



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO



DINÁMICA DE NANO-FERTILIZANTES EN LA PRODUCCIÓN
DE CULTIVOS HORTÍCOLAS

Por:

Mauricio Jesús Romero Méndez

Tesis profesional presentada como requisito parcial para obtener el grado de
Doctor en Ciencias Agropecuarias

Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P.

Noviembre de 2018



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO



DINÁMICA DE NANO-FERTILIZANTES EN LA PRODUCCIÓN DE CULTIVOS
HORTÍCOLAS

Por:

Mauricio Jesús Romero Méndez

Tesis profesional presentada como requisito parcial para obtener el grado de
Doctor en Ciencias Agropecuarias

Director de Tesis

Dr. Ángel Natanael Rojas Velázquez

Asesores

Dr. José Luis Lara Mireles

Dr. José Luis Woo Reza

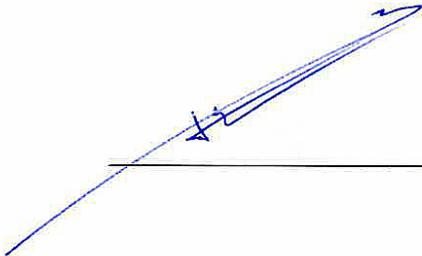
Dr. Jorge Alonso Alcalá Jáuregui

El trabajo titulado "Dinámica de nano-fertilizantes en la producción de cultivos hortícolas" fue realizado por: Mauricio Jesús Romero Méndez como requisito parcial para obtener el grado de "Doctor en Ciencias Agropecuarias" y fue revisado y aprobado por el suscrito Comité de Tesis.

Dr. Ángel Natanael Rojas Velázquez
Director



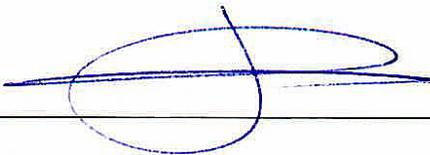
Dr. José Luis Lara Mireles
Asesor



Dr. José Luis Woo Reza
Asesor



Dr. Jorge Alonso Alcalá Jáuregui
Asesor



Ejido Palma de la Cruz, Municipio de Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P., a los 26 días del mes de noviembre de 2018.

DEDICATORIA

A la memoria de mis Padres.

A mi esposa y mis hijas, por su apoyo y estímulo para alcanzar este objetivo.

A mis hermanas y hermanos.

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por haberme recibido en sus aulas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme otorgado la beca número 58718, sin la cual no habría sido posible alcanzar este grado.

Al Dr. Ángel Natanael Rojas Velázquez, Director de Tesis, por sus consejos y su esfuerzo y dedicación en el asesoramiento del presente trabajo.

A los Doctores José Luis Lara Mireles, José Luis Woo Reza y Jorge Alonso Alcalá Jáuregui por su apoyo.

A los directivos y personal del Centro de Investigación y Estudios de Posgrado de la Facultad de Agronomía y Veterinaria, por las facilidades prestadas.

CONTENIDO

	Página
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
CONTENIDO	v
ÍNDICE DE CUADROS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	x
SUMMARY	xi
INTRODUCCIÓN	1
Hipótesis.....	2
Objetivos	2
Literatura Citada.....	2
CAPÍTULO I. EFECTO DE UN FERTILIZANTE NITROGENADO A BASE DE BENTONITA MODIFICADA Y TENSOACTIVO HDTMA EN EL CRECIMIENTO DE LECHUGA (<i>Lactuca sativa</i> L.) HIDROPÓNICA	4
Resumen.....	5
Summary	5
Introducción	6
Materiales y Métodos	8
Resultados y Discusión	11
Conclusiones	21
Literatura Citada.....	21
CAPÍTULO II. COMPORTAMIENTO DE UN POTENCIAL FERTILIZANTE DE LIBERACIÓN LENTA A BASE DE ÓRGANOBENTONITA FOSFATO EN EL CULTIVO DE LECHUGA.....	26
Resumen.....	26
Summary	27
Introducción	27
Materiales y Métodos	29
Resultados y Discusión	32

Conclusiones	36
Literatura Citada.....	37
CAPÍTULO III. CONCLUSIÓN GENERAL.....	41

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
CAPÍTULO I.	
1 Características de las hojas de lechuga de los tratamientos con OBN/Fertilizante en solución Steiner, para evaluar el efecto de un fertilizante nitrogenado a base de bentonita modificada en el crecimiento de lechuga hidropónica.....	13

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
CAPÍTULO I	
1. Consumo de agua durante el período de contacto de los tratamientos con OBN/Fertilizante en solución Steiner, para determinar el efecto de un fertilizante nitrogenado a base de bentonita modificada y tensioactivo HDTMA en el crecimiento de lechuga hidropónica. Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).....	12
2. Hojas (A) y raíces (B) de plantas de lechuga de los tratamientos con OBN/Fertilizante en solución Steiner, para evaluar el efecto de un fertilizante nitrogenado a base de bentonita modificada y tensioactivo HDTMA en el crecimiento de lechuga hidropónica.....	14
3. Peso seco (A); clorofilas: total (B), a (C) y b (D) en hojas interiores y exteriores de los tratamientos con OBN/Fertilizante en solución Steiner, para evaluar el efecto de un fertilizante nitrogenado a base de bentonita modificada en el crecimiento de lechuga hidropónica. Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).....	16
4. Comportamiento de la solución nutritiva al final del experimento: A) Conductividad eléctrica, B) Contenido de nitratos de los tratamientos con OBN/Fertilizante en solución Steiner, para evaluar el efecto de un fertilizante nitrogenado a base de bentonita modificada en el crecimiento de lechuga hidropónica. Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).....	18
5. Efecto de la concentración de HDTMA en la solución nutritiva en: A) Consumo de agua, B) Conductividad eléctrica, C) Contenido de NO_3^- en relación al valor inicial en los tratamientos para determinar el efecto del surfactante en el crecimiento de lechuga hidropónica. Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).....	20
6. Efecto de la concentración de HDTMA en la solución nutritiva en las plantas de lechuga.....	21

CAPÍTULO II

- 1 Comportamiento del contenido de fósforo aplicado con órganobentonita fosfatada (OBP)/Fertilizante en solución Steiner (FSS) en agua desionizada sin plantas. Letras distintas en los tratamientos con OBP indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$)..... 32
- 2 Consumo de fósforo por las plantas durante el experimento de los tratamientos con Órganobentonita fosfatada (OBP)/Fertilizante en solución Steiner, para determinar el efecto de un fertilizante fosfatado de órganobentonita en el crecimiento de lechuga hidropónica. Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$)..... 33
- 3 Concentración de fósforo total en hojas de los tratamientos con órganobentonita fosfatada (OBP)/Fertilizante en solución Steiner, para determinar el efecto de un fertilizante fosfatado de órganobentonita en el crecimiento de lechuga hidropónica. Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$)..... 34
- 4 Biomasa seca de hojas, raíz y total (A) y área foliar (B) de los tratamientos con órganobentonita fosfatada (OBP)/Fertilizante en solución Steiner (FSS), para determinar el efecto de un fertilizante fosfatado de órganobentonita en el crecimiento de lechuga hidropónica. Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$)..... 36
- 5 Consumo de agua durante el experimento de los tratamientos con órganobentonita fosfatada (OBP)/Fertilizante en solución Steiner (FSS), para determinar el efecto de un fertilizante fosfatado de órganobentonita en el crecimiento de lechuga hidropónica. Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$)..... 36

RESUMEN

La nanotecnología ofrece una gran oportunidad para mejorar la eficiencia de uso de los fertilizantes, reducir las pérdidas de nutrientes y minimizar los impactos ambientales adversos. Se ha investigado la factibilidad del uso de materiales naturales, abundantes y económicos, como las arcillas, para preparar nanomateriales con propiedades de liberación lenta de nutrientes. La hipótesis del presente trabajo fue que las formulaciones de nano-fertilizantes de N y P pueden liberar en forma lenta y sostenida el contenido de estos nutrientes a lo largo del ciclo de cultivo de las plantas y, por lo tanto, mejorar la eficiencia de uso de los fertilizantes. Los objetivos fueron: preparar y evaluar nanomateriales fertilizantes de N y P a base de bentonita modificada con un tensioactivo, y su efecto en el crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en un cultivo hidropónico. En el presente trabajo se preparó una órganobentonita (OB) por modificación de una bentonita natural con el tensioactivo bromuro de hexadeciltrimetilamonio (HDTMA), para servir como adsorbente de aniones nitrato y fosfato en solución acuosa, con la que se prepararon dos potenciales nanomateriales fertilizantes de liberación lenta de N y P. En un primer experimento se evaluó el efecto del fertilizante OB-nitrato (OBN) y del HDTMA en el crecimiento de plantas de lechuga; se concluyó que la OB puede usarse como adsorbente de elementos minerales y como fertilizante, pues liberó cantidades significativas de NO_3^- en la solución nutritiva, sin embargo, el HDTMA oscureció la raíz de las lechugas y afectó la absorción de agua y nutrimentos por lo que, para reducir la fitotoxicidad y eliminar los efectos negativos en el crecimiento, es necesario investigar el uso de otros tensioactivos. En un segundo experimento se estudió el comportamiento del potencial fertilizante OB-fosfato (OBP) y su efecto en el crecimiento de plantas de lechuga; el consumo de P por las plantas fue mayor en los tratamientos con más fertilizante soluble debido a que la OBP liberó P lentamente; se concluyó que la OB puede adsorber P y posteriormente liberarlo gradualmente sin que se presentaran efectos adversos por toxicidad del HDTMA, lo que indica que puede ser utilizado como fertilizante de liberación lenta.

SUMMARY

Nanotechnology offers a great opportunity to improve the efficiency of fertilizer use, reduce nutrient losses and minimize adverse environmental impacts. The feasibility of the use of natural, abundant and economic materials, such as clays, to prepare nanomaterials with slow release properties of nutrients has been investigated. The hypothesis of the present work was that N and P nano-fertilizer formulations can release in a slow and sustained way the content of these nutrients throughout the crop cycle of the plants and, therefore, improve the efficiency of use of fertilizers. The objectives were: to prepare and evaluate fertilizer nanomaterials of N and P based on bentonite modified with a surfactant, and its effect on the growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in a hydroponic culture. In the present work an organobentonite (OB) was prepared by modification of a natural bentonite with the surfactant hexadecyltrimethylammonium bromide (HDTMA), to serve as adsorbent of nitrate and phosphate anions in aqueous solution, with which two potential slow release fertilizers nanomaterials of N and P were prepared. In a first experiment, the effect of OB-nitrate fertilizer (OBN) and HDTMA on the growth of lettuce plants was evaluated; It was concluded that the OB can be used as an adsorbent of mineral elements and as a fertilizer, since it released significant quantities of NO_3^- in the nutritive solution, however, the HDTMA obscured the root of the lettuces and affected the absorption of water and nutrients, so that, to reduce phytotoxicity and eliminate the negative effects on growth, it is necessary to investigate the use of other surfactants. In a second experiment the behavior of the potential fertilizer OB-phosphate (OBP) and its effect on the growth of lettuce plants was studied; the consumption of P by the plants was greater in the treatments with more soluble fertilizer because the OBP released P slowly; it was concluded that the OB can adsorb P and later release it gradually without adverse effects due to toxicity of the HDTMA, which indicates that it can be used as a slow release fertilizer.

INTRODUCCIÓN

Según la FAO (2017) se espera que la población mundial crezca a casi 10 mil millones para el año 2050 impulsando la demanda de productos agrícolas en un 50 por ciento en comparación con el 2013. La utilización de fertilizantes es requerida en todos los sistemas de producción agrícola a largo plazo para mantener e incrementar los rendimientos de los cultivos (Salgado y Núñez, 2010). Una evaluación de estudios de largo plazo ha demostrado que el porcentaje promedio de rendimiento de los cultivos atribuible a los fertilizantes generalmente oscila entre 40 y 60 % en climas templados y tiende a ser mucho más alto en los trópicos (Stewart y Roberts, 2012). Dadas las limitadas tierras cultivables adicionales y los escasos recursos de agua en el mundo, un aumento significativo en la aplicación de fertilizantes agrícolas es necesario para lograr el aumento requerido en la producción mundial de alimentos (Naderi y Danesh-Shahraki, 2013). Sin embargo, las aplicaciones de diversos fertilizantes convencionales a altas tasas y durante un largo período en el sector agrícola han causado serios problemas ambientales a nivel mundial (Cameron *et al.*, 2012).

En el contexto de la agricultura sostenible, la aplicación de la nanotecnología, el área de investigación que estudia, diseña, fabrica y utiliza para alguna aplicación práctica materiales en la escala de 1 a 100 nm (Takeuchi y Mora, 2011), se considera uno de los enfoques más prometedores para aumentar significativamente la producción de cultivos y alimentar a la población mundial en rápido crecimiento. La nanotecnología ofrece una gran oportunidad para mejorar la eficiencia de uso de los fertilizantes a través de la liberación lenta de fertilizantes, que implica una mejor sincronización entre la disponibilidad de nutrientes y las necesidades de estos por las plantas (De Rosa *et al.*, 2010). En comparación con los fertilizantes convencionales, se espera que los nanofertilizantes permitan mejorar significativamente el crecimiento y el rendimiento de los cultivos; aumentar la eficiencia del uso de fertilizantes; reducir las pérdidas de nutrientes; y/o minimizar los impactos ambientales adversos (Liu y Lal, 2015).

Dentro de las categorías de nanofertilizantes se incluyen materiales nanoporosos (Mastronardi *et al.*, 2015) como las zeolitas y las arcillas, minerales naturales que pueden

ser utilizados para la liberación lenta de nutrientes (Chinnamuthu y Boopathi, 2009; De Campos Bernardi *et al.*, 2014; Naderi y Danesh-Shahraki, 2013).

Minerales de arcilla modificados a través de diferentes procesos para alterar su carga y sus propiedades superficiales con diferentes propósitos, como las órganoarcillas, son viables para ser utilizados para adsorber aniones como el nitrato y el fosfato y como materiales fertilizantes de liberación lenta de estos nutrientes (Basak *et al.*, 2012). Con base en lo anterior, se plantearon las siguientes hipótesis y objetivos:

Hipótesis

Las formulaciones de nano-fertilizantes de nitrógeno y fósforo pueden liberar en forma lenta y sostenida el contenido de estos nutrientes a lo largo del ciclo de cultivo de las plantas y, por lo tanto, pueden mejorar la eficiencia de uso de los fertilizantes.

Objetivos

1. Preparar y evaluar nanomateriales fertilizantes de nitrógeno y fósforo a base de bentonita modificada con un tensioactivo y su efecto en el crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en un cultivo hidropónico.

Literatura Citada

- Basak, B., S. Pal and S. Datta. 2012. Use of modified clays for retention and supply of water and nutrients. *Current Science*, 102(10): 1272-1278.
- Cameron, K.C., H.J. Di and J.L. Moir. 2012. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. *Annals of Applied Biology*, 162:145-173.
- Chinnamuthu, C. R., and P. M. Boopathi. 2009. Nanotechnology and agroecosystem. *Madras Agricultural Journal*, 96(1-6): 17-31.
- De Campos Bernardi, A. C., J. C. Polidoro, M. B. Monte, E. I. Pereira and C. R. de Oliveira. 2014. The use of clay minerals to improve nitrogen fertilizer efficiency. *World Fertilizer Congress*, Vol. 16, p. 24.

