

Nanopartículas de silicio como vehículos de transporte para moléculas de interés agrícola[◇]

Silicon nanoparticles as bio-carriers for molecules of agricultural interest

Eduardo Alberto Tejeda Villagómez,* Luis Hernández-Adame,**[†]
Francisco Nieto Navarro,* Mónica Anzaldo Montoya***

ABSTRACT: Silicon nanoparticles (SiNPs) have intrinsic properties that confer biocompatibility, high chemical-thermal stability, and a large surface area. This last allows it to anchor many molecules to its surface, in which nucleotides, proteins, and a diversity of chemical compounds with potential use in agriculture have been included. In this sense, this work describes fundamental aspects of SiNPs and presents a compilation of the latest works related to the use of SiNPs in agriculture. Finally, an overview of the status and the scientific resources related to nanotechnological innovation focused on the agricultural sector in Mexico is placed into perspective.

KEYWORDS: nanoparticles, silicon, agronanotechnology, biocarriers.

RESUMEN: Las nanopartículas de silicio (SiNPs) tienen características intrínsecas que le confieren biocompatibilidad, alta estabilidad química-térmica y amplia área superficial. Esta última cualidad le permite anclar una gran cantidad de moléculas en su superficie, en las cuales se han incluido nucleótidos, proteínas y una diversidad de compuestos químicos con potencial uso en la agricultura. En este contexto, este trabajo describe brevemente aspectos fundamentales sobre las SiNPs, además de presentar una compilación de los últimos trabajos relacionados con el uso de SiNPs y su efecto en diferentes cultivos. Finalmente, se pone en perspectiva un análisis del panorama actual y las capacidades científicas relacionadas con la innovación nanotecnológica enfocadas al sector agrícola del país.

PALABRAS CLAVE: nanopartículas, silicio, agronanotecnología, bioacarreadores.

Introducción

El silicio (Si) es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre y es un componente normal en las plantas que varía del 0.1 a 10.0%. Su principal función involucra el fortalecimiento de las paredes celulares, además de reducir la acumulación de metales en las plantas (Aryadeep, 2020). Según el nivel de Si, las especies de plantas se clasifican en tres grupos: 1) acumulado-

Recibido: 21 de febrero, 2022. Aceptado: 9 de agosto 2022. Publicado: 13 de octubre, 2022.

[◇] Agradecimientos: Luis Hernández Adame agradece al proyecto Conacyt 316934. Mónica Anzaldo Montoya reconoce al Proyecto Ciencia de Frontera Conacyt No. 304320.

* Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de La Paz. La Paz, BCS, México.

** Conacyt-Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR). Instituto Politécnico Nacional. La Paz, BCS 23090, México.

*** Conacyt-El Colegio de San Luis A. C., San Luis Potosí, SLP, México.

[†] Autor de correspondencia: ladame@cibnor.mx



ras de Si (mayor al 1.0%); 2) tipos intermedios (entre 0.5 y 1.0%), y, 3) excluidoras de Si (inferior al 0.5%). Tal diferencia en su contenido y biodistribución se atribuye principalmente a los mecanismos de absorción que involucran respuestas genotípicas reguladas a través de transportadores propios de cada tipo de planta (Asgari *et al.*, 2018).

