BLO, al incrementar la dosis de As el FT se incrementa, con un coeficiente de correlación  $r = 0.732^{**}$ , mientras que con BLA ocurre lo contrario (Cuadro 3). El factor de bioconcentración (FB), que es la relación entre la concentración de As en la planta y el suelo, fue mayor ( $P < 0.05$ ) cuando se aplicó BLA; los valores fueron de 0.33 a 0.55 en la parte aérea y de 1.17 a 3.16 en la raíz. En todos los casos se observa la tendencia de que el FB disminuye al aumentar la dosis de As, encontrándose una correlación inversa altamente significativa ( $P < 0.01$ ) en el FB de la parte aérea con BLO y de la raíz con BLA (Cuadro 3). Para ser considerada como una especie hiperacumuladora, una planta debe poseer la capacidad de captar y transferir los metales a la parte aérea. El FT mide la eficiencia de la planta para transportar un elemento desde las raíces a los brotes, mientras que el FB mide la efectividad de la planta para acumular el elemento con respecto a su concentración en el medio. Si ambos factores son superiores a 1.0 las especies presentan hiperacumulación (Melo *et al.*, 2009). Los valores encontrados en el presente estudio sugieren que la higuierilla no es una planta hiperacumuladora de As, ya que el FT y el FB de la parte aérea están por debajo de 1.0; en contraste, Wang *et al.* (2016) determinaron que esta planta posee una capacidad de hiperacumulación de Cd, ya que mostró un rango de FB de 1.20 a 1.97. En el presente estudio, el FB disminuyó al aumentar la dosis de As, dato que difiere con lo reportado por Melo *et al.* (2009) donde determinaron que tanto el FT como el FB aumentaron al incrementarse la dosis de As. Algunas especies de helechos, como *Pteris vittata* and *Pityrogramma calomelanos*, son hiperacumuladoras de As, ya que presentaron valores de FT de 15 y 91, respectivamente (Francesconi y Kuehnelt, 2002). Por otra parte, existen plantas tolerantes a este metal como *Agrostis catellana* (De Koe, 1994) y *Cynodon dactylon* (Jonnalagadda y Nenzou 1996, 1997), que presentaron valores de FT de 0.17 y 0.15 respectivamente; en el presente estudio las dosis de As no afectaron la producción de biomasa, lo cual sugiere que la higuierilla es una planta tolerante a As en el suelo.

**Cuadro 3.** Factor de translocación y bioacumulación de la planta higuera.

Descripción	As (mg kg <sup>-1</sup> )	Factor de Translocación	Factor de Bioacumulación	
			Parte aérea	Raíz
BLO	0	0.12		
	25	0.16	0.39	2.52
	50	0.23	0.36	2.33
	100	0.29	0.33	1.17
<i>r</i>		0.732**	-0.761**	-0.516
BLA	0	0.23		
	25	0.24	0.55	3.16
	50	0.22	0.42	2.51
	100	0.15	0.33	2.37
<i>r</i>		-0.529*	-0.469	-0.792**

*r* = coeficiente de correlación de Pearson; \*, \*\* = significancia del modelo de acuerdo al análisis de varianza: \* =  $p < 0.05$ , \*\* =  $p < 0.01$

### Concentración foliar de nutrientes

Los análisis de nutrientes en hoja mostraron que la concentración de P, K, Zn y Mn fue mayor ( $P < 0.05$ ) en los BLO, aun cuando P y K se incorporaron en mayor cantidad con los BLA (Cuadro 1; Cuadro 4). Todos los elementos, excepto N, Cu, Fe y Mn tuvieron un efecto significativo por la dosis de As. Para analizar en detalle dicho efecto, en el Cuadro 4 se anota el coeficiente de correlación de Pearson (*r*), apreciándose que en los BLO solamente K, Mg y Zn mostraron un valor de *r* cuyo modelo fue significativo ( $P < 0.05$ ), de acuerdo al análisis de varianza de la regresión, mientras que en los BLA todos los nutrientes, excepto N, Cu y Fe, tuvieron valores de *r* altamente significativos ( $P < 0.01$ ); en todos los casos significativos, los valores de *r* fueron negativos, es decir, al incrementarse la dosis de As, la concentración de los nutrientes disminuyó (Cuadro 4). Aun con la tendencia anterior, todos los nutrientes, excepto P, Mg y Cu fueron superiores al valor promedio para un adecuado crecimiento de plantas (Marschner, 2012).

