

Agronanotecnología: una nueva herramienta para la agricultura moderna

Agronanotechnology: a new tool for modern agriculture

Ricardo Hugo Lira Saldivar ¹, Bulmaro Méndez Argüello ¹, Ileana Vera Reyes ^{2,1}, Gladys de los Santos Villarreal ³

Originales: *Recepción:* 20/04/2016 - *Aceptación:* 02/08/2017

ÍNDICE

Resumen y palabras clave	<u>396</u>
Abstract and keywords	<u>396</u>
Introducción	<u>397</u>
Potencial de la nanotecnología en agricultura y los alimentos	<u>398</u>
Productos usados en aplicaciones agronanotecnológicas	<u>400</u>
Efecto de algunas nanopartículas en el crecimiento de las plantas	<u>403</u>
Modo de absorción y translocación de las nanopartículas	<u>405</u>
Conclusiones	<u>406</u>
Bibliografía	<u>407</u>

-
- 1 Departamento de Plásticos en la Agricultura. Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA). Blvd. Enrique Reyna Hermosillo 140. Saltillo. Coahuila. México. C. P. 25294.
 - 2 Catedrática CONACYT-CIQA.
 - 3 Departamento de Síntesis de Polímeros. CIQA.

RESUMEN

La nanotecnología (NT) estudia los materiales cuyo tamaño corresponde a la escala atómica y molecular (1-100 nm), destacando como los más estudiados a las nanopartículas (NPs) metálicas y las derivadas del carbono. En lo que respecta a la agricultura moderna, los estudios relacionados a este tipo de materiales han ido avanzando y se prevé un importante crecimiento en los reportes de resultados de investigación en el área, debido a la posibilidad de incrementar con su uso, la producción de alimentos. En este sentido, la NT brinda la posibilidad de generar nanofertilizantes y promotores del crecimiento. No obstante, actualmente existen imprecisiones sobre los resultados obtenidos, por una parte, algunas investigaciones muestran que la aplicación de los nanotubos de carbono y las NPs metálicas tienen un efecto benéfico en el crecimiento de las plantas, mientras que otros trabajos reportan inhibición y fitotoxicidad. Actualmente, la demanda de alimentos básicos a nivel mundial aumenta, pero las investigaciones y productos para incrementar el rendimiento de los cultivos son aún insuficientes. Por lo tanto, una opción para el desarrollo de una agricultura sustentable pudiese ser la generación de nanoproductos. Debido a lo antes señalado, este artículo analiza recientes investigaciones relacionadas con la utilización de las NPs en la agricultura y sus usos potenciales como nanofertilizantes y promotores de crecimiento de las plantas.

Palabras clave

agricultura sustentable • nanotecnología • nanopartículas

ABSTRACT

Nanotechnology (NT) is focused to study the materials at the atomic and molecular scale (1-100 nm), the most studied are metallic nanoparticles (NPs) and those derived from carbon. In modern agriculture NPs are investigated because they offer the possibility to control plant pathogens and to increase the yield of plant crops. Nanotechnology provides scientific tools to design and prepare important products such as fertilizers and plant growth promoters. However, scientific literature is plenty of mix results; for example, some papers reports the benefits obtained from the application of carbon nanotubes and metal NPs, promoting plant growth effects, while others papers mention inhibition and phytotoxicity on seeds and plants. NT in agriculture to produce nanofertilizers and pesticides is still being investigated; however, derivative products and applications have been steadily increasing in recent years and are expected to continue growing. Currently, the worldwide demand for food is increasing and research and products to enhance crops yield are still insufficient. Therefore, the industry needs to generate nanoproducts for the development of a sustainable agriculture. Consequently, this review presents recent results about the use of NPs in agriculture, and its potential uses as nanofertilizers and plant growth promoters.

Keywords

sustainable agriculture • nanotechnology • nanoparticles

INTRODUCCIÓN

En un intervalo de tiempo relativamente corto, la nanotecnología ha tenido un impacto significativo en numerosos sectores incluyendo la agroindustria. La NT, considerada como una tecnología emergente, se orienta a la caracterización, elaboración y aplicación de materiales de dimensiones muy pequeñas, en el rango de 1 a 100 nanómetros (nm), es decir de 1 a 100 billonésimas de metro (82), por lo que se ubica dentro de la escala atómica y molecular.

La NT es un extenso campo de la investigación interdisciplinaria, ya que con ella se abre un amplio abanico de oportunidades en diversas áreas como la medicina, la industria farmacéutica, la electrónica y la agricultura sustentable (54).

Actualmente los científicos agrícolas se enfrentan a una amplia gama de desafíos como el estancamiento en el rendimiento de los cultivos, la baja eficiencia en el uso de nutrientes, la disminución de la materia orgánica del suelo, las deficiencias de múltiples nutrientes, el cambio climático, la reducción de la superficie agrícola, la baja disponibilidad de agua para riego y la escasez de mano de obra; además del éxodo de personas desde las áreas agrícolas a las ciudades (11).

A pesar de esas enormes dificultades que enfrenta el sector agrícola, es necesario mantener un crecimiento sostenido del 4% para afrontar los desafíos que representa la demanda de alimentos a nivel global (40). Por lo tanto, para hacer frente a esa diversidad de problemas, es necesario explorar una de las tecnologías de vanguardia como la NT. Esta herramienta científica, permite detectar la presencia de plagas y enfermedades,

contaminación de alimentos así como aplicar la cantidad correcta de nutrientes y pesticidas que promuevan la productividad. Al mismo tiempo, garantizan la seguridad del medio ambiente y una mayor eficiencia en el uso de insumos agrícolas (45). En este contexto, se han desarrollado nuevos nanomateriales basados en el uso de NPs metálicas, poliméricas, inorgánicas, etc., las cuales permiten aumentar la productividad y buscan encontrar aplicaciones para el perfeccionamiento de nanosistemas inteligentes para la captura e inmovilización de nutrientes y su gradual liberación en el suelo para acrecentar la eficiencia de los fertilizantes (30).

Esos sistemas tienen la ventaja de reducir al mínimo la lixiviación, al tiempo que mejoran la absorción de nutrientes por las plantas y coadyuvan a mitigar la eutrofización al reducir la transferencia de nitrógeno a los mantos acuíferos subterráneos (38).

Además, es importante mencionar que los nanomateriales también podrían ser explotados para mejorar la estructura y función de los plaguicidas mediante el aumento de la solubilidad, la resistencia contra la hidrólisis, mejorando su foto descomposición y/o proporcionando una manera más eficaz de liberación controlada hacia los organismos objetivo (42).

Por la importancia y posibles beneficios de la agronotecnología como nueva y emergente área del conocimiento, este artículo de revisión presenta recientes investigaciones relacionadas con la utilización de las NPs en la agricultura y sus usos potenciales como nanofertilizantes, promotores de crecimiento de las plantas, nanoplaguicidas y nanosensores.

