

Micronutrients in castor-oil plants (*Ricinus communis* L.) growing in soil fertilized with biosolids

Concentración de elementos menores en plantas de higuera (*Ricinus communis* L.) que crecieron en suelo fertilizado con biosólidos

Sandra P. Maciel-Torres¹; Uriel Figueroa-Viramontes²; María D. R. Jacobo-Salcedo³; Aurelio Pedroza-Sandoval¹; Ricardo Trejo-Calzada¹; Rubén C. Encerrado-Alva⁴

¹ Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional de Zonas Áridas, km 40 Carretera Gómez Palacio-Chihuahua Bermejillo, Durango, México. C. P. 35230.

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental La Laguna, Blvd. José Santos Valdés núm. 1200 Matamoros, Coahuila, México. C. P. 27440.

³ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera, Margen Derecha Canal de Sacramento, Gómez Palacio, Durango, México. C. P. 35140.

⁴ Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Ciencias Biológicas, Av. Universidad s/n Fraccionamiento Filadelfia, Gómez Palacio, Durango, México. C. P. 35010.

*Corresponding author: figueroa.uriel@inifap.gob.mx

Abstract

Alkaline calcareous soils, typical of arid zones, can limit the availability of soil micronutrients for some crops. The aim of this work was to assess micronutrient concentrations in soil and castor-oil plants when soil fertilization involved ammonium sulfate and two types of biosolids. Treatments were designed taking into account three nitrogen (N) sources and three doses of each source plus the control (no fertilization). The N sources were ammonium sulfate (AS), biosolids from wastewater treatment plants with oxidation ponds (OPB), and with activated sludge (ASB). The N doses were 0 (control), 134, 200 and 260 kg·ha⁻¹. A randomized complete block experimental design with four replicates was used. Dry matter yield and seed oil content rose with increasing N rates. The highest concentrations of Cu and Fe in soil after harvest were obtained with OPB treatments, with means of 0.98 mg·kg⁻¹ Cu and 5.20 mg·kg⁻¹ Fe. Results suggest that the biosolids provided the necessary micronutrients for adequate development of *Ricinus communis* plants without risk of toxicity and pollution.

Keywords: Plant nutrition, microelements, oil content, soil fertility.

Resumen

Los suelos alcalinos y calcáreos, típicos de las zonas áridas, limitan la disponibilidad de micronutrientes en el suelo para algunos cultivos. El objetivo del presente trabajo fue evaluar los contenidos de elementos menores en suelo y plantas de higuera cuando se usaron sulfato de amonio y dos tipos de biosólidos como fertilizantes. Los tratamientos se definieron al considerar tres fuentes (fertilizantes) y tres dosis de N, así como un testigo (sin fertilización). Las fuentes de N fueron sulfato de amonio (SA), biosólidos de plantas de tratamiento de agua residual con lagunas de oxidación (BLO) y con lodos activados (BLA). Las dosis de N fueron de 0 (testigo), 134, 200 y 260 kg·ha⁻¹. El diseño experimental fue bloques al azar con cuatro repeticiones. El rendimiento de materia seca y el contenido de aceite en semillas se incrementaron al aumentar las dosis de N. Las concentraciones mayores de Cu y Fe en el suelo después de la cosecha correspondieron a los tratamientos con BLO, con medias de 0.98 mg·kg⁻¹ de Cu y 5.20 mg·kg⁻¹ de Fe. Los resultados indican que los biosólidos utilizados en el presente trabajo aportaron los micronutrientes necesarios para un desarrollo adecuado de plantas de higuera, sin riesgo de toxicidad y contaminación.

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

Please cite this article as follows (APA 6): Maciel-Torres, S., P., Figueroa-Viramontes, U., Jacobo-Salcedo, M. D. R.; Pedroza-Sandoval, A., Trejo-Calzada, R., & Encerrado-Alva, R., C. (2017). Micronutrients in castor-oil plants (*Ricinus communis* L.) growing in soil fertilized with biosolids. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 16(2), 13-22. Doi: 10.5154/r.rchza.2017.10.007



Introduction

Very few agricultural soils have a sufficient nutrient content to satisfy crop nutritional requirements, so fertilizers are frequently applied. Today, the depletion of natural resources is evident; therefore, the need to generate mechanisms and means for their efficient and effective use persists. In the current literature, much attention has been given to biosolids due to the increasing amount of them and the problem of their elimination (Kominko, Gorazda, & Wzorek, 2017).

Biosolids are rich in macro and micronutrients, so they can serve as a source of nutrients for plants (Ozores-Hampton, & Peach, 2002). Applying biosolids to the soil for agricultural production has become a common practice in many countries and is considered an efficient way of disposing of biosolids as the nutrients contained in them are recycled (Lu, He, & Stoffella, 2012).

In recent years, the generation of crops that provide adequate biomass for the production of biofuels has taken on increased importance. In this regard, one of the promising species is castor-oil plants (*Ricinus communis* L.). This oily species is resistant to drought (Baudhdh, Singh, Singh, & Singh, 2015). The oil extracted from the castor bean seeds has versatility in the industry with more than 700 uses such as in cosmetics, plastics, lubricants, medicines and, especially, biodiesel production. The oil content ranges between 35 and 60 %, depending on the plant variety and the growth environment (Danlami, Arsad, & Zaini, 2015).

