

Respuestas Fisiológicas de Plantas Cultivadas en Bioespacios por Efecto de Nanofertilizantes y Zeolita

¹Bulmaro Méndez-Argüello, ¹Ricardo Hugo Lira-Saldivar e ²Ileana Vera-Reyes

¹Departamento Plásticos en la Agricultura. Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA);

²Catedrática CONACYT-CIQA¹, Departamento Plásticos en la Agricultura. Saltillo, Coahuila, México. C.P. 25294.

Resumen

Las prácticas agrícolas están contribuyendo a la degradación de los procesos ecológicos que sustentan la vida en la tierra. Los fertilizantes son importantes para incrementar el rendimiento de los cultivos sin embargo, su baja eficiencia de aprovechamiento provoca contaminación ambiental, la calidad del agua y afecta las comunidades microbianas del suelo. La nanotecnología tiene potencial para mejorar la producción de alimentos con el uso de partículas nanométricas con propiedades únicas que pueden limitar el deterioro de los recursos naturales. Tiene prometedoras aplicaciones en la agricultura, como el suministro eficiente de fertilizantes y pesticidas; y tienen gran impacto en la germinación de semillas y el crecimiento de las plantas. Conjuntamente el uso de la zeolita en la agricultura representa una buena opción como material con potencial como fertilizante de liberación lenta, mejorador de suelo, uso eficiente del agua y como sustrato para el crecimiento de plantas en bioespacios.

Introducción

El uso excesivo de los fertilizantes y pesticidas utilizados en agricultura ha incrementado las emisiones de gases de efecto invernadero, degradación de los suelos, impacto negativo en la salud humana, la diversidad biológica y la calidad del agua. Las prácticas agrícolas están contribuyendo a la degradación de los procesos ecológicos que

sustentan la vida en la tierra y la eutrofización de las fuentes de agua por las fertilizaciones (DeLonge et al., 2016). Por lo que es necesario generar materiales y tecnologías más amigables con el medio ambiente, la nanotecnología (NT) tiene el potencial de transformar las prácticas agrícolas con alentadores resultados, así por ejemplo, las nanopartículas (NPs) pueden utilizarse como una nueva forma de liberación lenta de agroquímicos, promoviendo la utilización eficiente (Singh y Jajpura, 2016).

Con el rápido avance de la NT como la síntesis controlada del tamaño y morfología de los nanomateriales permitan dar solución a la absorción de macro y micronutrientes en las plantas, consiguiendo incrementar la producción de los alimentos. Las aplicaciones directas en la agricultura, incluyen principalmente la aplicación eficiente de nanofertilizantes foliares y nanopesticidas que proporcionan cantidades óptimas y reducen las pérdidas (Li et al., 2016). Por otra parte las zeolitas, nanoarcillas, nanozeolitas y nanominerales se están utilizando para mejorar la retención de agua, como acarreadores de nutrientes; y para la recuperación de suelos contaminados por fertilizantes y pesticidas. Estos nanomateriales promueven la germinación de semillas, crecimiento de las plantas, fijación del P y N (Rameshaiah y Pallavi, 2015).

Eficiencia de la fertilización química tradicional en los cultivos

Los fertilizantes son sustancias químicas añadidas al suelo, dependiendo de su naturaleza y origen, se clasifican generalmente en orgánicos o inorgánicos; naturales o sintéticos; simples o complejos (Timilsena et al., 2015). La disponibilidad de nutrientes en el suelo determina la cantidad y calidad de la producción agrícola. Por lo tanto, un suministro regular de nutrientes principalmente de N y P es necesario con el fin de mantener su fertilidad e incrementar el rendimiento de los cultivos (Amtmann y Armengaud, 2009).

La población mundial en rápido crecimiento ha hecho necesario que la producción de alimentos se incremente sustancialmente, lo que ha llevado a un aumento en el uso de

fertilizantes químicos (Timilsena et al., 2015). Sin embargo, a pesar de que permiten una mayor productividad de los cultivos, su baja eficiencia de aprovechamiento provoca contaminación del suelo, la calidad del agua y afecta las comunidades microbianas presentes en el suelo (Geisseler y Scow, 2014; Qin et al., 2015).

El N es uno de los nutrientes más importante para el crecimiento de las plantas (Zarebska et al., 2015), no obstante, su incorporación al suelo a través de las fertilizaciones nitrogenadas es ineficiente, ya que gran parte se pierde en forma de NO_3 movilizándose rápidamente a las aguas subterráneas y superficiales; también se pierde en forma de amoníaco (NH_3) hacia la atmósfera, provocando contaminación ambiental (Sattari et al., 2014). El N es considerado como el principal limitante para aumentar la productividad agrícola y este fertilizante es de alto costo (Lubkowski, 2016).

Los fertilizantes nitrogenados son más susceptibles de perderse a través de los procesos de lixiviación, mineralización y desnitrificación. Solo una parte del nitrógeno (< 50%) es absorbido por las plantas, mientras que otra permanece en las capas más profundas del perfil y se lixivia. La lixiviación de nitratos se ve incrementada por la cantidad y la forma de aplicación de las láminas de riego. Otra fracción importante se pierde por volatilización en formas reducidas de nitrógeno (NH_3). Por otra parte, la pérdida del P es debido a la escorrentía superficial y la mineralización, haciendo que no esté disponible para las plantas (Timilsena et al., 2015), además el P es un nutriente con baja tasa de recuperación y disponibilidad limitada (Sattari et al., 2014). También las ineficiencias en el uso del P podrían agravar otros problemas, como la degradación de suelos y contaminación del agua para consumo humano y para el riego (Naderi y Danesh, 2013; Baligar y Fageria, 2015; Paul et al., 2015).

Se ha señalado que la contaminación por P es un factor clave para el desarrollo de condiciones eutróficas en las cuencas agrícolas y es un nutriente limitante para el crecimiento de las plantas en ambientes acuáticos (Farrell et al., 2014). El P disuelto provoca enriquecimiento del fitoplancton y la producción de una neurotoxina que secretan colonias

de cianobacterias, lo que puede reducir la diversidad de especies y ocasionar una ruptura fundamental en el funcionamiento de los ecosistemas (Schoumans et al., 2014).

