

Disponibilidad de nitrógeno y rendimiento de biomasa de *Ricinus communis* L. fertilizado con biosólidos

Sandra Patricia Maciel-Torres¹
Uriel Figueroa-Viramontes²
María del Rosario Jacobo-Salcedo^{3§}
Ricardo Trejo-Calzada⁴
Aurelio Pedroza-Sandoval⁴
Rubén Carlos Encerrado-Alva⁵

¹Campo Experimental General Terán-INIFAP. Carretera Montemorelos-China km 31. General Terán, Nuevo León, México. CP. 67400. (maciel.sandra@inifap.gob.mx). ²Centro de Investigación Regional Norte Centro-INIFAP. Blvd. José Santos Valdés núm. 1200, Matamoros, Coahuila, México. CP. 27440 (figueroa.uriel@inifap.gob.mx). ³Centro Nacional de Investigación Disciplinaria RASPA-INIFAP. Margen Derecha Canal de Sacramento, Gómez Palacio, Durango, México. CP. 35140. ⁴Unidad Regional de Zonas Áridas-Universidad Autónoma Chapingo. Carretera Gómez Palacio-Chihuahua km 40, Bermejillo, Durango, México. CP. 35230. (apedroza@chapingo.uruza.edu.mx; rtrejo@chapingo.uruza.edu.mx). ⁵Facultad de Ciencias Biológicas-Universidad Juárez del Estado de Durango. Av. Universidad s/n Fraccionamiento Filadelfia, Gómez Palacio, Durango, México. CP. 35010. (saiiro.dcschoes@hotmail.com).

§Autora para correspondencia: jacobo.rosario@inifap.gob.mx.

Resumen

Un criterio para estimar la dosis de aplicación de biosólidos en suelos agrícolas es el nitrógeno disponible y el requerimiento del cultivo. El objetivo del estudio fue determinar la disponibilidad de nitrógeno de dos biosólidos generados a partir de sistemas de tratamiento diferente y su efecto sobre el rendimiento de aceite a partir de semilla de *Ricinus communis* L. Los tratamientos consistieron en tres fuentes de nitrógeno (N) y tres dosis, además de un testigo sin N. Las fuentes de N fueron: sulfato de amonio (SA), biosólidos de lagunas de oxidación (BLO) y biosólidos de lodos activados (BLA). El SA se consideró como un testigo comercial. Las dosis de N fueron de 0, 3.79, 5.65 y 7.52 g maceta⁻¹, que corresponden a 67%, 100% y 133% del requerimiento de N del cultivo (RNC), respectivamente. Se estableció el experimento en invernadero bajo un diseño experimental de bloques al azar con cuatro repeticiones, donde la unidad experimental fue una planta por maceta. La disponibilidad de nitrógeno se estimó mediante el método de equivalencia de fertilizante (EF). La materia seca (MS) fue estadísticamente similar entre los tratamientos, 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.

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

Recibido: septiembre de 2020

Aceptado: noviembre de 2020

Introducción

En México, en 2014 se contaba con un registro de 2337 plantas de tratamiento de agua residual (PTAR), lo cual permitió una cobertura nacional en el tratamiento de aguas residuales municipales de 52.7% (CONAGUA, 2014). En Gómez Palacio, Durango se cuenta con 11 PTAR de las que destacan dos por su capacidad de tratamiento, con 500 L s^{-1} mediante lodos activados y 100 L s^{-1} por lagunas de estabilización (CONAGUA, 2014). Durante estos procesos se genera un subproducto llamado lodo residual. Los lodos son sometidos a procesos de estabilización microbiológica, entre ellos se encuentran los mecánicos (secado térmico, al sol o al aire), los químicos (adición de cal o aluminio) y los biológicos (digestión anaeróbica o aeróbica) (Rigby *et al.*, 2016).

El tipo de manejo de la estabilización limita en algunos casos la disponibilidad de nutrientes (Smith *et al.*, 1998; Morris *et al.*, 2003; Pu *et al.*, 2008). En la búsqueda de reducir los efectos negativos al ambiente por la exposición a los lodos residuales, existen diversas alternativas para su disposición, desde depositarlos en rellenos sanitarios, incinerarlos o utilizarlos en la producción agrícola (Figuerola-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) fósforo (P) y potasio (K) (Kumar *et al.*, 2014). El grado de humificación de la MO y el estado de mineralización de los nutrientes incide sobre la fertilidad del suelo y el desarrollo de los cultivos (Pritchard *et al.*, 2010; Lu *et al.*, 2012).