**Cuadro 4.** Medias y diferencias significativas de macro y micronutrientes en las hojas de higuera en respuesta a dosis arsénico y Biosólidos de lagunas de Oxidación (BLO) y Biosólidos de Lodos Activados (BLA).

Descripción	Dosis As mg kg <sup>-1</sup>	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Zn	Mn
		%			mg kg <sup>-1</sup>					
BLO	0	2.03	0.18	2.93	1.08	0.21	4.35	540.7	99.9	239.8
	25	2.24	0.22	2.71	1.75	0.25	3.35	476.4	86.5	372.3
	50	2.25	0.15	2.59	1.26	0.12	4.6	307.3	102.9	396.7
	100	1.95	0.12	2.51	1.02	0.12	4.48	595.3	65.2	368.9
<i>Promedio</i>		2.12	0.17 A	2.69 A	1.28	0.18	4.20	479.9	88.6 A	344.4 A
<i>r</i>		-0.161	-0.404	-0.546*	-0.209	-0.589*	0.169	0.09	-0.582*	0.253
BLA	0	2.18	0.17	2.73	1.29	0.18	6.08	432	110.9	147.8
	25	2.16	0.13	2.6	1.29	0.22	4.83	389.6	86.8	126.3
	50	2.15	0.08	1.93	0.98	0.12	4.88	345.8	52.3	102.8
	100	2.61	0.06	1.64	0.71	0.05	4.23	250	31.4	37.3
<i>Promedio</i>		2.28	0.11 B	2.23 B	1.07	0.14	5.01	354.4	70.4 B	103.6 B
<i>r</i>		0.380	-0.728**	-0.628**	-0.832**	-0.640**	-0.359	-0.412	-0.829**	-0.721*
Tratamiento		ns	**	**	ns	ns	ns	ns	**	**
Dosis		ns	*	*	**	**	ns	ns	**	ns
Tratamiento x Dosis		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	Ns
Valor promedio adecuado en plantas <sup>†</sup>		1.5	0.2	1.0	0.5	0.2	6	100	20	50

*r* = coeficiente de correlación de Pearson; ns = diferencias no significativas, \*P ≤ 0.05 y \*\*P ≤ 0.01

<sup>†</sup>Marschner (2012), valor promedio para un adecuado crecimiento de plantas.

## CONCLUSIÓN

La planta de higuerilla (*Ricinus communis* L.) no presentó capacidad fitoextractora de As, con base en los factores de translocación y de bioacumulación que fueron menores de 1.0. No obstante, a lo anterior, la planta de higuerilla, mostró tolerancia al As, mediante una adecuada respuesta de crecimiento de la planta y producción de biomasa.

## LITERATURA CITADA

- Adhikari, T., & Kumar, A. (2012). Phytoaccumulation and Tolerance of *Ricinus Communis* L. to Nickel. *International Journal of Phytoremediation*, 14, 481–492. <http://doi.org/10.1080/15226514.2011.604688>
- Azpilcueta Pérez, E. M., Pedroza Sandoval, A., Sánchez Cohen, I., Jacobo Salcedo, R., & Trejo Calzada, R. (2017). Calidad química del agua en un área agrícola de maíz forrajero (en la Comarca Lagunera, México). *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 33(1), 75–83. <http://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.01.07>
- Bauidh, K., & Singh, R. P. (2012). Growth, tolerance efficiency and phytoremediation potential of *Ricinus communis* (L.) and *Brassica juncea* (L.) in salinity and drought affected cadmium contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 85(August 2014), 13–22. <http://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.08.019>
- Carbonell-Barrachina, A. A., Burló-Carbonell, F. M., & Mataix-Beneyto, J. J. (1995). *Arsénico en el sistema suelo-planta: Significado ambiental*. Universidad de Alicante.
- Cueto, W. J. A., Reta, S. D. G., Gonzalez, G. C., Orona, C. I., & Estrada, A. J. (2005). Características químicas de aguas de pozos profundos del acuífero de Villa Juárez, Durango. *Agrofaz*, 5, 869–874.
- De Koe, T. (1994). *Agrostis castellana* and *Agrostis delicatula* on heavy metal and arsenic enriched sites in NE Portugal. *Sci. Total Environ*, (145), 103–109.
- Diels, L., van der Lelie, N., & Bastiaens, L. (2002). New developments in treatment of