- De Rosa, M. C., C. Monreal, M. Schnitzer, R. Walsh. and Y. Sultan. 2010. Nanotechnology in fertilizers. *Nature Nanotechnol.* 5: 91.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2017. The future of food and agriculture - Trends and challenges. Rome. pp. 11-16.
- Liu, R. and R. Lal. 2015. Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of the Total Environment*, 514: 131-139.
- Mastronardi, E., P. Tsae, X. Zhang, C. Monreal and M. C. DeRosa. 2015. Strategic Role of Nanotechnology in Fertilizers: Potential and Limitations. *In: Rai M., C. Ribeiro, Mattoso L. and N. Duran (eds) Nanotechnologies in Food and Agriculture.* Springer International Publishing. Switzerland. pp. 25-67
- Naderi, M. R. and A. Danesh-Shahraki. 2013. Nanofertilizers and their roles in sustainable agriculture. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences.* 5 (19): 2229-2232.
- Salgado, E. R. y R. Núñez E. 2010. Importancia de los fertilizantes. *In: Manejo de Fertilizantes Químicos y Orgánicos.* Salgado, G. S. y R. Núñez E. coordinadores. Colegio de Posgraduados. Ed. Mundiprensa. México. pp. 1-4.
- Stewart, W. M. and T. L. Roberts. 2012. Food security and the role of fertilizer in supporting it. *Procedia Engineering*, 46: 76-82.
- Takeuchi, N. y M. E. Mora Ramos. 2011. Divulgación y formación en nanotecnología en México. *Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología*, 4(2): 59-64.

CAPÍTULO I.

**EFFECTO DE UN FERTILIZANTE NITROGENADO A BASE DE BENTONITA
MODIFICADA Y TENSOACTIVO HDTMA EN EL CRECIMIENTO DE
LECHUGA (*Lactuca sativa* L.) HIDROPÓNICA**

**EFFECT OF A NITROGEN FERTILIZER BASED ON MODIFIED
BENTONITE AND SURFACTANT HDTMA ON THE GROWTH OF
HYDROPONIC LETTUCE (*Lactuca sativa* L.)**



Editorial del Colegio de Postgraduados

24 de octubre de 2018

DR. ÁNGEL NATANAEL ROJAS VELÁZQUEZ
Angel.rojas@uaslp.mx

Por este conducto informo a usted que la contribución con clave: 18-349, intitulada: **EFFECTO DE UN FERTILIZANTE NITROGENADO A BASE DE BENTONITA MODIFICADA Y TENSOACTIVO HDTMA EN EL CRECIMIENTO DE LECHUGA HIDROPÓNICA**, cuyos autores son: Mauricio Jesús Romero-Méndez, Ángel Natanael Rojas-Velázquez, José Luis Lara Mireles, Paola Elizabeth Díaz Flores, José Luis Woo Reza, se encuentra aceptada para publicación.


SERGIO S. GONZÁLEZ MUÑOZ, Ph.D
DIRECTOR DE AGROCIENCIA

Tlatoe Kochtli.

• Oficina Central • Guerrero # 9, Esquina Avenida Hidalgo •
• 56251, San Luis Huastla, Texcoco, Estado de México •
• 01(595) 928.4427 • 01(595) 928.4013 •

• Colegio de Postgraduados • Campus Montecillo • Estadística •
• Carretera México-Texcoco, Km. 36.5, 56230, Montecillo •
• Texcoco, Estado de México •

• Apartado Postal 199, 56100, Texcoco •
• Apartado Postal 56, 56230, Chapingo •
• editorialcp@colpos.mx •

Resumen

La búsqueda para mejorar la eficiencia de fertilizantes ha llevado a investigar la factibilidad del uso de materiales abundantes y económicos que puedan impartir propiedades de liberación lenta a un fertilizante. El objetivo fue evaluar el efecto de un fertilizante, preparado por medio de adsorción de nitrato (NO_3^-) con una bentonita modificada (OBN) y tensioactivo bromuro de hexadeciltrimetilamonio (HDTMA), en el crecimiento de plantas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) y la concentración de NO_3^- bajo un sistema hidropónico. La hipótesis fue que la aplicación de fertilizante a base de OBN y HDTMA libera NO_3^- en la solución nutritiva y afecta positivamente el crecimiento de la lechuga. El diseño experimental fue completamente al azar. Primer experimento: 8 tratamientos con 6 repeticiones, total 48 unidades experimentales. Tratamientos OBN/fertilizante en solución Steiner: 0/100, 25/75, 50/50, 75/25, 25/0, 50/0, 75/0 y 100/0. Segundo experimento: 15 tratamientos con 6 repeticiones, total 90 unidades experimentales. Tratamientos: 15 dosis de HDTMA con 0 hasta 35 mg L⁻¹. La OBN disminuyó la biomasa seca entre 50 y 70 %. El número de hojas se redujo de 25 a 50 %, la longitud y el ancho de hojas disminuyó entre 40 y 55 %. El área foliar se redujo entre 68 y 78 %. La absorción de agua disminuyó 60 %, la concentración de NO_3^- se redujo de 35 a 60 % y la conductividad eléctrica (CE) descendió entre 15 y 25 %. El tensioactivo HDTMA oscureció la raíz y afectó la absorción de agua y nutrimentos. La órganobentonita puede usarse como adsorbente de elementos minerales y como fertilizante, pues liberó cantidades de NO_3^- en la solución nutritiva. El tipo de tensioactivo pudiera cambiarse para reducir la fitotoxicidad y eliminar los efectos negativos en el crecimiento.

Palabras clave: *Lactuca sativa* L., adsorción, surfactante, bromuro de cetrimonio, nitrato, organoarcillas.

Summary

The search to improve the efficiency of fertilizers has led to investigate the feasibility of using abundant and economic materials that can impart slow release properties to a fertilizer. The objective was to evaluate the effect of a fertilizer, prepared by means of adsorption of nitrate (NO_3^-) with a modified bentonite (OBN) and surfactant

hexadecyltrimethylammonium bromide (HDTMA), on the growth of lettuce plants (*Lactuca sativa* L.) and the concentration of NO_3^- under a hydroponic system. The hypothesis was that the application of fertilizer based on OBN and HDTMA, releases NO_3^- in the nutritive solution and positively affects the growth of the lettuce. The experimental design was completely random. First experiment: 8 treatments with 6 repetitions, total 48 experimental units. Treatments OBN / fertilizer in Steiner solution: 0/100, 25/75, 50/50, 75/25, 25/0, 50/0, 75/0 and 100/0. Second experiment: 15 treatments with 6 repetitions, total 90 experimental units. Treatments: 15 doses of HDTMA with 0 to 35 mg L⁻¹. The OBN decreased the dry biomass between 50 and 70 %. The number of leaves was reduced from 25 to 50 %, the length and width of leaves decreased between 40 and 55 %. The leaf area was reduced between 68 and 78 %. The absorption of water decreased 60 %, the concentration of NO_3^- was reduced from 35 to 60 % and the electrical conductivity (EC) decreased between 15 and 25 %. The HDTMA surfactant darkened the root and affected the absorption of water and nutrients. The organobentonite can be used as an adsorbent of mineral elements and as a fertilizer, thus it released amounts of NO_3^- in the nutrient solution. The type of surfactant could be changed to reduce phytotoxicity and eliminate negative effects on growth.

Key words: *Lactuca sativa* L., adsorption, surfactant, cetrimonium bromide, nitrate, organoclays.

Introducción

Los fertilizantes químicos son un factor determinante para aumentar la productividad agrícola mundial y se pronostica para el período de 2015 a 2020 un incremento en la demanda en 1.5, 2.2 y 2.4 % de N, P₂O₅ y K₂O respectivamente (FAO, 2017). El N es un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas y el NO_3^- es la forma de N que prefieren la mayoría de las especies vegetales (Hawkesford *et al.*, 2012). Sin embargo, su uso puede dañar la salud humana y el ambiente, además presenta baja eficiencia de utilización (Cameron *et al.*, 2012). Por lo que se debe lograr una mayor eficiencia en el uso de fertilizantes (Chien *et al.*, 2009). Una opción para mitigar el efecto negativo es el

uso de fertilizantes de lenta liberación, que gradualmente liberan los nutrientes y prolongan su disponibilidad (De Campos-Bernardi *et al.*, 2016).

Los fertilizantes de lenta liberación se producen formando un revestimiento de polímero en los granos de fertilizantes (Trenkel, 2010), mediante calentamiento, fusión y nebulización, lo que hace costosos a estos fertilizantes (Yuan, 2014), reduciendo su uso a cultivos de alto valor (Berber *et al.*, 2014). Debido a esto, existen demandas de tecnologías alternativas y más económicas para producir fertilizantes de lenta liberación (De Campos-Bernardi *et al.*, 2016). Se ha estudiado la viabilidad de utilizar arcillas naturales, como las bentonitas, para lenta liberación de nutrientes (Bhardwaj *et al.*, 2012) debido a su capacidad de adsorción e intercambio iónico (Zhou *et al.*, 2011). Las órgano-bentonitas son sintetizadas por sorción de un tensioactivo catiónico, que carga de negativo a positivo la superficie externa y el espacio de la capa intermedia (Ceyhan *et al.*, 1999), esto incrementa la capacidad de retención del nutriente aniónico, como el NO_3^- (Li, 2003).

La capacidad de adsorción de las organoarcillas depende del tipo de surfactante empleado en la modificación (Jacobo-Azuara *et al.*, 2006), los más utilizados son alquilos de cadena larga con un grupo amino cuaternario, como el HDTMA (Sheng *et al.*, 1996), que adsorbe aniones en soluciones acuosas (Naghash and Nezamzadeh-Ejehieh, 2015). Algunos estudios mencionan que el HDTMA podría causar daño al ambiente (Sarkar *et al.*, 2010), en ecosistemas acuáticos (Tišler *et al.*, 2004), en humanos (Momblano *et al.*, 1984), mamíferos (Andersen, 1997) y germinación de semillas (Song y Kim, 2016). Sin embargo, no se ha demostrado plenamente su toxicidad (Song and Kim, 2016), por lo que el HDTMA es el más utilizado para modificar arcillas usadas como adsorbentes en suelo, agua, aire (Ismadji *et al.*, 2015) y como potencial fertilizante de lenta liberación (Bhardwaj *et al.*, 2012).

En zeolita y montmorillonita modificadas con HDTMA existen varios estudios en columnas de suelo donde mejoró la adsorción de NO_3^- y la liberación lenta de este nutriente: con plantas de maíz (Li, 2003), sin plantas (Bhardwaj y Tomar, 2011; Bhardwaj *et al.*, 2012) y como enmienda del suelo disminuyó la lixiviación de NO_3^- en un lisímetro con plantas de maíz (Malekian *et al.*, 2011). La naturaleza hidrofóbica de las órganoarcillas sugiere su idoneidad como matriz para la lenta liberación de compuestos solubles y pueden impartir propiedades de lenta liberación a un fertilizante (Basak *et al.*,

2012), sin embargo, su uso no ha sido ampliamente estudiado con plantas y la modificación con HDTMA podría liberar nutrientes así como de otro tipo de sustancias con potencial fitotóxico, debido a que este químico se utiliza principalmente para el tratamiento de agua, y el crecimiento de las plantas podría afectarse por el riego (Yuan, 2014). El uso de cultivos hidropónicos aumenta el control de los factores que intervienen en los sistemas de raíces (Podar, 2013). Además, los cálculos se hacen por el principio de balance de masas, donde la masa de nutrientes está, ya sea en la solución o en las plantas (Bugbee, 2004), lo que permitiría evaluar la aplicación de los fertilizantes de lenta liberación y el HDTMA en un medio líquido sin interferencias del suelo. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de un fertilizante preparado por medio de adsorción de NO_3^- con una bentonita modificada (OBN) y tensioactivo bromuro de hexadeciltrimetilamonio (HDTMA) en el crecimiento de plantas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) y la concentración de NO_3^- bajo un sistema hidropónico. La hipótesis fue que la aplicación de fertilizante a base de OBN y HDTMA libera NO_3^- en la solución nutritiva e influye positivamente en el crecimiento de la lechuga.

Materiales y Métodos

La preparación del material fertilizante se realizó en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la U.A.S.L.P. Se utilizó una bentonita proveniente de un yacimiento localizado en el municipio de Guadalcázar, San Luis Potosí, México. Siguiendo la metodología propuesta por Jacobo-Azuara *et al.* (2006) se obtuvo la órganobentonita (OB) con la modificación de la bentonita por adsorción del tensioactivo bromuro de hexadeciltrimetilamonio (HDTMA $\text{C}_{19}\text{H}_{42}\text{BrN}$, Aldrich Chemicals) con una superficie cargada positivamente. Posteriormente, se obtuvo el material fertilizante órganobentonita-nitrato (OBN) por adsorción del ion NO_3^- , al añadir 400 mmol L^{-1} de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ a la OB obtenida, y se mantuvo durante un periodo de contacto de 7 días. Al finalizar este período se alcanzó el equilibrio de adsorción y se determinó la concentración de NO_3^- en solución. La cantidad de NO_3^- adsorbido sobre la OB se determinó por la diferencia de la concentración inicial menos la final y fue de 69.77 mg g^{-1} .

En el Centro de Hidroponía de la Facultad de Agronomía y Veterinaria se establecieron dos experimentos en julio 2017, en un sistema hidropónico de raíz flotante con plantas de lechuga en un invernadero tipo túnel de 9 x 5 m. La temperatura media fue de 23.5 °C y la luminosidad media de 17,417 lux. Se utilizaron semillas de la variedad Montemar sembradas en junio en un sustrato “Sunshine mix 3” en charola de poliestireno de 200 cavidades; se regó diariamente y se fertilizó con solución Steiner (Steiner, 1961); se determinó con análisis de agua un pH de 7.5 y una CE de 0.6 dS m⁻¹. A los 36 días después de la siembra se realizó el trasplante en el sistema hidropónico, se lavaron las raíces para retirar el sustrato adherido y se colocó cada planta en un recipiente de plástico con una capacidad de 100 mL de solución nutritiva Steiner (Steiner, 1961) con una composición en meq L⁻¹ de: 6 NO₃⁻, 0.5 H₂PO₄⁻, 3.5 SO₄²⁻, 3.5 K⁺, 2 Mg²⁺ y 4.5 Ca²⁺. Se utilizó agua desionizada para la preparación de solución nutritiva y los fertilizantes utilizados fueron: Ca(NO₃)₂·4H₂O, KNO₃, MgSO₄·7H₂O, K₂SO₄ y H₃PO₄. Los micronutrientes se añadieron con Carboxy Micro, el cual aporta Fe 5 %, Zn 2.5 %, Mn 1 % y B 0.5 % en forma quelatada EDDHA. La aireación de la solución fue con una bomba de pecera (Elite Maxima 2.5 PSI) con una aportación de oxígeno entre 3 y 5 mg L⁻¹. En este medio se cultivaron las plantas de cada experimento en un período de adaptación de 5 días previos a la aplicación de los tratamientos.

