

Nanocompuesto de Nitrógeno como Fertilizante de Liberación Lenta en Columnas de Suelo con Plantas de Lechuga Nitrogen Nanocomposite as a Slow-Release Fertilizer in Soil Columns with Lettuce Plants

Oscar Iván Guillén-Castillo¹, Ángel Natanael Rojas-Velázquez^{1†},
Jorge Alonso Alcalá-Jáuregui¹, Catarina Loredo-Osti¹,
Hugo Magdalena Ramírez-Tobías¹, Vincenzo Bertolini² y Juan Carlos Rodríguez Ortiz¹

¹ Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Agronomía y Veterinaria. Carretera a Matehuala km. 14.5, Ejido Palma de la Cruz. 78321 Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí, México; (O.I.G.C.), (A.N.R.V.), (J.A.A.J.), (C.L.O.), (H.M.R.T.), (J.C.R.O.).

[†] Autor para correspondencia: ángel.rojas@uaslp.mx

² Colegio de la Frontera, Unidad Tapachula. Carretera antiguo aeropuerto km 2.5, Centro. 30700 Tapachula, Chiapas, México; (V.B.).

RESUMEN

El uso continuo de fertilizantes nitrogenados en exceso genera riesgos ambientales al aumentar en el suelo la acumulación, volatilización y lixiviación de nitratos, que provocan pérdidas y baja eficiencia en la utilización de N. En este estudio, el objetivo fue evaluar la aplicación de nanocompuestos nitrogenados (NCN) como fertilizante de liberación lenta en el suelo y su efecto en el crecimiento del cultivo de lechuga. El NCN se preparó por la sorción de un surfactante catiónico en una arcilla de bentonita. El estudio se realizó en columnas de suelo, los tratamientos evaluados fueron relaciones de NCN y fertilizante convencional (FC) 25/0, 50/0, 75/0 y 100/0, 0/100, 25/75, 50/50 y 75/25. Las variables evaluadas fueron: peso fresco, biomasa seca, área foliar, conductividad eléctrica, concentración de NO_3^- en lixiviado y hoja, unidades SPAD y NDVI, además de la liberación del NCN en agua desionizada. Los resultados obtenidos indican que después de 40 días los tratamientos con NCN igualaron al control excepto el tratamiento 25/0 que redujo las variables peso fresco 20% y el área foliar 18% con respecto al control 0/100. Los valores de SPAD y NDVI no tuvieron diferencias significativas entre tratamientos. Las relaciones NCN/FC 0/100, 50/50 y 75/25 aumentaron 19% la concentración de nitratos en hojas. El tratamiento 100/0 aumentó biomasa seca total con 48%, 87% el volumen radical y 73% la biomasa seca de raíz. Los resultados de la liberación en agua desionizada confirmaron que el NCN libera gradualmente nitratos y en mayor cantidad que lo calculado. Finalmente, se concluye que el material nanocompuesto tiene el potencial de usarse como fertilizante de lenta liberación al aumentar crecimiento, por lo que podría ser una alternativa para reducir el uso de fertilizantes convencionales y disminuir las pérdidas de nitrógeno en suelo.

Palabras clave: lixiviación, nanofertilizante, nitrato, organoarcilla.

SUMMARY

The continuous use of excessive nitrogenous fertilizers generates environmental risks by increasing nitrate accumulation, volatilization and leaching in soil, which causes losses and low efficiencies in the use of nitrogen (N). The objective of the present study is to evaluate the application of nitrogenous nanocomposites (NCN) as a slow-release fertilizer (SRF) in soil and its effect on growth of the lettuce crop. The NCN was prepared by sorption of a cationic surfactant on a bentonite clay. The study was performed in soil columns; the evaluated treatments were ratios of NCN and conventional fertilizer (FC) 25/0, 50/0, 75/0 and 100/0, 0/100, 25/75, 50/50 and



Cita recomendada:

Guillén-Castillo, O. I., Rojas-Velázquez, A. N., Alcalá-Jáuregui, J. A., Loredo-Osti, C., Ramírez-Tobías, H. M., Bertolini, V., & Rodríguez-Ortiz, J. C. (2023). Nanocompuesto de Nitrógeno como Fertilizante de Liberación Lenta en Columnas de Suelo con Plantas de Lechuga. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-12. e1712. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1712>

Recibido: 24 de marzo de 2023.
Aceptado: 16 de mayo de 2023.
Artículo. Volumen 41.
Septiembre de 2023.

Editor de Sección:
Dr. Pablo Preciado Rangel
Editor Técnico:
Dra. Elizabeth Hernández Acosta



Copyright: © 2023 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

75/25. The variables evaluated were: fresh weight, dry biomass, leaf area, electrical conductivity, NO_3^- concentration in leachate and leaf, soil plant analysis development (SPAD) and normalized difference vegetation index (NDVI) units, as well as NCN release in deionized water. The results obtained indicate that the NCN treatments equaled the control after 40 days except for the 25/0 treatment that reduced the fresh weight variables by 20% and leaf area by 18% with respect to the 0/100 control. The SPAD and NVDI values did not have significant differences between treatments. The NCN/FC 0/100, 50/50 and 75/25 ratios increased nitrate concentration in leaves by 19%. The 100/0 treatment increased total dry biomass with 48%, 87% root volume and 73% root dry biomass. The results of the release in deionized water confirmed that NCN gradually releases nitrates and in higher amounts than those calculated. Finally, to conclude the nanocomposite material has the potential to be used as a slow-release fertilizer when growth increases. Therefore, nanocomposites could be an alternative to reduce the use of conventional fertilizers and nitrogen losses in soil.

Index words: *leaching, nitrate, organoclay, nanofertilizer.*

INTRODUCCIÓN

El nitrógeno es esencial para las plantas al formar parte de las proteínas, clorofila y lograr un mayor rendimiento de los cultivos (Kim, Kang, Choi y Yun, 2020), sin embargo, en el suelo se puede lixiviar en forma de nitratos, o volatilizar en forma de amoníaco, lo que induce grandes pérdidas de N, baja eficiencia, contaminación y altos costos económicos (Zhang *et al.*, 2015). Una alternativa para reducir las pérdidas de fertilizantes es suministrar nutrientes en proporciones correctas a las plantas sin disminuir el rendimiento (Pohshna y Mailapalli, 2022). Los fertilizantes de lenta liberación son una opción que intenta sincronizar la demanda de los nutrientes durante el crecimiento del cultivo (Das, 2014), reducen pérdidas de nutrientes por lixiviación y proporcionan una mayor absorción por parte de los cultivos (Kubavat *et al.*, 2020). Algunas opciones son los nanocompuestos con fertilizantes usados como de lenta liberación (Romero-Méndez, Rojas, Lara, Díaz y Woo, 2019).