Después de la MO, el N es el componente más abundante en los biosólidos, este elemento es también el nutriente de mayor demanda por parte de los cultivos. La mineralización del N es el proceso biológico por el que el N orgánico es transformado a las formas inorgánicas como amonio (NH_4^+), nitrato (NO_3^-) y nitrito (NO_2^-), lo que lo hace 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 los cultivos. Flores-Félix *et al.* (2014) obtuvieron un mayor rendimiento de materia seca (MS) con la aplicación de biosólidos, con respecto al uso de fertilizante sintético. Shaheen y Tsadilas (2013) reportaron que la aplicación de biosólidos aumenta la biomasa en canola. No obstante, el uso excesivo de biosólidos puede generar problemas ambientales, por ello la necesidad de hacer un uso racional de los mismos. Uno de los criterios utilizados para calcular la dosis de biosólidos a aplicar, es evaluar la cantidad de N disponible para el cultivo (NDC) (Silva *et al.*, 2013). Sin embargo, la agencia de protección ambiental de Estados Unidos de América por sus siglas en inglés (US-EPA), establece que las dosis de aplicación de biosólidos, expresadas en kg ha^{-1} de N, no debe exceder el requerimiento de N por el cultivo (RNC) (USEPA, 1994).

El NDC a partir de los biosólidos se puede estimar mediante diferentes metodologías (Mamo *et al.*, 1999; Torstensson y Aronsson, 2000; Pu *et al.*, 2008). Uno de los métodos es a partir de la equivalencia de fertilizante; ésta se calcula partiendo 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 e Ippolito, 2007).

La Higuierilla (*Ricinus communis* L.) es una especie de la familia *Euphorbiaceae* de importancia económica por su contenido de aceite. El aceite de su semilla puede alcanzar un rendimiento de hasta 64.5% (González-Chávez *et al.*, 2015).

La adaptación ecológica que tiene *R. communis* a factores bióticos como abióticos (Bauddh y Singh, 2012) la hace una especie atractiva, en particular, para zonas con baja disponibilidad de agua. Un factor importante es que el cultivo de higuierilla es industrial, y no entra en la cadena trófica, (Rajkumar y Freitas, 2008) por lo que su producción no compite en la alimentación.

Aunque es importante destacar, que en la estabilización de los lodos crudos que se utilizan para producir los biosólidos pueden afectar la disponibilidad de N y otros nutrientes la información sobre el NDC mediante el uso de biosólidos es escasa; por lo tanto, el objetivo de este estudio fue determinar la disponibilidad de N para el cultivo de Higuierilla (*Ricinus communis* L.) a base de dos tipos de biosólidos.

Materiales y métodos

Localización del área de estudio

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. El clima de esta región corresponde a BWhw, se caracteriza por ser seco o desértico y precipitación media anual de 240 mm, la temperatura media anual a la sombra es de 25 °C (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 una de ellas opera con lagunas de oxidación, en tanto que la segunda 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.

Desarrollo del experimento

El experimento se estableció en macetas de plástico de 24 L de capacidad, bajo invernadero donde se controlaron las variables climáticas necesarias. Las semillas de higuierilla utilizadas fueron variedad K 8SS, evaluada en el Campo Experimental Valle del Guadiana del INIFAP, en el estado de Durango.

Los tratamientos evaluados consistieron en tres fuentes de N y tres 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) y biosólidos de lodos activados (BLA). El SA empleado contenía 21% de nitrógeno y 24% de azufre. La caracterización nutrimental de los biosólidos se presenta en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Caracterización química de biosólidos empleados.

| Parámetro | pH | CE (dS m ⁻¹) | MO (%) | P (%) | NTK (%) | Cu (mg kg ⁻¹) | Fe (mg kg ⁻¹) | Zn (mg kg ⁻¹) | Mn (mg kg ⁻¹) |
|-----------|------|-----------------------------|-----------|-------|------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| BLO | 7.56 | 2.53 | 38.01 | 0.58 | 1.23 | 184.43 | 4269.5 | 732.26 | 283.93 |
| BLA | 7.53 | 3.65 | 56.83 | 1.6 | 2.24 | 130.6 | 3579.16 | 955.7 | 1480 |

Biosólidos de lagunas de oxidación (BLO); biosólidos de lodos activados (BLA); conductividad eléctrica (CE); materia orgánica (MO); y nitrógeno total Kjeldahl (NTK).