La duración de la evaluación de 11 días es un tiempo intermedio, basado en experimentos con fertilizantes de lenta liberación. Se consideró el tiempo de 15 días en columnas de suelo que utilizaron Bhardwaj y Tomar (2011), Bhardwaj *et al.* (2012) y además los de Hummel y Waddington (1986) y King y Balogh (2000) quienes mencionan que el uso de disoluciones de fertilizante durante 7 días es aceptable para predecir las tasas de liberación en suelo.

En el primer experimento se evaluaron 8 tratamientos: solución nutritiva de Steiner (Steiner, 1961) (0/100), tres tratamientos con OBN que aportan el 25, 50 y 75 % del N total contenido en la solución Steiner, más una Solución Steiner modificada con NO₃⁻ reducido, al 75, 50 y al 25 % para completar el 100 % de N total (25/75, 50/50 y 75/25) y cuatro tratamientos con OBN 25, 50, 75 y al 100 % en la misma solución Steiner modificada sin NO₃⁻ (25/0, 50/0, 75/0 y 100/0). En los tres tratamientos con NO₃⁻ reducido y en el 100/0, la cantidad de OBN agregada se calculó de tal forma que la suma del NO₃⁻

adsorbido más el disuelto en la solución inicial fuera igual a la de NO_3^- en la solución Steiner (6 meqL^{-1}). Durante este período se agregó diariamente agua desionizada para mantener constante el volumen inicial y se renovó la solución nutritiva cada vez que la planta consumió un tercio del volumen inicial para que la CE no descendiera excesivamente (Bugbee, 2004), lo cual solo se cumplió en el tratamiento 0/100 en dos ocasiones (días 5 y 8).

En las variables, se determinó cada 24 horas: consumo de agua (con bureta graduada), conductividad eléctrica (CE) (Medidor Orión 155, USA) y contenido de NO_3^- en la solución nutritiva (ionómetro Laqua Twin, Horiba, Japan). Las variables medidas al final de la evaluación fueron: biomasa seca de raíz, hojas y total (con estufa de secado de aire forzado Omron, a 70°C durante 72 horas hasta obtener peso constante y balanza digital (Ohaus PAJ4102N Gold series), ancho, largo y número de hojas, área foliar (software imageJ), clorofila a, b y total en hojas exteriores e interiores por espectrofotometría con el procedimiento EPA-ERT (1994). El diseño experimental fue un completamente al azar con 6 repeticiones por tratamiento y un total de 48 unidades experimentales, considerando cada planta como una unidad experimental.

En el segundo experimento se evaluaron 15 tratamientos que consistieron en: 0, 0.5, 1, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20, 22.5, 25, 30 y 35 mg L^{-1} de HDTMA agregados a una solución nutritiva igual a la del tratamiento Steiner. Las variables medidas al final de la evaluación fueron C.E. (Medidor Orión 155, USA) y contenido de NO_3^- (ionómetro Laqua Twin, Horiba, Japan) en la solución nutritiva, y consumo de agua diariamente (con bureta graduada). El diseño experimental fue un completamente al azar con 6 repeticiones por tratamiento y un total de 90 unidades experimentales, considerando cada planta como una unidad experimental.

En los dos experimentos establecidos con los datos obtenidos se realizó ANDEVA y una prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) para la comparación de medias entre tratamientos, con SAS versión 9.0.

Resultados y Discusión

Experimento 1: El consumo de agua (Figura 1) mostró diferencias significativas; el tratamiento sin OBN (0/100) fue al que mayor cantidad de agua diaria se repuso (26 mL) y resultó al final del estudio al que mayor volumen se agregó (291 mL). Desde el primer día se afectó 37 % el consumo de agua con los tratamientos con aplicación de OBN. El 75/0 consumió 61.5 % menos cantidad de agua comparado con el 0/100. En los siguientes días el consumo de agua se afectó 60 % con los tratamientos 25/75, 50/50 y 75/25 y de 80 a 88 % a 25/0, 50/0, 75/0 y 100/0 comparados con el 0/100. El consumo de agua al final de la evaluación siguió la misma tendencia; el tratamiento 0/100 consumió un 68.3 % más que el 25/75 y el 50/50, y un 81.3 % más que el resto de los tratamientos. En este sentido, al aplicar los tratamientos con OBN se observó un oscurecimiento en el sistema radical una hora después de la aplicación y una necrosis al final de la evaluación (Figura 2 B), lo cual también afectó la parte aérea de la planta (Figura 2 A). Este efecto pudo ser debido a que en la elaboración de la OBN se utilizó el tensioactivo HDTMA y éste alcanzó a generar una toxicidad en la planta. Como lo mencionan Song and Kim (2016) en estudios de germinación con lechuga, se afectó la elongación de la raíz y el tallo debido al efecto del HDTMA. De aquí que las raíces dañadas reducen la actividad metabólica y disminuyen la tasa de respiración comparadas con las raíces blancas (Baldi *et al.*, 2010), además de una disminución en la capacidad de absorción de agua (Gu *et al.*, 2015).

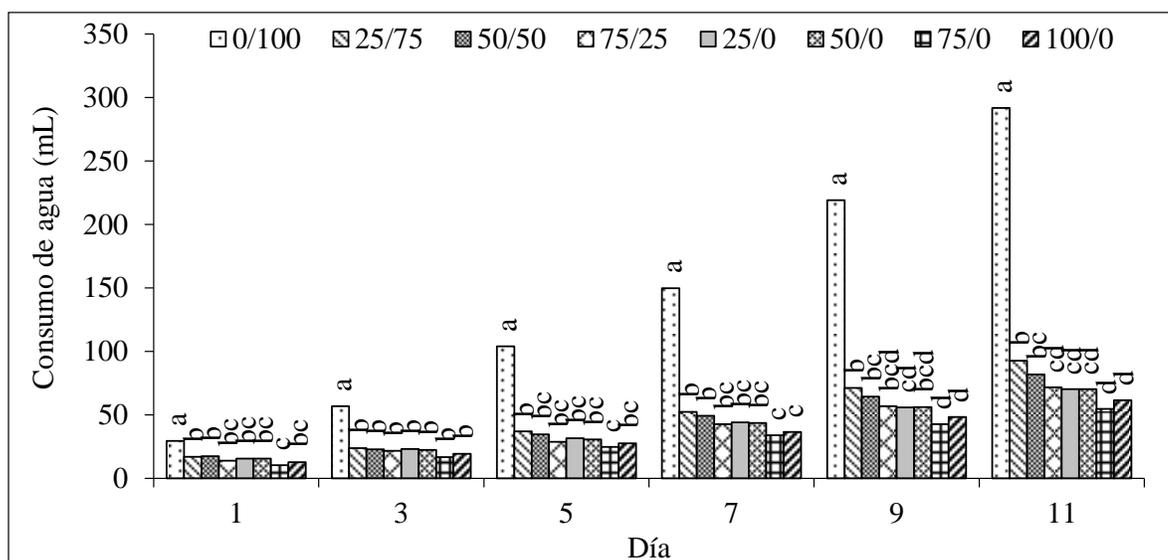


Figura 1. Consumo de agua durante el periodo de contacto de los tratamientos con OBN/Fertilizante en solución Steiner, para determinar el efecto de un fertilizante nitrogenado a base de bentonita modificada y tensioactivo HDTMA en el crecimiento de lechuga hidropónica. Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

En el número de hojas de lechuga (Cuadro 1 y Figura 2 A) el tratamiento 0/100 tuvo 22.58 % mayor cantidad que los tratamientos 25/75 y 50/50, y 48.4 % más que los demás tratamientos. La disminución de hojas en las plantas con la aplicación de OBN pudo ser por el estrés que se observó con la deshidratación que ocasionó el daño en las raíces. En este sentido mencionan Sirousmehr *et al.* (2014) que el estrés hídrico reduce el número de hojas cuando el agua llega a ser limitante para las raíces, debido al envejecimiento y a una alta concentración de etileno, lo cual reduce la transpiración.

En el largo de hojas (Cuadro 1, Figura 2 A), el tratamiento con 0/100 obtuvo 42.2 % más longitud que el 25/75 y el 50/50, y 56.4 % más que el 75/25 y el 75/0; los demás tratamientos que están entre estos porcentajes son estadísticamente iguales. En el ancho de hoja, el tratamiento 0/100 mostró los valores más altos, se disminuyó el valor en 41.4 % con el tratamiento 25/75 y en 52.5 % con 75/25, 50/0, 75/0 y 100/0; el resto está entre estos dos porcentajes. En el área foliar de la hoja más recientemente madura disminuyó 56.1 % con el 25/75 y 68 % con el resto de los tratamientos aplicados, comparados con el 0/100 que mostró el valor más alto. En este sentido mencionan Lisar *et al.* (2012) que el

tamaño de las hojas se reduce debido al estrés hídrico que provoca cambios en anatomía y ultraestructura de las hojas. Esta disminución en la hoja se considera beneficioso para las plantas en condiciones de déficit hídrico, debido a que se asocia a una tasa de transpiración reducida que afecta la tasa fotosintética (Forni *et al.*, 2017). Lo cual pudo haber sucedido en esta evaluación con el daño que se observó en la raíz en los tratamientos con OBN.

En el área foliar total (Cuadro 1 y Figura 2 A) el tratamiento 0/100 mostró los valores más altos, la aplicación de 25/75 disminuyó 68.3 % y 78.6 % con 50/50 y 75/0. El resto de tratamientos conservó un área foliar entre estos últimos porcentajes. La disminución del AFT pudo ser debido al daño que presentó la raíz al aplicar los tratamientos con OBN, lo que provocó un estrés por falta de agua. Al respecto, Sirousmehr *et al.* (2014) mencionan que la falta de agua disminuye crecimiento, división y alargamiento celular en hojas. Lo que se vio reflejado en la reducción del área foliar, además de que las hojas más viejas presentaron senescencia (Figura 2 A). En este caso, Gepstein y Glick (2013) mencionan que las plantas sometidas a sequía responden acelerando la senescencia y abscisión de las hojas más viejas.

Cuadro 1. Características de las hojas de lechuga de los tratamientos con OBN/Fertilizante en solución Steiner, para evaluar el efecto de un fertilizante nitrogenado a base de bentonita modificada en el crecimiento de lechuga hidropónica.

Tratamiento	NH (cm)	LH (cm)	AH (cm)	AFH (cm ²)	AFT (cm ²)
0/100	7.75a	11.59a	8.84a	60.52a	328.05a
25/75	5.75b	6.70b	5.18b	26.55b	104.13b
50/50	6.00b	6.35bc	4.53bc	19.35c	97.52bc
75/25	3.75c	5.05d	3.80c	14.73c	79.17bc
25/0	4.00c	5.70cd	4.35bc	16.93c	76.75bc
50/0	3.75c	5.43cd	4.20c	15.88c	70.16c
75/0	4.00c	4.83d	3.85c	13.55c	65.84c
100/0	3.75c	5.53cd	4.20c	16.33c	79.73bc
DMS	1.15	0.99	0.95	7.11	33.29
CV	10.11	6.61	8.32	13.22	10.44

Letras distintas en los tratamientos por columna indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). NH: número de hojas, LH: longitud de hoja, AH: ancho de hoja, AFH: área foliar de hoja, AFT: área foliar total.

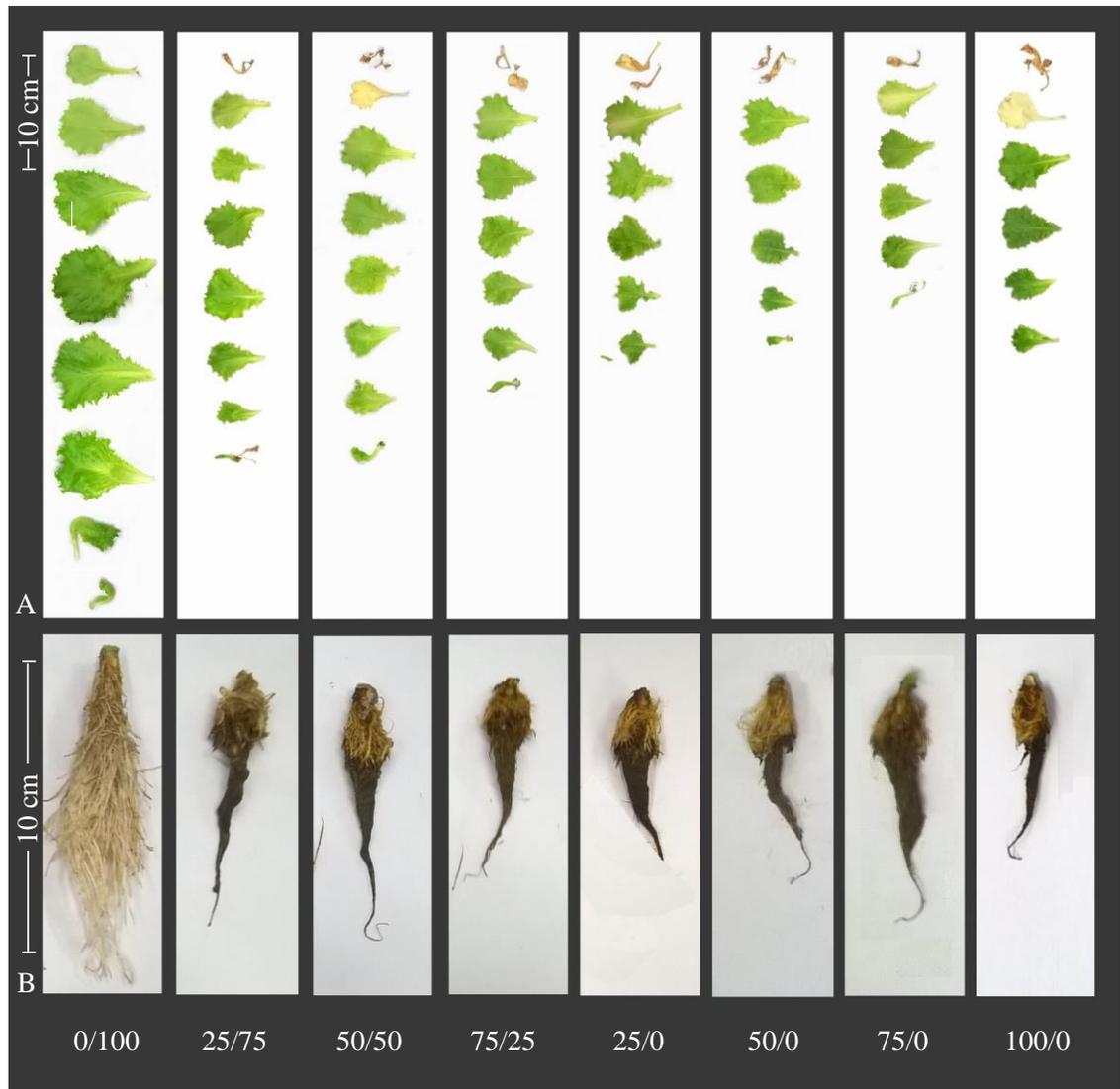


Figura 2. Hojas (A) y raíces (B) de plantas de lechuga de los tratamientos con OBN/Fertilizante en solución Steiner, para evaluar el efecto de un fertilizante nitrogenado a base de bentonita modificada y tensioactivo HDTMA en el crecimiento de lechuga hidropónica.