La aplicación de fertilización con macronutrientes por periodos prolongados puede causar desbalances en su concentración y la disponibilidad en el suelo, y a su vez afecta la disponibilidad de los micronutrientes. Por ejemplo, la aplicación excesiva de P inhibe la transferencia de Zn del suelo y da lugar a su escasez (Li et al., 2007). En una revisión realizada por Allison y Martiny (2008), se encontró que 84% de los 38 estudios realizados mostró que las comunidades microbianas son sensibles a las fertilizaciones de N, P y K.

Cuando se aplican fertilizantes convencionales al suelo, solo una pequeña cantidad es utilizada por las plantas, por ejemplo, alrededor de 40-70% del N y 80-90% del P se pierden al ambiente (Timilsena et al., 2015). La adopción de nuevas técnicas de manejo, como el uso de zeolita para controlar la liberación de fertilizantes compuestos ha cobrado importancia (Rabai et al., 2013; Baligar y Fageria, 2015; Paul et al., 2015).

Influencia de las nanopartículas en nutrición y crecimiento de plantas cultivadas en bioespacios

Recientemente en todo el mundo se están realizando experimentos con diversos cultivos para poder explicar el efecto de las NPs metálicas y derivadas del carbón en la fisiología de las plantas. Reportes sobre la aplicación de las NPs en diferentes cultivos han evidenciado que incrementan el crecimiento de las plantas, el contenido nutricional y la actividad enzimática (Engates y Shipley, 2011). Algunas NPs de ZnO y CuO muestran un efecto positivo sobre la reactividad de fitohormonas, especialmente del ácido indolacético, el cual promueve la elongación y división celular, incrementando la velocidad de crecimiento en las plantas; además de activar la biosíntesis de ácido salicílico, favoreciendo su acción fitoestimulante (Wang et al., 2012).

Las nanopartículas de plata (NPs Ag) en concentraciones bajas poseen un efecto positivo en la germinación de semillas y en la promoción del crecimiento en plantas. Sharma et al. (2012), reportan que las NPs Ag promueven el crecimiento de plántulas de mostaza (*Brassica juncea*) en concentraciones de 25 y 50 mg L⁻¹, reflejándose en mayor longitud de raíz, biomasa seca y altura. Sin embargo, altas concentraciones (250-500 mg kg⁻¹ de suelo), impiden el crecimiento de las plantas. Estos incrementos podrían estar relacionados con la producción endógena de fitohormonas como citoquininas y giberelinas, las cuales están implicadas en la división y elongación celular. Además estas NPs pueden mejorar la eficiencia de intercambio de electrones a nivel celular en las plantas, lo que podría reducir la formación de especies reactivas de oxígeno (Dimkpa et al., 2015).

Experimentando con plantas de frijol y maíz, Salama (2012) aplicó foliarmente dosis de 20, 40, 60, 80 y 100 ppm de nanopartículas de plata (NPsAg), las aplicaciones diarias con 15 ml de cada concentración durante 12 días, mostraron que bajas concentraciones (20-60 ppm) tuvieron un efecto estimulante sobre el crecimiento de las plántulas, mientras que las concentraciones altas (>80 ppm) indujeron un efecto fitotóxico. Adicionalmente observó que las concentraciones de 20 a 60 ppm incrementaron el diámetro de tallo, longitud de raíz, área foliar, índice de clorofila, concentración de carbohidratos y contenido de proteína en las plantas.

Otras NPs como las de óxido de titanio (NPsTiO₂) aplicadas al follaje, causan un incremento en la actividad de varias enzimas y promueven la absorción del nitrato, el cual acelera la transformación del nitrógeno inorgánico a orgánico haciéndolo más asimilable, reflejándose esto en mayor crecimiento vegetal (Rezaei et al., 2015). Por otro lado, Zhu et al. (2008) han mencionado que las plantas de calabaza (*Cucurbita maxima*), al aplicarles NPs de magnetita (Fe₃O₄), se pueden absorber, traslocar y acumularse en el tejido vegetal. Eso pone de manifiesto que las plantas son un importante componente del medio ambiente y de los hábitats, por lo tanto, se deben de considerar e investigar cuando se está evaluando el destino, transporte y caminos que siguen las NPs en los ecosistemas.

En un estudio para investigar los efectos de NPs ZnO y CeO₂ en concentraciones de 400 ppm en plantas de pepino (*Cucumis sativus*), se detectó mayor contenido de almidón y alteración del contenido de carbohidratos de los frutos (Zhao et al., 2014). Sin embargo, otros estudios realizados por García et al. (2011) revelan que las NPs de cerio son tóxicas en el conjunto de ensayos realizados, habiendo determinado que algunas semillas mostraron un efecto perjudicial (fitotoxicidad) en bioensayos de germinación. Reportes previos muestran que la fitotoxicidad causada por algunas NPs genera un comportamiento impredecible e irregular sobre el estrés oxidativo, que a su vez depende del tipo, concentración, propiedades y medios de exposición de las NPs (Foltete et al., 2011).

Resultados de bioensayos realizados en el CIQA

El efecto de NPs de óxido de zinc puras (NPsZnO) y con plata (NPsZnO+Ag) a una concentración de 50 ppm, así como aplicaciones foliares semanales en el crecimiento y producción de biomasa seca de plantas de chile (*Capsicum annuum*), fue analizado por Méndez et al. (2015c). El efecto de las NPsZnO puras, así como las dopadas con Ag al 1.25 y 2.5% en algunas variables de respuesta de las plantas de chile, se presenta en el Cuadro 1, el cual revela que las plantas sometidas a la aplicación foliar de NPsZnO + Ag al 1.25 y 2.5%, presentaron mayor producción de biomasa seca, crecimiento de la parte aérea (Figura 1) y radicular (Figura 2) en comparación con el tratamiento control.