Las dosis de N fueron de 0, 3.79, 5.65 y 7.52 g maceta⁻¹, 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⁻¹ para cubrir 100 del RNC (Rico-Ponce *et al.*, 2011) y considerando 40% de eficiencia por tratarse de un suelo arenoso; es decir, la dosis de N al 100% del RNC fue de 200 kg ha⁻¹.

En el Cuadro 2, se anotan las cantidades de fertilizante y biosólidos aplicados por tratamiento. La siembra se realizó en invernadero en suelo húmedo a capacidad de campo (CC), se depositaron tres semillas por maceta y al alcanzar 20 a 25 cm se dejó una planta por maceta. El suelo empleado en el presente trabajo presentó textura areno-francosa, un N inorgánico de 49.18 mg kg⁻¹, pH de 8.74 y conductividad eléctrica (CE) de 0.66 dS m⁻¹. La cosecha se realizó a los 113 días después de la siembra.

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

| Fuente de N | Concentración de N (%) | Nitrógeno (g maceta ⁻¹) | | |
|-------------|---------------------------|-------------------------------------|-------|-------|
| | | 3.79 | 5.65 | 7.52 |
| SA | 20.5 | 18.5 | 27.6 | 36.7 |
| BLO | 1.23 | 308 | 459.7 | 611.5 |
| BLA | 2.25 | 168.4 | 251.3 | 334.3 |

Los tratamientos se arreglaron en un diseño experimental de bloques al azar con cuatro repeticiones. El factor de bloqueo fue la luminosidad, debido a que un edificio adjunto al invernadero lograba sombrear el mismo durante una parte del día. La unidad experimental fue una maceta.

Variables evaluadas

Las plantas se fraccionaron en los diferentes órganos: raíz, tallo, hoja y semilla, los cuales se lavaron con agua destilada para eliminar posibles contaminantes. Posteriormente, los tejidos vegetales se dejaron secar al aire y finalmente en estufa de aire forzado a 65 °C, hasta llegar a peso constante para estimar la materia seca (MS) total.

La evaluación de la concentración de N total en los diferentes órganos se realizó por el método de combustión (TruSpec CHN, LECO) a partir de la molienda a un tamiz de 1 mm (molino Thomas Wiley, modelo Mini-Mill, con tamiz integrado). 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 Motavalli *et al.* (1989); Cusick *et al.* (2006); Barbarick e Ippolito (2007). 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 g maceta⁻¹); luego se calculó 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.

Análisis de datos

Los datos fueron analizados con el paquete estadístico SAS University Edition, mediante la prueba de Anova y contrastes ortogonales, para definir la comparación de medias entre fuentes de nitrógeno.

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).

Cuadro 3. Medias y contrastes ortogonales, de materia seca, en los diferentes órganos de higuerilla (*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 N (g maceta ⁻¹) | Materia seca (g planta ⁻¹) | | | | |
|-------------|-----------------------------------|--|-------|-------|---------|-------|
| | | Raíz | Tallo | Hoja | Semilla | Total |
| Testigo | 0 | 2.21 | 5.04 | 8.62 | 6.07 | 21.9 |
| SA | 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 |
| | Media | 5.07 | 8.36 | 15.5 | 10.2 | 39.1 |
| CV | | 16.38 | 13.31 | 14.66 | 27.79 | 3.36 |
| BLO | 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 |
| | Media | 3.57 | 6.6 | 15.3 | 9.65 | 35.1 |
| CV | | 11.11 | 5.21 | 12.51 | 4.08 | 6.62 |
| BLA | 3.79 | 4.23 | 8.7 | 12.5 | 9.82 | 35.2 |
| | 5.65 | 4.16 | 8.39 | 15.7 | 10.7 | 39 |
| | 7.52 | 4.47 | 7.36 | 14.1 | 11.6 | 37.5 |
| | Media | | | | | |