Aun a pesar de que el Si es considerado un elemento no esencial para el crecimiento de las plantas, estudios relacionados con su administración y biodistribución han reportado notables efectos benéficos en hortalizas, cereales y frutos; observando que, por ejemplo, el tomate (*Solanum lycopersicum*) sea considerado un fruto excluidor de Si debido a que absorbe menos del 0.5%. Además, al parecer, la absorción de Si por este cultivo mejora las concentraciones de calcio en hojas y frutos, reduce la aparición de podredumbre de extremo de la flor, altera el metabolismo de las hojas expuestas a estrés salino, aumenta el número total de frutas y la productividad (Cao *et al.*, 2015). En cuanto a plagas y enfermedades, la aplicación de Si reduce en aproximadamente un 50% el número de lesiones causadas por *Frankliniella schultzei* y en un 56.2% la incidencia de *Ralstonia solanacearum* (Dannon y Wydra, 2004; Stamatakis *et al.*, 2003). En arroz (*Oryza sativa*) las concentraciones de Si van generalmente de 0.1-0.6 milimoles (mM). Su absorción se lleva a cabo vía radicular mediante las raíces laterales y su traslocación ayuda a la planta a mantener sus hojas firmes, minimizar la transpiración e incrementar la resistencia de la planta contra enfermedades fúngicas y plagas de insectos (Guntamukkala y Pusarla, 2017). Con la avena (*Avena sativa*) se ha observado que el Si ayuda a estimular el crecimiento del cultivo y su productividad al aumentar la disponibilidad de diferentes elementos como el P, Ca, K, etc. (Borda *et al.*, 2007). Asimismo, se ha demostrado que el Si puede ayudar a reducir el estrés salino de plantas herbáceas como el clavel (*Dianthus caryophyllus*) (Soundararajan *et al.*, 2015), así como aumentar la resistencia a plagas en plantas de maíz para evitar la muerte de los cultivos por *Rhopalosiphum maidis* (Moraes *et al.*, 2005).

En relación con las rutas de administración, el Si es dispuesto en las plantas mediante métodos de pulverización vía foliar o por vía radicular en fertirrigación. Sin embargo, con ayuda de la nanotecnología, hoy en día se está estudiando el uso de nanopartículas¹ (NPs) como un novedoso método de administración (Angulo *et al.*, 2021). Esta técnica consiste en utilizar NPs en polvo o en solución, con el objetivo de eficientizar la administración de nutrientes, reducir el uso excesivo de agroquímicos y conservar la integridad de los ecosistemas en la producción agrícola. Es en este sentido que las nanopartículas de silicio (SiNPs) han ganado especial interés. Su integración multifuncional al sector agrícola ha permitido utilizarlas de manera eficaz para realzar la entrega específica de biomoléculas en las plantas, como nutriente,

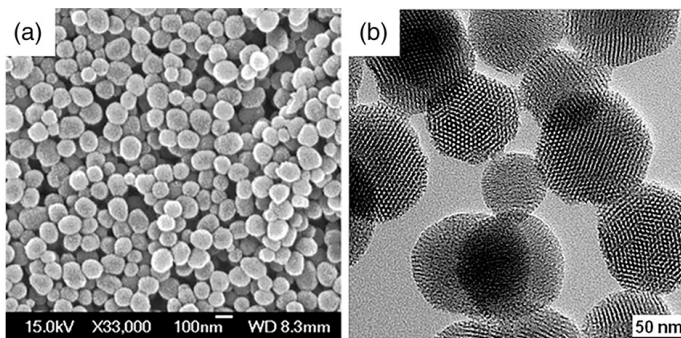
¹ Las nanopartículas son partículas muy pequeñas con tamaños en el orden de 1 a 100 nanómetros (nm), en donde, un nanómetro equivale a la milmillonésima parte de un metro (10⁻⁹ m).

bioestimulante y agente de control hídrico (Siddiqui y Al-Whaibi, 2014), entre otras aplicaciones. Debido a que los reportes de su uso se han incrementado notablemente, una revisión sistemática y actualizada de esta información podrá permitirnos analizar los alcances, riesgos y beneficios a corto y mediano plazo del uso de SiNPs en el sector agrícola. En este contexto, este trabajo pretende establecer un estudio selectivo que logre integrar la información en la frontera del conocimiento sobre el uso de SiNPs en la agricultura. Se describirán brevemente aspectos fundamentales de las SiNPs, destacando su uso como acarreadores de moléculas activas y su potencial beneficio en plantas de interés agrícola. Del mismo modo, se plantea una breve discusión del panorama actual y las capacidades científicas relacionadas con la innovación nanotecnológica enfocadas al sector agropecuario del país.

Nanopartículas de silicio (SiNPs)

Una nanopartícula es una partícula extremadamente pequeña, en la cual, al menos una de sus dimensiones se encuentra en la nanoescala² (Angel-Olarte *et al.*, 2019). Las SiNPs son nanomateriales con interesantes propiedades ópticas, biocompatibles, con gran área superficial y alta capacidad para poder transportar y liberar sustancias de forma biológicamente activa. Las SiNPs pueden clasificarse de acuerdo con su tamaño y forma (simétrica y asimétrica) pero, además, en el caso de las porosas, también lo hacen dependiendo del tamaño de poro, esto es: en microporosa (poros menores de 2 nm); mesoporosa (poros de 2 a 50 nm), y, macroporosa (poros mayores a 50 nm) (Asgari *et al.*, 2018). Un par de micrografías que muestran SiNPs de forma esférica se presentan en la figura 1.