Although plants require small amounts of microelements, they are only available to a limited extent in alkaline calcareous soils typical of the arid zones of northern Mexico. This may be due to the fact that these elements form poorly soluble compounds in the soil (Miller & Donahue, 1995). Some studies show that the addition of biosolids to the soil induces increases in crop yields. Akdeniz, Yilmaz, Bozkurt, and Keskin (2006) evaluated biosolid doses of 4.5 to 19 t·ha⁻¹; their results suggest that the 19 t·ha⁻¹ dose resulted in yields similar to that produced by an 80 kg·ha⁻¹ N dose, with 12.8 and 10.0 t·ha⁻¹ of sorghum, respectively; Regarding micronutrients, the application of biosolids increased the concentrations of Cu and Zn in the soil, as well as the concentrations of Ni and Zn in the leaves of sorghum plants, within the sufficiency ranges (Jones, Wolf, & Mills, 1991). Adair et al. (2014) studied the effect of biosolids applied to soil on the production of biodiesel from canola and camelina seed oil; with the dose of biosolids (316 kg·ha⁻¹ N), the yield in both crops was increased, as well as the contents of Fe, Mn and Cu in the oil paste. Lange, Martines, & Antonio (2005) observed that a deficiency of microelements does not allow for the proper development of castor-oil plants, thus limiting seed production. From the above,

Introducción

Muy pocos suelos agrícolas tienen un contenido suficiente de nutrientes para satisfacer los requerimientos nutrimentales de los cultivos, de tal manera que la aplicación de fertilizantes al suelo es una práctica frecuente. Actualmente, el agotamiento de los recursos naturales es evidente, por lo tanto, la necesidad de generar mecanismos y medios para el uso eficiente y efectivo de los mismos persiste. En la literatura actual, mucha atención se ha puesto a los biosólidos debido a la cantidad creciente y al problema de su eliminación (Kominko, Gorazda, & Wzorek, 2017).

Los biosólidos son ricos en macro y micronutrientes, por lo tanto, pueden servir como fuente de nutrientes para las plantas (Ozores-Hampton, & Peach, 2002). La aplicación de biosólidos al suelo para la producción agrícola se ha convertido en una práctica común en muchos países y se considera una manera eficaz de disposición de los biosólidos para reciclar los nutrientes que contiene (Lu, He, & Stoffella, 2012).

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 prometedoras es la higuera (*Ricinus communis* L.). Esta especie oleaginosa es resistente a la sequía (Baudhdh, Singh, Singh, & Singh, 2015). El aceite que se extrae de las semillas de higuera tiene versatilidad en la industria con más de 700 usos como cosméticos, plásticos, lubricantes, medicamentos y, especialmente, para la producción de biodiesel. El contenido de aceite oscila entre 35 y 60%, dependiendo de la variedad de semillas y ambiente de crecimiento (Danlami, Arsad, & Zaini, 2015).

A pesar de que las plantas requieren cantidades pequeñas de microelementos, están disponibles limitadamente en suelos calcáreos alcalinos típicos de las zonas áridas del Norte de México. Ello quizá se deba a que dichos elementos forman compuestos poco solubles en el suelo (Miller & Donahue, 1995). Algunos estudios demuestran que la adición de biosólidos al suelo induce incrementos del rendimiento de los cultivos. Akdeniz, Yilmaz, Bozkurt, y Keskin (2006) evaluaron dosis de 4.5 a 19 t·ha⁻¹ de biosólidos; sus resultados sugieren que la dosis de 19 t·ha⁻¹ provocó rendimientos similares a la dosis de 80 kg·ha⁻¹ de N, con 12.8 y 10.0 t·ha⁻¹ de sorgo, respectivamente; respecto a micronutrientes, la aplicación de biosólidos incrementó las concentraciones de Cu y Zn en el suelo, así como las concentraciones de Ni y Zn en las hojas de plantas de sorgo, dentro de los rangos de suficiencia (Jones, Wolf, & Mills, 1991). Adair et al. (2014) estudiaron el efecto de biosólidos aplicados al suelo sobre la producción de biodiesel a partir del aceite de semillas de canola y camelina; con la dosis de biosólidos

it is clear that there is insufficient information on the contribution of micronutrients when biosolids are incorporated into the soil and their use by crops such as castor-oil plants. The aim of the present study was to evaluate the micronutrient concentrations in soil and castor-oil plants when ammonium sulfate and two types of biosolids were used as fertilizers.

Materials and methods

The study was carried out in the facilities of the *Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera* (CENID-RASPA) of the *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias* (INIFAP for its acronym in Spanish), located in the city of Gómez Palacio, Durango, Mexico. The biosolids used were collected from two treatment plants in the same city, which operate with oxidation ponds and activated sludge. The biosolids were characterized according to NOM-004-SEMARNAT-2002 and classified as excellent due to their heavy metal content (Table 1). The soil used has a sandy loam texture with 49.18 mg·kg⁻¹ inorganic nitrogen, pH = 8.74 and electrical conductivity (EC) = 0.66 dS·m⁻¹. The K 8SS castor-oil plant variety was used. Technical staff at INIFAP's Valle del Guadiana Experiment Station provided the seed.