| Descripción | Dosis N (g maceta ⁻¹) | Materia seca (g planta ⁻¹) | | | | |
|------------------|-----------------------------------|--|-------|-------|---------|-------|
| | | Raíz | Tallo | Hoja | Semilla | Total |
| Media | | 4.29 | 8.15 | 14.1 | 10.7 | 37.2 |
| CV | | 3.79 | 8.63 | 11.47 | 8.25 | 5.06 |
| Testigo vs resto | | * | * | * | * | ** |
| SA vs BLO+BLA | | ns | ns | ns | ns | ns |
| SA vs BLO | | * | ns | ns | ns | ns |
| SA vs BLA | | ns | ns | ns | ns | ns |
| BLO vs BLA | | ns | ns | ns | ns | ns |

ns= diferencia no significativa; * = $p \leq 0.05$; ** = $p \leq 0.01$).

El mayor porcentaje de MS con base en los diferentes órganos de la planta corresponde a las hojas, con una variación de 33 a 45%, seguido por la semilla (de 19 a 32%), siendo la raíz el órgano con una menor proporción de MS (9.5-15%) (Figura 1).

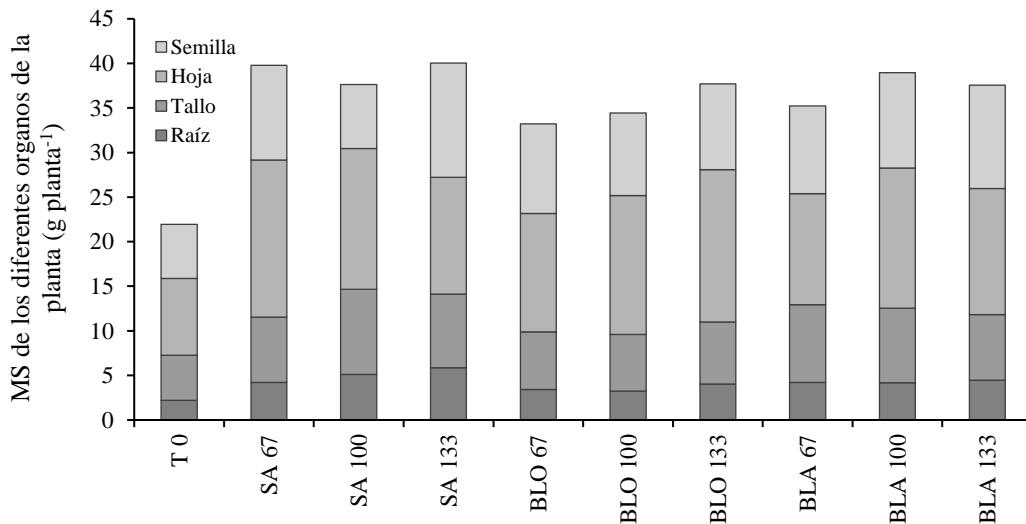


Figura 1. Materia seca de los diferentes órganos de higuera, en los diferentes tratamientos con sulfato de amonio (SA), biosólidos de lagunas de oxidación (BLO) y biosólidos de lodos activados (BLA) a diferentes dosis (0, 67, 100 y 133% del requerimiento de N del cultivo).

Se observó un comportamiento cuadrático del rendimiento de MS a las dosis de SA ($R^2= 0.60$), de los BLA ($R^2= 0.7$) 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 (VM) de MS, mediante la fórmula: $VM= b/2a$. A una dosis de N de SA de 6.13 g maceta⁻¹ se obtuvo un valor máximo de MS de 40.1 g planta⁻¹, mientras que el valor máximo de MS (38.9 g planta⁻¹) en los BLA se obtuvo a una dosis de N de 7.29 g maceta⁻¹. Por otra parte, se tendría que aplicar una dosis de N de los BLO de 9.57 g maceta⁻¹ para obtener 38.1 g planta⁻¹ de MS (Figura 2).