En la biomasa seca total, hojas y raíz (Figura 3 A) se mostró la misma tendencia, donde el tratamiento 0/100 presentó los valores más altos, en Biomasa Seca Total 58.8 % más que OBN con fertilizante (25/75, 50/50 y 75/25) y 73.1 % que OBN sin fertilizante (25/0, 50/0, 75/0 y 100/0). En hojas el tratamiento 0/100 evidenció 65.5 % más que la mayoría de los tratamientos y solo con el tratamiento 75/0 un 77.9 %. En raíz el tratamiento 0/100 reflejó un 42.4 % sobre todos los tratamientos. Esto indica que la aplicación de la OBN con y sin NO_3^- en la solución Steiner, disminuyó el contenido en la biomasa seca, debido al daño radical que presentó la planta. Lo cual ocasionó una falta de agua, que provocó el cierre de estomas, la inhibición del flujo de CO_2 y la absorción de nutrientes por las raíces; esto reduce la fotosíntesis y la producción de carbohidratos (Pan *et al.*, 2011), lo cual se refleja en menor tamaño de planta y disminución en la biomasa seca (Stagnari *et al.*, 2014).

En el contenido de clorofila total (Figura 3 B), en hojas interiores no mostraron diferencias significativas, solo en hojas exteriores, donde se observó la más alta concentración con el tratamiento 0/100 con 31.25 % comparado con 25/0 y 75/0, sin embargo, el resto de los tratamientos no mostraron diferencias estadísticas entre estos resultados. En este sentido, la disminución en el contenido de clorofila bajo déficit hídrico presenta estrés oxidativo y puede ser el resultado de la fotooxidación del pigmento y la degradación de la clorofila (Anjum *et al.*, 2011). En clorofila a en hojas interiores (Figura 3 C) no evidenció diferencias entre tratamientos. En el caso de hojas exteriores, la más alta concentración se observó en 0/100 y 100/0 con 48.4 % comparado con 25/0, sin embargo, el resto de los tratamientos no mostró diferencias con estos tres tratamientos. En la concentración de clorofila b (Figura 3 D), en los tratamientos no se presentó ninguna diferencia en hojas interiores y exteriores. En este sentido, Filimon *et al.* (2016) mencionan que las variaciones en las relaciones clorofila a/b son indicadores de senescencia o estrés y afectan el curso normal de los procesos biológicos de las plantas.

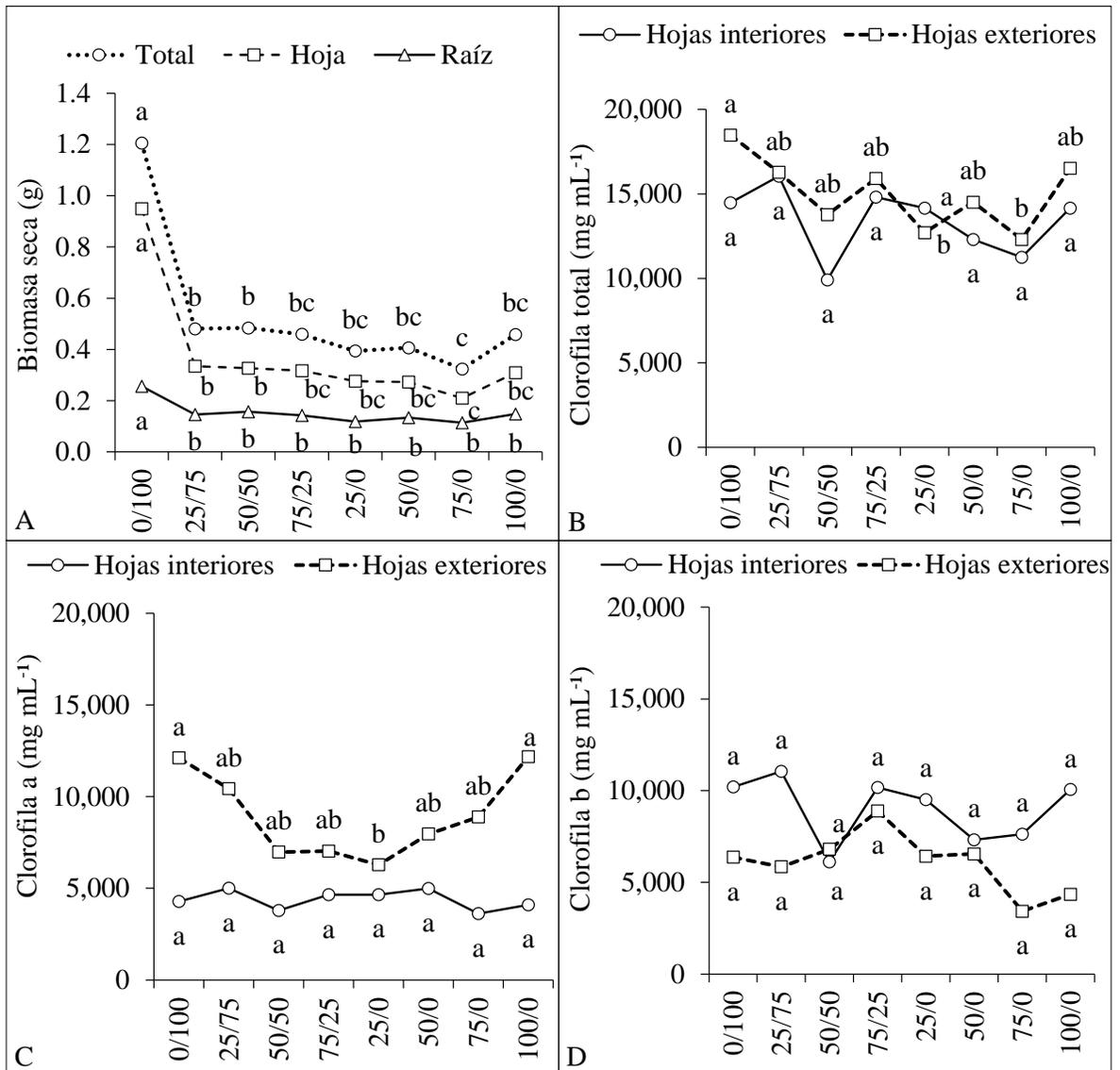


Figura 3. Peso seco (A); clorofilas: total (B), a (C) y b (D) en hojas interiores y exteriores de los tratamientos con OBN/Fertilizante en solución Steiner, para evaluar el efecto de un fertilizante nitrogenado a base de bentonita modificada en el crecimiento de lechuga hidropónica. Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

La conductividad eléctrica (CE) (Figura 4 A) de la solución inicial disminuyó muy poco en los tratamientos con OBN: 16 % con la OBN sin fertilizante (25/0, 50/0, 75/0 y 100/0) y 34.51 % con la OBN con fertilizante (25/75, 50/50, 75/25), y 61.53 % con el tratamiento sin OBN (0/100). En este sentido, mencionan Paulus *et al.* (2012) que la CE en la solución nutritiva desciende a lo largo del ciclo de un cultivo debido al consumo de nutrientes (Silva *et al.*, 2016).

En el contenido final de NO_3^- de la solución nutritiva (Figura 4 B) se detectaron diferencias entre los tratamientos; con el 0/100 se mostró 88.68 % de disminución del elemento por la absorción que tuvo la planta para realizar sus funciones. De acuerdo con Bugbee (2004), en sistemas hidropónicos las plantas remueven rápidamente algunos nutrientes como el N y en unas pocas horas puede bajar la concentración a niveles bajos. Cabe mencionar que en el resto de los tratamientos, al tener baja absorción del NO_3^- , la solución nutritiva no se renovó como en el caso del 0/100. La absorción en el 25/75 es de 44.64 %, en el 50/50 de 47.89 % y en el 75/25 de 36.44 %, considerando solo la aplicación de fertilizante N- NO_3^- a través de la solución Steiner. En este sentido, Ingestad y Agren (1995) mencionan que la demanda de nutrientes de las plantas está directamente relacionada con la tasa de crecimiento de éstas, donde los nutrientes se absorben de acuerdo con la síntesis de nueva biomasa, lo cual en este experimento se puede ver en el tratamiento, 0/100, con más biomasa seca (Figura 3 A).

Los tratamientos con solo OBN que no tenían N- NO_3^- en la solución Steiner: 25/0, 50/0, 75/0 y 100/0, mostraron (Figura 4 B) liberación de 50 a 60 mg L^{-1} de N- NO_3^- ; esto comprobó que la bentonita modificada con un tensioactivo, como el HDTMA, adsorbió y liberó el nutriente utilizado, lo que nos da alrededor del 15 % del valor aplicado comparado con el 0/100 con la solución Steiner. En este sentido, Mahlangu *et al.* (2016), en experimentos en lechuga con dosis de N con 60 mg L^{-1} , encontraron que esta concentración de N es suficiente para el crecimiento y rendimiento. En nuestro caso, la cantidad del nutriente que se encontró en la solución no fue una limitante tan marcada para las diferencias de crecimiento contra el 0/100, sino más bien por las limitantes de otros factores como el daño radical y el consumo de agua. Además, en la demanda de nutrientes, especialmente para N, las plantas tienen la capacidad de movilizarlo de las hojas senescentes a las hojas en expansión (Masclaux-Daubresse *et al.*, 2010), asociado esto con una mejor movilización de compuestos de N endógenos (Gombert *et al.*, 2010). Esto podría explicar el amarillamiento de las hojas senescentes en las plantas con los tratamientos con OBN (Figura 2 A), lo cual podría haber reducido la cantidad de N- NO_3^- utilizado en las plantas (Figura 4 B).

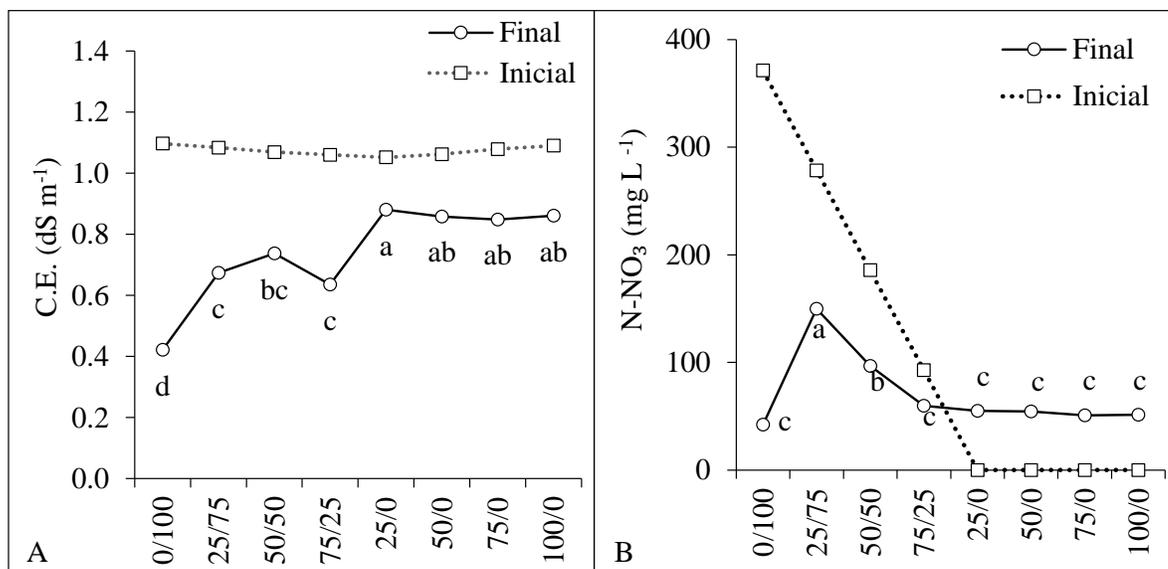


Figura 4. Comportamiento de la solución nutritiva al final del experimento: A) Conductividad eléctrica, B) Contenido de nitratos de los tratamientos con OBN/Fertilizante en solución Steiner, para evaluar el efecto de un fertilizante nitrogenado a base de bentonita modificada en el crecimiento de lechuga hidropónica. Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Experimento 2: En el consumo de agua (Figura 5 A), en las concentraciones bajas de 0 a 2.5 mg L⁻¹ de HDTMA se obtuvo 34.1 % más que en 5 mg L⁻¹ y 63.6 % más que en 17.5 mg L⁻¹ y mayor. Es evidente que el efecto del tensioactivo limita la absorción de agua, debido a un daño radical que oscurece la parte inferior de la raíz, alcanzando un color café oscuro y una necrosis al final de la evaluación (Figura 6), siendo muy similar a la del experimento 1 (Figura 2 B). Este efecto puede ser atribuido a las sales cuaternarias de amonio que al estar en altas concentraciones podrían conducir a un daño de la membrana celular de la raíz, y los componentes tóxicos podrían entrar a las partes internas de la planta (Liu *et al.*, 2013; Cvjetko-Bubalo *et al.*, 2014), como es el caso del HDTMA que ocasiona un daño en la raíz de lechuga (Song y Kim, 2016), por lo que se comprueba que el HDTMA es considerablemente tóxico para las plantas en medios líquidos. Y confirma que su uso representa un potencial peligro para el medio ambiente, humanos, mamíferos y organismos acuáticos (Ismadji *et al.*, 2015; Pawłowska y Biczak, 2016) y plantas.

En la CE se observó (Figura 5 B) que en las concentraciones de 0 a 5 mg L⁻¹ se mantiene un comportamiento similar al del tratamiento sin HDTMA, en el tratamiento de 7.5 mg L⁻¹

¹ se ve una menor disminución de la CE de 56.4 % y 84.5 % en los tratamientos de concentraciones más altas con una tendencia creciente, lo cual indica que el HDTMA limitó que bajara la CE; en este sentido mencionan Song y Kim (2016) que el HDTMA afecta significativamente la elongación de la raíz en plántulas y como consecuencia el crecimiento se afecta. En este caso, al estar dañada la raíz, la toma de nutrientes es limitada por lo que la CE casi no disminuye.

El contenido de NO_3^- en la solución nutritiva (Figura 5 C), con los tratamientos 0 a 2.5 mg L^{-1} de HDTMA mostró 32.8 % mayor que con 5 mg L^{-1} y 58.4 % que con 20 mg L^{-1} . Lo cual deja claro que el contenido de este nutriente se absorbió limitado por efecto del HDTMA. En este sentido, mencionan Salas y Urrestarazu (2004) que, bajo condiciones de estrés, la absorción de elementos minerales se encuentra generalmente vinculada al consumo de agua, siendo estos procesos no afectados de igual manera por las condiciones medioambientales.