Figura 1. Micrografías de nanopartículas de silicio (SiNPs): a) imagen a baja magnificación que muestra SiNPs de forma esférica y tamaños homogéneos; b) micrografía a alta magnificación en donde es posible observar el poro de SiNPs mesoporosas y su estructura.



Fuente: Imágenes tomadas con permiso de Li, Z. *et al.* (2021).

² La nanoescala es una región que comprende de 1 a 100 nm.

Al igual que con la mayoría de los sistemas de nanopartículas, las características físicas tales como la forma de la partícula, su tamaño y energía superficial son factores que afectan la interacción NPs-planta. Estas interacciones pueden inducir respuestas positivas o negativas en diferentes cultivos. Habiéndose observado, por ejemplo, en plantas de algodón, que SiNPs mesoporosas con un tamaño de 30 nm y forma esférica inducen efectos tóxicos en la germinación de la planta (Le *et al.*, 2014); mientras que, en plantas de tomate, estas mismas NPs pero con 12 nm de diámetro inducen un incremento en la germinación de su semilla (Siddiqui y Al-Whaibi, 2014).

Métodos de síntesis de SiNPs más utilizados

Las SiNPs son producidas principalmente por métodos de síntesis química. Algunas de estas rutas se describen a continuación:

Síntesis de SiNPs por ataque electroquímico

Probablemente la mejor técnica para generar nanopartículas de Si estables y pasivadas con hidrógeno (H) sea mediante el grabado electroquímico. Este consiste en el grabado de una oblea de Si seguido de la separación de partículas mediante fracturación ultrasónica. Este método produce una suspensión coloidal de partículas porosas en disolventes orgánicos, como por ejemplo el ácido fluorhídrico (HF). Químicamente, esta técnica de grabado es un proceso interfacial que involucra una transferencia de dos electrones a través de una reacción electroquímica en HF. La especie de Si divalente formada en la superficie de la oblea, se oxida a iones de Si tetravalente para formar ácido hexafluorosilícico (SiF_6) a través de una reacción redox. La pasivación de H resultante de la superficie es muy útil, ya que minimiza la contaminación por óxido de silicio (SiO_2) y otras impurezas. A diferencia de la preparación en fase gaseosa de partículas coloidales, la técnica de grabado electroquímico es más conveniente, ya que se puede modular de manera adecuada el tamaño de poro y grado de porosidad en las NPs, además de que el proceso puede comenzar utilizando obleas de Si de grado semiconductor de alta pureza que son comúnmente utilizadas en la electrónica para la fabricación de microchips o circuitos integrados (Kang *et al.*, 2011).

Síntesis de SiNPs utilizando residuos orgánicos

Se han reportado otras formas de sintetizar SiNPs utilizando el bagazo de remolacha o cáscara de arroz. Para la síntesis utilizando bagazo, el proceso consiste en calcinar el bagazo de remolacha a 500 °C durante 12 horas, tras lo cual, la ceniza se somete a hidrólisis ácida con ácido clorhídrico y ácido nítrico a 35 °C durante un par de horas, para, posteriormente, secarlo en un horno. La alcalinización ulterior del extracto acuoso se hace por 12 hr con hidróxido de sodio concentrado, seguida de la neutralización del ácido y filtración, la cual, finalmente, separará la solución de nanopartículas de las fibras (San *et al.*, 2014).

Otro método para sintetizar SiNPs es mediante el uso de la cáscara de arroz, que contiene un 60% de sílice. Este método consiste en hervir la cáscara de arroz en HCl durante dos horas para lavarla después con agua desionizada, se seca a 100 °C durante 24 hr y luego se piroliza a 700 °C durante 2 hr más. Las NPs formadas en este proceso se someten a ultrasonido por 1 hora en una solución de nitrato de potasio. La solución se filtra y se seca a 105 °C durante 4 hr. La muestra filtrada ya seca se piroliza de nuevo a 800 °C durante 4 hr, lo que da como resultado una nanopartícula de sílice porosa semicristalina (Wang *et al.*, 2012).