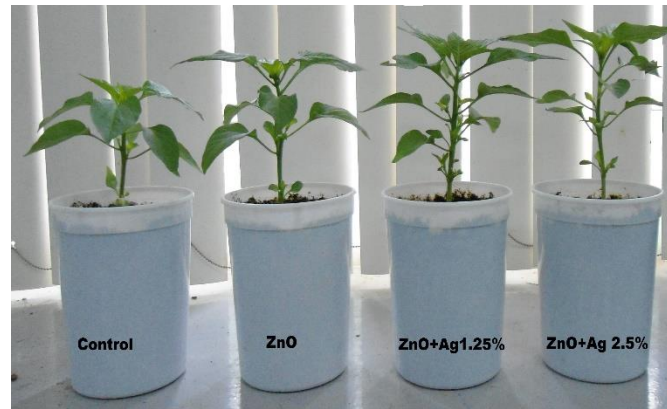


Figura 1. Crecimiento promedio diferenciado de plantas de *C. annuum* debido a la aplicación foliar de nanopartículas de ZnO puras y con plata a las concentraciones de 1.25 y 2.5% en peso.

Respecto a las plantas del tratamiento control, aquellas tratadas con NPsZnO + Ag al 2.5% (T4), mostraron el mayor incremento en altura (16.8%; Figura 3A), área foliar (30.3%; Figura 3B), biomasa seca total (59.5%; Figura 3C), biomasa seca de raíz (112.5 %; Tabla 2), biomasa seca de tallo (76%; Cuadro 1) y longitud de raíz (24.4%; Figura 3D). Además, con este mismo tratamiento se observó un incremento (8%) del índice de clorofila y un aumento de 32.6% en el número de hojas (Cuadro 1).



Figura 2. Desarrollo radicular de plantas de *C. annuum* que recibieron nanopartículas de ZnO puras y dopadas con plata a las concentraciones de 1.25 y 2.5% en peso.

La información generada consigna que en relación con el tratamiento control cuando se aplicaron NPsZnO + Ag al 1.25%, se incrementó significativamente la altura (16.8%, Figura 5A), área foliar (28.31%, Figura 3B), biomasa seca (52.8%, Figura 3C) y longitud de raíz

(23.7%, Figura 3D). También se determinó un incremento en el número de hojas (11.8%) e índice de clorofila (6.19%), aunque estos resultados no fueron estadísticamente significativos (Cuadro 1). Por otro lado, la aplicación de NPsZnO puras (T2) incrementaron la longitud de la raíz (11.8% Figura 3D), con respecto al control.

Cuadro 1. Efecto de la aplicación al follaje de NPsZnO puras y dopadas con Ag, en diferentes variables fisiológicas de *C. annuum*.

Variables	Tratamientos				p>F
	Control	NPsZnO puras	NPsZnO + Ag 1.5%	NPsZnO + Ag 2.5%	
Peso seco raíz (g)	0.24±0.02b	0.24±0.02b	0.46±0.05a	0.51±0.05a	0.0003*
Peso seco tallo (g)	0.13±0.01b	0.12±0.0b	0.23±0.01a	0.23±0.01a	0.0001*
Peso seco hojas (g)	0.50±0.05a	0.53±0.04a	0.66±0.06a	0.67±0.04a	0.058ns
Índice clorofila (U Spad)	47.16±1.26a	51.66±0.53a	50.08±1.37a	51.1±1.36a	0.07ns
Número de hojas	20.2±2.17a	20.8±1.24a	22.6±3.6a	26.8±2.9a	0.328ns

Medias (n = 5) ± error estándar de la media. Letras diferentes en la misma fila son estadísticamente diferentes. *Diferencia estadística (Tukey, p<0.05). ^{ns}No significancia entre tratamientos.

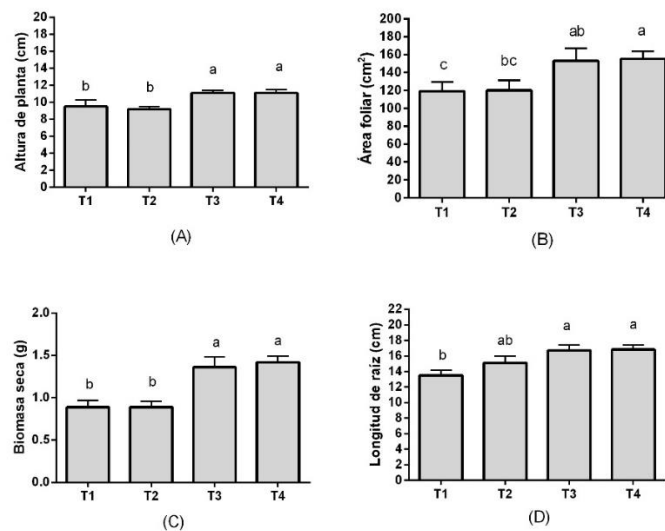


Figura 3. Crecimiento y producción de biomasa en plantas de *C. annuum* por efecto de nanopartículas de óxido de zinc puras y con Ag. A) Altura de planta, B) área foliar, C) biomasa seca y D) longitud de raíz. T1 = control, T2 = NPsZnO puras, T3 = NpsZnO + Ag al 1.25% y T4=NpsZnO + Ag al 2.5%. Medias (n = 5), las barras representan el error estándar de la media, letras diferentes son estadísticamente diferentes (Tukey, p≤0.05).

Comportamiento fisiológico de plantas debido al efecto de zeolita

En agricultura protegida, la adopción de cultivo sin suelo, junto con las prácticas recientes de manejo, como la protección integral de los cultivos, fertirrigación, riego por goteo, y el control del microclima, aumenta el rendimiento, la eficiencia del uso del agua y agroquímicos. En los invernaderos se emplean cultivos hidropónicos, donde las plantas se siembran en un sustrato sin suelo o soporte inerte en donde la gran mayoría de las necesidades nutricionales son suministradas a través del agua de riego. Los sistemas de cultivos hidropónicos permiten un mejor control del aporte de nutrientes. En estas condiciones el crecimiento de las plantas puede estar influenciada por la deficiencia de cualquier nutriente (Vardar et al., 2015). Por lo tanto, para el control del suministro de nutrientes con materiales como la zeolita es importante para el crecimiento de las plantas en sistemas hidropónicas y en condiciones de agricultura protegida.

