

## El tamaño sí importa: Los nanofertilizantes en la era de la agricultura de precisión

ILEANA ECHEVARRÍA-MACHADO

Unidad de Bioquímica y Biología Molecular de Plantas, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. Calle 43, No. 130 x 32 y 34, Col. Chuburná de Hidalgo, 97205, Mérida, Yucatán, México.  
[ileana@cicy.mx](mailto:ileana@cicy.mx)

Las nanotecnologías ocupan una posición destacada para la transformación de la agricultura y la producción de los alimentos. Materiales de dimensiones nanométricas proporcionan un medio eficiente para distribuir fertilizantes y otras sustancias, de una manera controlada y dirigida. A esto se le llama “sistemas de entrega inteligente” en la agricultura. El tamaño es un factor determinante en la interacción planta: nanomateriales (NMs). Éste determina la capacidad de los NMs para penetrar las barreras biológicas de las plantas y, por ello, su efectividad como nanoportadores de estas sustancias. A su vez, las características de las barreras biológicas son genotipo-específicas y pueden variar por las condiciones de crecimiento.

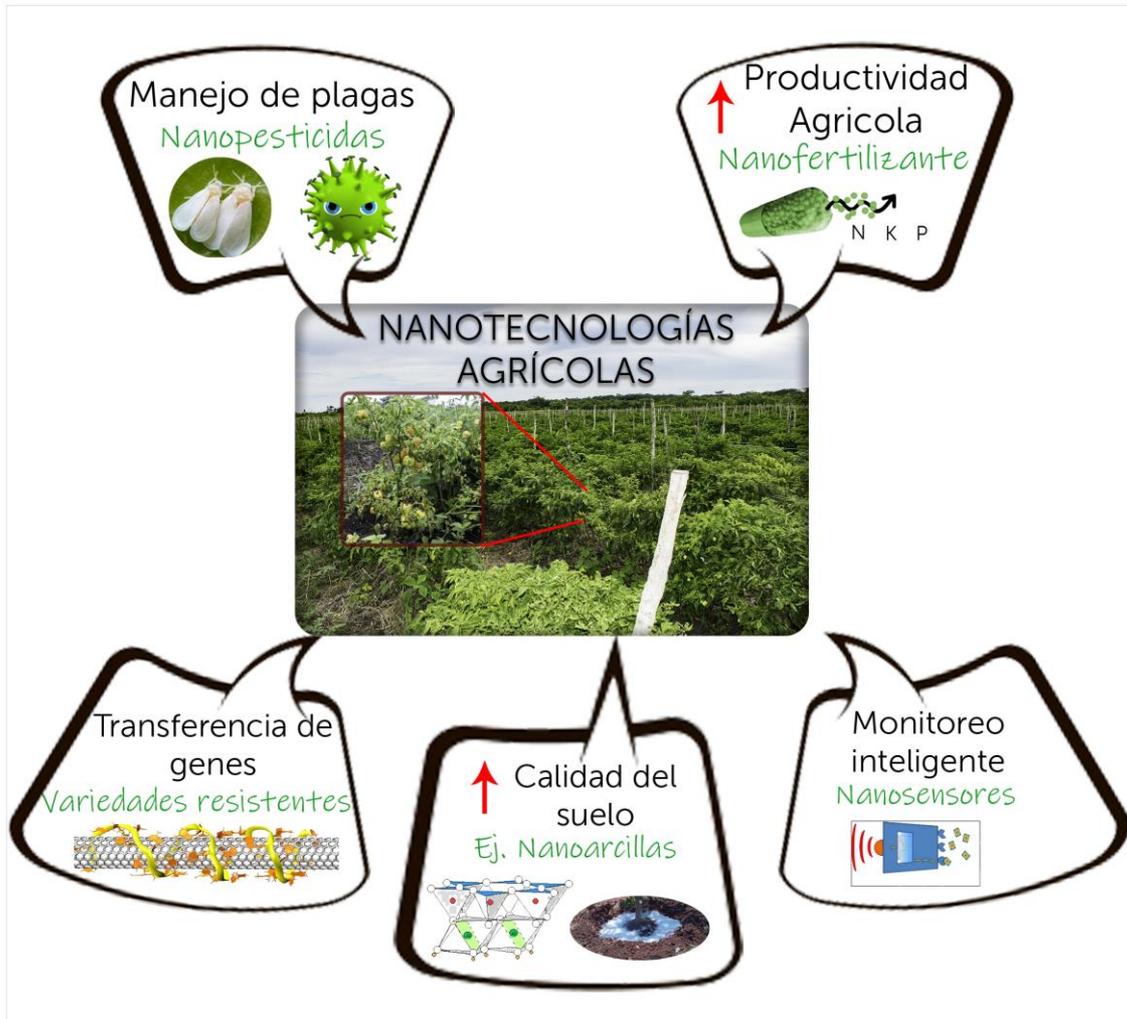
**Palabras clave:** Genotipo, nanoportadores, poros biológicos, vasos conductores.