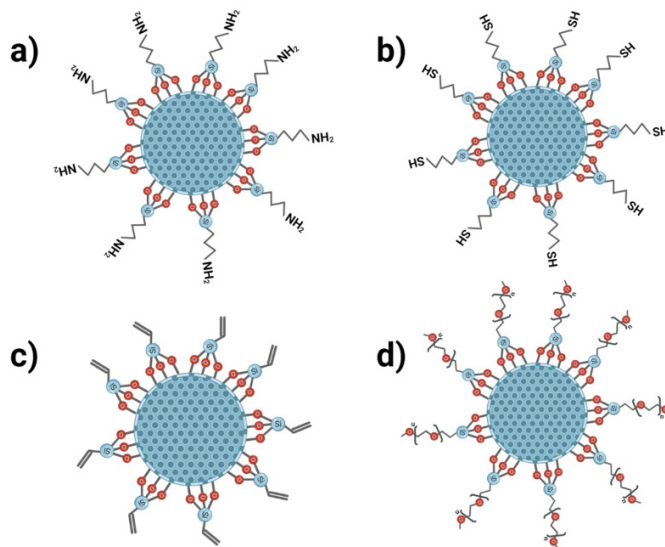
Estrategias de funcionalización

La funcionalización de una NP consiste en recubrir su superficie con una molécula orgánica o compuesto polimérico con el fin de conferirle estabilidad, solubilidad, y, en algunos casos, la capacidad para anclar compuestos y/o moléculas de interés químico o biológico sobre la misma NP (Hernández-Adame *et al.*, 2019). En el caso de las SiNPs, estas poseen en su superficie una gran cantidad de grupos silanol (Si-OH) y Si-Si que pueden ser manipulados químicamente. Este hecho ha permitido que las SiNPs sean funcionalizadas con una gran cantidad de compuestos como el 1-butilamina, 1-penteno, ácidos carboxílicos, grupos tiol, etc. (Sweryda-Krawiec *et al.*, 1999). Esta estrategia se lleva a cabo para incrementar las propiedades intrínsecas de las SiNPs. Las rutas más utilizadas son métodos químicos de funcionalización llevados a cabo por reacciones redox durante la síntesis en fase líquida utilizando compuestos de Si molecular a través de enlaces Si-C o Si-N. Por ejemplo, la aminización de partículas se logra mediante un enlace Si-N. El penteno reacciona con nanopartículas de Si a través de un enlace Si-C. Los grupos carboxílicos se forman en la superficie de pequeñas nanopartículas de Si pasivadas con H a través de la reacción con derivados de ácidos orgánicos por medio de un enlace Si-C (Kang *et al.*, 2011). Un diagrama esquemático que representa algunas de las rutas de funcionalización del SiNPs se muestra en la figura 2. Aquí, se observan los grupos funcionales expuestos sobre la superficie al utilizar (3-Aminopropyl) triethoxysilane (APTES), Vinyltriethoxysilane (VTES), (3-mercaptopropyl) trimethoxysilane (MPTMS) y Metoxi-PEG-Silano como ligandos o moléculas conectoras.

Aplicación e interacción de SiNPs en plantas

Las SiNPs han sido aplicadas normalmente a los cultivos mediante diferentes modos: 1) en modo hidropónico: aquí las SiNPs se agregan en polvo a la solución nutritiva utilizando concentraciones apropiadas y la absorción es mediada por las raíces de las plantas sumergidas en la solución nutritiva; 2) método de suplementación directa del suelo con SiNPs: el éxito de la técnica depende aquí de ciertas características con las que cuenta el suelo, las cuales incluyen la textura, pH, el contenido de sal y la duración de la liberación de agroquímicos

Figura 2. Diagrama esquemático que representa las estrategias de funcionalización en SiNPs utilizando: a) (3-Aminopropyl) triethoxysilane (APTES); b) (3-mercaptopropyl) trimethoxysilane (MPTMS); c) Vinyltriethoxysilane (VTES), y, d) Metoxi-PEG-Silano.