En los últimos años se han utilizado materiales nanocompuestos como portadores de fertilizantes, que suministran nutrientes en forma directa en dimensión nanométrica, llamados nanofertilizantes (Guha, Gopal, Kundu y Mukherjee, 2020). El término nanofertilizante se refiere a una estructura en la dimensión de 1-100 nm (Raliya, Saharan, Dimkpa y Biswas, 2017). Los nanocompuestos se utilizan para desarrollar nanomateriales de matrices multifásicas de arcilla que se incorporan con nanopartículas para mejorar la propiedad del material (Butt y Naseer, 2020). Debido a su mayor área de superficie, los minerales de arcilla de tamaño nanométrico pueden adsorber mayores cantidades de cationes (Umar, Czinkota, Gulyás, Aziz y Hameed, 2022). Las arcillas se usan para diseñar fertilizantes de liberación controlada, estos tienen propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas y los nutrientes deben adsorberse en la matriz del material para un rendimiento óptimo (Lawrencia *et al.*, 2021). La bentonita es una arcilla considerada como un buen sustrato para desarrollar formulaciones de lenta liberación debido a sus propiedades de capacidad de intercambio catiónico, capacidad de hinchamiento (Wen *et al.*, 2016) y liberación de nutrientes (Romero-Méndez, Rojas, Lara, Woo, Alcalá y Aguilar, 2021).

El uso de órgano arcillas como fertilizantes de lenta liberación de nutrientes ha sido investigada por diversos autores (Yuan, 2014; Chi, Zhang, Xiang, Cai y Wu, 2018; Romero-Méndez *et al.*, 2019; Romero-Méndez *et al.*, 2021). Dentro de las órgano-arcillas se destacan las órgano-bentonitas por su alta 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 las capas intermedias (Ceyhan, Güler y Güler, 1999), lo que hace posible la adsorción de formas aniónicas como el nitrato (Romero-Méndez *et al.*, 2019) y fosfato (Romero-Méndez *et al.*, 2021). Las arcillas modificadas al intercambiar aniones y cationes en el suelo pueden disminuir procesos como la lixiviación de iones hacia las aguas subterráneas sin afectar el crecimiento. En base a lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar la aplicación de los nanocompuestos de N como fertilizante de liberación lenta en suelo y su efecto en el crecimiento del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L. var. *capitata*).

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó en la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, con coordenadas de 22° 14' 00.3" N y 100° 51' 46.7" O, a 1840 m de altitud. Se utilizó un invernadero tipo túnel cubierto con plástico blanco con porcentaje de sombreado del 30% en una superficie de 5 × 9 m, durante la época de invierno con temperaturas medias de 20 °C y una luminosidad de 15 412 lux durante el ciclo de cultivo de otoño-invierno.

Preparación del Material Fertilizante

El fertilizante nanocompuesto de nitrógeno (NCN) se preparó con una bentonita con espacios interlaminares en un rango de 60-100 nm (Figura 1a) microscopia electrónica de barrido (SEM, UHR FEI HELIOS NANOLAB 600, E.U.A), con una distribución uniforme de partículas (Figura 1b) microscopia electrónica de transmisión TEM (model JEM 1230, JEOL, USA). Para el cambio de polaridad se añadió el surfactante catiónico hexadecylamina (HDA $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15}\text{NH}_2$, Aldrich Chemicals) y se añadió $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ para la absorción en las láminas de la bentonita, de acuerdo con la metodología propuesta por Romero-Méndez *et al.* (2019). Se utilizó un espectrofotómetro UV-Visible (Thermo CIENTIFIC GENESYS™ 10S U.S.A.) para determinar la concentración cargada de nitrato en el material nanocompuesto. La carga se obtuvo por la diferencia de concentración final e inicial que fue de 110 mg g^{-1} de NO_3^- . Se analizó la liberación de NO_3^- del NCN durante 45 días por espectrofotometría UV-vis (Thermo CIENTIFIC GENESYS™ 10S U.S.A), se utilizó una solución Steiner de NO_3^- de 3, 6, 9 y 12 mmol L^{-1} en 50 mL de agua desionizada.

Establecimiento del Experimento

Al suelo utilizado se le realizó un análisis fisicoquímico (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002) con las determinaciones: textura franco-arenosa, arena 76%, limo 8% y arcilla 16%, densidad aparente 1.37 g cm^{-3} , pH 7.9 y CE en extracto de saturación 0.6 mS cm^{-1} , contenido de materia orgánica de 1.4%, 6.0 kg ha^{-1} de nitrógeno inorgánico, 16 kg ha^{-1} de fósforo extraíble y 374 kg ha^{-1} de potasio.

Se agregó 2.37 kg de suelo en columnas de PVC de 11 cm de diámetro y 20 cm de altura. En la parte inferior de la columna se colocó una malla de plástico de apertura menor a 1 mm para contener el suelo dentro de la columna y no interrumpir el flujo del lixiviado, además de un recipiente en la parte baja de la columna para coleccionar el drenado.

Las semillas de lechuga fueron de la variedad Montemar con una duración de 60 días, las cuales se sembraron en charolas de poliestireno de 200 cavidades, en sustrato sunshine mix 3*, se trasplantaron en el suelo de las columnas a los 20 días cuando presentaban cuatro hojas verdaderas. Para el riego se utilizó agua desionizada y consistió en un volumen de 1350 mL distribuidos en 9 riegos cada 5 días y 150 mL a los 10, 20, 30 y 40 días para obtener drenaje y analizarlo.

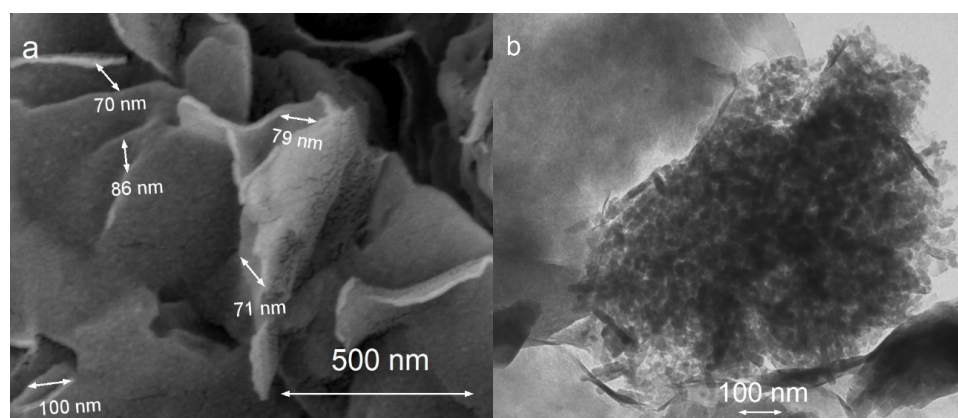


Figura 1. a) Microscopia electrónica de barrido (SEM), b) Microscopia electrónica de transmisión (TEM) del nanocompuesto nitrogenado.