La nanotecnología es un campo emergente de la ciencia con enormes aplicaciones en la terapia contra el cáncer, la biomedicina, la electrónica, la industria de los cosméticos, la remediación ambiental y la agricultura, entre otras. Si bien las nanopartículas (NPs, partículas con dimensiones entre 1 y 100 nm) pueden originarse naturalmente, son las de origen sintético las que han ocupado una posición central en estas aplicaciones de gran alcance (Zuverza-Mena *et al.* 2017), debido al gran número de propiedades que ellas despliegan (mecánicas, térmicas, fotoquímicas, eléctricas, fotocatalíticas, magnéticas, ópticas, etc.) (Klaine *et al.* 2008; Bhatt y Tripathi 2011).

La era de la agricultura de precisión (AP) no se concibe sin el uso de los nanomateriales (NMs, material que contiene partículas, sueltas o formando un agregado o conglomerado, y en el que el 50% o más de las misma, presenta una o más dimensiones en el rango de tamaño nanométrico). Se han dado muchas definiciones para la AP y una muy sencilla es

la que la refiere a un sistema de manejo integrado de cultivos, que intenta hacer coincidir el tipo y la cantidad de insumo con las necesidades reales de los cultivos, para áreas pequeñas dentro del campo y usando tecnologías de la información (Neube *et al.* 2018). En otras palabras, es una tecnología que se usa para aumentar la rentabilidad, mientras se reduce el impacto de la agricultura sobre el ambiente.