En general, en el cultivo de lechuga se observó la liberación del nutriente N-NO_3^- en el material utilizado (OBN) en un medio líquido, sin embargo, se presentó un daño radical (experimento 1), el cual se atribuyó al tensioactivo HDTMA (experimento 2). Por lo tanto, para la fabricación de fertilizantes de lenta liberación con bentonitas, el tensioactivo puede ser cambiado por otro compuesto con características similares para elaborar la OBN, pero con menor toxicidad para las plantas. Aun así, no se descartó la posibilidad de que en otras condiciones, como en el suelo, pueda ser viable su aplicación (Pawłowska y Biczak, 2016). De acuerdo a lo que mencionan Ivanković y Hrenović (2010), en el medio ambiente los tensioactivos se degradan principalmente a través de la actividad microbiana y la adsorción en el suelo o en los sedimentos puede reducir su toxicidad.

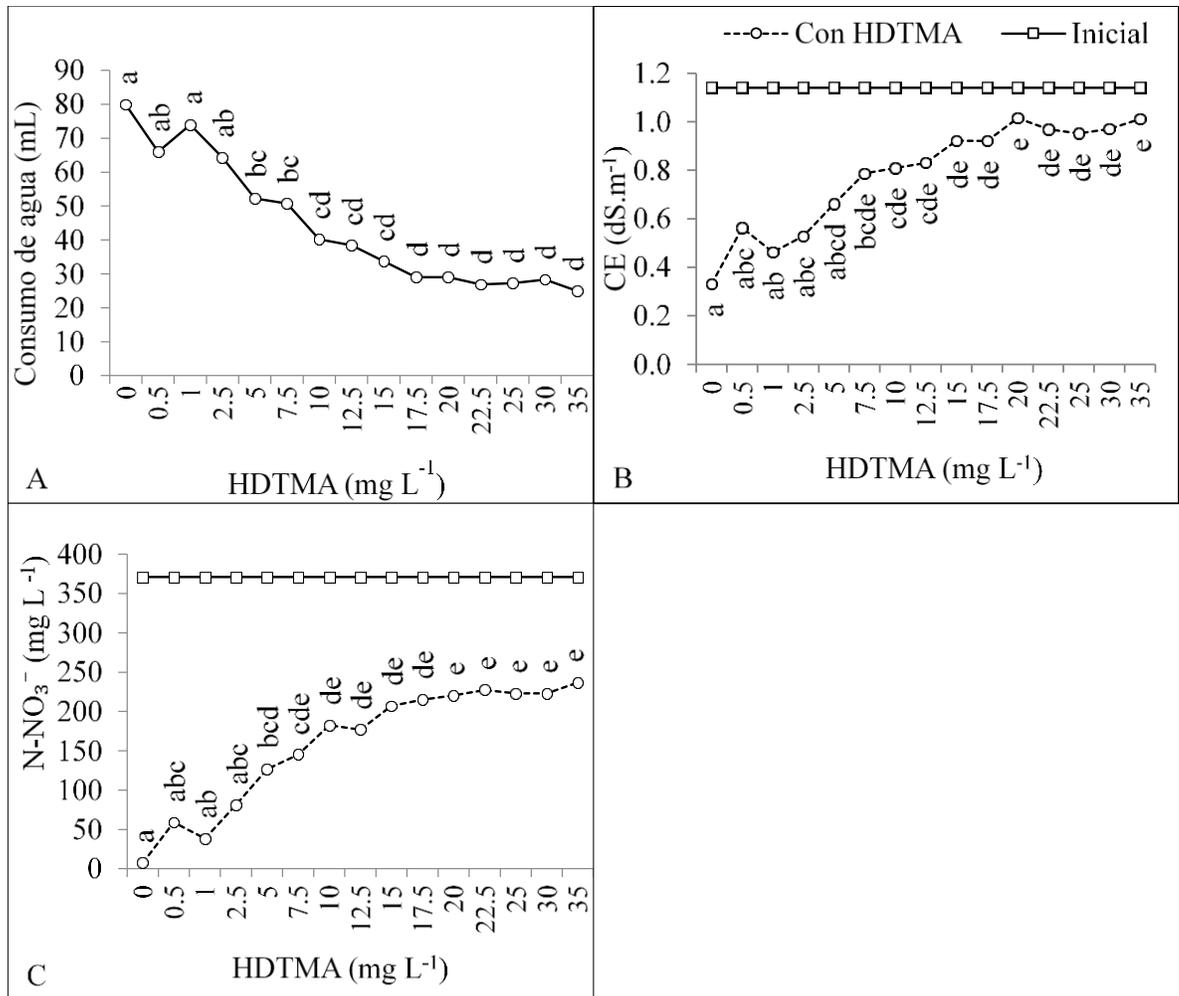


Figura 5. Efecto de la concentración de HDTMA en la solución nutritiva en: A) Consumo de agua, B) Conductividad eléctrica, C) Contenido de NO₃⁻ en relación al valor inicial en los tratamientos para determinar el efecto del surfactante en el crecimiento de lechuga hidropónica. Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

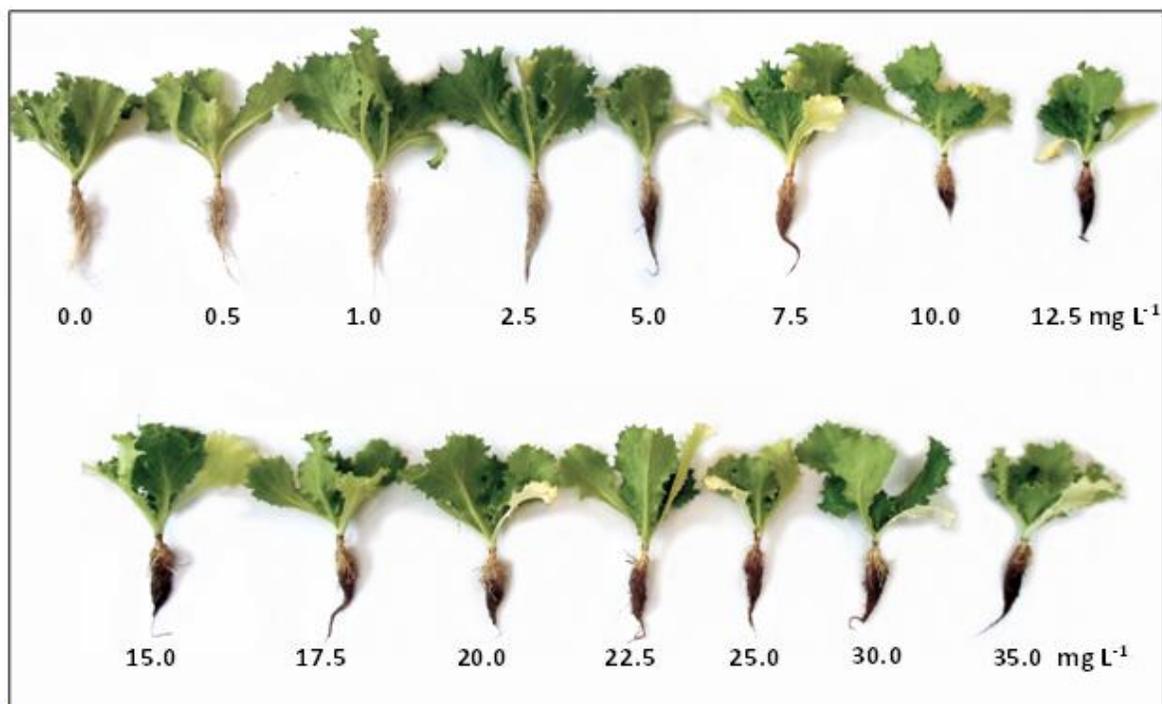


Figura 6. Efecto de la concentración de HDTMA en la solución nutritiva en las plantas de lechuga.

Conclusiones

El material fertilizante órganobentonita-nitrato (OBN) afectó negativamente el crecimiento de la lechuga, disminuyó el peso seco total, hoja y raíz, número, ancho, longitud de hojas y área foliar. El tensioactivo HDTMA usado para fabricar la órganobentonita generó toxicidad en la raíz y esto afectó el consumo de agua y nitratos y otros nutrientes en la solución nutritiva.

La órganobentonita (OB) es un material que podría ser utilizado como adsorbente de nutrientes y también es viable como material fertilizante (OBN), ya que liberó el nitrato adsorbido en las concentraciones aplicadas. Sin embargo, es necesario evaluar otros tensioactivos para reducir los efectos negativos en el crecimiento.

Literatura Citada

Andersen, F. 1997. Final report on the safety assessment of cetrimonium chloride, cetrimonium bromide, and steatrimonium chloride. *Int. J. Toxicol.* 16: 195–220

- Anjum, S.A., X.Y. Xie, L.C. Wang, M.F. Saleem, C. Man and W. Lei. 2011. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *Afr. J. Agric. Res.* 6: 2026-2032.
- Baldi, E, C.E. Wells and B. Marangoni. 2010. Nitrogen absorption and respiration in white and brown peach roots. *J. Plant Nutr.* 33: 461-469.
- Basak, B.B., S. Pal and S.C. Datta. 2012. Use of modified clays for retention and supply of water and nutrients. *Curr. Sci.* 102: 1272-1278.
- Berber, M. R., I. H. Hafez, K. Minagawa and T. Mori. 2014. A sustained controlled release formulation of soil nitrogen based on nitrate-layered double hydroxide nanoparticle material. *J. Soils Sediments* 14: 60-66.
- Bhardwaj, D. and R. Tomar. 2011. Use of surface modified inorganic nano materials as slow release nitrogen fertilizer. *In: Behnassi, M., S.A. Shahid and J. D'Silva. (eds.). Sustainable Agricultural Development. Springer Science. Netherlands. pp: 171-184.*
- Bhardwaj, D., M. Sharma, P. Sharma and R. Tomar. 2012. Synthesis and surfactant modification of clinoptilolite and montmorillonite for the removal of nitrate and preparation of slow release nitrogen fertilizer. *J. Hazard. Mater.* 227: 292-300.
- Bugbee B. 2004. Nutrient management in recirculating hydroponic culture. *Acta Hortic.* 648: 99-112.
- Cameron, K.C., H.J. Di and J.L. Moir. 2012. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. *Ann. Appl. Biol.* 162: 145-173.
- Ceyhan, Ö., H. Güler and R. Güler. 1999. Adsorption mechanisms of phenol and methylphenols on organoclays. *Adsorpt. Sci. Technol.* 17: 469-477.
- Chien, S.H., L.I. Prochnow and H. Cantarella. 2009. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. *Adv. Agron.* 102: 267-322.
- Cvjetko-Bubalo, M., K. Radosevic, I. Radojcic-Redovnikovic, J. Halambek and V.G. Sreck. 2014. A brief overview of the potential environmental hazards of ionic liquids. *Ecotox. Environ. Saf.* 99: 1-12
- De Campos-Bernardi, A.C., J.C. Polidoro, M.B. de Melo Monte, E.I. Pereira, C.R. de Oliveira and K. Ramesh. 2016. Enhancing Nutrient Use Efficiency Using Zeolites Minerals -A Review. *ACES* 6: 295-304.
- EPA-ERT (Environmental Protection Agency, Environmental Response Team). 1994. Chlorophyll Determination, Standard Operating Procedure #2030. Washington, D. C., USA. 6 p.

- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2017. World fertilizer trends and outlook to 2020. Summary Report. Rome. 27 p.
- Filimon, R.V., L. Rotaru and R.M. Filimon. 2016. Quantitative investigation of leaf photosynthetic pigments during annual biological cycle of *Vitis vinifera* L. Table Grape Cultivars. *S. Afr. J. Enol. Vitic.* 37: 1-14.
- Forni, C., D. Duca and B.R. Glick. 2017. Mechanisms of plant response to salt and drought stress and their alteration by rhizobacteria. *Plant Soil* 410: 335-356.
- Gepstein, S. and B.R. Glick. 2013. Strategies to ameliorate abiotic stress-induced plant senescence. *Plant Mol. Biol.* 82: 623-633.
- Gombert, J., F. Le Dily, J. Lothier, P. Etienne, L. Rossato, J.M. Allirand, A. Jullien, A. Savin and A. Ourry. 2010. Effect of nitrogen fertilization on nitrogen dynamics in oilseed rape using ¹⁵N-labelling field experiment. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 173: 875-884.
- Gu, J., X. Wei, J. Wang, X. Dong and Z. Wang. 2015. Marked differences in standing biomass, length density, anatomy and physiological activity between white and brown roots in *Fraxinus mandshurica* Rupr. plantation. *Plant Soil* 392: 267-277.
- Hawkesford, M., W. Horst, T. Kichey, H. Lambers, J. Schjoerring, I.S. Møller and P. White. 2012. Functions of macronutrients. *In: Marschner, P. (ed.): Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants.* Ed. Elsevier Ltd., Amsterdam, The Netherlands. pp. 135-189.
- Hummel Jr, N.W. and D.V. Waddington. 1986. Field dissolution of sulfur-coated ureas in turfgrass. *HortScience* 21: 1155-1156.
- Ingestad, T. and G.I. Agren. 1995. Plant nutrition and growth: Basic principles. *Plant Soil* 168: 15-20.
- Ismadji, S., F.E. Soetaredjo and A. Ayucitra. 2015. Clay materials for environmental remediation. *In: Sharma, S. K. (ed). Springer Briefs in Molecular Science. Green Chemistry for Sustainability.* Springer. 123 p.
- Ivanković, T. and J. Hrenović. 2010. Surfactants in the environment. *Arh. Hig. Rada. Toksikol.* 61: 95-110.
- Jacobo-Azuara, A., R. Leyva-Ramos, E. Padilla-Ortega, A. Aragón-Piña, R.M. Guerrero-Coronado and J. Mendoza-Barrón. 2006. Removal of toxic pollutants from aqueous solutions by adsorption onto an organobentonite. *Adsorpt. Sci. Technol.* 24: 687-699.
- King, K.W. and J.C. Balogh. 2000. Development of a nitrogen-release algorithm for slow-release fertilizers. *Trans ASAE* 43: 661-664