Figure 1. a) Scanning electron microscopy (SEM); b) Transmission electron microscopy (TEM) of the nitrogenous nanocomposite.

Diseño y Unidades Experimentales

El experimento se estableció en un diseño completamente al azar, con 8 repeticiones por tratamiento, la unidad experimental consistió en una planta de lechuga colocada en una columna de suelo. La dosis de fertilización aplicada fue la recomendada en un cultivo de lechuga en suelo de 75 kg ha⁻¹ de Nitrógeno (De Grazia, Tiftonell y Chiesa, 2001). Los tratamientos evaluados fueron las dosis de nitrógeno complementados con nanocompuesto nitrogenado y fertilización convencional en una relación de 25/0, 50/0, 75/0 y 100/0, 0/100 (testigo), 25/75, 50/50 y 75/25 (Cuadro 1). El fertilizante de lenta liberación se aplicó en su totalidad al inicio del experimento sobre la superficie de la columna. Los fertilizantes comerciales que se usaron para completar la dosis de fertilización fueron K₂HPO₄, K₂SO₄ y Ca (NO₃)₂ + 4H₂O, los cuales se aplicaron a través de una solución nutritiva en cada riego durante todo el experimento.

Variables Evaluadas

Al final del experimento se midieron biomasa fresca (g), área foliar (cm²), volumen radical (cm³), biomasa (g) seca de raíz y biomasa seca total (radical y aérea) en horno de secado de aire forzado (Omron, Japón), a 72 °C, hasta obtener peso constante y rendimiento (mg ha⁻¹). En el drenaje se determinó la conductividad eléctrica en dS m⁻¹ (CE Meter, Walfront, China). En hojas intermedias de la parte externa de la cabeza se registró las unidades SPAD (Soil Plant Analysis Development, SPAD-502 Plus Chlorophyll Meter 2900P, Spectrum Technologies, Illinois, USA) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, Green Seeker Trimble handheld crop sensor, California, USA). Para determinar la liberación del NCN se usó un espectrofotómetro UV-Visible (Thermo CIENTIFIC GENESYS™ 10S U.S.A) y se determinó la concentración de nitrato (mg L⁻¹) en los lixiviados y en el extracto celular del peciolo (Ionómetro Laqua Twin, Horiba, Japón).

Análisis Estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza y las medias de los tratamientos se compararon mediante una prueba de Tukey ($P < 0.05$), realizada con SAS versión 9.0 (SAS Institute, 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Peso Fresco de Hojas

En el peso fresco de la lechuga (Cuadro 2), los tratamientos mostraron en promedio 16.8 g en todos los tratamientos y estos fueron diferentes estadísticamente al tratamiento 25/0 al reducir un 20% el peso fresco. Al aplicar un nanofertilizante al 50% de la dosis recomendada aumento 24% el peso fresco de la lechuga respecto

Cuadro 1. Tratamientos aplicados durante el experimento de fertilización con nanocompuesto nitrogenado en columnas de suelo en cultivo de lechuga.

Table 1. Treatments applied during the fertilization experiment with nitrogenous nanocomposite in soil columns in lettuce cultivation.

Tratamientos NCN/FC	Nanocompuesto nitrogenado	Fertilizante convencional	Unidades totales
	----- % -----		
(Testigo) 0/100	0	100	100
25/75	25	75	100
50/50	50	50	100
75/25	75	25	100
25/0	25	0	25
50/0	50	0	50
75/0	75	0	75
100/0	100	0	100

al testigo con la dosis recomendada (100 kg ha^{-1}), el efecto presentado es porque el nano tiene una dimensión que oscila entre 30 y 40 nm que retiene iones y los libera de acuerdo con la demanda del cultivo. (Nofal, Ashmawi, Mohammed, El-Abd y Helaly, 2021). En nuestro caso, las dosis con NCN a excepción de la 25/0 mostraron un peso fresco similar, lo que pudo ser debido a que se liberó el nutriente de forma disponible para la planta y en el caso del 25/0 la cantidad de nutriente disponible en el tratamiento era menor.

Área Foliar

El área foliar de los tratamientos 50/50 y 75/25 fue mayor con 16.58 % que el tratamiento 75/0 y 23% mayor que el tratamiento 25/0, que redujo 18.20% el área foliar con respecto al tratamiento testigo 0/100 (Cuadro 2). Mencionan Nofal *et al.* (2021), que al aplicar un nano fertilizante NPK en lechuga, el área foliar aumentó 31% con una dosis a la mitad de la recomendada (50 kg ha^{-1}). En este sentido Marschner (2011) mencionan que la cantidad insuficiente de nitrógeno puede limitar el crecimiento de la planta. Sin embargo, en otros casos con el uso de los nanomateriales tienen una mayor disponibilidad del N en dosis más bajas en comparación con las fuentes de N convencionales, lo que incrementa el crecimiento vegetativo de las plantas.

Volumen Radical

Se encontraron diferencias estadísticas entre tratamientos para el volumen radical de las lechugas (Cuadro 2). Con respecto al control 0/100 se registraron mayor volumen radical en los tratamientos 50/0, con 62 %, 75/0 con 78 % y 100/0 con 87 %, mientras que los tratamientos 25/75, 50/50, 75/25 y 25/0 fueron iguales al control. Okay, Karagöz, Ulaş y Özen (2020) mencionan que las plantas con fertilizantes convencionales alcanzan el desarrollo radicular adecuado para obtener el nitrógeno y los fertilizantes de lenta liberación promovieron el crecimiento de la raíz hasta el último período de cosecha.

Biomasa Seca

La biomasa seca de la raíz presentó una diferencia significativa entre el tratamiento 100/0 con un aumento de 57% en comparación con el control 0/100 (Cuadro 2). Menciona Okay *et al.* (2020) que aplicar un nanofertilizante aumentó el crecimiento radicular en plantas de lechuga romana.

Cuadro 2. Variables de crecimiento y rendimiento en el desarrollo de lechugas con fertilización nitrogenada con nanocompuesto en columnas de suelo.

Table 2. Variables of growth and yield in the development of lettuce with nitrogen fertilization and nanocomposite in soil columns.