- heavy metal contaminated soils. *Environmental Science and Biotechnology*, 1, 75–82.
- Francesconi, K., & Kuehnelt, D. (2002). Arsenic compounds in the environment. In Frankenberger & J. W.T. (Eds.), *Environmental Chemistry of Arsenic*. Marcel Dekker (pp. 51–94). New York.
- Jonnalagadda, S. B., & Nenzou, G. (1996). Studies on arsenic rich mine dumps: I. effects on the surface soil. *J. Environ. Journal of Environmental Science & Health, A* 31(8), 1909–1915.
- Jonnalagadda, S. B., & Nenzou, G. (1997). Studies on arsenic rich mine dumps: II. The heavy element uptake by vegetation. *Journal of Environmental Science & Health, A* 32(2), 455–464.
- Larue, C., Korboulewsky, N., Wanga, R., & Mévy, J.-P. (2010). Depollution potential of three macrophytes : Exudated , wall-bound and intracellular peroxidase activities plus intracellular phenol concentrations. *Bioresource Technology*, 101, 7951–7957. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.010>
- Lavres Junior, J., Cabral, C. P., Rossi, M. L., Nogueira, T. A. R., Nogueira, N. de L., & Malavolta, E. (2012). Deficiency symptoms and uptake of micronutrients by castor bean grown in nutrient solution. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 36(1), 233–242. <http://doi.org/10.1590/S0100-06832012000100024>
- Mandal, B. K., & Suzuki, K. T. (2002). Arsenic Round the World : A Review. *Talanta*, 58, 201–235. [http://doi.org/10.1016/S0039-9140\(02\)00268-0](http://doi.org/10.1016/S0039-9140(02)00268-0)
- Marschner, P. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed.). Academic Press, Elsevier.
- Martinez, R. J. G., Castellanos, R. J. Z., Rivera, G. M., Nunez, H. C. G., & Faz, R. (2006). Contaminacion por nitratos en acuíferos del norte de Mexico y del Estado de Guanajuato. *Agrofaz*, 6(3), 379–387.
- Melo, E. E. C., Costa, E. T. S., Guilherme, L. R. G., Faquin, V., & Nascimento, C. W. A. (2009). Accumulation of arsenic and nutrients by castor bean plants grown on an As-

- enriched nutrient solution. *Journal of Hazardous Materials*, 168(1), 479–483. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.048>
- Quaghebeur, M., & Rengel, Z. (2001). The Presence of Phosphate in the Rhizosphere of *Holcus lanatus* L. Stimulates the Uptake of Arsenate from Kaolinite. In *Arsenic in the Asia Pacific Region Workshop (Book of Abstracts), 20-23 November 2001, Adelaide, SA*.
- Rajkumar, M., & Freitas, H. (2008). Influence of metal resistant-plant growth-promoting bacteria on the growth of *Ricinus communis* in soil contaminated with heavy metals. *Chemosphere*, 71(5), 834–842. <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.11.038>
- Santamaría-César, J., Reta-Sánchez, D., Chávez-González, J. F. J., Cueto-Wong, J. A., & Romero-Paredes, R. J. I. (2006). *Caracterización del medio físico en relación a cultivos forrajeros alternativos para la Comarca Lagunera. Libro Técnico No. 2* (Primera Ed). INIFAP-CIRNOC-CELALA. Matamoros, Coah., México.
- Tu, C., & Ma, L. Q. (2002). Effects of arsenic concentrations and forms on arsenic uptake by the hyperaccumulator ladder brake. *Journal of Environmental Quality*, 31(2), 641–647.
- Vamerali, T., Bandiera, M., & Giuliano, M. (2010). Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land. A review. *Environmental Chemistry Letters*, 8, 1–17. <http://doi.org/10.1007/s10311-009-0268-0>
- Wang, S., Zhao, Y., Guo, J., & Zhou, L. (2016). Effects of Cd, Cu and Zn on *Ricinus communis* L. Growth in single element or co-contaminated soils: Pot experiments. *Ecological Engineering*, 90, 347–351. <http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.11.044>