POTENCIAL DE LA NANOTECNOLOGÍA EN LA AGRICULTURA Y LOS ALIMENTOS

El potencial de la NT ha sido documentado en la literatura en diversas áreas tales como: en el cuidado de la salud al utilizarse en la fabricación de textiles antimicrobiales o de nuevos materiales con propiedades superiores a los ya existentes.

Adicionalmente, se ha empleado también, en tecnologías de información, comunicación, así como en el sector energético y en la aeronáutica. Sin embargo, la aplicación de la NT en la agricultura apenas ha comenzado a investigarse y validarse con productores y empresarios.

En el caso de la agricultura, la NT ofrece la posibilidad de mejorar la producción agrícola mediante diversas estrategias

que pueden incrementar la producción de alimentos utilizando menores insumos de energía y reduciendo los costos de producción y los desperdicios de agroquímicos (70).

Las aplicaciones de la NT en la agricultura son muy diversas, destacando principalmente la elaboración de nanopesticidas encapsulados para su liberación controlada (22), la producción de macro y micronutrientes al nivel nano, así como su utilización buscando hacer más eficiente y sustentable el uso y aplicaciones de los agroquímicos (45).

El uso potencial de la NT para diseñar y fabricar nanosensores que permiten detectar la presencia de plagas y enfermedades en los cultivos (18) se presenta en la figura 1.

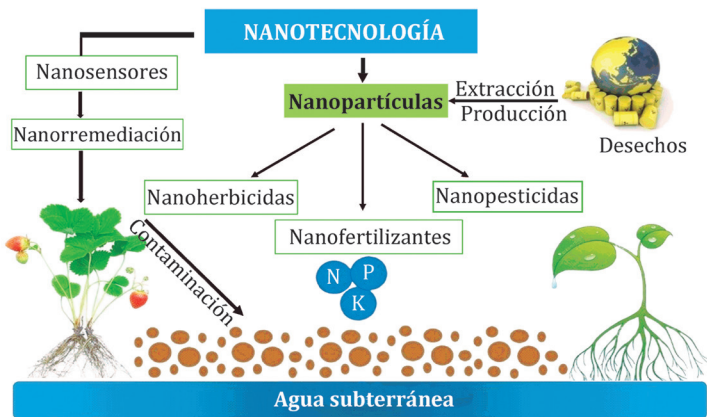


Figura 1. Aplicaciones potenciales de la nanotecnología y de las nanopartículas en la agricultura, incluyendo la fabricación de nanosensores, nanofertilizantes, nanopesticidas y nanoherbicidas.

Figure 1. Potential applications of nanotechnology and nanoparticles in agriculture, including the manufacture of nanosensores, nanofertilizers, nanopesticides and nanoherbicides.

Asimismo, la NT ha permitido el desarrollo de empaques inteligentes de alimentos que pueden revelar el desarrollo bacteriano o fúngico al estar envasados (77).

La figura 1 (pág. 398), también muestra que diversos tipos de NPs metálicas como las de Ag, Fe, Cu, Zn, etc., pueden ser utilizadas con un enfoque dual, ya sea como nanofertilizantes al mejorar la germinación de semillas y al promover el crecimiento de las plantas (26), o para emplearse como nanopesticidas (34). Algunos materiales como arcillas y zeolitas pueden ser usados al nivel nano para mejorar la capacidad de retención de agua en el suelo, y además actúan como materiales de lenta liberación de agua y fertilizantes, incrementando así la eficiencia en el uso de agua y nutrientes por las plantas (69).

En años recientes muchos esfuerzos se han venido realizando en centros de investigación e instituciones de educación superior de todo el mundo, para encontrar novedosas aplicaciones de la NT en la producción sustentable de alimentos y cultivos (10, 28). En este contexto, la nanoencapsulación de agroquímicos y microorganismos benéficos ha adquirido una gran relevancia al ser una manera de controlar plagas y enfermedades con bajo impacto ambiental, lo cual permite reducir la cantidad de agroquímicos que dañen los ecosistemas (22). Es por eso que las inversiones en agricultura y alimentación nanotecnológica van en aumento, debido a que sus beneficios potenciales se enfocan a mejorar la calidad e inocuidad de los insumos agrícolas al ser utilizados en menor volumen y promoviendo

mejoras en la nutrición (61). Mientras que la mayor inversión en NT se realiza en países desarrollados, los avances de investigación permiten vislumbrar posibles aplicaciones en la agricultura, alimentos y en la bioseguridad del agua, lo que podría tener un impacto significativo en la sociedad de países en desarrollo (23).

La observación mencionada se centra en las estrategias modernas utilizadas para el manejo del agua, el uso de agroquímicos convencionales y el potencial de los nanomateriales en la agricultura sustentable, con un enfoque moderno en las fronteras de la agricultura no tradicional (1, 74).

A pesar de que las posibles aplicaciones de la NT son muy vastas, los usos actuales en el sector agrícola y alimentario son relativamente escasos, debido a que la agronanociencia se encuentra en un estado emergente (73). Una visión general de más de 800 productos de consumo basados en NT que actualmente están disponibles a nivel mundial, apunta que solo cerca del 10% de ellos son alimentos, bebidas y productos para el envasado de comestibles (12). Sin embargo, en los últimos años los productos y aplicaciones derivados de la NT en estos sectores han ido en constante aumento y se prevé que siga creciendo rápidamente en el futuro (59).

Todas esas aplicaciones potenciales que han sido generadas por trabajos de investigación, se ven claramente reflejadas en incremento constante de las publicaciones relacionadas con la NT en el sector agrícola y de productos alimenticios (figura 2, pág. 400).

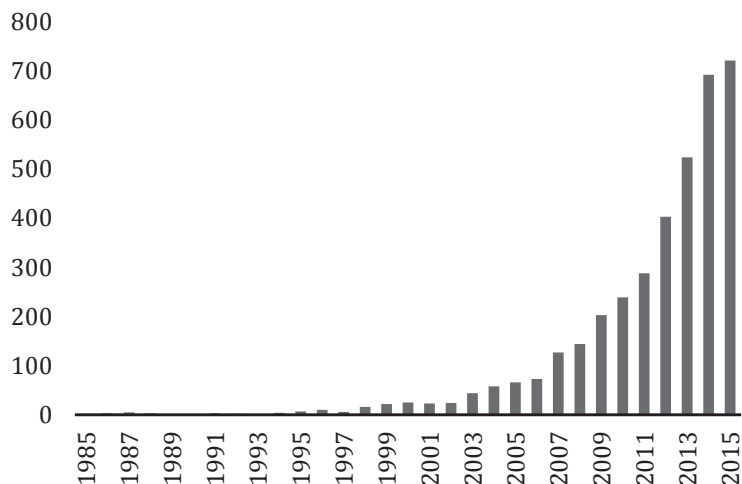


Figura 2. Publicaciones anuales en revistas científicas relacionadas con nanotecnología aplicada a la agricultura y en productos alimenticios.