Tratamientos Relación NCN/FC	Peso fresco	Área foliar	Volumen radical	Biomasa seca		Rendimiento
				Raíz	Total	
	g	cm ²	cm ³	g		mg ha ⁻¹
0/100	15.4 a	346 ab	17.8 c	1.5 b	3.9 b	3.85 a*
25/75	17.5 a	393 ab	23.0 abc	1.7 ab	3.9 b	4.37 a
50/50	17.3 a	386 a	26.5 abc	2.0 ab	4.1 ab	4.31 a
75/25	17.8 a	405 a	22.3 bc	1.8 ab	3.7 b	4.44 a
25/0	12.2 b	283 c	23.5 abc	1.8 ab	3.9 b	3.05 b
50/0	16.1 a	364 ab	28.8 ab	2.3 ab	5.0 ab	4.01 a
75/0	15.3 a	322 bc	31.7 ab	2.4 ab	4.7 ab	3.87 a
100/0	18.2 a	392 a	33.3 a	2.6 a	6.0 a	4.54 a
DMS	3.1	60.92	10.45	1.040	1.89	0.77
CV	10.36	9.13	21.9	28.21	23.5	10.6

* Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas Tukey ($P < 0.05$).

* Different letters in the treatments indicate significant differences Tukey's ($P < 0.05$).

La biomasa seca total presentó diferencias entre tratamientos (Cuadro 2), el tratamiento de NCN aplicado 100/0 presentó el mayor valor de 5.5 g y una diferencia de 31% comparado con 0/100, 25/75, 75/25 y 25/0 y los demás tratamientos no mostraron diferencias. De igual manera al aplicar un nanofertilizante NPK en lechuga la biomasa seca aumentó con la dosis 50 kg ha⁻¹ que es la mitad de la dosis recomendada (Nofal *et al.*, 2021). Sharaf-Eldin *et al.* (2022) mencionan que la evaluación de dos ciclos en el cultivo de lechuga aumentó de 123 a 159% el peso de la planta con aplicaciones al suelo y foliares con un nanofertilizante nitrogenado en suelo 75% nanopartículas y 25% fertilizante convencional. (Abdel-Aziz, Hasaneen y Omer, 2016) mencionan que el efecto positivo de los nanofertilizantes aumentan la materia seca, debido a la presencia de macronutrientes que mejoran la eficiencia de absorción y uso de nutrientes.

Rendimiento

En el rendimiento de la lechuga, casi todos los tratamientos fueron estadísticamente iguales al control a excepción del tratamiento 25/0 con un valor de 3.05 Mg ha⁻¹, al reducir 20.7% menos que el testigo 0/100 (Cuadro 2). Sharaf-Eldin *et al.* (2022) al aplicar fertilización nitrogenada en forma de nanofertilizante como 25% foliar y 75% fertiirrigación obtuvo rendimientos de 20 Mg ha⁻¹. En nuestro caso, el rendimiento refleja que la dosis de fertilización nitrogenada fue deficiente por el bajo crecimiento y peso que obtuvo la lechuga con los diferentes tratamientos.

Conductividad Eléctrica (CE)

Los resultados de la conductividad eléctrica del lixiviado mostrados en el Cuadro 3, a los 10, 20 y 40 días no presentaron diferencias significativas entre tratamientos. Dado que las lecturas de CE no son selectivas de iones, cualquier ion en solución contribuirá en sus valores (Cancellier, Degryse, Silva, da Silva y McLaughlin, 2018), de tal manera que la conductividad eléctrica aumenta debido a la liberación de nutrientes por parte del fertilizante (Zanin, Maucieri, Dal Ferro, Bortolini y Borin, 2020), además de que las plantas los absorben más fácilmente (Andiru, Pasian y Frantz, 2015). En este caso la cantidad de nitratos aplicados como NCN o como fertilizante convencional no influyeron en mostrar una CE diferente entre tratamientos. En el día 30 el tratamiento 25/75 mostró una diferencia significativa en los valores de conductividad con un 32% comparado con los tratamientos 25/0, 75/0 y 100/0. Mencionan Gwenz, Nyambishi, Chaukura y Mapope (2018) que los fertilizantes convencionales se caracterizan por una rápida liberación de nutrientes y pérdidas potencialmente altas de nutrientes por lixiviación y escorrentía. En este caso los tratamientos del fertilizante convencional liberaron menor cantidad de iones en el drenaje y en el caso del NCN pudo ser debido a que se libera más lento que el fertilizante convencional y la cantidad fue mayor a lo que la planta podría absorber en los primeros días, por ello se acumuló más CE en el lixiviado.

Cuadro 3. Conductividad Eléctrica del lixiviado obtenido durante el desarrollo de lechuga con nanocompuesto nitrogenado en columnas de suelo.

Table 3. Electrical Conductivity of the leachate obtained during lettuce development with nitrogenous nanocomposite in soil columns.

Tratamientos Relación NCN/FC	Conductividad eléctrica (CE)			
	10 DDT	20 DDT	30 DDT	40 DDT
	----- dS m ⁻¹ -----			
0/100	0.85 a	0.69 a	0.58 abc	0.62 a*
25/75	0.79 a	0.74 a	0.72 a	0.67 a
50/50	0.74 a	0.78 a	0.65 ab	0.65 a
75/25	0.79 a	0.77 a	0.63 abc	0.61 a
25/0	0.78 a	0.69 a	0.48 c	0.54 a
50/0	0.77 a	0.70 a	0.48 c	0.53 a
75/0	0.83 a	0.73 a	0.59 abc	0.59 a
100/0	0.82 a	0.64 a	0.46 c	0.54 a
DMS	0.0968	0.167	0.1726	0.1885
CV	6.54	12.62	16.28	17.17

* Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas Tukey ($P < 0.05$). DDT = días después del trasplante.

* Different letters in the treatments indicate significant differences Tukey's ($P < 0.05$). DDT = days after transplant.

Unidades SPAD

En las unidades SPAD que se registraron durante el ciclo del cultivo (Cuadro 4), los valores no mostraron diferencias significativas entre tratamientos durante el desarrollo del cultivo, con valores promedios de 25 a 30 unidades SPAD que serían bajos según lo reportado por otros autores en lechuga como lo mencionan Lara-Izaguirre, Rojas, Romero, Ramírez, Cruz, Alcalá y Loredó (2019) el efecto del SPAD no varía en relación con las dosis de nitrógeno, pero si el cultivar en diferentes ciclos, en otoño valores de 39.38 y en verano 29.58. Los cambios de color de las hojas son causados por cambios en la absorción de N por parte del sistema radicular, y el color de la hoja es una medida de diagnóstico importante para las plantas (Ling *et al.*, 2005). En este trabajo la coloración de las lechugas a la cosecha era de un verde pálido (Figura 2), lo que influyó en los valores bajos de las unidades SPAD y pudieron ser debido a la aplicación de una dosis baja de nitrógeno (75 kg ha⁻¹).