The experiment involved two factors: A) fertilization sources: ammonium sulfate (AS), oxidation pond biosolids (OPB) and activated sludge biosolids (ASB); and B) three doses of each source (3.79, 5.65 and 7.52 g of N·pot⁻¹, which corresponded to 67, 100 and 133 % of the crop N requirement (CNR, respectively) plus the control (no fertilization). To calculate 100 % CNR, a dose of 80 kg·ha⁻¹ was considered as a reference (Rico-Ponce et al., 2011), in addition to assuming 40 % fertilizer use efficiency because it is a sandy soil. The treatments were distributed according to a randomized block experimental design with four replicates.

The experimental units were 24-L plastic pots. Sowing was carried out in moist soil at field capacity (FC). Three seeds were deposited in each pot. When the plants reached a height of between 20 and 25 cm, the unnecessary ones were removed to leave one plant per pot. The harvest took place 113 days after sowing. The plants were divided into samples of the different organs: root, stem, leaf and seed. The specimens were washed with distilled water to remove possible contaminants; subsequently, the samples were dehydrated, exposed to the air and then dried to constant weight in a forced-air oven at 65 °C for 72 hours to estimate total dry matter (DM).

The percentage of oil in the seed was estimated using the soxhlet method and 5.0-g seed samples (Adair et al., 2014; Danlami et al., 2015). The micronutrient content in the soil at the end of the study was carried out

(316 kg·ha⁻¹ de N) se incrementó el rendimiento en ambos cultivos, así como los contenidos de Fe, Mn y Cu en la pasta de aceite. Lange, Martines, & Antonio (2005) observaron que la deficiencia de microelementos no permite el desarrollo adecuado de plantas de higuera, limitando así la producción de semilla. De lo anterior se desprende que se carece de información suficiente sobre la aportación de micronutrientes cuando se incorporan biosólidos al suelo y su aprovechamiento por cultivos como la higuera. El objetivo del presente estudio fue evaluar los contenidos de elementos menores en suelo y plantas de higuera cuando se usaron sulfato de amonio y dos tipos de biosólidos como fertilizantes.

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. Los biosólidos utilizados fueron colectados de dos plantas de tratamiento de la misma ciudad, las cuales operan con lagunas de estabilización y lodos activados. Los biosólidos se caracterizaron de acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002 y clasificados como excelentes debido al contenido de metales pesados (Cuadro 1). El suelo utilizado es de textura areno-francosa con 49.18 mg·kg⁻¹ de Nitrógeno inorgánico, pH = 8.74 y conductividad eléctrica (CE) = 0.66 dS·m⁻¹. La variedad de higuera K8SS fue usada. Personal técnico del Campo Experimental Valle del Guadiana del INIFAP proporcionó la semilla.

El experimento involucró dos factores: A) fuentes de fertilización: sulfato de amonio (SA), biosólidos de lagunas de oxidación (BLO) y biosólidos de lodos activados (BLA); y B) tres dosis de cada fuente (3.79, 5.65 y 7.52 g de N·maceta⁻¹, que corresponden al 67, 100 y 133 % del requerimiento de N del cultivo (RNC), respectivamente) más el testigo (sin fertilizante). Para calcular el RNC al 100 % se consideró como referencia una dosis de 80 kg·ha⁻¹ (Rico-Ponce et al., 2011), además de suponer un 40 % de eficiencia de uso del fertilizante por tratarse de un suelo arenoso. Los tratamientos se distribuyeron de acuerdo al diseño experimental de bloques al azar con cuatro repeticiones.

Las unidades experimentales fueron macetas de plástico de 24 L de capacidad. La siembra se realizó en suelo húmedo a Capacidad de Campo (CC). Tres semillas se depositaron en cada maceta. Cuando las plantas alcanzaron una altura de entre 20 y 25 cm se eliminaron las necesarias para dejar una planta por maceta. La cosecha se realizó a los 113 días después de la siembra. Las plantas se fraccionaron en muestras de los diferentes órganos: raíz, tallo, hoja y semilla.

Table 1. Values of the chemical and biological variables of the biosolids used as fertilizers for the production of castor-oil plants (*Ricinus communis* L.).**Cuadro 1. Valores de las variables químicas y biológicas de los biosólidos usados como fertilizantes para la producción de aceite de higuera (*Ricinus communis* L.).**

Variable/Variable	Oxidation pond biosolids/ Biosólido de Lagunas de oxidación	Activated sludge biosolids/ Biosólidos de lodos activados
pH	7.56	7.53
Electrical conductivity (dS·m ⁻¹)/ Conductividad eléctrica (dS·m ⁻¹)	2.53	3.65
Organic matter (%) /Materia orgánica (%)	38.01	56.83
NTK (%) /NTK (%)	1.23	2.24
Phosphorus (P) (%) /Fósforo (P) (%)	0.58	1.60
Potassium (K) (%) /Potasio (K) (%)	0.46	0.48
Sodium (Na) (%) /Sodio (Na) (%)	0.14	0.45
Calcium (Ca) (%) /Calcio (Ca) (%)	5.18	4.58
Magnesium (Mg) (%) /Magnesio (Mg) (%)	0.51	0.17
Copper (Cu) (mg·kg ⁻¹) /Cobre (Cu) (mg·kg ⁻¹)	184.43	130.60
Iron (Fe) (mg·kg ⁻¹) /Hierro (Fe) (mg·kg ⁻¹)	4 269.5	3 579.16
Zinc (Zn) (mg·kg ⁻¹) /Zinc (Zn) (mg·kg ⁻¹)	732.26	955.70
Manganese (Mn) (mg·kg ⁻¹) /Manganeso (Mn) (mg·kg ⁻¹)	283.93	148.00
Lead (Pb) (mg·kg ⁻¹) /Plomo (Pb) (mg·kg ⁻¹)	134.6	78.93
Cadmium (Cd) (mg·kg ⁻¹) /Cadmio (Cd) (mg·kg ⁻¹)	6.40	9.23
Arsenic (As) (mg·kg ⁻¹) /Arsénico (As) (mg·kg ⁻¹)	17.3	12.6