Los minerales zeolíticos se están utilizando como sustratos para el cultivo de plantas, también como fertilizantes de liberación lenta o mejoradores de suelos (Li et al., 2013; Vunduk et al., 2014). Las zeolitas son un grupo de minerales de origen volcánico con aproximadamente 40 especies, de las cuales la clinoptilolita es la más abundante y con mayores propiedades benéficas (Campos et al., 2010). Son aluminosilicatos hidratados con estructura porosa en arreglo tridimensional; presentan alta capacidad de intercambio catiónico (CIC), capacidad de absorción de NH_4 y agua (Salas-Cruz et al., 2014). También promueven el crecimiento vegetal mediante el aumento en la disponibilidad de nutrientes, mejoran la estructura del suelo y su capacidad de retención de agua (Najafi, 2014; Rabai et al., 2013).

También se ha determinado que las zeolitas causan beneficios evidentes al usarse como sustrato en cultivos semi hidropónicos (Molla et al., 2014), debido a que aumentan la disponibilidad del N y K al reducir las pérdidas por lixiviación. Estos nutrientes son retenidos

en su estructura tipo panal y luego son liberados lentamente en la solución del sustrato, o directamente en la zona de la rizósfera (Campos et al., 2010; Gül et al., 2005, Gruener et al., 2007, Shahsavari et al., 2014). Además, incrementan el contenido de N, P y K en el follaje de las plantas (Pirzad y Mohammadzade, 2014). La mezcla de zeolita con fertilizantes nitrogenados ayuda a reducir la lixiviación de nitratos, mejorando así la calidad del suelo y haciendo disponibles los nutrientes por más tiempo (De Campos-Bernardi et al., 2013). En suelos de textura arenosa y con alta disponibilidad hídrica, reducen los niveles de NO_3 potencialmente lixiviables sin afectar el crecimiento de las plantas, esto se debe a la retención de N en su estructura porosa (Civeira y Rodríguez, 2011; Torma et al., 2014). En la Figura 4 se ilustran algunas de las aplicaciones que tiene la zeolita en la agricultura.

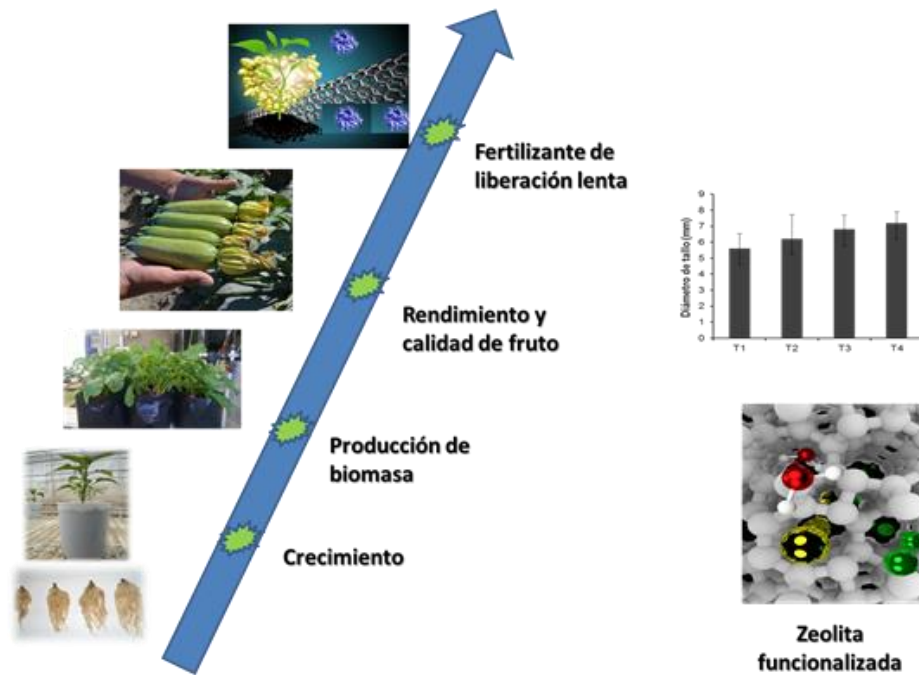


Figura 4. Usos y aplicaciones potenciales de la zeolita en la agricultura sustentable.

Méndez-Argüello et al. (2015 a) evaluaron el efecto de la incorporación de zeolita al sustrato donde cultivaron plantas de tomate en macetas de 1 L de capacidad. En la Figura 5 se puede apreciar el crecimiento vegetativo (A) y longitud radicular (B) de plantas de tomate cultivadas con zeolita mezclada en diferentes proporciones de peat moss y perlita. Los tratamientos evaluados consistieron en mezclas del sustratos peat moss, perlita y zeolita

(v:v), en las siguientes proporciones: T1 (control) = 100:0:0; T2 = 70:30:0; T3 = 70:20:10; T4 = 70:10:20 y T5= 70:0:30, (v/v). La zeolita fue mezclada en proporciones de 0, 10, 20 y 30% (v/v) con un sustrato vegetal (peat moss) y otro mineral (perlita 0, 10 y 20%) según el caso. En comparación con las plantas desarrolladas en el sustrato control (100% peat moss), las plantas cultivadas con 30% de zeolita, exhibieron valores superiores en altura (24.2% Figura 6A), área foliar (64.5%), número de hojas (92% 6B), longitud de raíz (63.2% 6C), diámetro de tallo (28.5% 6D), biomasa seca aérea (62.5%) (Figura 5A), biomasa seca de raíz (208.9%) y (Figura 5B). En todos los sustratos donde se mezcló la zeolita promovieron mayor crecimiento de las plantas (Cuadro 2).