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Para el NDVI (Cuadro 4), al día 10 se presentaron diferencias significativas en donde los tratamientos con NCN fueron más bajos en comparación con los tratamientos que solo contenían fertilizante convencional, Gwenzi *et al.* (2018) mencionan que esto pudo ser posible debido a la liberación rápida de nutrientes.

Para los días 20, 30 y 40 no se presentaron diferencias significativas mostrados valores entre 0.30 y 0.40. Estos valores del NDVI son bajos comparados con los obtenidos por Lara-Izaguirre *et al.* (2019) en un cultivo de lechuga en verano (0.65) y otoño (0.66). Igualmente, (Galieni, Stagnari, Specca y Pisante, 2016) mencionan que las estaciones de crecimiento en lechuga no tienen diferencias (0.82 a 0.85) y en tratamientos sin N reducen los valores de NDVI. Los cambios morfológicos y fisiológicos de las hojas pueden emplearse como indicadores de condiciones de crecimiento limitante en términos de estrés (Kizil, Genc, Inalpulat, Şapolyo y Mirik, 2012). En este caso el estrés en el cultivo de lechuga reflejado en los valores del NDVI en todos los tratamientos reflejaron menor disponibilidad de nitrógeno pudo ser debido a que se aplicó una dosis baja de nitrógeno (75 kg ha⁻¹) de acuerdo con lo mencionado por (Velázquez, Ruiz, Chávez y Luna, 2014) que utilizó 115 kilogramos por hectárea.

Comportamiento de Liberación de NO₃⁻ en Agua Desionizada

Los resultados obtenidos de la liberación permiten ver que el nitrato cargado en el material NCN libera gradualmente la cantidad durante 45 días inclusive supera la cantidad calculada de nitratos que contiene el NCN (Figura 3). Se puede observar que a mayor concentración de la cantidad de nitrógeno agregada se liberó mayor cantidad de nitratos. Liberaron cerca del 100% aproximadamente a los 10 días, sin embargo, el material NCN continuó liberando hasta los 45 días de estudio en promedio 157% para 3 mmol L⁻¹, 131% para 6 mmol L⁻¹, 71% para 9 mmol L⁻¹ y 33% para 12 mmol L⁻¹ de nitrato.

Cuadro 4. Evolución de Unidades SPAD y NDVI durante el desarrollo de lechuga con nanocompuesto nitrogenado en columnas de suelo. Table 4. Evolution of soil plant analysis development (SPAD) and normalized difference vegetation index (NDVI) units during lettuce development with nitrogenous nanocomposite in soil columns.

Tratamientos	Unidades SPAD				NDVI			
	10	20	30	40	10	20	30	40
Relación NCN/FC								
	----- DDT -----				----- DDT -----			
0/100	27.7 a	26.6 a	29.4 a	31.4 a	0.38 a	0.34 a	0.24 a	0.22 a*
25/75	26.9 a	25.8 a	25.7 a	27.4 a	0.36 ab	0.38 a	0.30 a	0.27 a
50/50	26.9 a	25.1 a	26.1 a	26.3 a	0.34 abc	0.37 a	0.30 a	0.30 a
75/25	28.7 a	27.6 a	28.9 a	27.0 a	0.23 bcd	0.29 a	0.34 a	0.32 a
25/0	25.1 a	25.5 a	26.8 a	26.4 a	0.16 d	0.35 a	0.31 a	0.32 a
50/0	24.8 a	24.6 a	26.8 a	25.5 a	0.20 d	0.32 a	0.26 a	0.24 a
75/0	26.1 a	28.0 a	28.5 a	26.6 a	0.21 cd	0.33 a	0.29 a	0.26 a
100/0	27.5 a	28.3 a	26.1 a	27.9 a	0.13 d	0.33 a	0.29 a	0.28 a
DMS	5.38	5.79	3.95	6.16	0.13	0.14	0.13	0.11
CV	10.91	11.86	7.85	12.24	30.01	22.54	25.61	22.42

* Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas Tukey ($P < 0.05$). DDT= días después del trasplante.

* Different letters in the treatments indicate significant differences Tukey's ($P < 0.05$). DDT= days after transplant.

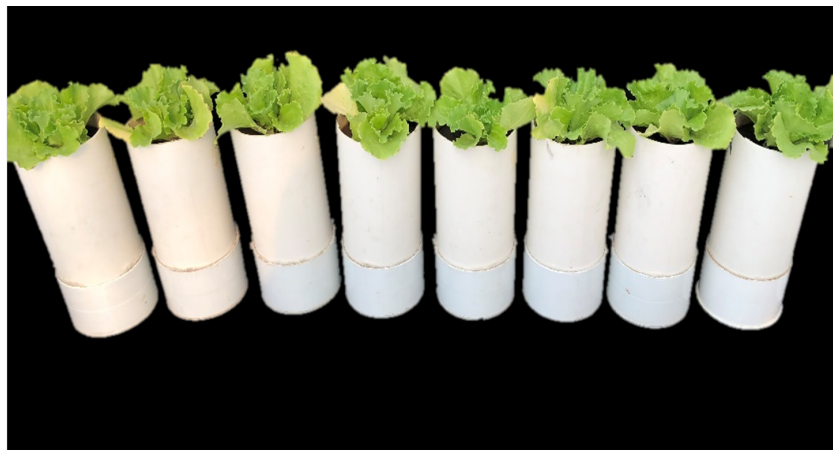


Figura 2. Plantas de lechuga con nanocompuesto nitrogenado en columnas de suelo.
Figure 2. Lettuce plants with nitrogenous nanocomposite in soil columns.

Concentración de Nitrato en los Lixiviados

La concentración de nitrato (Figura 4), en los lixiviados en los primeros 10 días presentó valores diferentes significativamente entre tratamientos, donde los registros más altos se obtuvieron con los tratamientos que contienen nanocompuesto desde la dosis más baja hasta la más alta, con y sin fertilizante. Sin embargo, el tratamiento NCN 50/0 mostró mayor concentración de 23%, comparado con los tratamientos con base de fertilizante convencional; a la vez, la fertilización convencional presentó un mayor valor igual a 40% comparado con el control 0/100. En este sentido Okyay *et al.* (2020) mencionan que el suministro de nutrientes del fertilizante de lenta liberación de nitrógeno estaba listo para su uso en el suelo, pero no pudo ser tomado por la planta ya que la liberación no coincidió con el tiempo de cosecha de la lechuga, por lo que se quedó una gran cantidad de nitrógeno en el suelo al término de los experimentos.