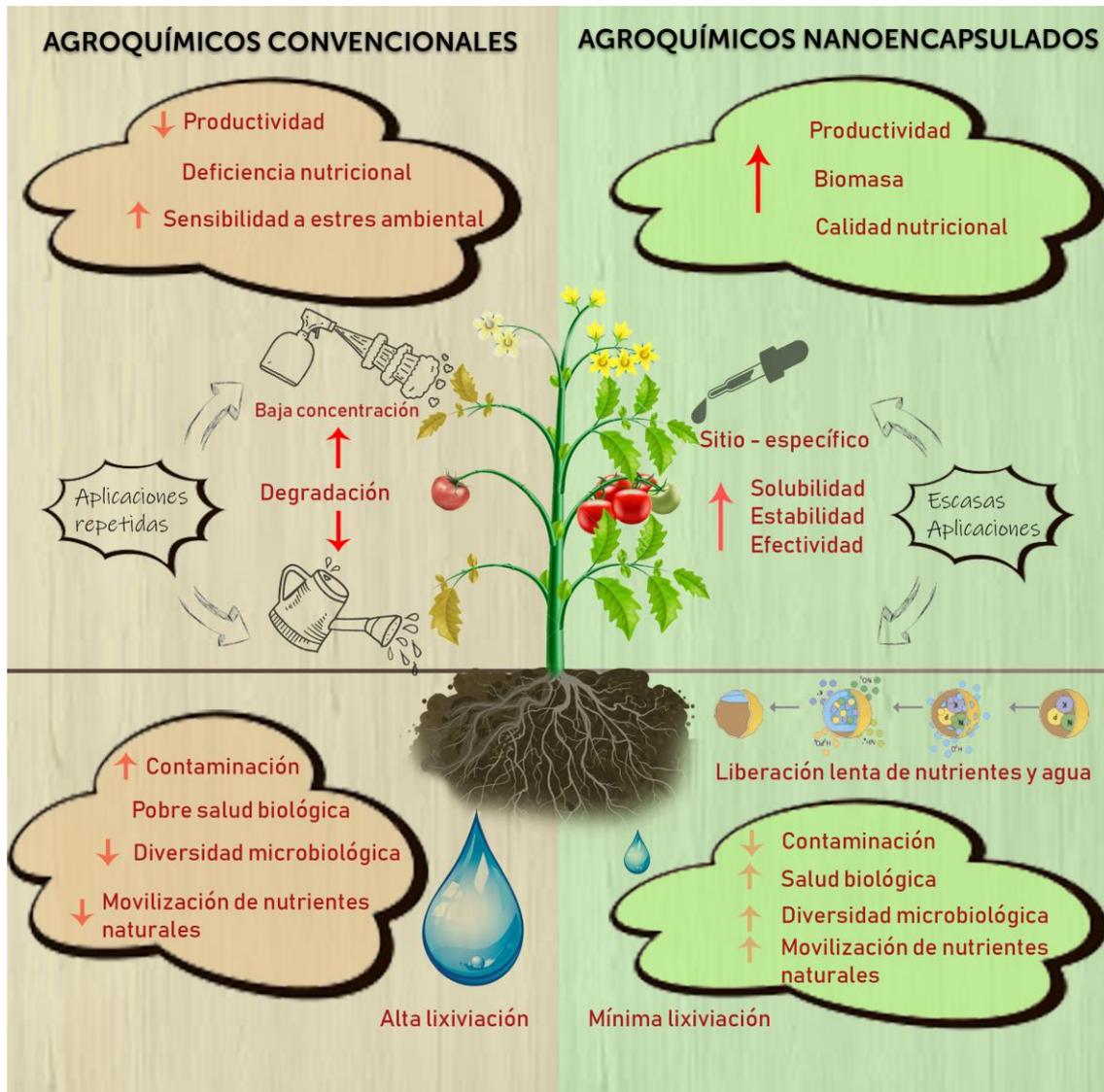
Es justamente a través de la aplicación de los NMs que se pudiera alcanzar el objetivo central de la AP. Por ejemplo, la adición de nanopesticidas (manejo de plagas), nanofertilizantes (NF) (aumento en los rendimientos agrícolas), nanoarcillas (recuperación de la calidad de los suelos) y NPs que medien la transferencia de genes (desarrollo de variedades resistentes a plagas y a ambientes extremos). El uso de nanosensores basados en “sistemas de entrega inteligentes” puede contribuir al uso eficiente de recursos como el agua, los nutrientes y otros agroquímicos (Figura 1).



**Figura 1.** Aplicaciones de las nanotecnologías en la agricultura. En la fotografía se presenta una plantación de chile habanero en Peto, Yucatán. (Fotografía: Ileana Echevarría-Machado; Figura: Luis Manuel Martínez-Echevarría).

Algunos avances en estas materias son ya un hecho. Por ejemplo, NPs de plata de 10 a 20 nm se han aplicado de manera efectiva para el manejo de la enfermedad de la mancha marrón en trigo, causada por el hongo *Bipolaris sorokiniana* Shoemaker (Mishra *et al.* 2014). Igualmente, NPs de zinc con un tamaño entre 16 a 20 nm han sido efectivas contra bacterias (Elumalai *et al.* 2015) y hongos fitopatógenos (Rajiv *et al.* 2013). Recientemente, el uso de NMs basados en carbono y en metales, suprimió la infección viral (Turnip mosaic virus, TuMP) en *Nicotiana benthamiana* Domin (Hao *et al.* 2018).