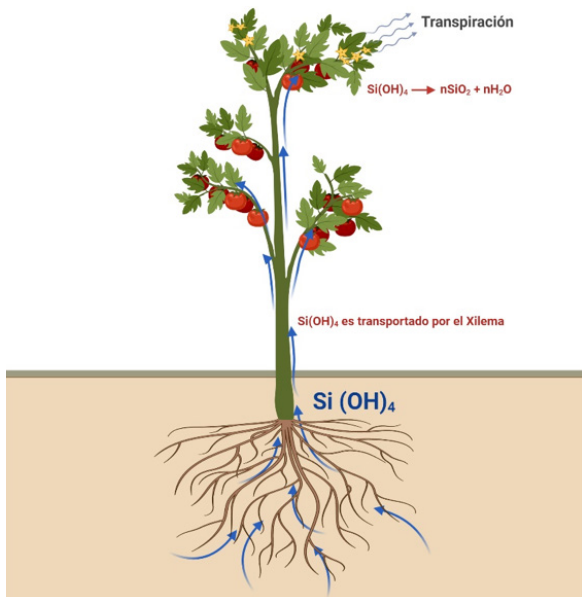
Fuente: Elaboración de los autores.

por las NPs; 3) aplicación foliar: este método constituye otra ruta en la cual las SiNPs se rocían en solución sobre la superficie de las hojas y la absorción se produce por las estomas o las células epidérmicas de las hojas. Cabe mencionar que los factores que rigen la absorción, translocación y acumulación de las SiNPs incluyen el tipo de especie vegetal, edad y entorno de crecimiento. Además, el tamaño y la forma de las SiNPs son un factor importante, al deber ser este menor al diámetro de los poros de la pared celular (5-20 nm) para una correcta absorción por la planta y evitar que puedan quedar atrapadas en los mismos (Aryadeep, 2020). Un esquema representativo del proceso de absorción, distribución y eliminación del Si en las plantas se presenta en la figura 3.

Referente al mecanismo de absorción de Si por las plantas, este incluye varias etapas. En la primera, el Si es tomado del suelo por las raíces de las plantas y se absorbe en forma de ácido monosilícico ($\text{Si}(\text{OH})_4$). Posteriormente, se transporta por la xilema mediante los transportadores LSi1, LSi2 y LSi6 para ser depositado en la pared epidérmica y el tejido vascular del tallo, la hoja y la vaina de las plantas. Se ha reportado que tanto LSi1 como LSi2 están localizados en la exodermis y endodermis, pero LSi1 está en el lado distal y Lsi2 está en el lado proximal (figura 4) (Rastogi *et al.*, 2019).

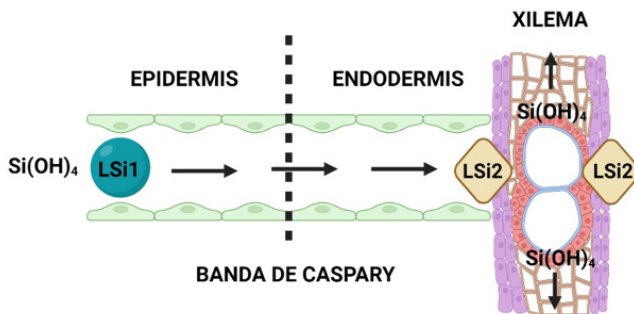
Después de la captación y transporte a los brotes de la planta, el Si se concentra y polimeriza en gel de sílice coloidal ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) principalmente debido al proceso de transpiración (Mandlik *et al.*, 2020). Sin embargo, si la acumulación de Si es elevada, esta comienza a degradar la calidad de los cultivos

Figura 3. Representación esquemática del proceso de absorción, distribución y eliminación del Si en plantas.



Fuente: Elaboración de los autores.

Figura 4. Representación esquemática de la absorción de silicio en plantas.