A los 20 días, se observó la misma tendencia que a los 10 días, aunque el mayor valor lo obtuvo NCN 75/0. El día 30, los tratamientos donde se aplicó el nanocompuesto mostraron valores más altos en comparación con los fertilizantes convencionales y el mayor valor fue con 100/0. Caso contrario Fernández, Esteban, Conesa, Ochoa y Álvarez (2012) en el cultivo de lechuga al aplicar fertilizantes nitrogenados de lenta liberación en tres ciclos sucesivos, encontró que la concentración de nitratos disminuyó en el lixiviado conforme pasó el ciclo de cultivo en todos los tratamientos, en el fertilizante convencional desde 300 a 150 mg L⁻¹ de NO₃⁻ y el de lenta liberación fue menor de 170 a 50 miligramos por litro.

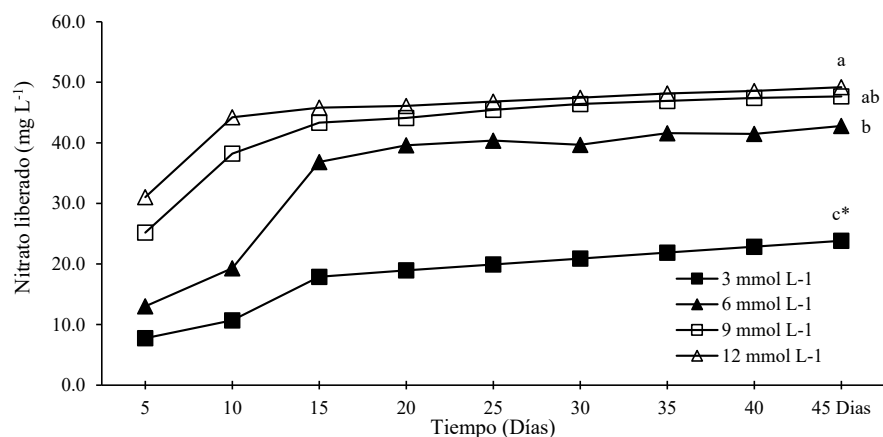


Figura 3. Liberación de nitrato durante el desarrollo de lechuga con nanocompuesto nitrogenado en columnas de suelo. * Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas Tukey ($P < 0.05$).

Figure 3. Nitrate release during lettuce plant development with nitrogenous nanocomposite in soil columns. * Different letters in the treatments indicate significant differences Tukey ($P < 0.05$).

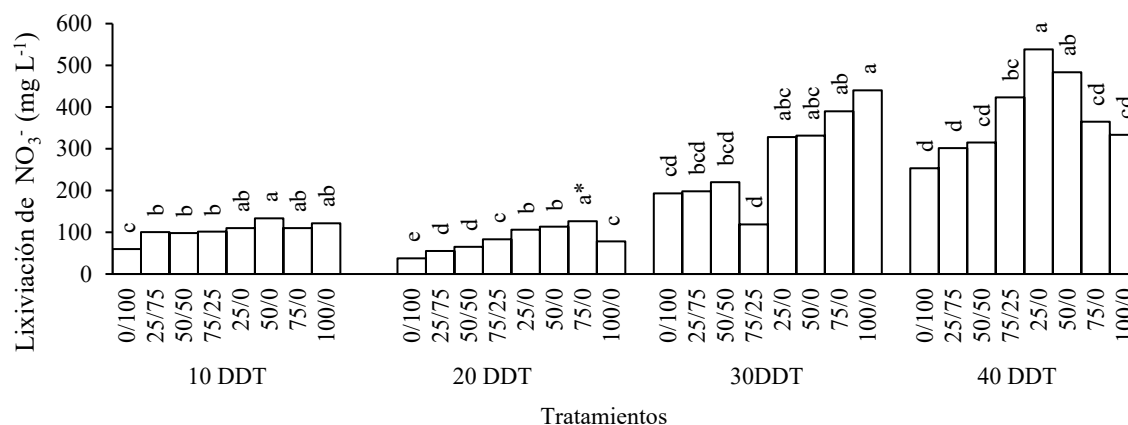


Figura 4. Concentración de iones nitrato en el lixiviado obtenido durante el desarrollo de lechuga con nanocompuesto nitrogenado en columnas de suelo. * Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas Tukey ($P < 0.05$). DDT = días después del trasplante.

Figure 4. Nitrate ion concentration in the leachate obtained during lettuce plant development with nitrogenous nanocomposite in soil columns. * Different letters in the treatments indicate significant differences Tukey ($P < 0.05$). DDT= Days after transplant.

A los 40 días, los fertilizantes convencionales con las dosis más bajas 0/100, 25/75, 50/50 y las dosis de nanocompuestos más altas 75/0 y 100/0, fueron los que menor cantidad de lixiviados mostraron; caso contrario los valores más altos de nitrato en los lixiviados fueron con nanocompuesto sin fertilizante convencional 25/0 y 50/0 con valores de 538 y 483 $\text{NO}_3^- \text{mg L}^{-1}$ Saha, Rose, Wong, Cavagnaro y Patti, (2018) mencionan que la utilización de fertilizantes de lenta liberación disminuye su contenido en el lixiviado.

En nuestro caso los mayores contenidos de nitrato en los lixiviados con NCN se podrían explicar por la forma de aplicación del fertilizante convencional que fue con cada riego y esto disminuye la lixiviación. También debido a la fracción correspondiente al NCN liberó más cantidad de nitrato que la calculada (Figura 3), por consecuencia la dosis de N en los tratamientos con NCN mostró mayor cantidad de nitrato lixiviado.

Concentración de Nitrato en Peciolo

La concentración de nitrato en el peciolo mostró diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 5). Los mayores valores se presentaron con los tratamientos NCN 50/0 y 75/0, quienes tuvieron en promedio 2700 mg L^{-1} con un aumento del 24% a diferencia de todos los tratamientos con un valor promedio de 2000 mg L^{-1} , a excepción de 100/0 que fue estadísticamente igual a los mejores tratamientos, pero diferente a 0/100, 50/50

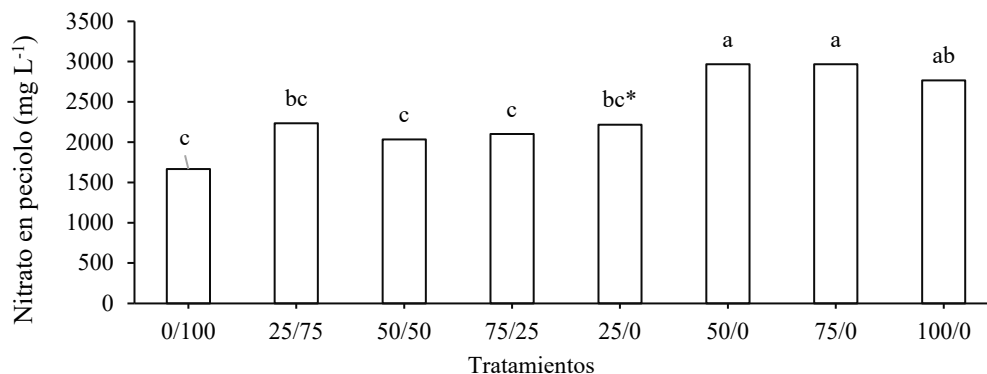


Figura 5. Concentración de iones en peciolo de lechuga con nanocompuesto nitrogenado cultivada en columnas de suelo. * Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas Tukey ($P < 0.05$).