La nanoencapsulación o el nanorecubrimiento de los agroquímicos tiene una función vital en la protección del ambiente y en la planta. Estos procesos evitan la degradación de los compuestos y el lixiviado de los mismos, por lo que se garantiza la concentración efectiva requerida en la planta, aumentando la producción vegetal y la calidad nutricional de los cultivos. En cambio, con los agroquímicos convencionales, esta concentración no puede asegurarse y por ello, se requiere de aplicaciones repetidas, aumentando la contaminación ambiental (Figura 2).

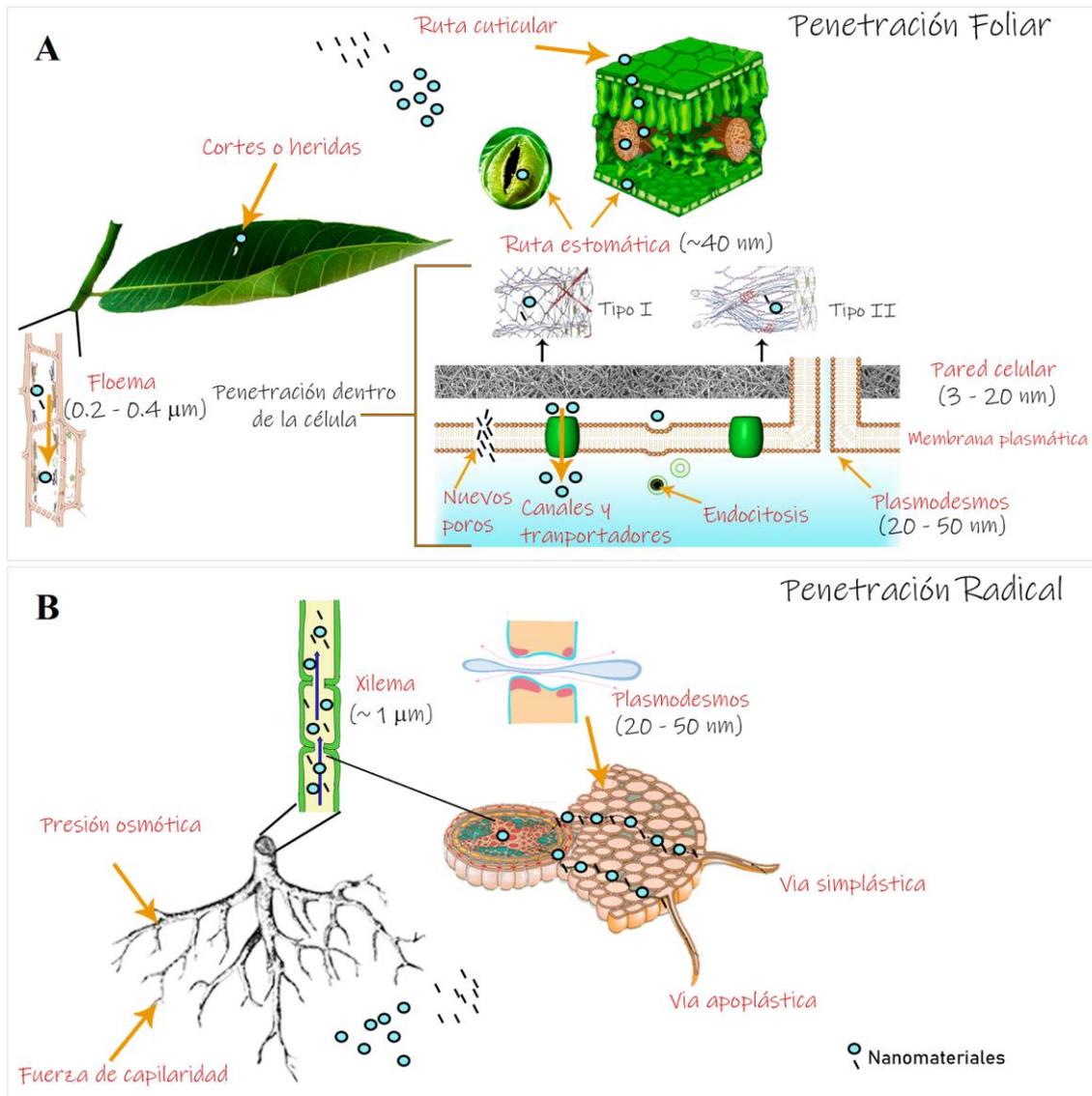


**Figura 2.** Efectos de la aplicación de los agroquímicos convencionales (fertilizantes, pesticidas, etc.) y los agroquímicos nanoencapsulados o nanoformulaciones, sobre las plantas y el ambiente. (Figura: Luis Manuel Martínez-Echevarría).

En particular, un NF se refiere a un producto que entrega nutriente a los cultivos a través de tres maneras: NMs que sirvan como macro o micronutrientes para las plantas, nutrientes químicos convencionales encapsulados en el interior de los NMs (nanoportadores o nanocápsulas) o recubiertos por películas poliméricas protectoras (DeRosa *et al.* 2010; Ditta y Arshad 2016). En el primer caso, por ejemplo, la aplicación de NPs de zinc y de hierro a cultivos que crecen en suelos con pH alcalino y ricos en carbonato de calcio es

muy importante. En estos suelos la disponibilidad de los micronutrientes Zn y Fe para las plantas es baja y las NPs proporcionan una forma más soluble de estos elementos debido a su alta reactividad. Igualmente, la aplicación de NPs de titanio, NPs de plata y los nanotubos de carbono aumenta el crecimiento y la productividad vegetal de una manera dependiente de la especie (Khodakovskaya *et al.* 2013; Duhan *et al.* 2017).

El éxito de un nanoportador para un fertilizante, o de los NMs que sirven como