Figure 2. Annual publications in scientific journals related to nanotechnology applied to agriculture and food products.

PRODUCTOS USADOS EN APLICACIONES AGRONANOTECNOLÓGICAS

Diversos nanomateriales se han utilizado e investigado por su función biológica en células de humanos y plantas, como son los nanotubos de carbono (NTC), fullerenos, liposomas, proteínas y polímeros (figura 3, pág. 401), incluyendo biopolímeros como el quitosán (21).

Los efectos positivos de los NTC en el crecimiento y desarrollo de las plantas han sido documentados por varios grupos de investigación, habiendo reportado que incrementaron el crecimiento de las raíces en plantas de cebolla y pepino (6), así como de zacate rye grass (35).

Además, se ha demostrado que los nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT), pueden activar el crecimiento de plantas de tomate y afectar a la expresión de genes que son esenciales para la división celular y el desarrollo de la planta (29, 78).

Liu *et al.* (2009), demostraron que los nanotubos de carbono de pared sencilla poseen el tamaño adecuado como para penetrar en las paredes y membranas de las células de tabaco. Esto ha generado interés, porque de manera similar a las aquaporinas pueden ayudar a transportar muy rápidamente agua y nutrientes dentro de las plantas (27).

También son útiles para procesos de desalinización, ya que pueden cargarse internamente con iones de Na^+ y Cl^- para luego eliminar del sistema las sales en exceso (20).

Por su parte los fullerenos al tener una nanoestructura en forma de esfera o balón, pueden utilizarse como contenedores de material biológico o mineral de tal manera que pueda ser transportado hasta su destino en el interior de su estructura, donde luego será utilizado por las plantas (25).

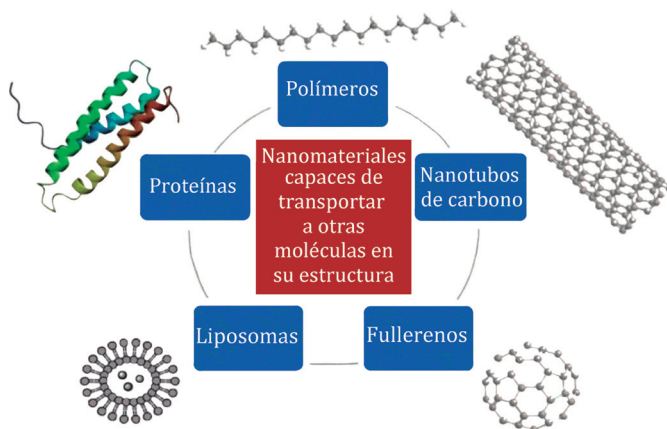


Figura 3. Algunas características de los nanomateriales usados en una gran diversidad de aplicaciones biológicas e industriales.

Figure 3. Some characteristics of nanomaterials used in a wide variety of biological and industrial applications.

Los organelos celulares conocidos como liposomas también han probado ser útiles para almacenar nitratos en su interior y ser transportados dentro de plantas de *Arabidopsis thaliana* (50).

Para el caso de la horticultura moderna, se están utilizando nanomateriales para el tratamiento de algunas enfermedades de plantas, para la detección precoz de los patógenos que las producen (31), para la mejora en la asimilación de nutrientes esenciales (41), e incluso para construir nanobiosensores importantes en determinados procesos biológicos (79).

La NT puede incrementar la eficacia de los pesticidas e insecticidas comerciales, reduciendo la cantidad de aplicación al suelo o follaje a dosis significativamente menores que las requeridas de manera convencional, con la mejora que eso implica para los ecosistemas (81).

La nutrición mineral de las plantas en la agricultura es de primordial importancia y en este ámbito los nanofertilizantes ya están ofreciéndose en el

mercado de Estado Unidos; por ejemplo, la compañía A.M. Leonard, puso a la venta el producto denominado Florikan, el cual se ha llamado NANO 16-5-11.

La empresa que lo produce señala que al aplicar NANO, se obtendrá 10 veces el número de puntos de contacto comparado con el fertilizante estándar. NANO se ha formulado al 100% como fertilizante nanoencapsulado de liberación lenta, teniendo el total de nutrientes solubles en agua para el consumo de las plantas. Este nanoproducto es elaborado con nitrato de amonio y está completamente libre de urea.

Se considera que el uso de este insumo es seguro, eficaz y económico con una reducción del volumen de fertilización total aplicado (4).

En el ámbito agrícola la producción mundial de alimentos ha sido facilitada por las más diversas tecnologías de producción. Uno de los principales factores para el aumento de producción y disminución de costos, es el aprovechamiento máximo y selección especial

de las "mejores" semillas, desarrolladas biotecnológicamente y mediante técnicas genéticas (72).

Por otro lado, respecto del uso de NPs en el área de los fertilizantes químicos o tradicionales, en China se ha reportado la preparación de nanocompuestos que contienen fertilizantes de liberación lenta, lo cual es un avance importante en la nutrición vegetal (39).

Actualmente se considera que los nanodispositivos tendrán la capacidad de detectar una infección por hongos o bacterias, la deficiencia en el uso de nutrientes por las plantas, o cualquier otro problema de fitosanidad, mucho antes de que los síntomas sean evidentes en la escala macro (67). Este tipo de tratamiento con nanocompuestos puede ser dirigido a la zona afectada con una mayor conciencia sobre los riesgos asociados con el uso de plaguicidas sintéticos o tradicionales.

Debido al efecto adverso en los agroecosistemas, se ha originado una necesidad urgente de explorar productos alternativos para el control de plagas y enfermedades (56).

El trabajo de Pérez-de-Luque y Rubiales (2009) pone de manifiesto que la NT está abriendo nuevas aplicaciones potenciales para la agricultura, las cuales ya están siendo exploradas y utilizadas en la medicina y farmacología, pero el interés por su uso en la protección de cultivos apenas está iniciando. El trabajo de esos autores se centra en el desarrollo de nanodispositivos para atacar sitios de las plantas con problemas y para usar nanotransportadores de emisiones químicas controladas.

La NT también puede mejorar las técnicas del manejo de cultivos existentes en el corto y mediano plazo. Las nanocápsulas ayudarán a evitar problemas en los cultivos mediante la utilización de herbicidas sistémicos contra malezas parásitas (83).

La nanoencapsulación puede mejorar la aplicación de herbicidas, proporcionando una mejor penetración a través de cutículas, estomas y tejidos, ya que permite la liberación lenta y constante de las sustancias activas.