by means of the DTPA extraction method, according to NOM 021 SEMARNAT 2000. The different plant organs were milled in a sieve with 1- mm openings. Subsequently, these plant tissue samples were processed by wet digestion with HNO₃ + HCl₄ (3:2) and the concentrations of Cu, Fe, Zn and Mn were determined by atomic absorption spectrophotometry (AA 700, Perkin Elmer). The data were subjected to analysis of variance, Tukey's range test and orthogonal contrast analysis using Statistical Analysis System software (SAS, 2017).

Results and discussion

Dry matter production

According to the analysis of variance and orthogonal contrasts, dry matter production of the plant, seed production and percentage of oil in the seed as a result of fertilizer treatments were greater than by the effect of the control (Table 2). Dry matter per plant due to the fertilizer treatments was 28 g (± 3.7) on average, while seed production averaged 10 g (± 3.6) per plant; that is, the soil fertilization practice induced 71 % more

Los especímenes se lavaron con agua destilada para eliminar posibles contaminantes; posteriormente, las muestras se deshidrataron expuestas al aire y luego fueron secadas hasta peso constante en estufa de aire forzado a 65 °C durante 72 horas para estimar Materia Seca (MS) total.

El porcentaje de aceite de la semilla se estimó con el método soxhlet al usar muestras de 5.0 g de semilla (Adair et al., 2014; Danlami et al., 2015). El contenido de micronutrientes en suelo al final del estudio se realizó mediante el método de extracción DTPA, de acuerdo a la NOM 021 SEMARNAT 2000. Los diferentes órganos de la planta se molieron en un tamiz de 1 mm de abertura. Posteriormente, esas muestras de tejido vegetal se procesaron mediante digestión húmeda con HNO₃ + HCl₄ (3:2) y las concentraciones de Cu, Fe, Zn y Mn se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica (AA 700, Perkin Elmer). Los datos fueron involucrados en análisis de varianza, prueba de comparación de medias por diferencia mínima significativa (DMS) y análisis de contraste ortogonales al usar el paquete estadístico Statistical Analysis System (SAS, 2017).

DM in the plant and 64 % more DM in the castor bean seed grown in a pot, with respect to the control. The oil percentage averaged 35 % as a result of the fertilizer treatments, which represented an increase of 16 % with respect to the control (Table 2).

These results differ from those obtained by Adair et al. (2014) who found that adding biosolids to the soil did not influence the oil content in canola seeds differently than the control, since an average of 41 % was obtained for both groups. However, the oil percentage values obtained in this study due to the addition of ammonium sulfate and biosolids to the soil are lower than those reported by Danlami et al. (2015) and Perdomo et al. (2013), who recorded averages of 53.4 and 48.8 %, respectively. When analyzing the source x dose interaction, only the oil percentage showed a significant effect, given that the plants with AS had the highest oil percentage of oil due to the intermediate dose (5.65 g of N·pot⁻¹), (Table 2).

Soil nutrient concentrations

In general, the concentrations of micronutrients in the soil after harvest were higher in soils with biosolids than in the soil without fertilizer and with ammonium sulfate. Soils with OPB had higher Cu and Fe concentrations and lower Zn concentrations than soils with ASB (Table 3). The above differences

Resultados y discusión

Producción de materia seca

De acuerdo con el análisis de varianza y contrastes ortogonales, producción de materia seca de la planta, producción de semilla y porcentaje de aceite en la semilla por efecto de los tratamientos con fertilizante fueron mayores que por efecto del testigo (Cuadro 2). La materia seca por planta por efecto de los tratamientos con fertilizante fue de 28 g (\pm 3.7) en promedio, en tanto que la producción de semilla promedió 10 g (\pm 3.6) por planta; es decir, la práctica de fertilización del suelo indujo incrementos de 71 % de MS de planta y de 64 % de MS de semilla de higuera cultivada en maceta, con respecto al testigo. El porcentaje de aceite promedió 35 % por efecto de los tratamientos con fertilizante, lo que representó un incremento de 16 % con respecto al testigo (Cuadro 2).

Estos resultados difieren de los obtenidos por Adair et al. (2014) quienes encontraron que la adición de biosólidos al suelo no influyó en el contenido de aceite en semillas de canola de manera diferente que el testigo, ya que a ambos grupos se asoció una media de 41 %. Sin embargo, los valores de porcentaje de aceite obtenidos en este estudio por efecto de la adición de sulfato de amonio y biosólidos al suelo son menores que los reportado por Danlami et al. (2015) y Perdomo

Table 2. Means and orthogonal contrasts of the dry matter and oil yield.

Cuadro 2. Medias y contrastes ortogonales del rendimiento de materia seca y aceite.