Figure 5. Ion concentration in lettuce petiole with nitrogenous nanocomposite grown in soil columns. * Different letters in the treatments indicate significant differences Tukey's ($P < 0.05$).

y 75/25 al aumentar un 19% más que el tratamiento sin nanocompuesto nitrogenado 0/100. La concentración de nitratos en peciolo puede cambiar conforme a las condiciones climáticas en las épocas de cultivo, como lo mencionan Lara-Izaguirre *et al.* (2019) en lechuga con diferentes relaciones de $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ en el verano de 5431 mg L^{-1} de NO_3^- y 2416 mg L^{-1} en otoño. Fernández *et al.* (2012) evaluaron la fertilización durante tres ciclos sucesivos en lechuga cultivada en suelo. En el primer ciclo, la mayor concentración de nitrato con el tratamiento control 1200 mg kg^{-1} , en el segundo aumentó en todos los tratamientos, fue mayor con fertilización control y un fertilizante de lenta liberación entre 2000 y 2800 mg kg^{-1} . Al final, disminuyeron en todos los tratamientos, fue mayor en fertilización control con 611 mg kg^{-1} y un fertilizante de lenta liberación con 515 miligramos por kilogramo.

CONCLUSIONES

La síntesis de bentonita con nitrógeno formó un nanocompuesto con propiedades de liberación lenta. La aplicación al suelo del nanocompuesto nitrogenado en dosis de 50 y 75% maximizó el rendimiento sin afectar el crecimiento. Lo que podría ser una alternativa para reducir el uso de fertilizantes y disminuir las pérdidas de nitrógeno en suelo.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: A.N.R.V. y O.I.G.C. Metodología: A.N.R.V. Software: O.I.G.C. Validación, J.A.A.J. Análisis Formal: C.L.O. y V. B. Investigación: O.I.G.C. Recursos: A.N.R.V. y J.A.A.J. Escritura: preparación del borrador original: O.I.G.C. Escritura: revisión y edición: A.N.R.V.; C.L.O. y J.C.R.O. Visualización: A.N.R.V. Supervisión: C.L.O. y H.M.R.T. Adquisición de fondos: A.N.R.V. y J.A.A.J.

AGRADECIMIENTOS

No aplicable.

LITERATURA CITADA

- Abdel-Aziz, H. M. M., Hasaneen, M. N. A., & Omer, A. M. (2016). Nano chitosan-NPK fertilizer enhances the growth and productivity of wheat plants grown in sandy soil. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 14(1), 1-9. <https://doi.org/10.5424/sjar/2016141-8205>
- Andiru, G. A., Pasian, C. C., & Frantz, J. M. (2015). Effects of controlled-release fertilizer placement on nutrient leaching and growth of bedding impatiens. *Journal of Environmental Horticulture*, 33(2), 58-65. <https://doi.org/10.24266/0738-2898-33.2.58>