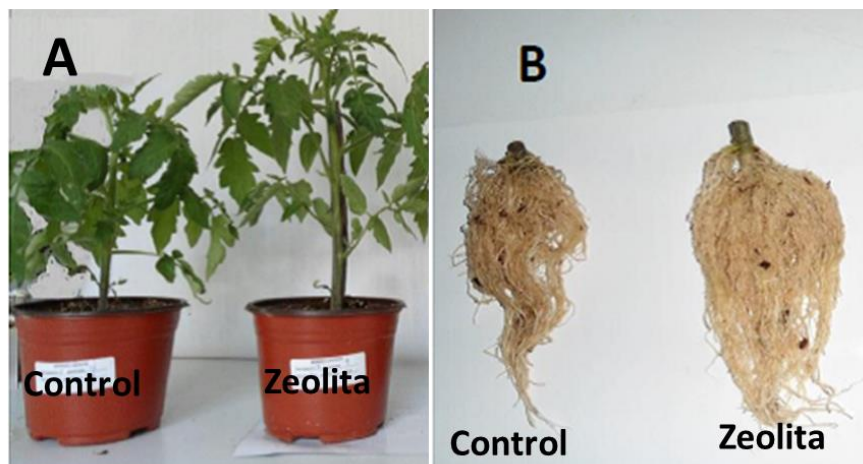


Figura 5. Crecimiento vegetativo (A) y longitud radicular (B) de plantas de tomate cultivadas con zeolita mezclada en diferentes proporciones de peat moss y perlita.

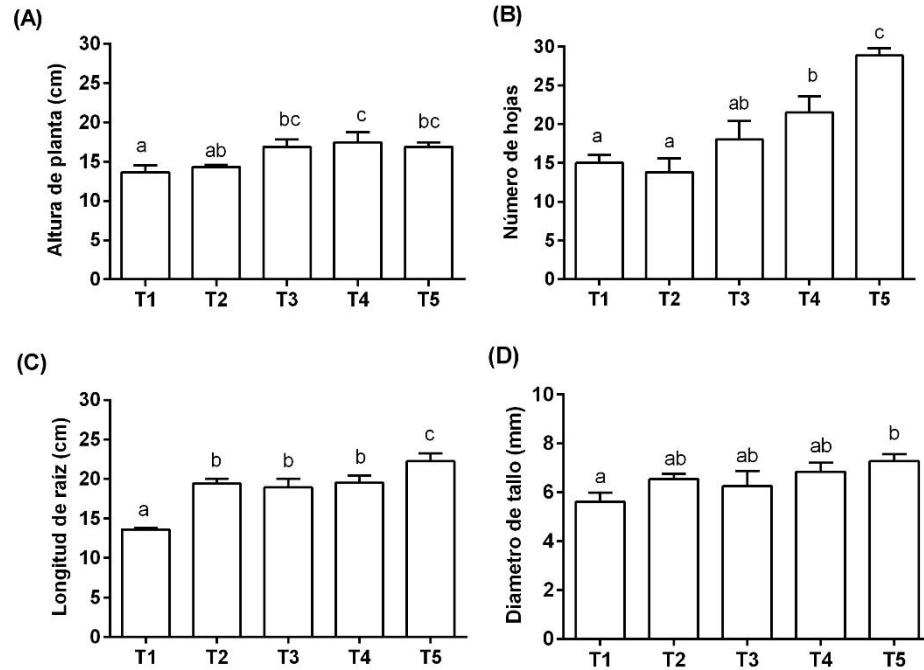


Figura 6. Crecimiento vegetativo de plantas cultivadas en diferentes mezclas de sustrato donde se incorporó la zeolita. A). altura de plantas, B) número de hojas, C) longitud de raíz y C) diámetro de tallo. Medias (n = 12); medias con una letra común en barras, no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Cuadro 2. Comportamiento fisiológico de plantas de tomate cultivadas con sustratos conteniendo diferentes proporciones de zeolita.

Variables	Tratamientos					p>F
	T1 100:0:0	T2 70:30:0	T3 70:20:10	T4 70:10:20	T5 70:0:30	
Área foliar (cm ²)	478.8±42b	706.41±86ab	701.14±88ab	695.82±34ab	787.89±46b	0.020*
Biomasa seca follaje (g)	2.49±0.34a	3.51±0.33ab	3.66±0.37ab	3.52±0.20ab	3.94±0.27b	0.025*
Biomasa seca raíz (g)	0.67±0.07a	1.87±0.44ab	2.47±0.43b	2.34±0.62b	2.07±0.20ab	0.025*
Índice de clorofila †	39.12±2a	40.26±1a	40.70±2a	38.78±1a	41.25±1a	0.866 _{ns}

Medias (n = 12) ± EE, Medias con una letra común en filas, no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); *=Diferencia significativa, ns=No significancia entre tratamientos (ANOVA, $\alpha=0.05$).

Respecto a la caracterización física (Figura 7) también se consignaron resultados alentadores en comparación con el tratamiento control, ya que los sustratos que contenían 30% de zeolita aumentaron su porosidad total en 8.47% (Figura 7A), capacidad de retención de agua en 260% (Figura 7B), densidad aparente en 212% (Figura 7C) y densidad de partículas en 230% (Figura 7D).

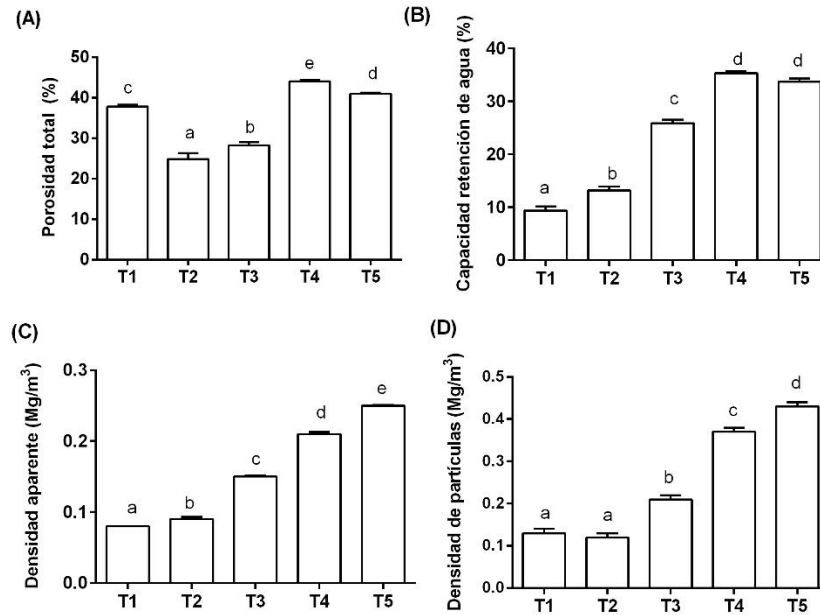


Figura 7. Propiedades físicas de los sustratos conteniendo zeolita en los cuales se cultivaron plantas de tomate. Medias (n = 3); medias con una letra común en barras, no son significativamente diferentes (p> 0.05).