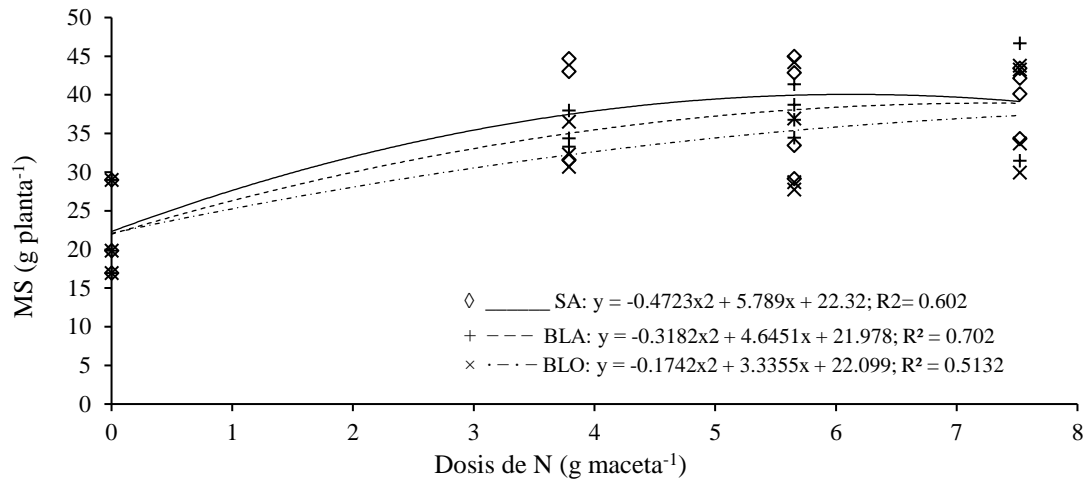


Figura 2. Respuesta de la materia seca total (MS) a dosis de sulfato de amonio (SA) y biosólidos de lodos activados (BLA) y biosólidos de lagunas de oxidación (BLO).

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).

Cuadro 4. Medias y contrastes ortogonales, nitrógeno (N) y nitrógeno extraído en los diferentes órganos de higuera en respuesta a los diferentes tratamientos.

| Descripción | Dosis N (g maceta ⁻¹) | Concentración de N | | | | N extraído | | | | |
|-------------|--------------------------------------|--------------------|-------|------|---------|---------------------------|-------|-------|---------|-------|
| | | Raíz | Tallo | Hoja | Semilla | Raíz | Tallo | Hoja | Semilla | Total |
| | | % (MS) | | | | (g planta ⁻¹) | | | | |
| Testigo | 0 | 1.19 | 0.42 | 1.51 | 2.67 | 0.03 | 0.02 | 0.13 | 0.16 | 0.33 |
| SA | 3.79 | 1.77 | 1.74 | 2.81 | 4.03 | 0.07 | 0.13 | 0.49 | 0.43 | 1.12 |
| | 5.65 | 1.9 | 1.98 | 2.9 | 3.87 | 0.1 | 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 |
| | Media | | 1.83 | 1.9 | 2.88 | 3.89 | 0.09 | 0.16 | 0.44 | 0.4 |
| CV | | 7.17 | 2.42 | 3.11 | 3.11 | 22.3 | 19.86 | 11.67 | 26.51 | 5.08 |
| BLO | 3.79 | 1.52 | 0.6 | 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 | 1.9 | 4 | 0.06 | 0.08 | 0.32 | 0.39 | 0.86 |
| | Media | | 1.56 | 0.92 | 1.84 | 3.74 | 0.05 | 0.06 | 0.28 | 0.36 |
| CV | | 2.26 | 30.96 | 9.63 | 9.06 | 10.83 | 33.55 | 20.04 | 7.64 | 14.65 |
| BLA | 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 | 1.6 | 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 |
| | Media | | 1.56 | 0.92 | 1.84 | 3.74 | 0.05 | 0.06 | 0.28 | 0.36 |
| CV | | 2.26 | 30.96 | 9.63 | 9.06 | 10.83 | 33.55 | 20.04 | 7.64 | 14.65 |

| Descripción | Dosis N (g maceta ⁻¹) | Concentración de N | | | | N extraído | | | | |
|------------------|--------------------------------------|--------------------|-------|-------|---------|---------------------------|-------|-------|---------|-------|
| | | Raíz | Tallo | Hoja | Semilla | Raíz | Tallo | Hoja | Semilla | Total |
| | | % (MS) | | | | (g planta ⁻¹) | | | | |
| Media | | 1.5 | 0.85 | 1.76 | 4.08 | 0.07 | 0.07 | 0.24 | 0.44 | 0.81 |
| CV | | 7.92 | 22.67 | 12.94 | 9.07 | 8.66 | 11.84 | 13.74 | 15.61 | 14.56 |
| Testigo vs resto | | * | ** | ** | ** | * | * | ** | * | ** |
| SA vs BLO+BLA | | * | ** | ** | ns | * | ** | ** | ns | ** |
| SA vs BLO | | * | ** | ** | ns | * | ** | ** | ns | ** |
| SA vs BLA | | ns | ** | ** | ns | * | ** | ** | ns | ** |
| BLO vs BLA | | ns | ns | ns | * | ns | ns | ns | ns | ns |