Fuente: Imagen modificada de Mitani (2005).

disminuyendo la tasa de germinación de las semillas, la biomasa fresca y seca, así como la longitud de raíces y brotes. Estos hechos alteran el proceso de fotosíntesis, reducen la tasa de transpiración, pierden la regulación ascendente y descendente de varios genes relacionados con el estrés, inducen daño del ADN y, por último, la apoptosis de las plantas (Mandlik *et al.*, 2020). Referente al proceso de eliminación, se ha reportado que las SiNPs son eliminadas mediante el proceso de transpiración natural de la planta (Siddiqui *et al.*, 2020).

SiNPs como acarreadores de compuestos activos de interés agrícola

La absorción e impacto positivo, como potencialmente negativo de varias NPs en el crecimiento, desarrollo y proceso bioquímico de las plantas varían de manera diversa entre las distintas especies de estas. Sin embargo, el uso de SiNPs proporciona una nueva perspectiva sobre el uso seguro de esta nueva tecnología para mejorar la variedad y el rendimiento de los cultivos. Las SiNPs son biocompatibles y biodegradables, poseen estructuras químicas que les permiten obtener alta estabilidad térmica y mecánica, además de excelentes propiedades ópticas. En el caso de las SiNPs porosas, tienen, asimismo, capacidad para modular adecuadamente el tamaño de poro, lo cual permite incrementar exponencialmente el área superficial para poder anclar moléculas de interés químico o biológico. Estas cualidades hacen que las SiNPs sean superiores a otros sistemas de NPs para administrar compuestos químicos activos, genes y pesticidas contra fitopatógenos en cultivos agrícolas (Rastogi *et al.*, 2019).

Las SiNPs son el vector más utilizado para entregar material genético dentro de células vegetales (Karupannan *et al.*, 2020). Estos nanomateriales presentan muchas ventajas en comparación con los métodos convencionales de administración de genes, los cuales incluyen una mayor integridad del ADN transferido, disminución de daño celular, amplio rango de uso en especies de plantas y baja toxicidad, debido a lo cual, las nanopartículas diseñadas proporcionan un nuevo vehículo para la transferencia de ácidos nucleicos y proteínas dentro de las células vegetales (Gad *et al.*, 2020). En este sentido, la tabla 1 muestra como antecedentes una compilación del uso de SiNPs como bioacarreadores de proteínas y nucleótidos administrados en sistemas vegetales.

Tabla 1. Uso de SiNPs como vehículo de transporte para proteínas y nucleótidos.

Nanopartícula	Tamaño de NP (nm)	Tamaño de poro (nm)	Tipo de proteína o nucleótido	Resultados más sobresalientes	Cita
SiNPs Mesoporosa	100	2.3	DNA	Demostró que las SiNPs pueden funcionar como agentes de suministro de DNA para células vegetales.	Torney <i>et al.</i> (2007).
SiNPs Mesoporosa	100	50	siRNA y DNA	Permitió la entrega segura de construcciones de siRNA y DNA.	Xia <i>et al.</i> (2009).
SiNPs Mesoporosa	600	10	Proteína Cre	Exploró la entrega directa de proteína Cre a células vegetales utilizando SiNPs mesoporosas.	Martin-Ortigosa <i>et al.</i> (2014).

Fuente: Elaboración de los autores.

Hoy en día, las SiNPs están siendo ampliamente utilizadas como bioacarreadores de compuestos químicos, tales como pesticidas y herbicidas, de los cuales, los resultados más prometedores están enfocados en el desarrollo de pesticidas, al conferir resistencia a plagas de insectos y hongos sin afectar el crecimiento de la planta y sin tener efectos tóxicos que puedan afectar la salud del consumidor. En este sentido, una compilación reciente del uso de SiNPs como bioacarreador de compuestos químicos se muestra en la tabla 2, donde se describe el tamaño de partícula, el de poro, el compuesto químico de interés, el cultivo blanco y los resultados más sobresalientes.

Tabla 2. Uso de SiNPs como vehículos de transporte para compuestos químicos usados en agricultura.