- Butt, B. Z., & Naseer, I. (2020). Nanofertilizers. In S. Javad (Ed). *Nanoagronomy* (pp. 125-152). Cham, Switzerland: Springer. Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41275-3_8
- Cancellier, E. L., Degryse, F., Silva, D. R. G., da Silva, R. C., & McLaughlin, M. J. (2018). Rapid and low-cost method for evaluation of nutrient release from controlled-release fertilizers using electrical conductivity. *Journal of Polymers and the Environment*, 26, 4388-4395. <https://doi.org/10.1007/s10924-018-1309-1>
- Ceyhan, Ö., Güler, H., & Güler, R. (1999). Adsorption mechanisms of phenol and methylphenols on organoclays. *Adsorption Science & Technology*, 17(6), 469-477. <https://doi.org/10.1177/026361749901700603>
- Chi, Y., Zhang, G., Xiang, Y., Cai, D., & Wu, Z. (2018). Fabrication of reusable temperature-controlled-released fertilizer using a palygorskite-based magnetic nanocomposite. *Applied Clay Science*, 161, 194-202. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.04.024>
- Das, S., K. (2014). Recent developments in clean up techniques of pesticide residue analysis for toxicology study: a critical review. *Universal Journal of Agricultural Research*, 2(6), 198-202. <https://doi.org/10.13189/ujar.2014.020603>
- De Grazia, J., Tittonell, P. A., & Chiesa, Á. (2001). Efecto de la época de siembra, radiación y nutrición nitrogenada sobre el patrón de crecimiento y el rendimiento del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.). *Investigación Agraria. Producción y Protección Vegetales*, 16(3), 356-365.
- Fernández, J. A., Esteban, A., Conesa, E., Ochoa, J., & Álvarez-Rogel, J. (2012). Nitrate evolution in soil, leaching water, and lettuce plant crops using different fertilization strategies. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43(19), 2467-2483. <https://doi.org/10.1080/00103624.2012.711868>
- Galieni, A., Stagnari, F., Specia, S., & Pisante, M. (2016). Leaf traits as indicators of limiting growing conditions for lettuce (*Lactuca sativa*). *Annals of Applied Biology*, 169(3), 342-356. <https://doi.org/10.1111/aab.12305>
- Guha, T., Gopal, G., Kundu, R., & Mukherjee, A. (2020). Nanocomposites for delivering agrochemicals: A comprehensive review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(12), 3691-3702. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06982>
- Gwenzi, W., Nyambishi, T. J., Chaukura, N., & Mapope, N. (2018). Synthesis and nutrient release patterns of a biochar-based N-P-K slow-release fertilizer. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15, 405-414. <https://dx.doi.org/10.1007/s13762-017-1399-7>
- Kim, D. H., Kang, Y. J., Choi, J. J., & Yun, S. I. (2020). Lettuce growth and nitrogen loss in soil treated with corn starch carbamate produced using urea. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 53(1), 13-21. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2020.53.1.013>
- Kizil, Ü., Genc, L., Inalpulat, M., Şapolyo, D., & Mirik, M. (2012). Lettuce (*Lactuca sativa* L.) yield prediction under water stress using artificial neural network (ANN) model and vegetation indices. *Zemdirbystė=Agriculture*, 99(4), 409-418.
- Kubavat, D., Trivedi, K., Vaghela, P., Prasad, K., Vijay-Anand, G. K., Trivedi, H., ... & Ghosh, A. (2020). Characterization of a chitosan-based sustained release nanofertilizer formulation used as a soil conditioner while simultaneously improving biomass production of *Zea mays* L. *Land Degradation & Development*, 31(17), 2734-2746. <https://doi.org/10.1002/ldr.3629>
- Lara-Izaguirre, A. Y., Rojas-Velázquez, A. N., Romero-Méndez, M. J., Ramírez-Tobías, H. M., Cruz-Crespo, E., Alcalá-Jáuregui, J. A., & Loredó-Ostí, C. (2019). Growth and no₃-accumulation in hydroponic lettuce with nitrate/ammonium ratios in two cultivation seasons. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 42(1), 21-29.
- Lawrencia, D., Wong, S. K., Low, D. Y. S., Goh, B. H., Goh, J. K., Ruktanonchai, U. R., ... & Tang, S. Y. (2021). Controlled release fertilizers: A review on coating materials and mechanism of release. *Plants*, 10(2), 1-25. <https://doi.org/10.3390/plants10020238>
- Ling, Q. H., Zhang, H. C., Dai, Q. G., Ding, Y. F., Ling, L., Su, Z. F., ... & Wang, S. H. (2005). Study on precise and quantitative N application in rice. *Scientia Agricultura Sinica*, 38, 2457-2467.
- Marschner, H. (2011). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. (3rd ed). London, England: Academic Press.
- Muñoz-Huerta, R. F., Guevara-Gonzalez, R. G., Contreras-Medina, L. M., Torres-Pacheco, I., Prado-Olivarez, J., & Ocampo-Velázquez, R. V. (2013). A review of methods for sensing the nitrogen status in plants: advantages, disadvantages and recent advances. *Sensors*, 13(8), 10823-10843. <https://doi.org/10.3390/s130810823>
- Nofal, A. S. Ashmawi, A. E., Mohammed, A. A., El-Abd, M. T., & Helaly, A. A., (2021). Effect of soil application of nano NPK fertilizers on growth, productivity and quality of Lettuce (*Lactuca sativa*). *Al-Azhar Journal of Agricultural Research*, 46(1), 91-100. <https://doi.org/10.21608/ajar.2021.218559>
- NOM-021-SEMARNAT-2000 (Norma Oficial Mexicana). (2002). Antes NOM-021-REC/NAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*. D. F.: SEGOB.
- Okay, G., Karagöz, S., Ulaş, A., & Özen, İ. (2020). Efficiency of an agrotexile surface structure possessing fertilizer and water management coupled with mulching property in romaine lettuce growth trials. *The Journal of the Textile Institute*, 111(12), 1735-1744. <https://doi.org/10.1080/00405000.2020.1727268>
- Pandey, S., & Ramontja, J. (2016). Recent modifications of bentonite clay for adsorption applications. *Focus on Sciences*, 2(4), 1-10.
- Pohshna, C., & Mailapalli, D. R. (2022). Engineered Urea-Doped Hydroxyapatite Nanomaterials as Nitrogen and Phosphorus Fertilizers for Rice. *ACS Agricultural Science & Technology*, 2(1), 100-112. <https://doi.org/10.1021/acsagstech.1c00191>
- Raliya, R., Saharan, V., Dimkpa, C., & Biswas, P. (2017). Nanofertilizer for precision and sustainable agriculture: current state and future perspectives. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26), 6487-6503. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02178>
- Rathnappriya, R. H. K., Sakai, K., Okamoto, K., Kimura, S., Haraguchi, T., Nakandakari, T., ... & Bandara, W. B. M. A. C. (2022). Examination of the effectiveness of controlled release fertilizer to balance sugarcane yield and reduce nitrate leaching to groundwater. *Agronomy*, 12(3), 1-23. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030695>
- Romero-Méndez, M. J., Rojas-Velázquez, A. N., Lara-Mireles, J. L., Diaz-Flores, P. E., & Woo-Reza, J. L. (2019). Efecto de un fertilizante nitrogenado a base de bentonita modificada y tensoactivo HDTMA en el crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) hidropónica. *Agrociencia*, 53(2), 219-234.
- Romero-Méndez, M. J., Rojas-Velázquez, A. N., Lara-Mireles, J. L., Woo-Reza, J. L., Alcalá-Jáuregui, J. A., & Aguilar-Benítez, G. (2021). Comportamiento de un fertilizante de liberación lenta a base de organobentonita-fosfato en plantas de lechuga. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 44(1), 51-51.
- Saha, B. K., Rose, M. T., Wong, V. N., Cavagnaro, T. R., & Patti, A. F. (2018). Nitrogen dynamics in soil fertilized with slow-release brown coal-urea fertilizers. *Scientific Reports*, 8(1), 14577. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32787-3>
- SAS Institute (2002). *Statistical Analysis System. User's Guide. Release 9.0*. Cary, NC, USA: SAS Institute, Inc.
- Sharaf-Eldin, M. A., Elsayy, M. B., Eisa, M. Y., El-Ramady, H., Usman, M., & Zia-ur-Regman, M. (2022). Application of nano-nitrogen fertilizers to enhance nitrogen efficiency for lettuce growth under different irrigation regimes. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 59(3), 367-379. <https://doi.org/10.21162/PAKJAS/22.1044>
- Umar, W., Czinkota, I., Gulyás, M., Aziz, T., & Hameed, M. K. (2022). Development and characterization of slow-release N and Zn fertilizer by coating urea with Zn fortified nano-bentonite and ZnO NPs using various binders. *Environmental Technology & Innovation*, 26, 102250. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102250>

-
- Wen, P., Wu, Z., He, Y., Ye, B. C., Han, Y., Guan, X., & Wang, J. (2016). Microwave-assisted one-step synthesis and characterization of a slow-release nitrogen fertilizer with inorganic and organic composites. *RSC Advances*, 6(44), 37337-37346. <https://doi.org/10.1039/C5RA27828G>
- Yuan, G. (2014). An organoclay formula for the slow release of soluble compounds. *Applied Clay Science*, 100, 84-87. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.04.005>
- Zanin, G., Maucieri, C., Dal Ferro, N., Bortolini, L., & Borin, M. (2020). Evaluating a controlled-release fertilizer for plant establishment in floating elements for bioretention ponds. *Agronomy*, 10(2), 1-15. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020199>
- Zarebyaneh, H., & Bayatvarkeshi, M. (2015). Effects of slow-release fertilizers on nitrate leaching, its distribution in soil profile, N-use efficiency, and yield in potato crop. *Environmental Earth Sciences*, 74(4), 3385-3393. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4374-y>
- Zhang, X., Davidson, E. A., Mauzerall, D. L., Searchinger, T. D., Dumas, P., & Shen, Y. (2015). Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*, 528(7580), 51-59.