Description/Descripción	Dose (g of N·pot ⁻¹)/Dosis (g de N·maceta ⁻¹)	Dry matter (g·plant ⁻¹)/ Materia seca (g·planta ⁻¹)		Oil (%)/Aceite (%)
		Plant/Planta	Seed/Semilla	
Control/Testigo	0	16.33	6.07	30.11
Ammonium sulfate/ Sulfato de Amonio	3.79	32.12	9.04	30.25
	5.65	27.42	7.17	33.98
	7.52	26.32	12.8	42.55
Oxidation pond biosolids/Biosólidos de lagunas de oxidación	3.79	22.62	10.1	27.00
	5.65	23.76	9.27	37.16
	7.52	27.1	9.62	35.65
Activated sludge biosolids/ Biosólidos de lodos activados	3.79	28.31	9.82	35.75
	5.65	30.72	10.7	39.00
	7.52	33.63	11.6	34.11
Orthogonal contrasts/Contrastes ortogonales				
Control vs rest/Testigo vs resto		**	*	*
AS vs (OPB + ASB)/SA vs (BLO + BLA)		ns	ns	ns

*= $P < 0.05$, **= $P < 0.01$ significance of the model according to the analysis of variance, ns=Not significant

*= $P < 0.05$, **= $P < 0.01$ significancia del modelo de acuerdo al análisis de varianza, ns=No significativo

are congruent with the chemical composition of the biosolids (Table 1). The Mn concentrations were similar in both soils. It is also noticeable that the concentration of micronutrients in the soil rose with increasing biosolid dose (Table 3). It is important to mention that based on NOM-021-SEMARNAT-2000, the Fe and Zn concentrations in the original soil were classified as "Deficient" and "Marginal", respectively, while Cu and Mn were at "Adequate" concentrations.

With the application of OPB to the soil, the Fe concentration after harvest was increased, inducing "Adequate" values ($> 4.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) with the 5.75 and 7.52 g doses of N·pot⁻¹; in the case of Zn, all doses of both biosolids led to "Adequate" values ($>1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) in the soil (Table 3). This highlights the advantage of using biosolids as organic fertilizer to replenish such

et al. (2013), quienes registraron promedios de 53.4 y 48.8 %, respectivamente. Al analizar la interacción fuente x dosis, solo el porcentaje de aceite mostró un efecto significativo, dado que las plantas con SA tuvieron el mayor porcentaje de aceite por efecto de la dosis mayor (7.52 g de N·maceta⁻¹), mientras que las plantas con biosólidos mostraron la mayor concentración de aceite por efecto de la dosis intermedia (5.65 g de N·maceta⁻¹), (Cuadro 2).

Concentraciones de nutrimentos en el suelo

En general, las concentraciones de los micronutrientes en el suelo después de la cosecha fueron mayores en suelos con biosólidos que en el suelo sin fertilizante y con sulfato de amonio. Los suelos con BLO tuvieron mayores concentraciones de Cu y Fe,

Table 3. Means and main effects of microelements in soil after harvest.

Cuadro 3. Medias y efectos principales de microelementos en suelo después de la cosecha.

Description/ Descripción	Dose (g of N·pot ⁻¹)/ Dosis (g de N·maceta ⁻¹)	Cu	Fe	Zn	Mn
		(mg·kg ⁻¹)			
Control/Testigo	0	0.28	0.815	0.554	3.933
Ammonium sulfate/ Sulfato de amonio	3.79	0.322	0.917	0.524	3.669
	5.65	0.335	1.177	0.585	3.663
	7.52	0.301	1.210	0.471	3.872
Oxidation pond biosolids/ Biosólidos de laguna de oxidación	3.79	0.869	4.218	3.909	4.239
	5.65	1.008	4.969	5.235	4.799
	7.52	1.078	6.412	6.549	5.122
Activated sludge biosolids/ Biosólidos de lodos activados	3.79	0.359	1.746	4.512	4.338
	5.65	0.414	2.726	6.967	4.961
	7.52	0.467	3.422	8.417	5.418
Main effects/Efectos principales					
Ammonium sulfate/Sulfato de Amonio		0.32 c	1.10 c	0.53 c	3.73 b
Oxidation pond biosolids/ Biosólidos de laguna de oxidación		0.98 a	5.20 a	5.23 b	4.72 a
Activated sludge biosolids/ Biosólidos de lodos activados		0.41 b	2.63 b	6.63 a	4.91 a
	3.79 (g of N·pot ⁻¹)/3.79 (g de N·maceta ⁻¹)	0.52 b	2.29 c	2.98 c	4.08 b
	5.65 (g of N·pot ⁻¹)/5.65 (g de N·maceta ⁻¹)	0.59 a	2.96 b	4.26 b	4.47 ab
	7.52 (g of N·pot ⁻¹)/7.52 (g de N·maceta ⁻¹)	0.62 a	3.68 a	5.15 ^a	4.80 a
	Critical value*/Valor crítico*	< 0.2	< 2.5	< 0.5	< 1.0

Different letters between rows indicate significant differences ($P < 0.05$).

*NOM-021-SEMARNAT-200

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

*NOM-021-SEMARNAT-200

nutrients in arid zone soils, which may be reflected in applications of lower amounts of micronutrients in subsequent cultivation cycles.