Con la nanobiotecnología se plantea la posibilidad de diseñar plantas mediante la manipulación de las semillas (3). Las investigaciones en este campo se basan en el desarrollo de nuevas técnicas que utilizan NPs que permiten introducir ADN ajeno a una célula. Por ejemplo, los investigadores del laboratorio Oak Ridge en Estados Unidos, descubrieron una técnica de escala nanométrica para inyectar ADN de manera simultánea a millones de células. Con esto se ha logrado que millones de nanofibras de carbono con ADN sintético adherido crezcan de un chip de silicio. Posteriormente se lanzan las células vivas contra las fibras que las perforan y les inyectan ADN en el proceso (51).

La conversión directa de la energía solar a electricidad a partir de las proteínas responsables de la fotosíntesis en las hojas de las plantas, es otro ejemplo de una nueva aplicación de las NPs en la agricultura, tal y como lo han demostrado investigadores de la Universidad Vanderbilt en EUA.

Por su parte Scott y Chen (2013) señalan que los cultivos agrícolas no solo pueden incrementar el rendimiento por el uso de la NT, sino que también los nuevos materiales y dispositivos de diseño pueden prevenir la presencia de plagas y enfermedades. De hecho, se prevé un gran futuro a través de la exploración y explotación de los estudios a nanoescala de materiales biológicos de origen agrícola y natural en beneficio de una sociedad sustentable y amigable con el ambiente (15, 48).

EFFECTO DE ALGUNAS NANOPARTÍCULAS EN EL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS

Algunos autores mencionan que el efecto promotor o inhibidor del crecimiento de las NPs en las plantas está relacionado con su concentración, tamaño y las propiedades inherentes del elemento involucrado, así como la función fisiológica y bioquímica que desempeña en la planta, y si actúa como micronutriente tratándose de cobre, zinc, etc. (80).

NPs como las de CuO muestran un efecto positivo sobre la reactividad de fitohormonas, especialmente del ácido indolacético (AIA), así como del ácido salicílico, esto hace que se facilite o incremente la acción fitoestimulante de las NPs (80).

Las NPs de óxido de zinc (NPs ZnO) son usadas en diferentes áreas como la industria de cosméticos, textiles, medicina, electricidad y en la agricultura (8).

En el sector agrícola son estudiadas por su actividad antimicrobial (14, 66) y por su potencial como nanofertilizantes, corrigiendo las deficiencias de zinc en las plantas y promoviendo crecimiento y desarrollo (9, 43, 60). Algunos estudios señalan que concentraciones elevadas (1000 mg L⁻¹) causan fitotoxicidad e inhibición de la germinación (32, 84); mientras que dosis bajas (< 50 mg L⁻¹) han demostrado efectos significativos en el crecimiento y desarrollo (44, 55), reflejándose en mayor biomasa seca y área foliar. Este efecto promotor ha sido atribuido al zinc, por ser este uno de los micronutrientes esenciales demandados para la división celular y por su importancia como componente de varias enzimas en las plantas (47); del mismo modo está implicado en la síntesis de proteínas, carbohidratos, lípidos y ácidos nucleicos (76).

Trabajos efectuados en diversas especies de plantas confirman que las NPs ZnO promueven mayor germinación y crecimiento de plántulas (73).

En el reporte de Panwar *et al.* (2012) se señala más crecimiento y producción de biomasa seca en plántulas de tomate cuando aplicaron 20 mg L⁻¹ al follaje; además, encontraron altas concentraciones de Zn en las hojas, confirmando con ello que ocurrió la penetración en los estomas y su traslocación basipétala vía floema.

Otro estudio realizado por Prasad *et al.* (2012), revela que una concentración de 1000 mg L⁻¹ de NPs ZnO promueven la germinación en semillas de cacahuete, así como la elongación de raíz y tallo. Zhao *et al.* (2014), obtuvieron incrementos significativos en longitud y biomasa seca de la raíz en plantas de pepino cultivadas en maceta, debido a incorporación al suelo de 400 y 800 mg kg⁻¹ de NPs ZnO. Estos investigadores consignan que las altas concentraciones usadas por ellos no afectaron negativamente a las plantas.

En pruebas de germinación de semillas las dosis de 250 a 2000 mg L⁻¹ de NPs ZnO promovieron incrementos significativos de clorofila y proteína en plántulas de trigo (57). Concentraciones bajas (10 y 20 mg L⁻¹) de estas mismas NPs mejoraron la germinación de semillas de cebolla (58).

En plantas de goma guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) una concentración de 10 mg L⁻¹ de NPs ZnO aplicada foliarmente promovió mayor producción de biomasa, contenido de clorofila, longitud y área radicular, así como síntesis de proteína (57). En plantas de soya la dosis de 1.0 g L⁻¹ de NPs ZnO causó efectos significativos en la germinación y crecimiento (68).

La aplicación foliar en plantas de garbanzo (*Cicer arietinum*) de 1.5 y 10 mg L⁻¹ de NPs ZnO durante 15 días, originaron mayor altura y biomasa seca (47).

Se ha destacado que la aplicación de zinc en forma de nanofertilizante aplicado al follaje en dosis bajas, es más eficiente para promover el crecimiento vegetativo. Se ha sugerido que este efecto se debe a que el zinc es requerido para la producción de biomasa y también porque este microelemento tiene una función muy importante en muchas enzimas involucradas en el proceso fotosintético, así como en la integridad y mantenimiento de las membranas celulares de las plantas (2, 5).

El zinc como nanofertilizante en dosis de 10 mg L⁻¹ ha promovido más crecimiento en plantas de mijo (*Pennisetum americanum*), mayor producción de biomasa seca, longitud de raíz, contenido de clorofila y rendimiento de grano (76).

La aplicación foliar de nanoquelato de zinc como fertilizante promovió un incremento significativo en la altura de plantas de algodón (*Gossypium hirsutum*), así como de biomasa seca y contenido de clorofila (63).

Existen reportes indicando que las NPs ZnO incrementan el nivel de AIA en raíces y en los brotes apicales, incrementando de esta forma la velocidad de crecimiento en las plantas (72).

El efecto de las NPs ZnO en el crecimiento vegetal, podría relacionarse a la actividad que tiene el zinc como precursor en la producción de auxinas reguladoras del crecimiento, las cuales también promueven la elongación y división celular (62).

Además, se reporta que el zinc es uno de los micronutrientes esenciales y un componente muy importante de varias enzimas responsables de muchas reacciones metabólicas (72), igualmente desempeña una importante función en la elaboración de clorofila; germinación de semillas; producción de polen y biomasa (47).

Por otra parte, se ha puntualizado que 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 causan más crecimiento de plántulas de mostaza (*Brassica juncea*) en concentraciones de 25 y 50 mg L⁻¹, reflejándose esto en mayor longitud de raíz, biomasa seca y altura. Sin embargo, altas concentraciones (250-500 mg kg⁻¹ de suelo), inhibieron la germinación y crecimiento en las plantas de haba. 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, respectivamente. Además estas NPs pueden mejorar la eficiencia de intercambio de electrones a nivel celular en las plantas, lo que podría reducir la formación de las dañinas especies reactivas de oxígeno (9).