Este trabajo claramente señala que la incorporación de zeolita (clinoptilolita) mezclada con los sustratos peat moss y perlita, produjeron significativamente mayor crecimiento y materia seca en plántulas de tomate. Esto sugiere que la zeolita puede promover la absorción de nutrientes más eficientemente en la zona radicular y pudiese ser utilizada en la agricultura como un biofertilizante de lenta liberación iónica de elementos como K, Ca, Mg y N, que naturalmente contiene, y como sustrato para condiciones de agricultura protegida, ya que aporta nutrientes, pero además permite una buena aireación, así como un mejor suministro de agua y nutrientes a las plantas. Por lo tanto, la incorporación de zeolita al suelo o sustrato, puede promover una agricultura sostenible al reducir los volúmenes de riego y fertilizantes empleados para los cultivos.

El trabajo de Méndez-Argüello et al. (2015b) proporciona datos alentadores al evaluar el efecto del manejo agronómico de *Cucurbita pepo* con y sin acolchado plástico, más zeolita incorporada al suelo a razón de 0, 10, 20 y 40 t ha⁻¹. Los resultados indicaron que el

acolchado en interacción con la zeolita promovió mayor fotosíntesis (Fs) durante todo el día; la conductancia estomática (Cs) también fue mayor en las primeras horas de la mañana (Figura 8A y 8B). Por su parte, la zeolita mostró resultados alentadores, ya que la incorporación de 40 t ha⁻¹ al suelo incrementó el rendimiento, número de flores, biomasa seca y calidad del fruto respecto al control (Figura 9).

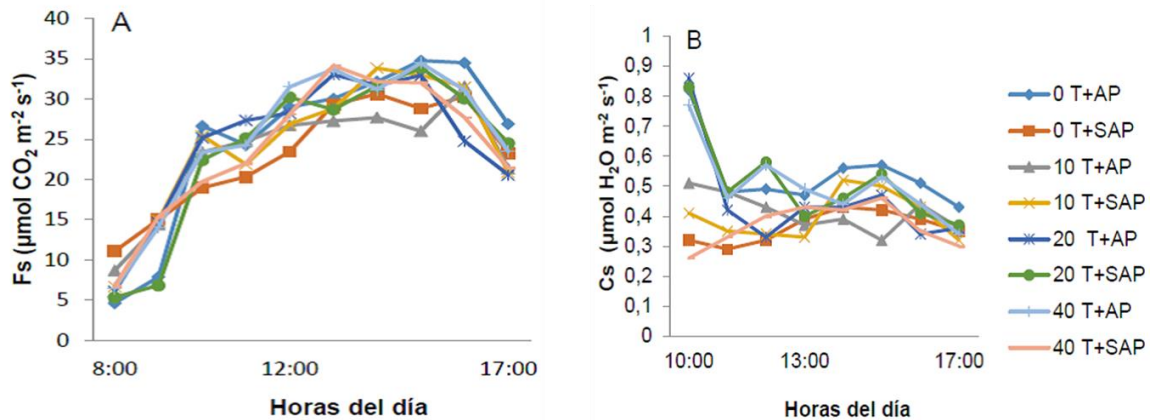


Figura 8. Resultados de intercambio gaseoso de plantas de *Cucurbita pepo* cultivadas en suelo con incorporación de zeolita más acolchado plástico. A) Fotosíntesis y B) conductancia estomática.

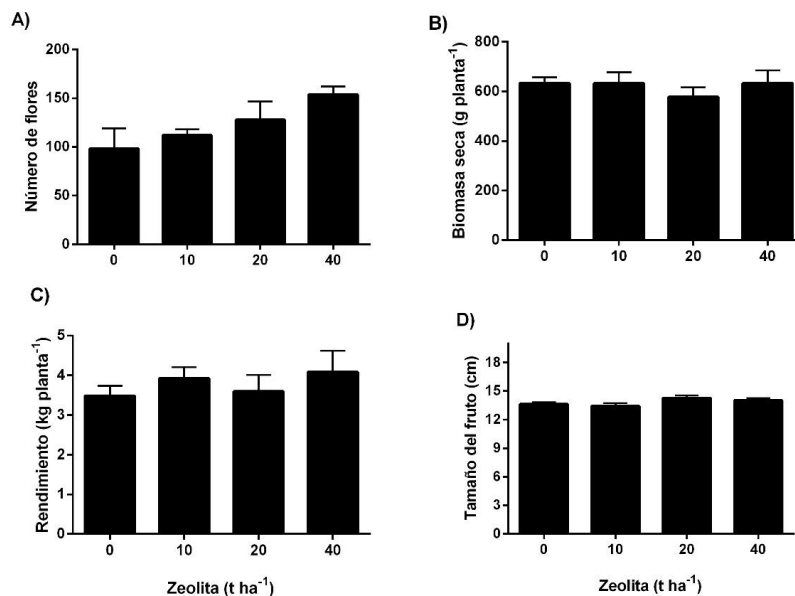


Figura 9. Variables fisiológicas de *Cucurbita pepo* influenciadas por la incorporación de diferentes cantidades de zeolita en el suelo.

Conclusiones

Es evidente que el uso excesivo de fertilizantes y pesticidas han deteriorado el suelo y han contaminado las fuentes de agua, existe entonces una necesidad urgente de desarrollar productos agrícolas con mayor eficiencia, por lo que la nanotecnología empieza a tener importancia para formular nanofertilizantes y nanopesticidas, promoviendo así una agricultura de bajo impacto ambiental. Por otra parte, el uso de la zeolita en la agricultura representa una buena opción como fertilizante de liberación lenta, mejorador de suelo, para uso eficiente del agua de riego y como sustrato para el crecimiento de plantas en bioespacios.