**Figura 3.** Vías de entrada de los nanomateriales a la planta. **A.** La penetración foliar puede ocurrir por la ruta cuticular, estomática o por cortes o heridas en las hojas. Para la entrada a las células, los nanomateriales atraviesan la pared celular a través de los poros y la membrana plasmática a través de endocitosis, por proteínas transportadoras o creando nuevos poros en la membrana. El transporte entre células ocurre por los plasmodesmos y a largas distancias (hasta la raíz) son transportados por el floema. **B.** La penetración radical es determinada por parámetros como la presión osmótica y la conductividad hidráulica y puede ocurrir vía simplástica o apoplástica. A larga distancia, los NMs son transportados hacia la parte aérea a través del xilema. (Figuras: Luis Manuel Martínez-Echevarría).

nutrientes, es entregar su “carga” en sitios específicos dentro de la planta en los que estos compuestos son requeridos, para lograr el resultado deseado. Para ello, necesitan ser capaces de atravesar las barreras biológicas, entrar a los tejidos vegetales y ser translocados a distintos órganos de la planta. Por lo tanto, el tamaño y

la forma de estas NPs, además de sus características superficiales, juegan un papel determinante en este proceso, e incluso pueden ser la causa que provoque toxicidad de las mismas en las plantas (obstruyen los poros de los tejidos, reduciendo la toma de nutrientes y agua).

Los mecanismos para la toma biológica de los NMs aún no son bien comprendidos, aunque se han comprobado varias vías de penetración, tanto foliar (Figura 3A) como radical (Figura 3B), para algunas de las NPs. Sin embargo, aunque en las barreras biológicas existen poros de un determinado rango de tamaño (Figura 3), éstos pueden variar entre especies y condiciones ambientales, determinando así que algunas partículas puedan atravesar los mismos en algunas plantas, mientras que otras no. Por ejemplo, NPs poliméricas de 43 nm fueron capaces de atravesar los estomas de *Vicia faba* L. (Eichert *et al.* 2008), mientras que NPs de cerio, de menor tamaño (37 nm), no pudieron atravesar por estas estructuras en *Zea mays* L. (Birbaum *et al.* 2010).