Otras NPs como las de TiO₂ aplicadas al follaje, revelan 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 (7).

Estudios realizados por García *et al.* (2011), revelan que las NPs de cerio son extremadamente tóxicas en el conjunto de ensayos realizados, habiendo determinado que en pruebas de germinación, algunas semillas mostraron un efecto perjudicial (fitotoxicidad) en la 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 (17, 33, 75). Por lo tanto, la función de las NPs en la modulación del sistema de defensa

antioxidante en las plantas no está totalmente elucidado, siendo un tema necesario para ser investigado con mayor profundidad.

Estos resultados pueden servir de base para considerar el uso de NPs magnéticas como un sistema acarreador de ingredientes para remediar enfermedades bacterianas. Por otro lado, Zhu *et al.* (2008), han mencionado que las plantas de calabaza (*Cucurbita maxima*), al aplicarles NPs de magnetita (Fe_3O_4), pueden absorber, traslocar y acumular las NPs 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 considerar e investigar cuando se está evaluando el destino, medio de transporte y caminos que siguen las NPs en las plantas y los ecosistemas.

MODO DE ABSORCIÓN Y TRANSLOCACIÓN DE LAS NANOPARTÍCULAS

Cuando las NPs son aplicadas al follaje se absorben a través de los estomas y su translocación o transporte basipétalo hacia la base del tallo es por el sistema vascular del floema (figura 4). Al ser aplicadas al suelo o en el agua de riego penetran a través de la epidermis de la raíz y la corteza, posteriormente pasan a la endodermis y finalmente entran al tejido conductivo del xilema, para luego ser translocados a larga distancia hasta las ramas y el follaje de las plantas (52, 65).

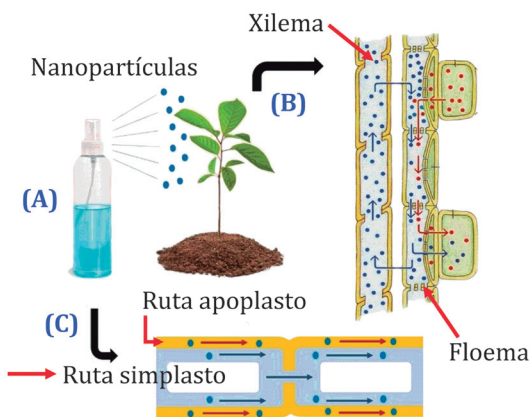


Figura 4. (A) Esquema que ilustra la aplicación de nanopartículas al follaje de las plantas. (B) Cuando penetran a través de los estomas se translocan o transportan vía floema. (C) Cuando se aplican a la zona radicular, su translocación a larga distancia es principalmente por el apoplasto del tejido conductivo del xilema.

Figure 4. (A) Diagram illustrating the application of nanoparticles to plant foliage. (B) When they are absorbed through stomata are translocate or transported via phloem. (C) When applied to the root zone the long distance translocation is primarily by the apoplast conductive xylem tissue.

Se ha señalado que las paredes y membranas celulares actúan como una eficaz barrera a la entrada de cualquier tipo de NPs, y que la efectividad de su entrada y transporte está determinado por el tamaño de los poros de la pared celular, que están en el rango de 5 a 20 nm (13, 16). Por lo tanto, solo NPs de un tamaño menor al de los poros de la pared celular, pudiesen pasar con facilidad y penetrar las membranas en su camino al interior del citoplasma celular.

Los nanomateriales son considerados un factor de estrés en las plantas, ya que existe la posibilidad de que puedan remodelar y modificar la estructura y constitución de las membranas y pared celular en plantas (37).

Diversas investigaciones han demostrado que tanto las NPs de carbono, como las metálicas, son capaces de producir estrés en las plantas, generando un exceso de ERO (especies reactivas del oxígeno) que pueden afectar las proteínas, lípidos, carbohidratos y el ADN. Las NPs alteran la eficiencia fotosintética, la fluorescencia fotoquímica y el rendimiento cuántico en las plantas, debido a las interacciones de estas con los fotosistemas I y II, ya que diversos estudios han demostrado que las clorofilas transfieren la energía a las NPs (46, 64).

A su vez, la perturbación en la actividad fotosintética se traduce en estrés oxidativo en las plantas. El estrés oxidativo en plantas provocado por las NPs se ha investigado a través de técnicas que miden la producción de ERO como H_2O_2 , la activación de los mecanismos de defensa enzimáticos, la peroxidación lipídica y pérdida de electrolitos, entre los más importantes. Sin embargo, aún no se entiende completamente cómo las propiedades químicas de las NPs inducen la producción de ERO y el daño causado a la membrana de las plantas (24).

CONCLUSIONES

La nanotecnología es el conocimiento emergente del siglo XXI en todos los campos de la ciencia. En la agricultura su beneficio incluye el mejoramiento genético de plantas, la mejora de la productividad agrícola utilizando NPs como inductores del crecimiento vegetal, producción de nanoencapsulados para la lenta liberación de fertilizantes, así como para la formulación de nanoplaguicidas y nanoherbicidas.

Con el empleo de la NT también se podrán fabricar nanosensores muy eficaces para la detección temprana de enfermedades. Además se podrá realizar la transferencia de ADN en las plantas para el desarrollo de variedades resistentes a plagas y enfermedades, así como a factores bióticos y abióticos. Sin embargo, la presencia de NPs en cualquiera de sus formas es factible que afecten la estructura de la comunidad microbiana, lo que puede causar alteraciones en la función de los agroecosistemas y comprometer los procesos de producción de alimentos.

La biodisponibilidad del exceso de nanomateriales amenaza en última instancia el ecosistema y la salud humana.