Plant nutrient concentrations

The micronutrient concentrations were different in the four plant organs. In the present study, Cu was concentrated to the greatest degree in root (average of 20.3 mg·kg⁻¹), then stem (9.3 mg·kg⁻¹) and finally leaf (2.3 mg·kg⁻¹). The Cu concentration in leaf was not statistically different due to the effect of the sources and doses of fertilizer (Table 4). The Cu concentrations in root and stem are greater than in leaves. These concentrations are higher due to the OPB effect than the ammonium sulfate effect, which coincides with the fact that OPB have a higher concentration of this element (Table 1).

It can also be seen that the higher the application dose, the higher the Cu concentration in the root, but not in the stem and leaf (Table 4). The scientific literature lacks sufficiency ranges for this plant species; however, Marschner (2012) mentions that, in general, 6 mg·kg⁻¹ of Cu in leaves is an average value for adequate growth of the plants. It is likely that the castor-oil plant requires a small amount of Cu and therefore limits its transport from roots and stems to the leaves. Even so, the results agree with those reported by Lavres Junior et al. (2012), who found concentrations in castor-oil plant leaves from 2.7 to 5.2 mg·kg⁻¹, when solutions with different Cu concentrations were used to grow the plants.

The root had an average Fe concentration of 1,183 mg·kg⁻¹, which was five times higher than in the leaf (230 mg·kg⁻¹) and 40 times higher than in the stem (30 mg·kg⁻¹). The Fe concentration in root was greater due to the effect of the control (Table 4), although the concentration in the soil corresponding to this treatment was the lowest (Table 3). This could be due to the fact that Fe tends to form stable organic complexes with humic substances present in biosolids (Pandey, Pandey, & Misra, 2000), which led perhaps to lower Fe availability for the castor-oil plants. The Fe concentration in leaf was not different among fertilization sources, while the 5.65 g N dose per pot was associated with the highest concentration (Table 4). Marschner (2012) indicates a foliar concentration of 100 mg·kg⁻¹ of Fe as the average value for adequate growth of plants, although there are crops with a wide sufficiency range, such as cotton whose range is from 40 to 300 mg·kg⁻¹ (Jones et al., 1991).

On average, Zn occurred at higher concentrations in the leaf than in the root and stem due to the effect of most treatments (Table 4). Applying biosolids significantly increased the Zn concentration in the three organs evaluated; the higher the application

menores concentraciones de Zn que los suelos con BLA (Cuadro 3). Las diferencias anteriores son congruentes con la composición química de los biosólidos (Cuadro 1). Las concentraciones de Mn fueron similares en ambos suelos. También resulta notorio que la concentración de los micronutrientes en el suelo se incrementó al aumentar la dosis de biosólidos (Cuadro 3). Es importante mencionar que con base en la NOM-021-SEMARNAT-2000, las concentraciones de Fe y Zn en el suelo original fueron clasificadas como “Deficiente” y “Marginal”, respectivamente; mientras que Cu y Mn estuvieron en concentraciones “Adecuadas”.

Con la aplicación de BLO al suelo, la concentración de Fe después de la cosecha se incrementó, induciendo valores “Adecuados” (> 4.5 mg·kg⁻¹) con las dosis 5.75 y 7.52 g de N·maceta⁻¹; En el caso del Zn, todas las dosis de ambos biosólidos propiciaron valores “Adecuados” (>1.0 mg·kg⁻¹) en el suelo (Cuadro 3). Lo anterior destaca la ventaja del uso de biosólidos como abono orgánico para reabastecer este tipo de nutrimentos a suelos de zonas áridas, lo cual puede reflejarse en aplicaciones de menores cantidades de micronutrientes en ciclos de cultivo posteriores.

Concentraciones de nutrimentos en la planta

Las concentraciones de micronutrientes fueron diferentes en los órganos de la planta. En el presente estudio, el Cu se concentró en mayor proporción en raíz (promedio de 20.3 mg·kg⁻¹), luego en tallo (9.3 mg·kg⁻¹) y finalmente en hoja (2.3 mg·kg⁻¹). La concentración de Cu en hoja no fue estadísticamente diferente por efecto de las fuentes y dosis de fertilizante (Cuadro 4). Las concentraciones de Cu en raíz y tallo son mayores que en hoja. Esas concentraciones son mayores por efecto de BLO que por efecto de sulfato de amonio, lo cual coincide con que los BLO tienen mayor concentración de este elemento (Cuadro 1).

También se observa que a mayor dosis de aplicación por efectos principales corresponde mayor concentración de Cu en raíz, pero no en tallo y hoja (Cuadro 4). La literatura científica carece de rangos de suficiencia para esta especie vegetal; sin embargo, Marschner (2012) menciona que, en general, 6 mg·kg⁻¹ de Cu en hojas es un valor promedio para un crecimiento adecuado de las plantas. Es probable que la higuera requiera poca cantidad de Cu y por eso limita su transporte desde raíz y tallos a las hojas. Aun así, los resultados concuerdan con lo reportado por Lavres Junior et al. (2012), quienes encontraron concentraciones en hojas de higuera de 2.7 a 5.2 mg·kg⁻¹, cuando el cultivo fue en soluciones nutritivas con diferentes concentraciones de Cu.

La raíz tuvo una concentración promedio de Fe de 1,183 mg·kg⁻¹, la cual fue cinco veces mayor que en hoja (230 mg·kg⁻¹) y 40 veces mayor que en tallo (30 mg·kg⁻¹).