- Li, Z. 2003. Use of surfactant-modified zeolite as fertilizer carriers to control nitrate release. *Microporous Mesoporous Mater.* 61: 181-188.
- Lisar, S.Y., R. Motafakkerazad, M.M. Hossain and I.M. Rahman. 2012. Water stress in plants: causes, effects and responses. *In: Rahman, I.M.M. and H. Hazegawa (eds). Water stress. InTech.* pp. 1-12
- Liu, H., S. Zhang, X. Hu and C. Chen. 2013. Phytotoxicity and oxidative stress effect of 1-octyl-3-methylimidazolium chloride ionic liquid on rice seedlings. *Environ. Pollut.* 181: 242-249
- Mahlangu, R.I.S., M.M. Maboko, D. Sivakumar, P. Soundy and J. Jifon. 2016. Lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth, yield and quality response to nitrogen fertilization in a non-circulating hydroponic system. *J. Plant Nut.* 39: 1766-1775.
- Malekian, R., J. Abedi-Koupai and S.S. Eslamian. 2011. Influences of clinoptilolite and surfactant-modified clinoptilolite zeolite on nitrate leaching and plant growth. *J. Hazard. Mater.* 185: 970-976.
- Masclaux-Daubresse, C., F. Daniel-Vedele, J. Dechorgnat, F. Chardon, L. Gaufichon and A. Suzuki. 2010. Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: Challenges for sustainable and productive agriculture. *Ann. Bot.* 105: 1141-1157.
- Momblano, P., B. Pradere, N. Jarrige, D. Concina and E. Bloom. 1984. Metabolic acidosis induced by cetrimonium bromide. *Lancet.* 324: 1045.
- Naghash, A. and A. Nezamzadeh-Ejehieh. 2015. Comparison of the efficiency of modified clinoptilolite with HDTMA and HDP surfactants for the removal of phosphate in aqueous solutions. *J. Ind. Eng. Chem.* 31: 185-191.
- Pan, X., R.R. Lada, C.D. Caldwell and K.C. Falk. 2011. Water-stress and N-nutrition effects on photosynthesis and growth of *Brassica carinata*. *Photosynthetica* 49: 309-315.
- Paulus, D., E. Paulus, G.A. Nava and C.A. Moura. 2012. Crescimento, consumo hídrico e composição mineral de alface cultivada em hidroponia com águas salinas. *Rev. Ceres* 59: 110-117.
- Pawłowska, B. and R. Biczak. 2016. Evaluation of the effect of tetraethylammonium bromide and chloride on the growth and development of terrestrial plants. *Chemosphere* 149: 24-33.
- Podar, D. 2013. Plant growth and cultivation. *in: Frans J.M. Maathuis (ed.). Plant Mineral Nutrients: Methods and Protocols. Methods Mol. Biol.* 953: 23–45

- Salas S., M.C. y M. Urrestarazu G. 2004. Métodos de riego y fertirrigación en cultivos sin suelo. *In*: Urrestarazu G. M. (ed). Tratado de cultivo sin suelo. Mundi-Prensa, Madrid. pp: 162-236.
- Sarkar, B., M. Megharaj, Y. Xi, G.S.R. Krishnamurti and R. Naidu. 2010. Sorption of quaternary ammonium compounds in soils: implications to the soil microbial activities. *J. Hazard. Mater.* 184: 448-456.
- Sheng, G., S. Xu and S.A. Boyd. 1996. Cosorption of organic contaminants from water by hexadecyltrimethylammonium-exchanged clays. *Water Res.* 30: 1483-1489.
- Silva, M.G.D., T.M. Soares, H.R. Gheyi, I.D.S. Oliveira, J.A.D. Silva-Filho and F.F.D. Carmo. 2016. Frequency of recirculation of nutrient solution in hydroponic cultivation of coriander with brackish water. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.* 20: 447-454.
- Sirousmehr, A., J. Arbabi and M.R. Asgharipour. 2014. Effect of drought stress levels and organic manures on yield, essential oil content and some morphological characteristics of sweet basil (*Ocimum basilicum*). *Adv. Environ. Biol.* 8: 880-885.
- Song, U. and H.E. Kim. 2016. Assessing the phytotoxicity of cetrimonium bromide in plants using eco-physiological parameters. *J. Ecol. Environ.* 40: 1-5.
- Stagnari, F., A. Galieni, S. Speca and M. Pisante. 2014. Water stress effects on growth, yield and quality traits of red beet. *Sci. Hort.* 165: 13-22.
- Steiner, A. A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant Soil* 15: 134-154.
- Tišler, T., J. Zagorc-Končan, M. Cotman and A. Drolc. 2004. Toxicity potential of disinfection agent in tannery wastewater. *Water Res.* 38: 3503–3510.
- Trenkel, M.E. 2010. Slow-and controlled-release and stabilized fertilizers: An option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. 2nd ed. International Fertilizer Industry Association, Paris, France. 160 pp.
- Yuan, G. 2014. An organoclay formula for the slow release of soluble compounds. *Appl. Clay Sci.* 100: 84-87.
- Zhou, Y., X. Y. Jin, H. Lin and Z. L. Chen. 2011. Synthesis, characterization and potential application of organobentonite in removing 2, 4-DCP from industrial wastewater. *Chem. Eng. J.* 166: 176-183.0

CAPÍTULO II.
**COMPORTAMIENTO DE UN POTENCIAL FERTILIZANTE DE
LIBERACIÓN LENTA A BASE DE ÓRGANOBENTONITA FOSFATO EN EL
CULTIVO DE LECHUGA**
**BEHAVIOR OF A POTENTIAL SLOW RELEASE FERTILIZER BASED ON
ORGANOBENONITE PHOSPHATE IN LETTUCE CULTIVATION**

Mauricio Jesús Romero Mendez¹, Ángel Natanael Rojas Velázquez^{1*}, José Luis Lara Mireles¹, José Luis Woo Reza¹

¹Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Agronomía. Carretera San Luis-Matehuala km. 14.5. C.P. 78321. Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí, México. Teléfono 01 444 852 4056. (mauricio.romero@uaslp.mx; jllara@uaslp.mx; luis.woo@uaslp.mx).

*Autor para correspondencia: angel.rojas@uaslp.mx

Resumen

En la búsqueda de mayor eficiencia de los fertilizantes se ha investigado la viabilidad del uso de materiales naturales para la liberación lenta de nutrientes. En este trabajo se estudió el comportamiento de un potencial fertilizante preparado por adsorción de fosfato sobre una órganobentonita (OB) y su efecto en el crecimiento de plantas de lechuga. Se evaluaron 8 tratamientos en un sistema hidropónico de raíz flotante: solución Steiner (0/100), tres tratamientos con el 25, 50 y 75 % del P aportado con OB-fosfato (OBP) en soluciones Steiner modificadas con P reducido al 75, 50 y al 25 % del P de la solución Steiner (25/75, 50/50 y 75/25), y cuatro tratamientos con 25, 50, 75 y 100 % del P aportado con OBP en una solución Steiner modificada sin P (25/0, 50/0, 75/0 y 100/0). El diseño experimental fue completamente al azar con 6 repeticiones y 48 unidades experimentales. Además, en laboratorio se realizó un experimento sin plantas para evaluar la liberación del P de la OBP. La liberación de P fue mayor a mayor contenido de OBP aplicado; la mayor cantidad de P liberada a los 35 días fue en el 100/0 (7.27 mg L⁻¹) y la menor en 25/75 (3.27 mg L⁻¹) y 25/0 (2.18 mg L⁻¹). El consumo de P por las plantas fue mayor en los tratamientos con más fertilizante soluble debido a que la OBP liberó P lentamente La

órganobentonita puede adsorber P y posteriormente liberarlo gradualmente, lo que indica que puede ser utilizado como fertilizante de lenta liberación

Palabras clave: adsorción, nanofertilizante, fósforo, organoarcillas

Summary

In the search for greater efficiency of fertilizers, the feasibility of natural materials for the slow release of nutrients has been investigated. In this work we studied the behavior of a potential fertilizer prepared by adsorption of phosphate on an organobentonite (OB) and its effect on the growth of lettuce plants. 8 treatments were evaluated in a floating root hydroponic system: Steiner solution (0/100), three treatments with 25, 50 and 75 % of the P contributed with OB-Phosphate (OBP) in Steiner solutions modified with P reduced to 75, 50 and 25 % of the P of the Steiner solution (25/75, 50/50 and 75/25), and four treatments with 25, 50, 75 and 100 % of the P contributed with OBP in a modified Steiner solution without P (25/0, 50 / 0, 75/0 and 100/0). The experimental design was completely randomized with 6 repetitions and 48 experimental units. In addition, an experiment without plants was carried out in the laboratory to evaluate the P release of the OBP. The release of P was greater at a higher content of OBP applied; the highest amount of P released at 35 days was 100/0 (7.27 mg L⁻¹) and the lowest was 25/75 (3.27 mg L⁻¹) and 25/0 (2.18 mg L⁻¹). The consumption of P by the plants was greater in the treatments with more soluble fertilizer because the OBP released P slowly. The bentonite organism can adsorb P and later release it gradually, which indicates that it can be used as slow release fertilizer.

Key words: adsorption, nanofertilizer, phosphorus, organoclays

Introducción

Los fertilizantes químicos han sido un factor determinante para aumentar la productividad agrícola mundial (Alexandratos y Bruinsma, 2012) y se pronostica que las demandas de fuentes de N, P₂O₅ y K₂O crecerán anualmente en promedio 1.5, 2.2 y 2.4 % respectivamente de 2015 a 2020, y también la capacidad mundial de producción de

fertilizantes (FAO, 2017). El fósforo (P) es uno de los nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas y juega un papel fundamental en una variedad de procesos tales como generación de energía, síntesis de ácidos nucleicos, fotosíntesis, respiración, reacciones redox, metabolismo de carbohidratos y fijación de nitrógeno (Hanif *et al.*, 2015). Sin embargo, su alta tasa de fijación química, velocidad de difusión lenta y fracción sustancial de P orgánicamente ligado en el suelo hacen que sea uno de los nutrientes menos disponibles para los cultivos (Wu *et al.*, 2013). Con frecuencia el P es el elemento más limitante para el crecimiento y desarrollo de las plantas debido a su escasa disponibilidad (Dar *et al.*, 2017). Para obtener altos rendimientos de los cultivos, el P a menudo se aplica excesivamente, lo que lleva a acelerar la degradación del suelo y la eutrofización de cuerpos de agua (Liu y Lal, 2014). Los fertilizantes de liberación lenta fueron desarrollados y han sido ampliamente usados para mejorar la eficiencia de uso de los nutrientes, permiten reducir la lixiviación de estos y las emisiones de gases de efecto invernadero (Yuan, 2014), sin embargo, el revestimiento con polímeros, que es la tecnología dominante en la producción de estos fertilizantes, implica complicados procesos de producción que incluyen el calentamiento y la separación por tamaño de los fertilizantes y la fusión y nebulización de polímeros, que hacen que estos fertilizantes sean caros (Trenkel, 2010). A pesar de la necesidad de desarrollar opciones alternativas para diferentes usos, los esfuerzos de investigación durante las últimas décadas no han tenido resultados fructíferos (Preetha y Balakrishnan, 2017). Se ha estudiado la viabilidad de utilizar materiales naturales como las arcillas y zeolitas, para la liberación lenta de nutrientes (Yuan, 2014; Bhardwaj *et al.*, 2012). La viabilidad de utilizar órganoarcillas como fertilizantes de liberación lenta de nutrientes ha sido investigada por diversos autores (Malekian *et al.*, 2011, Bhardwaj *et al.*, 2012, Berber *et al.*, 2014). Dentro de las órganoarcillas se destacan las órgano Bentonitas (OB) por sus altas propiedades de adsorción y capacidad de intercambio iónico (Pandey y Ramontja, 2016); estas son sintetizadas por sorción de un tensioactivo catiónico sobre una bentonita, que carga de negativa a positiva la superficie externa y el espacio de la capas intermedias (Ceyhan *et al.*, 1999), lo que hace posible la adsorción de formas aniónicas como el fosfato. Por esto han sido propuestas como fertilizantes de liberación lenta. (Yuan, 2014). Sin embargo, a pesar de resultados promisorios, el efecto de la liberación de fósforo con estos materiales

no ha sido estudiado, por lo que se requiere investigar el efecto en el crecimiento de las plantas.

El uso de cultivos hidropónicos permite aumentar el control de los factores que intervienen en el funcionamiento de las raíces (Podar, 2013). Además, en hidroponía los cálculos se hacen por el principio de balance de masas, donde la masa de nutrientes está, ya sea en la solución o en las plantas (Bugbee, 2004). Lo que permitiría evaluar la aplicación de los fertilizantes de lenta liberación en un medio líquido sin interferencias del suelo.

El objetivo del presente trabajo es estudiar el comportamiento de un potencial fertilizante preparado por medio de adsorción de iones fosfato sobre una OB y su efecto en el crecimiento de plantas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en un medio hidropónico. La hipótesis fue que la aplicación de fertilizante a base de OB-fosfato (OBP) libera P en la solución nutritiva en forma lenta, y éste puede ser utilizado en el crecimiento de la lechuga.

Materiales y Métodos

La preparación del material fertilizante se realizó en el Laboratorio de Química Ambiental de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la U.A.S.L.P., con una bentonita proveniente del municipio de Guadalcázar, S.L.P., México, por adsorción del surfactante catiónico bromuro de hexadeciltrimetilamonio (HDTMA $C_{19}H_{42}BrN$, $364.45 \text{ g mol}^{-1}$; Aldrich Chemicals). Siguiendo la metodología propuesta por Jacobo-Azuara *et al.* (2006), se obtuvo una órganobentonita (OB) que adsorbió la máxima cantidad de HDTMA al formarse una bicapa de surfactante con una superficie cargada positivamente. Posteriormente, se obtuvo el material fertilizante órganobentonita-fosfato (OBP) por adsorción de iones fosfato de una solución acuosa de fosfato monobásico de potasio (KH_2PO_4) 400 mM sobre la OB durante un periodo de contacto de 7 días. Al finalizar este periodo y alcanzarse el equilibrio de adsorción, se determinó la concentración de P de la solución. La cantidad de P adsorbido en la OBP fue de 140.4 mg g^{-1} y se determinó por la diferencia de la concentración inicial con la final.

En el Centro de Hidroponía de la Facultad de Agronomía y Veterinaria se estableció en marzo del 2018 un experimento con plantas de lechuga en un sistema hidropónico de

raíz flotante en un invernadero tipo túnel de 9 x 5 m. La temperatura media fue de 24.6 °C y una luminosidad media de 17,718 lux. Se utilizaron semillas de la variedad Montemar sembradas en febrero en un sustrato “Sunshine mix 3” en una charola de poliestireno de 200 cavidades, se regó diariamente y se fertilizó con solución Steiner (Steiner, 1961); se determinó con análisis de agua un pH de 7.5 y una CE de 0.6 dS m⁻¹. A los 36 días después de la siembra se realizó el trasplante en el sistema hidropónico, se lavaron las raíces para retirar el sustrato adherido y se colocó cada una planta en un recipiente de plástico con una capacidad de 100 mL de solución nutritiva Steiner (Steiner, 1961) con una composición en meq L⁻¹ de: 6 NO₃⁻, 0.5 H₂PO₄⁻, 3.5 SO₄²⁻, 3.5 K⁺, 2 Mg²⁺ y 4.5 Ca²⁺. Se utilizó agua desionizada para la preparación de solución nutritiva y los fertilizantes utilizados fueron Ca(NO₃)₂·4H₂O, KNO₃, MgSO₄·7H₂O, K₂SO₄ y H₃PO₄. Los micronutrientes se añadieron con Carboxy Micro, el cual aporta Fe 5 %, Zn 2.5 %, Mn 1 % y B 0.5 % en forma quelatada EDDHA. La aireación de la solución fue con una bomba de pecera (Elite Maxima 2.5 PSI), con una aportación de oxígeno entre 3 y 5 mg L⁻¹. En este medio se cultivaron las plantas del experimento en un período de adaptación de 5 días previos a la aplicación de los tratamientos.