En los últimos años, el campo de la nanotoxicología que estudia los efectos adversos y el riesgo probable asociado con partículas <100 nm, ha surgido de la comprensión reconocida de los efectos tóxicos de las partículas metálicas y otras y sus interacciones con las plantas. Quizá la mayor importancia del uso de la NT en la agricultura incluye las aplicaciones específicas para formular nanofertilizantes y nanopesticidas, que permitan aumentar de manera sustentable la productividad de los cultivos, al reducir la contaminación de los agroecosistemas y coadyuven en la protección contra plagas de insectos y enfermedades microbianas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ali, M. A.; Rehman, I.; Iqbal, A.; Din, S.; Rao, A. Q.; Latif, A.; Husnain, T. 2014. Nanotechnology, a new frontier in Agriculture. *Advancements in Life Sciences*. 1: 129-138.
2. Ambrogetti, A. O.; Uliarte, E. M.; Montoya, M. A.; Haist, W.; del Monte, R. F. 2016. Evaluación de un panel para recuperación de deriva en aplicaciones fitosanitarias en viñedos. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. 48(2): 83-94.
3. Amemiya, Y.; Tanaka, T.; Yoza, B.; Matsunaga, T. 2005. Novel detection system for biomolecules using nano-sized bacterial magnetic particles and magnetic force microscopy. *Journal of Biotechnology*. 120: 308-314.
4. A. M-Leonard Company. 2017. Horticultural tool and supply company. Disponible en: <http://www.amleo.com/> (Consultado: Enero. 2017).
5. Burman, U.; Saini, M.; Kumar, P. 2013. Effect of zinc oxide nanoparticles on growth and antioxidant system of chickpea seedlings. *Toxicological and Environmental Chemistry*. 95: 605-612.
6. Cañas, J. E.; Long, M.; Nations, S.; Vadan, R.; Dai, L.; Luo, M.; Olszyk, D. 2008. Effects of functionalized and nonfunctionalized single-walled carbon nanotubes on root elongation of select crop species. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 27: 1922-1931.
7. Capaldi, A. S.; Diniz, S. A.; Moretto, G. R.; Antunes, A. R.; Zezzi, A. M. 2015. Nanoparticles applied to plant science. A review. *Talanta*. 13: 693-705.
8. Chang, Y.; Zhang, M.; Xia, L.; Zhang, J.; Xing, G. 2012. The toxic effects and mechanisms of CuO and ZnO nanoparticles. *Materials*. 5: 2850-2871.
9. Dimkpa, C. O.; McLean, J. E.; David, W.; Britt, D. W.; Anderson, A. J. 2015. Nano CuO and interaction with nano-ZnO or soil bacterium provide evidence for the interference of nanoparticles in metal nutrition of plants. *Ecotoxicology*. 24: 119-129.
10. Ditta, A.; Arshad, M.; Ibrahim, M. 2015. Nanoparticles in sustainable agricultural crop production: Applications and perspectives. In *Nanotechnology and Plant Sciences*. Springer International Publishing. 55-75 p.
11. Dubey, A.; Mailapalli, D. R. 2016. Nanofertilisers, nanopesticides, nanosensors of pest and nanotoxicity in agriculture. In *Sustainable Agriculture Reviews*. Springer International Publishing. 307-330 p.
12. Dudo, A.; Choi, D. H.; Scheufele, W. 2010. Food nanotechnology in the news. Coverage patterns and thematic emphases during the last decade. *Appetite*. 56: 78-89.
13. Eichert, T.; Kurtz, A.; Steiner, U.; 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: 151-160.
14. Fang, T.; Watson, J. L.; Goodman, J.; Dimkpa, C. O.; Martineau, N.; McLean, S. J.; Britt, D. W.; Anderson, A. J. 2013. Does doping with aluminum alter the effects of ZnO nanoparticles on the metabolism of soil pseudomonads? *Microbiological Research*. 168: 91-98.
15. Faunce, T.; Styring, S.; Wasielewski, M. R.; Brudvig, G. W.; Rutherford, A. W.; Johannes M.; Lee, A. F.; Hill, C. L. 2013. Artificial photosynthesis as a frontier technology for energy sustainability. *Energy and Environmental Science*. 6: 1074-1076.
16. Fleischer, A.; O'Neill, M. A.; Ehwald, R. 1999. The pore size of non-graminaceous plant cell walls is rapidly decreased by borate ester cross-linking of the pectic polysaccharide rhamnogalacturonan II. *Plant Physiology*. 121: 829-838.
17. Foltete, A. S.; Masfaraud, J. F.; Bigorgne, E.; Nahmani, J.; Chaurand, P.; Botta, C.; Cotelle, S. 2011. Environmental impact of sunscreen nanomaterials: ecotoxicity and genotoxicity of altered TiO₂ nanocomposites on *Vicia faba*. *Environmental Pollution*. 159: 2515-2522.
18. Fraceto, L. F.; Grillo, R.; De Medeiros, G. A.; Scognamiglio, V.; Rea, G.; Bartolucci, C. 2016. Nanotechnology in agriculture: Which innovation potential does it have? *Frontiers in Environmental Science*. 4: 1-5.

19. García, A.; Espinosa, R.; Delgado, L.; Casals, E.; González, E.; Puentes, V.; Barata, C.; Font, X.; Sánchez, A. 2011. Acute toxicity of cerium oxide, titanium oxide and iron oxide nanoparticles using standardized tests. *Desalination*. 269: 136-141.
20. Goh, P. S.; Ismail, A. F.; Ng, B. C. 2013. Carbon nanotubes for desalination: performance evaluation and current hurdles. *Desalination*. 308: 2-14.
21. Grillo, R.; Pereira, A. E.; Nishisaka, C. S.; de Lima, R.; Oehlke, K.; Greiner, R.; Fraceto, L. F. 2014. Chitosan/tripolyphosphate nanoparticles loaded with paraquat herbicide: an environmentally safer alternative for weed control. *Journal of Hazardous Materials*. 278: 163-171.
22. Grillo, R.; Abhilash, P. C.; Fraceto, L. F. 2016. Nanotechnology applied to bio-encapsulation of pesticides. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 16: 1231-1234.
23. Gruère, G. P. 2012. Implications of nanotechnology growth in food and agriculture in OECD countries. *Food Policy*. 37: 191-198.
24. Huang, C.; Verrillo, F.; Renzone, G. 2011. Response to biotic and oxidative stress in *Arabidopsis thaliana*: analysis of variably phosphorylated proteins. *Journal of proteomics*. 74: 1934-1949.
25. Husen, A.; Siddiqi, K. S. 2014. Carbon and fullerene nanomaterials in plant system. *Journal of Nanobiotechnology*. 12: 1-10.
26. Jeyasubramanian, K.; Thoppey, U. U. G.; Hikku, G. S.; Selvakumar, N.; Subramania, A.; Krishnamoorthy, K. 2016. Enhancement in growth rate and productivity of spinach grown in hydroponics with iron oxide nanoparticles. *RSC Advances*. 6: 15451-15459.
27. Joseph, S.; Aluru, N. R. 2008. Why are carbon nanotubes fast transporters of water? *Nano Letters*. 8: 452-458.
28. Kashyap, P. L.; Xiang, X.; Heiden, P. 2015. Chitosan nanoparticle based delivery systems for sustainable agriculture. *International Journal of Biological Macromolecules*. 77: 36-51.
29. Khodakovskaya, M. V.; de Silva, K.; Nedosekin, D. A.; Dervishi, E.; Biris, A. S.; Shashkov, E. V.; Zharov, V. P. 2011. Complex genetic, photothermal, and photoacoustic analysis of nanoparticle-plant interactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 108: 1028-1033.
30. Kottegoda, N.; Munaweera, I.; Madusanka, N.; Karunaratne, V. 2011. A green slow-release fertilizer composition based on urea-modified hydroxyapatite nanoparticles encapsulated wood. *Current Science (Bangalore)*. 101: 73-78.
31. Krishnaraj, C.; Ji, B. J.; Harper, S. L.; Yun, S. I. 2016. Plant extract-mediated biogenic synthesis of silver, manganese dioxide, silver-doped manganese dioxide nanoparticles and their antibacterial activity against food-and water-borne pathogens. *Bioprocess and Biosystems Engineering*. 1: 1-14.
32. Kyung-Seok, K. S.; Kong, I. C. 2014. Toxic effects of nanoparticles on bioluminescence activity, seed germination, and gene mutation. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 98: 3295-3303.
33. Lei, Z.; Mingyu, S.; Xiao, W.; Chao, L.; Chunxiang, Q.; Liang, C.; Fashui, H. 2008. Antioxidant stress is promoted by nano-anatase in spinach chloroplasts under UV-B radiation. *Biological Trace Element Research*. 121: 69-79.
34. Le Van, N.; Ma, C.; Shang, J.; Rui, Y.; Liu, S.; Xing, B. 2016. Effects of CuO nanoparticles on insecticidal activity and phytotoxicity in conventional and transgenic cotton. *Chemosphere*. 144: 661-670.
35. Lin, D.; Xing, B. 2007. Phytotoxicity of nanoparticles: inhibition of seed germination and root growth. *Environmental Pollution*. 150: 243-250.
36. Liu, Q.; Chen, B.; Wang, Q.; Shi, X.; Xiao, Z.; Lin, J.; Fang, X. 2009. Carbon nanotubes as molecular transporters for walled plant cells. *Nano Letters*. 9: 1007-1010.
37. Liu, Q.; Zhang, X.; Zhao, Y.; Lin, J.; Shu, C.; Wang, C.; Fang, X. 2013. Fullerene-induced increase of glycosyl residue on living plant cell wall. *Environmental Science and Technology*. 47: 7490-7498.
38. Liu, R. Q.; Lal, R. 2015. Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of the Total Environment*. 514: 131-139.