Table 4. Means and orthogonal contrasts of micronutrients in the different organs of castor-oil plants fertilized with biosolids.**Cuadro 4. Medias y contrastes ortogonales de elementos menores en los diferentes órganos de higuerilla fertilizada con biosólidos.**

Description/ Descripción	Dose (g of N per pot) N (kg·ha ⁻¹)/ Dosis (g de N por maceta) N (kg·ha ⁻¹)	Cu (mg·kg ⁻¹)			Fe (mg·kg ⁻¹)			Zn (mg·kg ⁻¹)			Mn (mg·kg ⁻¹)		
		Root/ Raíz	Stem/ Tallo	Leaf/ Hoja	Root/ Raíz	Stem/ Tallo	Leaf/ Hoja	Root/ Raíz	Stem/ Tallo	Leaf/ Hoja	Root/ Raíz	Stem/ Tallo	Leaf/ Hoja
Control/Testigo	0	16.3	8.28	3.10	1379	29.7	173	38.7	20.5	50.3	61.8	4.28	97.0
Ammonium sulfate /Sulfato de amonio	3.79	14.9	10.1	1.73	1070	32.2	211	28.0	13.2	52.2	51.0	5.43	65.2
	5.65	13.2	9.60	1.73	1056	12.3	441	28.2	14.7	52.6	46.1	5.70	78.1
	7.52	14.0	7.10	1.98	1074	27.7	156	26.3	12.9	46.2	50.4	8.95	108.6
Oxidation pond biosolids/ Biosólidos de laguna de oxidación	3.79	27.2	9.05	1.75	1215	26.5	237	84.9	43.6	97.2	240.1	21.1	435.6
	5.65	24.3	13.1	2.33	1008	40.8	177	65.2	76.2	88.3	122.4	35.0	605.4
	7.52	36.2	16.1	3.13	1340	41.3	213	109.3	98.2	110.8	301.2	55.0	659.4
Activated Sludge biosolids/ Biosólidos de lodos activados	3.79	17.0	9.73	1.90	1113	27.8	213	71.3	79.7	71.5	98.6	10.7	147.3
	5.65	22.0	4.90	3.53	1275	46.0	214	87.4	124.0	92.6	158.0	27.2	223.7
	7.52	17.8	4.73	1.83	1302	14.8	265	107.0	103.5	65.9	278.0	24.4	255.2
Main effects/Efectos principales													
Ammonium sulfate/ Sulfato de Amonio		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
Oxidation Pond Biosolids/ Biosólidos de Laguna de Oxidación		25.9 a	11.6 a	2.6	1235.3 ^b	34.5	199.9	74.5 a	59.6 b	86.6 a	181.4 a	28.9 a	449.4 a
Activated Sludge Biosolids/ Biosólidos de Lodos Activados		18.2 b	6.9 b	2.6	1267.1 ^a	30.7	216.3	76.1 a	81.9 a	70.1 b	149.1 a	16.6 b	180.8 b
Control/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
3.79 (g of N-pot) ¹ / 3.79 (g de N-maceta) ¹		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
5.65 (g of N-pot) ¹ / 5.65 (g de N-maceta) ¹		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
7.52 (g of N-pot)/ 7.52 (g de N-maceta) ¹		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

Different letters between rows indicate significant differences ($p < 0.05$).

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

rate, the greater the Zn concentration in root and stem, but not in the leaves (Table 4). Lavres-Junior et al. (2012) observed that Zn was concentrated to a greater extent in root (62.3 mg·kg⁻¹) and leaf (59.2 mg·kg⁻¹). In the present study, the average concentration in leaf was 73 mg·kg⁻¹. Marschner (2012) noted that a foliar concentration of 20 mg·kg⁻¹ of Zn is adequate in plants, although cotton has a broad sufficiency range of 20 to 100 mg·kg⁻¹ of Zn (Jones et al., 1991).

La concentración de Fe en raíz fue mayor por efecto del testigo (Cuadro 4), a pesar de que la concentración en el suelo correspondiente a este tratamiento fue la menor (Cuadro 3). Esto se pudo deber a que el Fe tiende formar complejos orgánicos estables con sustancias húmicas presentes en los biosólidos (Pandey, Pandey, & Misra, 2000), lo cual conllevó quizás a menor disponibilidad del Fe para las plantas de higuerilla. La concentración de Fe en hoja no fue diferente entre fuentes de fertilización, mientras que a la dosis 5.65 g de N por

In general, the Mn concentration was on average almost twice as much in leaf ($268 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) than in root ($141 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), while the concentration in stem ($20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) was 14 times less than in leaf. The same behavior could be observed in the study carried out by Lavres-Junior et al. (2012) since the Mn was more concentrated in leaf than root and stem. The application of biosolids increased the concentration in the three organs more than the application of AS (Table 4). The higher the dose, the higher the Mn concentration in the three organs (Table 4). The Mn concentration in leaves is greater than the adequate value of $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ mentioned by Marschner (2012), although crops such as cotton have a sufficiency range of 30 to $300 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Jones et al., 1991).

Pollution risk

The United States of America standard (US-EPA, 1994) includes a cumulative maximum limit value (CMLV) per element in soils receiving biosolids. Based on this standard, when using OPB, Pb would be the first element to reach the CMLV of $300 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ in 103 years with the 100 % CNR dose. On the other hand, when using ASB, Zn would be the element that would first have the CMLV of $300 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ in 246 years.