Se evaluaron 8 tratamientos: solución nutritiva de Steiner (0/100), tres tratamientos con OBP que aportan el 25, 50 y 75 % del P total contenido en la solución Steiner más una solución Steiner modificada con P reducido, al 75, 50 y al 25% para completar el 100 % de P total (25/75, 50/50 y 75/25) y cuatro tratamientos con OBP 25, 50, 75 y al 100 % en la misma solución Steiner modificada sin P (25/0, 50/0, 75/0 y 100/0). En los tratamientos con P reducido y en el 100/0, la cantidad de OBP agregada se calculó de tal forma que la suma del P adsorbido en el material más el disuelto en la solución inicial fuera igual a la de P de la solución Steiner (0.5 meq L⁻¹).

La duración del experimento fue de 13 días, un tiempo intermedio basado en experimentos con fertilizantes de lenta liberación. Se consideró el tiempo de 15 días en columnas de suelo que utilizaron Bhardwaj y Tomar (2011), Bhardwaj *et al.* (2012) y además los de Hummel y Waddington (1986) y King y Balogh (2000), quienes mencionan que el uso de cantidades de disolución de fertilizante durante 7 días es aceptable para predecir las tasas de liberación en suelo. Durante el experimento se agregó diariamente agua desionizada para mantener constante el volumen inicial y se renovó la solución

nutritiva cada vez que la conductividad eléctrica (CE) descendió a causa de la absorción de nutrientes por las plantas, a valores comprendidos entre 0.4 y 0.5 dS m⁻¹ (Bugbee, 2004), lo cual se realizó en todos los tratamientos de 1 a 5 veces.

Las variables determinadas cada 24 horas fueron: consumo de agua (con bureta graduada), CE de la solución nutritiva (Medidor Orión 155, USA). Los días 1, 3, 5, 7, 9, 11 y 13 se determinó el P en la solución nutritiva por el método del ácido ascórbico (A.P.H.A, 1985) (Espectrofómeto Thermo-Scientific mod Genesys 10UV) tomando una muestra de 1 mL de cada recipiente. Las variables medidas al final de la evaluación: biomasa seca de raíz, hojas y total (con estufa de secado de aire forzado Omron, a 70 °C durante 72 horas hasta obtener peso constante y balanza digital, Ohaus PAJ4102N Gold series), área foliar (software imageJ), y P total en hojas por el método del ácido vanadomolibdofosfórico (Alcántar y Sandoval, 1999). El diseño experimental fue un completamente al azar con 6 repeticiones por tratamiento y un total de 48 unidades experimentales, considerando cada planta como una unidad experimental (U.E.)

Simultáneamente en el laboratorio se realizó un experimento sin plantas para evaluar por separado la liberación de P de la OBP de los mismos tratamientos. Se colocaron en recipientes iguales cerrados, en oscuridad y a temperatura ambiente, en 4 repeticiones por tratamiento y un total de 32 unidades experimentales (U.E.). Se determinó el P en solución los días 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 20 y 35 por el procedimiento anteriormente descrito. Se consideró como P liberado (desorbido) la cantidad de P que se incrementó por arriba de la concentración inicial.

Las concentraciones medidas durante el experimento sin plantas se utilizaron para estimar la concentración de P a la que las plantas habrían tenido acceso en cada día transcurrido desde el inicio o desde el último cambio de la solución nutritiva (P potencialmente disponible). El consumo de fósforo por las plantas se calculó en cada U.E. por la diferencia entre la concentración encontrada en la solución nutritiva de las plantas menos el P potencialmente disponible del día correspondiente.

En los dos experimentos con los datos obtenidos se realizó ANDEVA y una prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) para la comparación de medias entre tratamientos, con SAS versión 9.0.

Resultados y Discusión

El P liberado por el material fertilizante OBP (Figura 1), al utilizar fertilizante químico de alta solubilidad, mostró inicialmente la concentración calculada en la solución Steiner 0/100 (16 mg L⁻¹), 75/25 (12 mg L⁻¹), 50/50 (8 mg L⁻¹) y 25/75 (4 mg L⁻¹). Al considerar el análisis estadístico de la OBP se mostró que la liberación fue de menos a más concentración del contenido aplicado y que el uso del fertilizante soluble no intervino en la liberación. Se observó que el mayor contenido liberado de la OBP en los 35 días fue con 100/0 (7.27 mg L⁻¹) y el menor contenido con 25/75 (3.27 mg L⁻¹) y 25/0 (2.18 mg L⁻¹). Bansiwali *et al.* (2006) en un experimento de flujo constante estudiaron la liberación lenta de P con una zeolita modificada con surfactante y KH₂PO₄; sus resultados muestran que la liberación de P por la zeolita modificada fue alrededor de 1080 h (45 días) y el KH₂PO₄ a las 264 h (11 días) dejó de liberar, por lo que sugieren un potencial de utilización como fertilizante de lenta liberación.

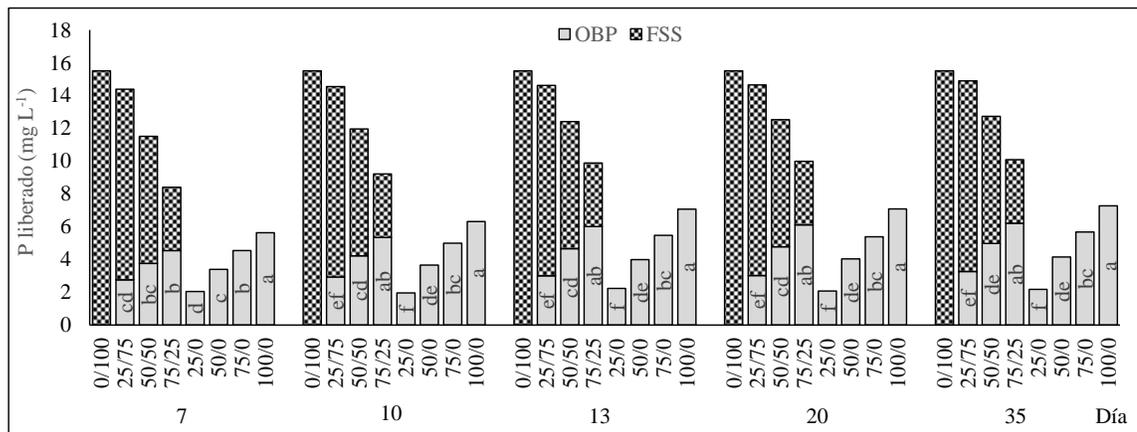


Figura 1. Comportamiento del contenido de fósforo aplicado con órganobentonita fosfatada (OBP)/Fertilizante en solución Steiner (FSS) en agua desionizada sin plantas. Letras distintas en los tratamientos con OBP indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

En el consumo de fósforo (Figura 2), desde los primeros días hasta el último día se diferenció un mayor consumo en los tratamientos con fertilizante soluble en la solución sin y con OBP. Esto es debido a que el fertilizante soluble aplicado el P fue liberado desde el primer día (Figura 3) y en los que contenían OBP se liberó gradualmente. De este modo, al final de la evaluación se observó que a mayor cantidad de fertilizante soluble aplicado

en los tratamientos, el consumo por la planta es mayor, siendo los valores de tratamientos de OBP sin fertilizante soluble en los que el consumo de P fue menor sin notar diferencias entre ellos. En este caso mencionan Johnston *et al.* (2014) que existe una correlación lineal positiva entre el incremento en la aplicación de P y el contenido total en el medio radical.

De este modo, al aplicar más cantidad de P la raíz tiene más P disponible y consume más cantidad, como pasó en los tratamientos con el fertilizante soluble; sin embargo, la OBP también liberó gradualmente una cantidad de P que la planta consumió. En este sentido, Trenkel (2010) menciona que la liberación lenta se asocia con el retraso del mecanismo de liberación de nutrientes. Lo ideal sería hacer coincidir su liberación con los requisitos nutricionales del cultivo o ampliar más la disponibilidad que los fertilizantes de alta solubilidad (Campos-Bernardi *et al.*, 2016).

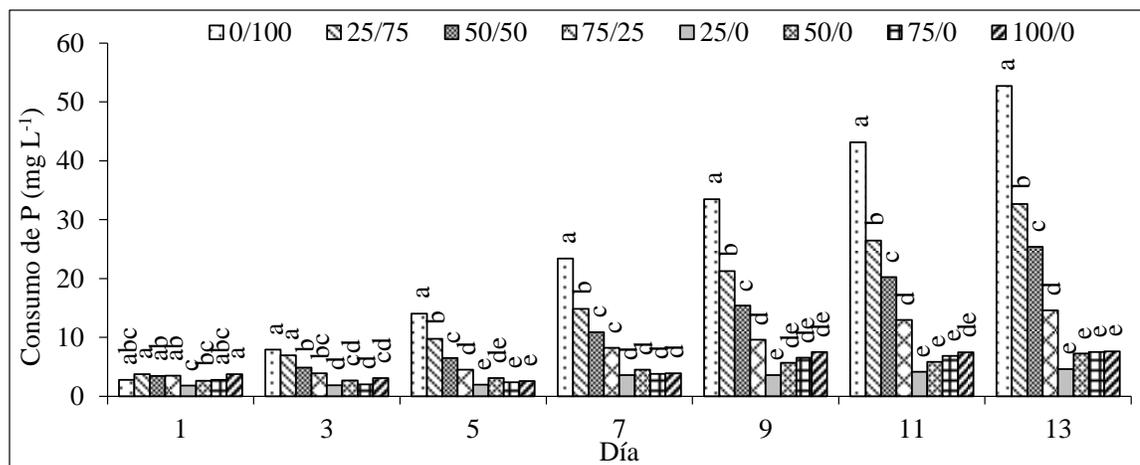


Figura 2. Consumo de fósforo por las plantas durante el experimento de los tratamientos con Órganobentonita fosfatada (OBP)/Fertilizante en solución Steiner, para determinar el efecto de un fertilizante fosfatado de órganobentonita en el crecimiento de lechuga hidropónica. Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

En el contenido de fósforo en la planta (Figura 3) se observó que los tratamientos con fertilizante soluble mostraron los mayores valores, con el tratamiento 0/100 que fue mayor en 17.3 % que el 25/75 y 50/50, 40.8 % más que el 75/25 y el 100/0, 50.1 % más que el 25/0, el 50/0 y el 75/0. Cabe señalar que el mayor contenido de OBP (100/0) fue igual estadísticamente a dos de los tratamientos con OBP/ fertilizante soluble (50/50 y 75/25). Los menores contenidos de P en hojas se presentan en los tratamientos que tuvieron

menores concentraciones de P en la solución nutritiva. En este sentido, Verónica *et al.* (2017) mencionan que las concentraciones de P en hojas se incrementan a mayor contenido de P disponible para las raíces. Perez-Melián *et al.* (1977) reportaron contenidos totales de 0.4 a 0.5 % en el tejido de plantas de lechuga cultivadas 25 días en una solución universal de Steiner y de 0.20 % para lechugas cultivadas en una solución sin P, en las que se observaron síntomas marcados de deficiencia. En este experimento solo los tratamientos 25/0, 50/0 y 75/0 tuvieron valores inferiores a estos (respectivamente 0.27, 0.31 y 0.37 %), Este efecto se puede atribuir a las bajas concentraciones de P de las soluciones nutritivas que tuvieron estos tratamientos, lo cual provocó una baja absorción del nutriente.

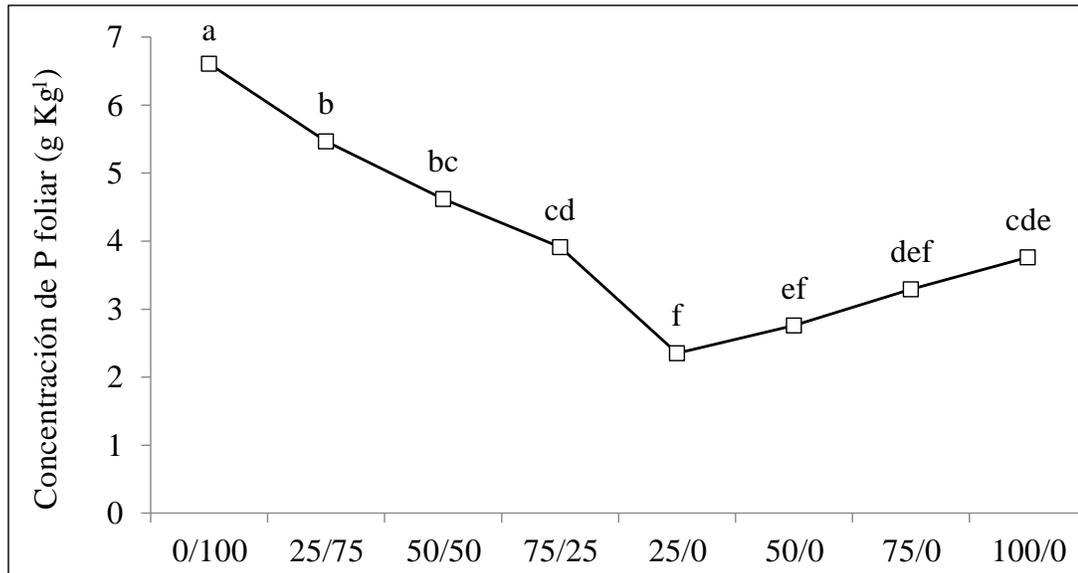


Figura 3. Concentración de fósforo total en hojas de los tratamientos con órganobentonita fosfatada (OBP)/Fertilizante en solución Steiner, para determinar el efecto de un fertilizante fosfatado de órganobentonita en el crecimiento de lechuga hidropónica. Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Biomasa seca (Figura 4 A): la acumulación de biomasa en la raíz no fue diferente significativamente con la aplicación de los tratamientos con P. Este mismo comportamiento lo mencionan Verónica *et al.* (2017) en el cultivo del arroz. Esto puede ser atribuido a que una disminución de P afecta menos el crecimiento de la raíz que de la parte aérea (Dar *et al.*, 2017; Fageria y Moreira, 2011), debido a que disminuye el tamaño

de hojas y que los fotoasimilados se translocan hacia la raíz mejorando su crecimiento (Balemi y Negisho, 2012).

En las hojas la aplicación de 0/100, 25/75 y 50/0 mostró los valores más altos en hojas. Sin embargo, el 0/100 es el que obtuvo 27.7 % mayor diferencia. La aplicación de 25/75 y 50/0 fueron igual estadísticamente al resto de los tratamientos. Esto es asociado a una reducción del crecimiento de la hoja bajo un estrés por P (Cakmak, 1994) y debido a una disminución de la división celular y elongación de las células, lo que afecta el tamaño final de la hoja (Kavanová *et al.*, 2006).

En la biomasa seca total el 0/100 obtuvo los mayores valores, 28 % más que el 75/25 y 33 % más que el 50/0; sin embargo, 75/25 y 50/0 fueron igual a los demás tratamientos. El crecimiento de raíz y parte aérea son afectados directamente por la disponibilidad de P (Wissuwa, *et al.*, 2005). En este sentido, una aplicación de menor cantidad de P reduce la tasa de crecimiento y limita fuertemente la acumulación de biomasa (Veronica *et al.*, 2017, Hodges y Constable, 2010).