39. Liu, X.; Feng, Z.; Zhang, S.; Zhang, J.; Xiao, Q.; Wang, Y. 2006. Preparation and testing of cementing nano-subnano composites of slow or controlled release of fertilizers. *Scientia Agricultura Sinica*. 39: 1598-1604.
40. Manimaran, M. 2015. A review on nanotechnology and its implications in agriculture and food industry. *Asian Journal of Plant Science and Research*. 5:13-15.
41. Martínez-Fernández, D.; Barroso, D.; Komárek, M. 2016. Root water transport of *Helianthus annuus* L. under iron oxide nanoparticle exposure. *Environmental Science and Pollution Research*. 23: 1732-1741.
42. Mishra, S.; Singh, H. B. 2015. Biosynthesized silver nanoparticles as a nanoweapon against phytopathogens: exploring their scope and potential in agriculture. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 99: 1097-1107.
43. Naderi, M. R.; Shahraki, D. A. 2013. Nanofertilizers and their roles in sustainable agriculture. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. Sci. 5: 2229-2232.
44. Núñez-Ramírez, F.; Grijalva-Contreras, R. L.; Robles-Contreras, F.; Macías-Duarte, R.; Escobosa-García, M. I.; Santillano Cázares, J. 2017. Influencia de la fertirrigación nitrogenada en la concentración de nitratos en el extracto celular de pimiento, el rendimiento y la calidad de tomate de invernadero. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. 49(2): 93-103.
45. Nuruzzaman, M.; Rahman, M. M.; Liu, Y.; Naidu, R. 2016. Nanoencapsulation, nano-guard for pesticides: A new window for safe application. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 64: 1447-1483.
46. Olejnik, M.; Krajnik, B.; Kowalska, D.; Twardowska, M.; Czechowski, N.; Hofmann, E.; Mackowski, S. 2013. Imaging of fluorescence enhancement in photosynthetic complexes coupled to silver nanowires. *Applied Physics Letters*. 102: 083-703.
47. Pandey, A. C.; Sanjay, S. S.; Yadav, R. S. 2010. Application of ZnO nanoparticles in influencing the growth rate of *Cicer arietinum*. *Journal of Experimental Nanoscience*. 5: 488-97.
48. Panpatte, D. G.; Jhala, Y. K.; Shelat, H. N.; Vyas, R. V. 2016. Nanoparticles: The next generation technology for sustainable agriculture. In: *Microbial inoculants in sustainable agricultural productivity*, book. Springer India. 289-300 p.
49. Panwar, J.; Jain, N.; Bhargava, A.; Akhtar, M. S.; Yun, Y. S. 2012. Positive effect of zinc oxide nanoparticles on tomato plants: A step towards developing nano-fertilizers. *International Conference on Environmental Research and Technology (ICERT)*. Malaysia. 8 p.
50. Parker, J. L.; Newstead, S. 2014. Molecular basis of nitrate uptake by the plant nitrate transporter NRT1. 1. *Nature*. 507: 68-72.
51. Peckys, D. B.; Melechko, A. V.; Simpson, M. L.; McKnight, T. E. 2009. Immobilization and release strategies for DNA delivery using carbon nanofiber arrays and self-assembled monolayers. *Nanotechnology*. 20: 1-8.
52. Peng, C.; Duan, D.; Xu, C.; Chen, Y.; Sun, L.; Zhang, H.; Yuan, X.; Zheng, L.; Yang, Y.; Yang, J.; Zhen, X.; Chen, Y.; Shi, J. 2015. Translocation and biotransformation of CuO nanoparticles in rice (*Oryza sativa* L.) plants. *Environmental Pollution*. 197: 99-107.
53. Pérez-de Luque, A.; Rubiales, D. 2009. Nanotechnology for parasitic plant control. *Pest Management Science*. 65: 540-545.
54. Prasad, R.; Kumar, V.; Prasad, K. S. 2014. Nanotechnology in sustainable agriculture: present concerns and future aspects. *African Journal of Biotechnology*. 13: 705-713.
55. Prasad, T. N.; Sudhakar, P.; Sreenivasulu, Y.; Latha, P.; Munaswamy, V.; Reddy, K. R.; Pradeep, T. 2012. Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. *Journal of Plant Nutrition*. 35: 905-927.
56. Rai, M.; Ingle, A. 2012. Role of nanotechnology in agriculture with special reference to management of insect pests. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 94: 287-293.
57. Raliya, R.; Tarafdar, J. C. 2013. ZnO nanoparticle biosynthesis and its effect on phosphorous-mobilizing enzyme secretion and gum contents in cluster bean (*Cyamopsis tetragonoloba* L.). *Agricultural Research*. 2: 48-57.