ns= diferencias no significativas; * = $p \leq 0.05$ y ** = $p \leq 0.001$; SA= sulfato de amonio; BLO= biosólidos de lagunas de oxidación; BLA= biosólidos de lodos activados; CV= coeficiente de variación.

El nitrógeno extraído total por la higuierilla mostró una diferencia significativa entre testigo y los tratamientos, así como entre el SA y ambos biosólidos ($p < 0.01$); sin embargo, entre tipos de biosólidos no fue estadísticamente diferente de acuerdo con el análisis de contrastes ortogonales (Cuadro 2). En forma general, la mayor cantidad de nitrógeno se encontró en la semilla de los tratamientos evaluados (Figura 3).

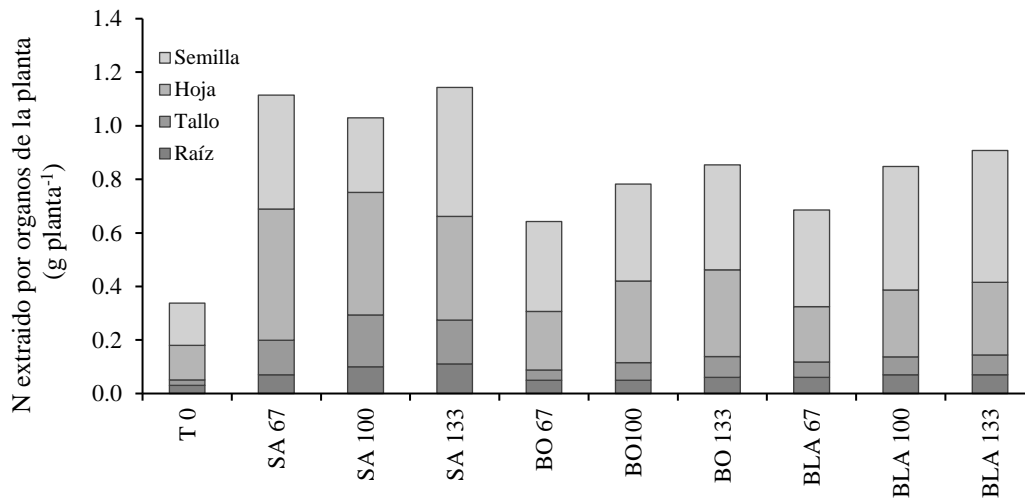


Figura 3. Distribución de N extraído en los diferentes órganos de Higuierilla (*Ricinus communis* L.) en los diferentes tratamientos con sulfato de amonio (SA), biosólidos de lagunas de oxidación (BLO) y biosólidos de lodos activados (BLA) a diferentes dosis (0, 67, 100 y 133% del requerimiento de N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

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.