El tamaño de los poros en la pared celular, aunque parecen estar en un rango entre 3 y 20 nm, pueden modificarse de acuerdo a la composición química de la misma. En este sentido, la pared celular de las gramíneas contiene una matriz de polisacárido y constituyentes proteicos muy diferentes al resto de las plantas con flores, proponiéndose los modelos tipo I y tipo II para las paredes celulares de estas últimas y las gramíneas, respectivamente (Figura 3; Carpita y Gibeaut 1993).

Así mismo, la conductividad hidráulica, el parámetro que más se usa para estudiar el transporte de los fluidos dentro de los vasos conductores de la planta, varía grandemente entre plantas y a lo largo de la planta, así como en respuesta a estrés ambiental como, por ejemplo, el estrés hídrico (Pire *et al.* 2007).

De lo anterior, es claro que varios aspectos dentro de las nanotecnologías aplicables a la agricultura requieren de una atención especial. Por ejemplo, el diseño de nuevos nanoportadores con el objetivo de maximizar su eficiencia para la entrega dirigida de agentes activos como los fertilizantes; la comparación de los efectos de

estas nanoformulaciones con los productos comerciales que existen en la actualidad permitirá demostrar las ventajas reales de las mismas; y la creación de marcos legales, determinará la comercialización y uso de estos NMs en el campo. A pesar de las investigaciones pendientes, el potencial de las NPs para la entrega de los nutrientes a los cultivos agrícolas está demostrado (Karny *et al.* 2018).

En resumen, si bien la aplicación masiva de las nanotecnologías para solucionar los grandes problemas actuales en la agricultura parece aún lejana, ellas ofrecen ventajas en cuanto a productividad y cuidado del medio ambiente, que contribuirán a lograr la sustentabilidad agrícola y alimentaria en el futuro.

## Referencias

- Bhatt I. y Tripathi B.N. 2011.** Interaction of engineered nanoparticles with various components of the environment and possible strategies for their risk assessment. *Chemosphere* 82: 308-317.
- Birbaum K., Brogiolli R., Schellenberg M., Martinoia E., Stark W.J., Gunther D. y Limbach L. 2010.** No evidence for cerium dioxide nanoparticle translocation in maize plants. *Environmental Science and Technology* 44: 8718-8723.
- Carpita N.C. y Gibeaut D.M. 1993.** Structural models of primary cell walls in flowering plants: consistency of molecular structure with the physical properties of the walls during growth. *The Plant Journal* 3(1): 1-30.
- DeRosa M.C., Monreal C., Schnitzer M., Walsh R. y Sultán Y. 2010.** Nanotechnology in fertilizers. *Nature Nanotechnology* 5: 91.
- Ditta A. y Arshad M. 2016.** Applications and perspectives of using nanomaterials for sustainable plant nutrition.