58. Ramesh, M.; Palanisamy, K.; Babu, K.; Sharma, N. K. 2014. Effects of bulk and nano-titanium dioxide and zinc oxide on physio-morphological changes in *Triticum aestivum* Linn. *Journal of Global Biosciences*. 3: 415-422.
59. Ranjan, S.; Dasgupta, N.; Chakraborty, A. R.; Samuel, S. M.; Ramalingam, C.; Shanker, R.; Kumar, A. 2014. Nanoscience and nanotechnologies in food industries: opportunities and research trends. *Journal of Nanoparticle Research*. 16: 1-23.
60. Raskar, S. V.; Laware, S. L. 2014. Effect of zinc oxide nanoparticles on cytology and seed germination in onion. *International Journal Current Microbiology Applied Science*. 3: 467-473.
61. Razzaq, A.; Ammara, R.; Jhazab, H. M.; Mahmood, T.; Hafeez, A.; Hussain, S. 2016. *Journal of Nanoscience and Technology*. 2(1): 55-58.
62. Rehman, H.; Aziz, T.; Farooq, M.; Wakeel, A.; Rengel, Z. 2012. Zinc nutrition in rice production systems: a review. *Plant and Soil*. 361: 203-226.
63. Rezaei, M.; Abbasi, H. 2014. Foliar application of nanochelate and non-nanochelate of zinc on plant resistance physiological processes in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Iranian Journal of Plant Physiology*. 4: 1137-1144.
64. Rico, C. M.; Peralta-Videa, J. R.; Gardea-Torresdey, J. L. 2015. Chemistry, biochemistry of nanoparticles, and their role in antioxidant defense system in plants. In *Nanotechnology and Plant Sciences*. Springer International Publishing. 1-17.
65. Ruiz, H. A.; Oliverio Sarli, G.; Gonçalves Reynaud Schaefer, C. E.; Filgueira, R. R.; Silva de Souza, F. 2016. La superficie específica de oxisoles y su relación con la retención hídrica. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. 48(2): 95-105.
66. Sabir, S.; Arshad, M.; Chaudhari, S. K. 2014. Zinc oxide nanoparticles for revolutionizing agriculture: Synthesis and applications. *The Scientific World Journal*. 1: 1-8.
67. Scott, N.; Chen, H. 2013. Nanoscale science and engineering for agriculture and food systems. *Industrial Biotechnology*. 9: 17-18.
68. Sedghi, M.; Hadi, M.; Toluie, S. G. 2013. Effect of nano zinc oxide on the germination parameters of soybean seeds under drought stress. *Annals. West. Univ. Timisoara Ser. Biol*. 16: 73-78.
69. Sekhon, B. S. 2014. Nanotechnology in agri-food production: an overview. *Nanotechnology, Science and Applications*. 7: 31-53.
70. Servin, A. D.; White, J. C. 2016. Nanotechnology in Agriculture: Next steps for understanding engineered nanoparticle exposure and risk. *NanoImpact*. 1: 9-12.
71. Sharma, P.; Deepesh, B.; Zaidi, M. G. H.; Pardha, P.; Khanna, P. K.; Sandeep, A. 2012. Silver nanoparticle-mediated enhancement in growth and antioxidant status of *Brassica juncea*. *Applied biochemistry and biotechnology*. 167: 2225-2233.
72. Shyla, K. K.; Natarajan, N. 2014. Customizing zinc oxide, silver and titanium dioxide nanoparticles for enhancing groundnut seed quality. *Indian Journal of Science and Technology*. 7: 1376-1381.
73. Siddiqui, H. M.; Al-Whaibi, H.; M.; Mohammad, F. 2015. Nanotechnology and plant sciences. Nanoparticles and their impact on plants. Springer International Publishing Switzerland. 305 p.
74. Singh, A.; Singh, N. B.; Hussain, I.; Singh, H.; Singh, S. C. 2015. Plant-nanoparticle interaction: an approach to improve agricultural practices and plant productivity. *International Journal of Pharmaceutical Science Invention*. 4: 25-40.
75. Song, G.; Gao, Y.; Wu, H.; Hou, W.; Zhang, C.; Ma, H. 2012. Physiological effect of anatase TiO₂ nanoparticles on *Lemna minor*. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 31: 2147-2152.
76. Tarafdar, J. C.; Raliya, R.; Mahawar, H.; Rathore, I. 2014. Development of zinc nanofertilizer to enhance crop production in pearl millet (*Pennisetum americanum*). *Agricultural Research*. 3: 257-262.
77. Vanderroost, M.; Ragaert, P.; Devlieghere, F.; De Meulenaer, B. 2014. Intelligent food packaging: the next generation. *Trends in Food Science and Technology*. 39: 47-62.

78. Villagarcía, H.; Dervishi, E.; de Silva, K.; Biris, A. S.; Khodakovskaya, M. V. 2012. Surface chemistry of carbon nanotubes impacts the growth and expression of water channel protein in tomato plants. *Small*. 8: 2328-2334.
79. Vimala, V.; Clarke, S. K.; Urvinder Kaur, S. 2016. Pesticides detection using acetylcholinesterase nanobiosensor. *Biosens Journal*. 5: 1-4.
80. Wang, S.; Liu, H.; Zhang, Y.; Xin, H. 2015. Effect of CuO nanoparticles on reactive oxygen species and cell cycle gene expression in roots of rice. *Environmental Toxicological Chemistry*. 34: 554-561.
81. Xue, J.; Luo, Z.; Li, P.; Ding, Y.; Cui, Y.; Wu, Q. 2014. A residue-free green synergistic antifungal nanotechnology for pesticide thiram by ZnO nanoparticles. *Scientific Reports*. 4: 1-9.
82. Yadollahi, A.; Arzani, K.; Khoshghalb, H. 2009. The role of nanotechnology in horticultural crops postharvest management. In *Southeast Asia Symposium on quality and safety of fresh and fresh-cut produce* 875. 49-56 p.
83. Yin, Y.; Guo, Q.; Han, Y.; Wang, L.; Wan, S. 2012. Preparation, characterization and nematicidal activity of lansiumamide B nano-capsules. *Journal of Integrative Agriculture*. 11: 1151-1158.
84. Zhang, D.; Hua, T.; Xiao, F.; Chen, C.; Gersberg, M. R.; Liu, Y.; Stuckey, D.; Ng, J. W.; Tan, K. S. 2015. Phytotoxicity and bioaccumulation of ZnO nanoparticles in *Schoenoplectus tabernaemontani*. *Chemosphere*. 20: 211-219.
85. Zhao, L.; Sun, Y.; Hernandez, V. J.; Servin, A. D.; Hong, J.; Niu, G.; Peralta, V. J.; Duarte, G. M.; Gardea, T. J. 2014. Influence of CeO₂ and ZnO nanoparticles on cucumber physiological markers and bioaccumulation of Ce and Zn: A Life Cycle Study. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 61: 11945-11951.
86. Zhu, H.; Han, J.; Xiao, J. Q.; Jin, Y. 2008. Uptake, translocation, and accumulation of manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants. *Journal Environmental Monitoring*. 10: 685-784.