The recommendation, then, is to apply the nutrients according to the crop's N demand and periodically analyze the accumulation of metals in the soil; however, according to the concentration of metals in the biosolids evaluated, considering the doses applied and based on the US-EPA standard, the use of these biosolids in the long term ensures some security with respect to a pollution risk.

Conclusions

Applying biosolids to soil generated a dry matter yield and oil percentage similar to those associated with chemical fertilization, so it is feasible to replace chemical fertilizers with biosolids.

The biosolids provided microelements that contributed to good development of the castor-oil plants as there were no symptoms of deficiency or toxicity. The concentrations of minor elements remaining in the soil after harvest were adequate, going from deficient and marginal levels to acceptable levels.

Acknowledgments

This work is part of the project entitled *Diagnosis and evaluation of alternatives for the management of effluents and livestock waste and creation of infrared spectroscopy libraries for rapid analysis of Biosolids*,

maceta se asoció la concentración mayor (Cuadro 4). Marschner (2012) señala una concentración foliar de $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de Fe como valor promedio para un crecimiento adecuado de las plantas, aunque hay cultivos con un rango de suficiencia amplio, como el algodón cuyo rango es de 40 a $300 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Jones et al., 1991).

En promedio, el Zn se presentó en concentraciones mayores en la hoja que en la raíz y tallo por efecto de la mayoría de los tratamientos (Cuadro 4). 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 4). Lavres-Junior et al. (2012) observaron que el Zn se concentró en mayor cantidad en raíz ($62.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y hoja ($59.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). En el presente estudio, la concentración promedio en hoja fue $73 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Marschner (2012) señaló que una concentración foliar de $20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de Zn es adecuada en plantas; aunque el algodón tiene un rango de suficiencia amplio de 20 a $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de Zn (Jones et al., 1991).

En general, la concentración de Mn fue en promedio casi el doble en hoja ($268 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) que en raíz ($141 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), mientras que la concentración en tallo ($20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) fue 14 veces menor que en la hoja. El mismo comportamiento se pudo observar en el estudio realizado por Lavres-Junior et al. (2012) ya que el Mn se concentró más en hoja que en raíz y tallo. La aplicación de biosólidos incrementó más la concentración en los tres órganos que la aplicación de SA (Cuadro 4). A mayor dosis se aprecia mayor concentración de Mn en los tres órganos (Cuadro 4). La concentración de Mn en hojas es mayor al valor adecuado de $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ que menciona Marschner (2012), aunque cultivos como algodón tienen un rango de suficiencia de 30 a $300 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Jones et al., 1991).

Riesgo de contaminación

La norma de los Estados Unidos de América (US-EPA, 1994) incluye un valor límite máximo acumulado (VLMA) por elemento en suelos que reciben biosólidos. Con base en esta norma, al utilizar BLO, el Pb sería el primer elemento en alcanzar el VLMA de $300 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en 103 años con la dosis al 100 % del RNC. Por otro lado, al usar BLA, el Zn sería el elemento que tendría primero el VLMA de $2,800 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en 246 años.

La recomendación, entonces, es 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 con la concentración

number 12294732544, funded by INIFAP-CENIDRASPA fiscal projects.

End of English version

References / Referencias

- 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. <https://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. <https://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. <https://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*, 8(5), 1781-1791. <https://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. <https://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. <https://doi.org/10.1155/2012/201462>
- Marschner, P. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed.). New York: Academic Press, Elsevier.
- Miller, R. W., & Donahue, R. L. (1995). *Soils in our environment* (Prentice H).
- de metales en los biosólidos evaluados, considerando las dosis aplicadas y con base en la norma de la US-EPA, el uso de estos biosólidos en el largo plazo garantiza cierta seguridad con respecto a un riesgo de contaminación.

Conclusiones

La aplicación de biosólidos al suelo generó un rendimiento de materia seca y porcentaje de aceite similar a los asociados a la fertilización química, por lo que es factible sustituir al fertilizante químico por biosólidos.

Los biosólidos aportaron microelementos que contribuyeron a un buen desarrollo de plantas de higuera debido a que no se observaron síntomas de deficiencia y toxicidad. Las concentraciones de elementos menores remanentes en el suelo al final del cultivo fueron adecuadas, al pasar de niveles Deficientes y Marginales a niveles adecuados.

Agradecimientos

El presente trabajo forma parte del proyecto Diagnóstico y evaluación de alternativas para el manejo de efluentes y residuos pecuarios y creación de librerías en espectroscopia de infrarrojo para análisis rápido de Biosólidos, con número 12294732544, financiado por Proyectos fiscales INIFAP-CENIDRASPA.

Fin de la versión en español

- Ozores-Hampton, M., & Peach, D. R. A. (2002). Biosolids in vegetable production systems. *HortTechnology*, 12(3), 336–340.
- Pandey, A. K., Pandey, S. D., & Misra, V. (2000). Stability constants of metal-humic acid complexes and its role in environmental detoxification. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 47, 195–200. <https://doi.org/10.1006/eesa.2000.1947>
- 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. <https://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 higuera (Ricinus communis L.) en Michoacán*. (1st ed.). Apatzingán, Michoacán, México.