- Nanotechnology Reviews* 5(2): 209-229.
- Duhan J.S., Kumar R., Kumar N., Kaur P., Nehra K. y Duhan S. 2017.** Nanotechnology: The new perspective in precision agriculture. *Biotechnology Reports* 15: 11-23.
- Eichert T., Kurtz A., Steiner U. y Goldbach H.E. 2008.** Size exclusion limits and lateral heterogeneity of the stomatal foliar uptake pathway for aqueous solutes and water-suspended nanoparticles. *Physiologia Plantarum* 134(1): 151-160.
- Elumalai K., Velmurugan S., Ravi S., Kathiravan V. y Ashokkumar S. 2015.** Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Moringa oleifera* leaf extract and evaluation of its antimicrobial activity. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 143: 158-164.
- Hao Y., Yuan W., Ma C., White J.C., Zhang Z., Adeel M., Zhou T., Rui Y. y Xing B. 2018.** Engineered nanomaterials suppress Turnip mosaic virus infection in tobacco (*Nicotiana benthamiana*). *Environmental Science: Nano* 5: 1685-1693.
- Karny A., Zinger A., Kajal A., Shain-sky-Roitman J. y Schroeder A. 2018.** Therapeutic nanoparticles penetrate leaves and deliver nutrients to agricultural crops. *Scientific Reports* 8: 7589.
- Klaine S.J., Alvarez P.J.J., Batley G.E., Fernandes T.F., Handy R.D., Lyon D.Y., Mahendra S., McLaughlin M.J. y Lead J.R. 2008.** Nanomaterials in the environment: behavior, fate, bio-availability, and effects. *Environmental Toxicology and Chemistry* 27(9): 1825-1851.
- Khodakovskaya M.V., Kim B.S., Kim J.N., Alimohammadi M., Dervishi E., Mustafa T. y Cernigla C.E. 2013.** Carbon nanotubes as plant growth regulators: effects on tomato growth, reproductive system, and soil microbial community. *Small* 9(1): 115-123.
- Mishra S., Singh B.R., Singh A., Keswani C., Naqvi A.H. y Singh H.B. 2014.** Biofabricated silver nanoparticles act as a strong fungicide against *Bipolaris sorokiniana* causing spot blotch disease in wheat. *PLoS One* 9(5): e97881.  
<http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0097881>
- Neube B., Mupangwa W. y French A. 2018.** Precision agriculture and food security. En: Mensah P., Katerere D., Hachigonta S. y Roodt A. (Eds.). *Systems analysis approach for complex global challenges*, pp. 159-178. Springer International Publishing AG, Switzerland.
- Pire R., Sanabria M.E., Pereira A. y Díez J.J. 2007.** Conductividad hidráulica y grosor de los vasos del xilema en cinco materiales de vid sometidos a déficit hídrico. *Interciencia* 32: 35-40.
- Rajiv P., Rajeshwari S. y Venckatesh R. 2013.** Bio-fabrication of zinc oxide nanoparticles using leaf extract of *Parthenium hysterophorus* L., and its size-dependent antifungal activity against plant fungal pathogen. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 112: 384-387.
- Zuverza-Mena N., Martínez-Fernández D., Du W., Hernández-Viezas J.A., Bonilla-Bird N., López-Moreno M.L., Komárek M., Peral-Videa J.R. y Gardea-Torresdey J.L. 2017.** Exposure of engineered nanomaterials to plants: insights into the physiological and biochemical response-A review. *Plant Physiology and Biochemistry* 110: 236-264.

**Desde el Herbario CICY, 11: 69–75 (4-abril-2019)**, es una publicación semanal editada por el Herbario CICY del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., con oficinas en Calle 43 No. 130, Col. Chuburná de Hidalgo, C.P. 97200, Mérida, Yucatán, México. Tel. 52 (999) 942-8330 Ext. 232, [www.cicy.mx/Sitios/Desde\\_Herbario/](http://www.cicy.mx/Sitios/Desde_Herbario/), [webmas@cicy.mx](mailto:webmas@cicy.mx). Editor responsable: Ivón Mercedes Ramírez Morillo. Reserva de Derechos al Título Exclusivo No. 04-2016-041413195700-203, otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor, ISSN: 2395-8790. Responsable de la publicación: José Fernely Aguilar Cruz, Calle 43 No. 130, Col. Chuburná de Hidalgo, C.P. 97200, Mérida, Yucatán, México. Fecha de última modificación: 4 de abril de 2019. Las opiniones expuestas por los autores no necesariamente expresan la postura del editor de la publicación. De la misma manera, la responsabilidad sobre la veracidad y la precisión de los contenidos, le corresponde totalmente a los autores de los ensayos.