Literatura citada

- Allison, S.D. y Martiny, J.B. (2008). Resistance, resilience, and redundancy in microbial communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(Supplement 1), 11512-11519.
- Amtmann, A. y Armengaud, P. (2009). Effects of N, P, K and S on metabolism: new knowledge gained from multi-level analysis. *Current opinion in plant biology*, 12(3), 275-283.
- Baligar, V.C. y Fageria, N.K. (2015). Nutrient use efficiency in plants: An overview. In *Nutrient use efficiency: From basics to advances* (pp. 1-14). Springer India.
- Campos, A.C., Monte, B.M., Paiva, R.P., Werneck, C.G., Haim P.G. y Barros F.D. (2010). Dry matter production and nutrient accumulation after successive crops of lettuce, tomato, rice, and andropogon grass in a substrate with zeolite. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34: 435-442.
- Civeira, G. y M.B. Rodríguez (2011). Nitrógeno residual y lixiviado del fertilizante en el sistema suelo-planta-zeolitas. *Ciencia del suelo (Argentina)* 29: 285-294.
- De Campos Bernardi, A. C., Polidoro, J. C., de Melo Monte, M. B., Pereira, E. I., de Oliveira, C. R., y Ramesh, K. (2016). Enhancing Nutrient Use Efficiency Using Zeolites Minerals-A Review. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 6(04), 295-304.
- DeLonge, M. S., Miles, A. y Carlisle, L. (2016). Investing in the transition to sustainable agriculture. *Environmental Science y Policy*, 55, 266-273. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aasci.2016.05.013>.

- Dimkpa, C.O., Hansen, T., Stewart, J., McLean, J.E., Britt, D.W. y Anderson, A.J. (2015). ZnO nanoparticles and root colonization by a beneficial pseudomonad influence essential metal responses in bean (*Phaseolus vulgaris*). *Nanotoxicology*, 9(3), 271-278.
- Engates, K.E. y Shipley, H.J. (2011). Adsorption of Pb, Cd, Cu, Zn, and Ni to titanium dioxide nanoparticles: effect of particle size, solid concentration, and exhaustion. *Environmental Science and Pollution Research*, 18(3), 386-395.
- Farrell, M., Macdonald, L.M., Butler, G., Chirino-Valle, I. y Condron, L.M. (2014). Biochar and fertiliser applications influence phosphorus fractionation and wheat yield. *Biology and fertility of soils*, 50(1), 169-178.
- Foltête, A.S., Masfaraud, J.F., Bigorgne, E., Nahmani, J., Chaurand, P., Botta, C. y Cotellet, S. (2011). Environmental impact of sunscreen nanomaterials: ecotoxicity and genotoxicity of altered TiO₂ nanocomposites on *Vicia faba*. *Environmental Pollution*, 159(10), 2515-2522.
- García, A., Espinosa, R., Delgado, L., Casals, E., González, E., Puentes, V. y Sánchez, A. (2011). Acute toxicity of cerium oxide, titanium oxide and iron oxide nanoparticles using standardized tests. *Desalination*, 269(1), 136-141.
- Geisseler, D. y Scow, K.M. (2014). Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms –A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 75, 54-63.
- Gruener, J.E., D.W. Ming, C.J. Galindo, K.E. Henderson y D.C. Golden (2007). Plant productivity and characterization of zeoponic substrates after three successive crops of radish (*Raphanus sativus* L.). *Microporous and Mesoporous Materials* 105: 279-284.
- Gül, A., D. Eroğul y A.R. Ongun (2005). Comparison of the use of zeolite and perlite as substrate for crisp-head lettuce. *Scientia Horticulturae* 106: 464-471.
- Li, B.Y., Zhou, D.M., Cang, L., Zhang, H.L., Fan, X.H. y Qin, S.W. (2007). Soil micronutrient availability to crops as affected by long-term inorganic and organic fertilizer applications. *Soil and Tillage Research*, 96(1), 166-173.
- Li, P., Du, Y., Huang, L., Mitter, N., y Xu, Z. P. (2016). Nanotechnology promotes the RyD of new-generation micronutrient foliar fertilizers. *RSC Advances*, 6(73), 69465-69478.
- Li, Z., Zhang, Y. y Li, Y. (2013). Zeolite as slow release fertilizer on spinach yields and quality in a greenhouse test. *Journal of Plant Nutrition* 36: 1496-1505.
- Lubkowski, K. (2016). Environmental impact of fertilizer use and slow release of mineral nutrients as a response to this challenge. *Polish Journal of Chemical Technology*, 18(1), 72-79.
- Méndez Argüello, B., Lira-Saldivar, R.H., Ruiz-Torres, N.A., Cardenas-Flores, A., Ponce-Zambrano, R., Vera-Reyes, I. Mendoza-Mendoza, E., García-Cerda, L.A., De los Santos-Villarreal, G. (2015a). Influencia de nanopartículas de óxido de zinc puras y dopadas con plata en el crecimiento y producción de biomasa en plántulas de chile. XVI Congreso Nacional de Biotecnología 21-26 de Junio de 2015. Guadalajara, Jal., México.
- Méndez-Argüello, B., Lira-Saldivar R.H., Felipe-Victoriano M., Vera-Reyes I., Cárdenas-Flores, A. (2015b). Comportamiento fisiológico y rendimiento de calabacita por efecto de un biofertilizante zeolítico y acolchado plástico. 13° Simposio Internacional y 8° Congreso Nacional de Agricultura Sostenible, 23 al 27 de noviembre, Aguascalientes, Ags. México. (Artículo in extenso).