En el área foliar (Figura 4 B), se observó 23.5 % más con el tratamiento 0/100 que en el resto de los tratamientos. La disminución de P reduce el área foliar en el cultivo de frijol (Hernández *et al.*, 2007) y en arroz (Veronica *et al.*, 2017). De acuerdo con Hodges y Constable (2010), el P en menor cantidad reduce la expansión de las hojas por lo que esto disminuye el área foliar total.

En el consumo de agua (Figura 5), en el primer día se obtuvo con el 50/0 un 21 % más que el tratamiento 0/100. En los días tres y cinco no se mostraron diferencias entre tratamientos. A partir del séptimo día se observó una diferencia de 26 hasta 32 % entre los tratamientos (0/100) y la máxima cantidad de OBP aplicada (100/0). En la última fecha de evaluación, a los 13 días, la diferencia se hizo evidente en los tratamientos 25/0, 75/0 y 100/0 con un 24 % más comparado con 0/100 que tuvo un consumo total de 400 mL. En este sentido, mencionan Hodges y Constable (2010) que bajo condiciones de baja disponibilidad de P decrece el suministro de agua por las raíces. En este caso, el menor consumo de agua en los tratamientos con OBP puede ser atribuido a este efecto. Esto es debido a que la disminución de P ocasiona una reducción en la conductancia estomática, intercambio gaseoso y tasa de transpiración, lo que reduce el área foliar y esto provoca menor consumo de agua (Veronica *et al.*, 2017).

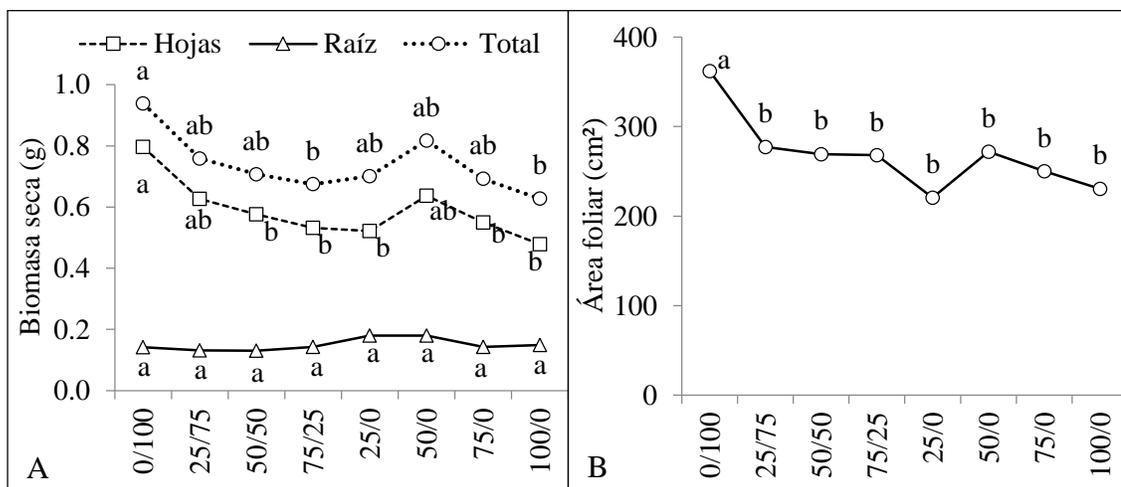


Figura 4. Biomasa seca de hojas, raíz y total (A) y área foliar (B) de los tratamientos con órganobentonita fosfatada (OBP)/Fertilizante en solución Steiner (FSS), para determinar el efecto de un fertilizante fosfatado de órganobentonita en el crecimiento de lechuga hidropónica. Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

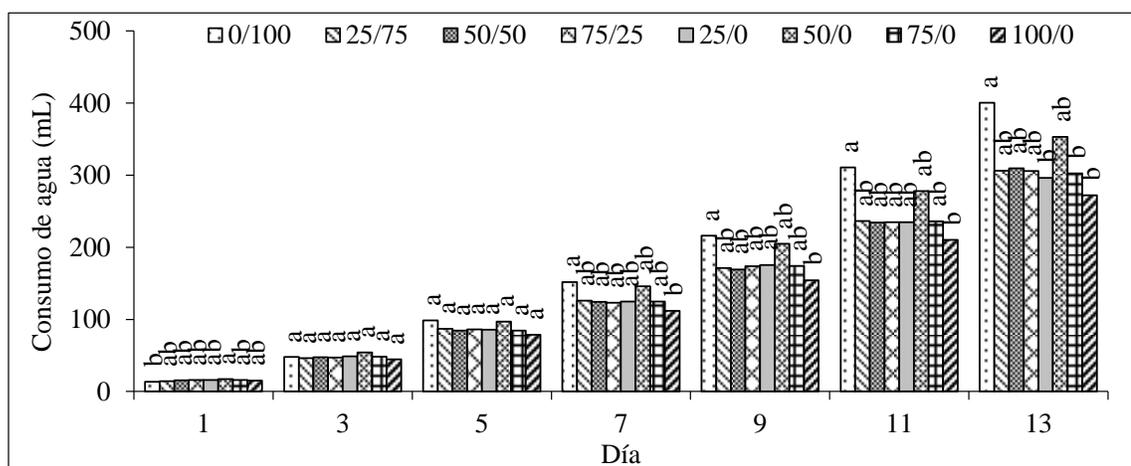


Figura 5. Consumo de agua durante el experimento de los tratamientos con órganobentonita fosfatada (OBP)/Fertilizante en solución Steiner (FSS), para determinar el efecto de un fertilizante fosfatado de órganobentonita en el crecimiento de lechuga hidropónica. Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Conclusiones

La órganobentonita puede incrementar la eficiencia de la utilización del P al liberarlo de manera lenta; esto se demostró en laboratorio sin plantas y en invernadero con plantas de lechuga, sin embargo falta demostrarlo en suelo. Estos resultados indican que la

bentonita al modificarse con un surfactante adsorbe P que posteriormente libera gradualmente, lo que indica que puede ser utilizado como un fertilizante de lenta liberación ya que contribuye a incrementar la retención y absorción de P en el medio utilizado.

Literatura Citada

- Alcántar, G. G. y Sandoval, M. 1999. Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Publicación Especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México. 156 p.
- Alexandratos, N. and Bruinsma, J. 2012. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA Working paper No. 12-03. Rome, FAO
- American Public Health Association (A.P.H.A.). 1985. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, Inc. 16th edition. Washington, D.C. U.S.A. 4/187-4/203 pp.
- Balemi, T. and Negisho, K. 2012. Management of soil phosphorus and plant adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: a review. *Journal of soil science and plant nutrition*. 12(3):547-562.
- Bansiwal, A. K.; Rayalu, S. S.; Labhasetwar, N. K.; Juwarkar, A. A. and Devotta, S. 2006. Surfactant-modified zeolite as a slow release fertilizer for phosphorus. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 54(13):4773-4779.
- Berber, M. R.; Hafez, I. H.; Minagawa, K. and Mori, T. 2014. A sustained controlled release formulation of soil nitrogen based on nitrate-layered double hydroxide nanoparticle material. *Journal of soils and sediments*. 14(1):60-66.
- Bhardwaj, D. and Tomar, R. 2011. Use of surface modified inorganic nano materials as slow release nitrogen fertilizer. In: Behnassi, M., S.A. Shahid and J. D'Silva. (eds.). *Sustainable Agricultural Development*. Springer Science. Netherlands. 171-184 pp.
- Bhardwaj, D.; Sharma, M.; Sharma, P. and Tomar, R. 2012. Synthesis and surfactant modification of clinoptilolite and montmorillonite for the removal of nitrate and preparation of slow release nitrogen fertilizer. *Journal of hazardous materials*. 227:292-300.
- Bugbee, B. 2004. Nutrient management in recirculating hydroponic culture. *Acta Hort.* 648: 99-112.

- Cakmak, I.; Hengeler, C. and Marschner, H. 1994. Partitioning of shoot and root dry matter and carbohydrates in bean plants suffering from phosphorus, potassium and magnesium deficiency. *Journal of Experimental Botany*. 45(9):1245-1250.
- Campos-Bernardi, A. C.; Polidoro, J. C.; de Melo Monte, M. B.; Pereira, E. I.; de Oliveira, C. R. and Ramesh, K. 2016. Enhancing Nutrient Use Efficiency Using Zeolites Minerals -A Review. *Advances in Chemical Engineering and Science*. 6:295-304.
- Ceyhan, Ö.; Güler, H. and Güler, R. 1999. Adsorption mechanisms of phenol and methylphenols on organoclays. *Adsorpt. Sci. Technol.* 17:469-477.
- Dar, T. A.; Uddin, M.; Ali, A. and Khan, M. M. A. 2017. Understanding the Dynamics of Phosphorus Starvation and Plant Growth. *In: Essential Plant Nutrients* Springer, Cham. 147-154 pp.
- Fageria, N. K. and Moreira, A. 2011. The role of mineral nutrition on root growth of crop plants. *In: Advances in agronomy*. (Vol. 110). Academic Press. 251-331 pp.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2017. World fertilizer trends and outlook to 2020. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i6895e.pdf>
- Hanif, H. U.; Arshad, M.; Ali, M. A.; Ahmed, N. and Qazi, I. A. 2015. Phyto-availability of phosphorus to *Lactuca sativa* in response to soil applied TiO₂ nanoparticles. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*. 52(1):177-182.
- Hernández, G.; Ramírez, M.; Valdés-López, O.; Tesfaye, M.; Graham, M. A.; Czechowski, T.; Schlereth, A.; Wandrey, M.; Erban, A.; Cheung, F.; Wu, H. C.; Lara, M.; Town, C. D.; Kopka, J.; Udvardi, M. K. and Vance, C. P. 2007. Phosphorus stress in common bean: root transcript and metabolic responses. *Plant physiology*. 144(2): 752-767.
- Hodges, S. C. and Constable, G. 2010. Plant responses to mineral deficiencies and toxicities. *In: Physiology of cotton*. Springer, Dordrecht. 142-161 pp.
- Hummel Jr, N. W. and Waddington, D. V. 1986. Field dissolution of sulfur-coated ureas in turfgrass. *HortScience* 21:1155-1156.
- Jacobo-Azuara, A.; Leyva-Ramos, R.; Padilla-Ortega, E.; Aragón-Piña, A.; Guerrero-Coronado, R. M. and Mendoza-Barrón, J. 2006. Removal of toxic pollutants from aqueous solutions by adsorption onto an organobentonite. *Adsorpt. Sci. Technol.* 24:687-699.
- Johnston, A. E.; Poulton, P. R.; Fixen, P. E. and Curtin, D. 2014. Phosphorus: its efficient use in agriculture. *In: Advances in agronomy*. Vol. 123, pp. 177-228. Academic Press.

- Kavanová, M.; Lattanzi, F. A.; Grimoldi, A. A. and Schnyder, H. 2006. Phosphorus deficiency decreases cell division and elongation in grass leaves. *Plant Physiology*. 141(2):766-775.
- King, K.W. and Balogh, J.C. 2000. Development of a nitrogen-release algorithm for slow-release fertilizers. *Trans ASAE* 43:661-664
- Liu, R. and Lal, R. 2014. Synthetic apatite nanoparticles as a phosphorus fertilizer for soybean (*Glycine max*). *Scientific reports*, 4:5686.
- Malekian, R.; Abedi-Koupai, J. and Eslamian, S. S. 2011. Influences of clinoptilolite and surfactant-modified clinoptilolite zeolite on nitrate leaching and plant growth. *Journal of hazardous materials*. 185(2):970-976.
- Pandey, S. and Ramontja, J. 2016. Recent modifications of bentonite clay for adsorption applications. *Focus on Sciences*. 2(4):1-10.
- Perez-Melián, G.; Escalona, A. L. and Steiner, A. A. 1977. Leaf analysis as a diagnosis of nutritional deficiency or excess in the soilless culture of lettuce. *Plant and soil*. 48(2):259-267.
- Podar, D. 2013. Plant growth and cultivation. *In: Frans J.M. Maathuis (ed.). Plant Mineral Nutrients: Methods and Protocols. Methods Mol. Biol.* 953:23–45
- Preetha, P. S. and Balakrishnan, N. 2017. A Review of nano fertilizers and their use and functions in soil. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* 6(12):3117-3133.
- Steiner, A. A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil*. 15(2):134-154.
- Trenkel, M. E. 2010. Slow-and controlled-release and stabilized fertilizers: An option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. 2nd ed. International Fertilizer Industry Association, Paris, France. 160 pp.
- Veronica, N.; Subrahmanyam, D.; Kiran, T.V.; Yugandhar, P.; Bhadana, V. P.; Padma, V.; Jayasree, G. and Volet, S. R. 2017. Influence of low phosphorus concentration on leaf photosynthetic characteristics and antioxidant response of rice genotypes. *Photosynthetica*. 55(2):285-293.
- Yuan, G. 2014. An organoclay formula for the slow release of soluble compounds. *Applied Clay Science*, 100, 84-87.
- Wissuwa, M.; Gamat, G. and Ismail, A. M. 2005. Is root growth under phosphorus deficiency affected by source or sink limitations?. *Journal of Experimental Botany*. 56(417):1943-1950.

Wu, P.; Shou, H.; Xu, G. and Lian, X. 2013. Improvement of phosphorus efficiency in rice on the basis of understanding phosphate signaling and homeostasis. *Current Opinion in Plant Biology*. 16(2):205-212.

CAPÍTULO III. CONCLUSIÓN GENERAL

La bentonita modificada con el tensioactivo HDTMA muestra una significativa capacidad para adsorber aniones nitrato y fosfato y producir los materiales OBN y OBP. En la comparación entre los dos materiales fertilizantes, se observa que la cantidad de P adsorbido en la OBP (140.4 mg g^{-1}) representa el doble de la de N en la OBN (69.77 mg g^{-1}); sin embargo, si se calculan con base en los pesos molares de cada elemento, se estima que la cantidad adsorbida de estos elementos es similar y, por lo tanto, también las concentraciones de los aniones fosfato y nitrato adsorbidos sobre la OB.

Al comparar las cantidades de OBN/OBP utilizadas en los dos experimentos, la cantidad utilizada OBN fue 11.6 veces mayor que la de OBP en los tratamientos equivalentes, debido a que en la solución nutritiva Steiner (Steiner, 1961) la concentración normal de NO_3^- es 12 veces mayor que la de H_2PO_4^- , y en consecuencia, en el cálculo del peso de OBN/OBP necesario para obtener las cantidades equivalentes de cada elemento en la solución nutritiva en los tratamientos con N/P reducido, se presenta la misma proporción. En este sentido, la toxicidad que se observó en el experimento con nitrato pudo ser consecuencia de la mayor liberación del surfactante HDTMA en el medio de cultivo y que su composición afectó los cultivos.

Los resultados de los experimentos realizados indican que la bentonita al modificarse con un tensioactivo tiene capacidad para adsorber cantidades importantes de N y P y que posteriormente pueden liberarse gradualmente en el medio de cultivo de las plantas de lechuga, lo que indica que pueden ser utilizados como fertilizantes de lenta liberación y que contribuyen a mejorar la eficiencia de uso de los nutrientes. Sin embargo falta realizar experimentos en el suelo que demuestren su efectividad como fertilizante de lenta liberación.