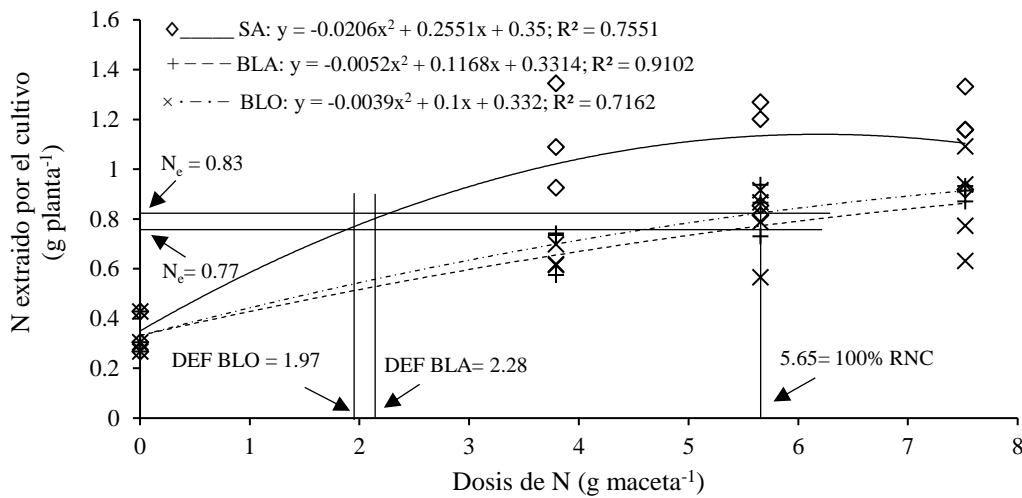


Figura 4. Nitrógeno extraído (N_e) por el cultivo de Higuierilla (*Ricinus communis* L.) y dosis equivalente de fertilizante (DEF) de biosólidos de lagunas de oxidación (BLO) y biosólidos de lodos activados (BLA).

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 de 26.4%. Estos 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 sin fertilizar, al utilizar BLO, BLA y SA, respectivamente. Resultados similares fueron registrados en el trabajo de Reddy y Matcha (2010), en dosis alta de fertilización. 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 $40.1 \text{ g planta}^{-1}$ se obtuvo con $7.29 \text{ g maceta}^{-1}$ de N, mientras que con BLA y BLO la dosis requerida para obtener el máximo rendimiento fue de 7.29 y $9.57 \text{ g planta}^{-1}$, 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 90 a 95% del rendimiento relativo máximo.

El N es el principal nutriente para la producción de semillas y forraje (Mengel *et al.*, 2006). Con respecto a la extracción de N por la higuierilla, 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 *et al.*, 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 ($K Al(SO_4)_2 12H_2O$) 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 de biosólidos provenientes de lagunas se presentó en un rango de 8 a 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 NDC 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; 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 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 SA, la materia seca fue similar entre las fuentes de N, lo cual indica que es posible sustituir el fertilizante químico por los biosólidos.

Agradecimientos

Se agradece a las plantas de tratamiento de agua residual de la ciudad de Gómez Palacio Durango por facilitar los biosólidos empleados en esta investigación y a su personal por la ayuda brindada.

Literatura citada

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

- Cogger, C. G.; Bary, A. I.; Sullivan, D. M. and Myhre, E. A. 2004. Biosolids processing effects on first- and second-year available nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68(1):162-167. <http://doi.org/10.2136/sssaj2004.1620>.
- CONAGUA. 2014. Comisión Nacional del Agua. Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. México, DF.
- Cusick, P. R.; Kelling, K. A.; Powell, J. M. and Muñoz, G. R. 2006. Estimates of residual dairy manure nitrogen availability using various techniques. *J. Environ. 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. and 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. Rev. Cienc. Tecnol. de La UACJ.* 8(1):35-43. <http://bva.colech.edu.mx/xmlui/bitstream/handle/1/1482/rs014.pdf?sequence=1>.
- Flores-Félix, E.; Moreno-Casillas, H.; Figueroa-Viramontes, U. and Potisek-Talavera, M. d. C. 2014. Disponibilidad de nitrógeno y desarrollo de avena forrajera (*Avena sativa* L.) con aplicación de biosólidos. *Terra Latinoam.* 32(2):99-105.
- González-Chávez, M. C. A.; Ruiz Olivares, A.; Carrillo-González, R. and Ríos-Leal, E. 2015. Crude oil and bioproducts of castor bean (*Ricinus communis* L.) plants established naturally on metal mine tailings. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 12(7):2263-2272. <http://doi.org/10.1007/s13762-014-0622-z>.
- González-Torres, A.; Figueroa-Viramontes, U.; Delgado, J. A.; Núñez-Hernández, G.; Cueto-Wong, J. A.; Preciado-Rangel, P. and Palomo-Gil, A. 2009. SPAD-502 calibration to evaluate nitrogen requirements in forage corn. *Terra Latinoam.* 27(4):303-309.
- Kumar, K.; Hundal, L. S.; Cox, A. E. and Granato, T. 2014. Nitrogen mineralization from anaerobically digested centrifuge cake and aged air-dried biosolids. *Water Environ. Res.* 86(9):828-834. <http://doi.org/10.2175/106143014X14062131177872>.
- López-Calderón, M. J.; Figueroa-Viramontes, U.; Fortis-Hernandez, G.; Ochoa-Martinez, E. and Sánchez-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*). *Bot. Exp. Int.* 84(1):8-13.
- Lu, Q.; He, Z. L. and Stoffella, P. J. 2012. Land application of biosolids in the USA: a review. *Appl. Environ. Soil Sci.* 1(esp 1):1-11. <http://doi.org/10.1155/2012/201462>.
- Maciel-Torres, S. P.; Jacobo-salcedo, M. R.; Figueroa-viramontes, U.; Pedroza-sandoval, A.; Trejo, R. and López-romero, L. L. 2015. Caracterización de biosólidos para su aprovechamiento agrícola. *Agrofaz.* 15(2):49-58.
- Mamo, M.; Rosen, C. J. and Halbach, T. R. 1999. Nitrogen availability and leaching from soil amended with municipal solid waste compost. *J. Environ. Quality.* 28(4):1074-1082. <http://doi.org/10.2134/jeq1999.00472425002800040003x>.
- Mengel, K.; Hütsch, B. and Kane, Y. 2006. Nitrogen fertilizer application rates on cereal crops according to available mineral and organic soil nitrogen. *Eur. J. Agron.* 24(4):343-348. <http://doi.org/10.1016/j.eja.2005.12.001>.
- Morris, R.; Smith, S. R.; Bellett-Travers, D. M. and 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. and Converse, J. 1989. First-year nutrient availability from injected dairy manure. *J. Environ. Quality.* 18(2):180-185.