- Méndez-Argüello, B.; Lira-Saldivar R.H.; Vera-Reyes I.; Cárdenas-Flores, A. (2015c). Promoción de crecimiento en plantas de tomate por efecto de un biofertilizante zeolítico. 13° Simposio Internacional y 8° Congreso Nacional de Agricultura Sostenible, 23 al 27 de noviembre, Aguascalientes, Ags.
- Molla, A., Loannou, Z., Dimirkou A. y Mollas S. (2014). Reduction of nitrate nitrogen from alkaline soils cultivated with maize crop using zeolite-bentonite soil amendments. *International Journal of Waste Resources* 4:1-5.
- Naderi, M.R. y Danesh-Shahraki, A. (2013). Nanofertilizers and their roles in sustainable agriculture. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5(19), 2229-2232.
- Najafi, M.G. (2014). Effects of zeolite and vermicompost applications on potassium release from calcareous soils. *Soil and Water Research* 9: 31-37.
- Paul Fixen, Frank Brentrup, Tom W. Bruulsema, Fernando Garcia, Rob Norton and Shamie Zingore. Nutrient/fertilizer use efficiency: Measurement, current situation and trends. (2015). In Drechsel, P., Heffer, P., Magen, H., Mikkelsen, R., y Wichelns, D. (Eds). *Managing water and fertilizer for sustainable agricultural intensification*. International Plant Nutrition Institute (IPNI), and International Potash Institute (IPI). First edition, Paris, France.
- Pirzad, A. y Mohammadzade, S. (2014). The effects of drought stress and zeolites on the protein and nutrients of *Lathyrus sativus*. *International Journal of Biosciences* 4: 241-248.
- Qin, H., Lu, K., Strong, P. J., Xu, Q., Wu, Q., Xu, Z. y Wang, H. (2015). Long-term fertilizer application effects on the soil, root arbuscular mycorrhizal fungi and community composition in rotation agriculture. *Applied Soil Ecology*, 89, 35-43.
- Rabai, K.A., Ahmed, O.H. y Kasim, S. (2013). Use of formulated nitrogen, phosphorus, and potassium compound fertilizer using clinoptilolite zeolite in maize (*Zea mays* L.) cultivation. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 25(9), 713.
- Rameshaiah, G. N. y JPallavi, S. (2015). Nano fertilizers and nano sensors—an attempt for developing smart agriculture. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 3(1), 314-320.
- Rezaei, F., Moaveni, P., Mozafari, H., y Morteza, E. (2015). Investigation of different concentrations and times of nano-TiO₂ foliar application on traits of soybean (*Glycine max* L.) at Shahr-e-Qods, Iran. *International Journal of Biosciences (IJB)*, 6(5), 109-114.
- Salama H.M.H. (2012) Effects of silver nanoparticles in some crop plants, common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and corn (*Zea mays* L.). *Int. Res. J. Biotechnol.* 3(10): 190-197.
- Salas-Cruz, L., P.R. Foroughbackhch, J.L. Díaz, P.J. Hernández, P.A. Carrillo y A.M. Cárdenas (2014). Seed and seedling survival of six cacti species using natural zeolite as substrate. *International Journal Current Research and Academic Review* 2: 81-91.
- Sattari, S.Z., Van Ittersum, M.K., Bouwman, A.F., Smit, A.L., y Janssen, B.H. (2014). Crop yield response to soil fertility and N, P, K inputs in different environments: testing and improving the QUEFTS model. *Field Crops Research*, 157, 35-46.
- Schoumans, O.F., Chardon, W. J., Bechmann, M.E., Gascuel-Oudou, C., Hofman, G., Kronvang, B. y Dorioz, J.M. (2014). Mitigation options to reduce phosphorus losses from the agricultural sector and improve surface water quality: A review. *Science of the Total Environment*, 468, 1255-1266.

- Shahsavari, N., Jais, H.M. y Rad, A.H. (2014). Effect of zeolite and zinc on the biochemical characteristics of canola upon drought stress. *Sains Malaysiana* 43: 1549-1555.
- Sharma, P., Bhatt, D., Zaidi, M.G.H., Saradhi, P.P., Khanna, P.K., y Arora, S. (2012). Silver nanoparticle-mediated enhancement in growth and antioxidant status of *Brassica juncea*. *Applied biochemistry and biotechnology*, 167(8), 2225-2233.
- Singh, B., y Jajpura, L. (2016). Sustainable Agriculture: A Key to the Healthy Food and Better Environment, Economic Prosperity for Farmers and a Step towards Sustainable Development. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 5(1), 148-156.
- Timilsena, Y.P., Adhikari, R., Casey, P., Muster, T., Gill, H., y Adhikari, B. (2015). Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(6), 1131-1142.
- Torma, S., Vilcek, J., Adamisin, P., Huttmanova, E. y Hronec, O. (2014). Influence of natural zeolite on nitrogen dynamics in soil. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry Turkish* 38: 739-744.
- Vardar, G., Altıkatoğlu, M., Ortaç, D. y Cemek, M. (2015). Measuring calcium, potassium, and nitrate in plant nutrient solutions using ion-selective electrodes in hydroponic greenhouse of some vegetables. *Biotechnology and applied biochemistry*, 62(5), 663-668.
- Vunduk, J., Klaus, A., Kozarski, M., Đorđević, R., Jovanović L. y Nikšić M. (2014). Zeolites as possible biofortifiers in maitake cultivation. *Archives of Biological Sciences* 66: 123-129.
- Wang, Z., Xie, X., Zhao, J., Liu, X., Feng, W., White, J.C. y Xing, B. (2012). Xylem and phloem-based transport of CuO nanoparticles in maize (*Zea mays* L.). *Environmental science y technology*, 46(8), 4434-4441.
- Zarebska, A., Romero Nieto, D., Christensen, K. V., Fjerbæk Sjøtoft, L., y Norddahl, B. (2015). Ammonium fertilizers production from manure: a critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(14), 1469-1521.
- Zhao, L., Peralta-Videa, J. R., Rico, C. M., Hernandez-Viezcas, J. A., Sun, Y., Niu, G. y Gardea-Torresdey, J. L. (2014). CeO₂ and ZnO nanoparticles change the nutritional qualities of cucumber (*Cucumis sativus*). *Journal of agricultural and food chemistry*, 62(13), 2752-2759.
- Zhu, H., Han, J., Xiao, J.Q. y Jin, Y. (2008). Uptake, translocation, and accumulation of manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants. *Journal of Environmental Monitoring*, 10(6), 713-717.