- Pritchard, D. L.; Penney, N.; McLaughlin, M. J.; Rigby, H. and Schwarz, K. 2010. Land application of sewage sludge (biosolids) in Australia: risks to the environment and food crops. *Water Sci. Technol.* 62(1):48-57. <http://doi.org/10.2166/wst.2010.274>.
- Pu, C.; Bell, M.; Barry, G. and Want, P. 2008. Fate of applied biosolids nitrogen in a cut and remove forage system on an alluvial clay loam soil. *Soil Res.* 46(8):703-709. <http://doi.org/10.1071/SR08127>.
- Reddy, K. R. and 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. and Zamarripa-Colmenero, A. 2011. Guía para cultivar higuerilla (*Ricinus communis* L.) en Michoacán. Technical Brochure. 1-43 p.
- Rigby, H.; Clarke, B. O.; Pritchard, D. L.; Meehan, B.; Beshah, F.; Smith, S. R. and 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. *Sci. Total Environ.* 541(1):1310-1338. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.089>.
- Rigby, H.; Pritchard, D.; Collins, D.; Walton, K.; Allen, D. and Penney, N. 2010. Improving guidelines for the plant available nitrogen value of biosolids from wastewater treatment. *J. Residuals Sci. Technol.* 7(1):13-19.
- Santamaría-César, J.; Reta-Sánchez, D.; Chávez-González, J. F. J.; Cueto-Wong, J. A. and Romero-Paredes, R. J. I. 2006. Caracterización del medio físico en relación a cultivos forrajeros alternativos para la Comarca Lagunera. INIFAP-CIRNOC-CELALA. Matamoros, Coah., México. Primera (Ed.). Libro técnico núm. 2. 35-37 pp.
- Shaheen, S. M. and 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. and Mosquera, J. 2013. Evaluación de la mineralización de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb.* 17(4):434-442. <http://doi.org/10.1590/S1415-43662013000400012>.
- Smith, S. R.; Woods, V. and Evans, T. D. 1998. Nitrate dynamics in biosolids-treated soils. I. Influence of biosolids type and soil type. *Bio. Technol.* 66(2):39-149.
- Torstensson, G., and Aronsson, H. 2000. Nitrogen leaching and crop availability in manured catch crop systems in Sweden. *Nutr. Cycling Agroecosys.* 56(2):139-152. <http://doi.org/10.1023/A:1009821519042>.
- USEPA. 1994. United States Environmental, and Agency Protection. Land application of sewage sludge: a guide for land appliers on the requirements of the federal standards for the use or disposal of sewage sludge, 40 CFR Part 503. Office of Enforcement and Compliance Assurance. Washington, DC. 62 p.
- Varvel, G. E.; Wilhelm, W. W.; Shanahan, J. F. and Schepers, J. S. 2007. An algorithm for corn nitrogen recommendations using a chlorophyll meter based sufficiency index. *Agron. J.* 99(3):701-706. <http://doi.org/10.2134/agronj2006.0190>.