SiNPs	Tamaño de NP (nm)	Tamaño de poro (nm)	Compuesto químico anclado	Planta o cultivo	Aplicación	Resultados más sobresalientes	Cita
Mesoporosa	110	3.7	Piraclostrobina	<i>Asparagus officinalis</i>	Pesticida	Aumentó su resistencia contra <i>Phomopsis asparagi</i> .	Cao et al. (2016).
Mesoporosa	410	4	Piraclostrobina	<i>Asparagus officinalis</i>	Pesticida	Aumentó su resistencia contra <i>Phomopsis asparagi</i> .	Cao et al. (2016).
Mesoporosa	200	20	Procloraz	<i>Cucumis sativus</i>	Pesticida	Aumentó su actividad fungicida en plantas de pepino.	Zhao et al. (2018a).
Mesoporosa	140	2.74	Azoxistrobina	<i>Oryza sativa</i>	Pesticida	Aumentó su actividad fungicida contra <i>Pyricularia oryzae</i> .	Xu et al. (2020).
Mesoporosa	222	3.2	Azoxistrobina	<i>Solanum lycopersicum</i>	Pesticida	Aumentó su actividad fungicida contra <i>Phytophthora infestans</i> en plantas de tomate.	Xu et al. (2018).
Mesoporosa	70.89	20	Procloraz	<i>Oryza sativa</i>	Pesticida	Aumentó su actividad fungicida contra <i>Magnaporthe oryzae</i> en plantas de arroz.	Abdelrahman et al. (2021).
Mesoporosa	190.1	1.81	Abamectina	<i>Oryza sativa</i>	Pesticida	Aumentó su resistencia contra <i>Cnaphalocrocis medinalis</i> en plantas de arroz.	Gao et al. (2019).
Mesoporosa	200	2.9	Geranodil	Sin datos	Pesticida	Funcionó como un excelente nanoportador de pesticidas.	Plohl, Gyergyek y Zemljčić (2021).
Mesoporosa	142	2	Diquat	<i>Datura stramonium</i>	Herbicida	Mostró una actividad herbicida excelente contra <i>Datura stramonium</i> .	Shan et al. (2019).
Mesoporosa	170	5	Tiametoxam	<i>Oryza sativa</i>	Pesticida	Aumentó su resistencia contra <i>Nilaparvata lugens</i> .	Gao et al. (2020b).
Mesoporosa	200	20	Pirimetanil	<i>Cucumis sativus</i>	Pesticida	Aumentó su actividad fungicida.	Zhao et al. (2017).
Mesoporosa	258.1	5	Fenoxanil	<i>Oryza sativa</i>	Pesticida	Aumentó su actividad de pesticida en plantas de arroz.	Zhu et al. (2018).
Mesoporosa	15,100,200	3	Piraoxistrobina	<i>Cucumis sativus</i>	Pesticida	Demostró la importancia del tamaño de la nanopartícula para la entrega de pesticidas en plantas de pepino.	Xu et al. (2021).

Continúa ►

Tabla 2. Uso de SiNPs como vehículos de transporte para compuestos químicos usados en agricultura. (Continuación)

SiNPs	Tamaño de NP (nm)	Tamaño de poro (nm)	Compuesto químico anclado	Planta o cultivo	Aplicación	Resultados más sobresalientes	Cita
Mesoporosa	423	2.54	Trimetilamina	Sin datos	Pesticida	Mostró buena bioactividad en la planta sin efectos adversos sobre su crecimiento.	Cao <i>et al.</i> (2017).
Mesoporosa	200	9.97	Abamectina	<i>Brassica oleracea</i>	Pesticida	Aumentó su actividad contra <i>Plutella xylostella</i> .	Feng <i>et al.</i> (2021).
Mesoporosa	200	5	Espirotetramato	<i>Cucumis sativus</i>	Pesticida	Reguló satisfactoriamente la dosificación y efecto del pesticida en plantas de pepino.	Zhao <i>et al.</i> (2018b).
Mesoporosa	100	3.78	Clorpirifós	Sin datos	Pesticida	Comprobó el efecto del ion de cobre para la mayor absorción del pesticida.	Chen <i>et al.</i> (2016).
Mesoporosa	178	2.5	Indoxacarb	<i>Brassica oleracea</i>	Pesticida	Aumentó su resistencia contra <i>Plutella xylostella</i> .	Bilal <i>et al.</i> (2020).
Mesoporosa	701	3.4	Metil eugenol	Sin datos	Pesticida	Aumentó su resistencia contra <i>Bactrocera dorsalis</i> .	Chen <i>et al.</i> (2020).
Mesoporosa	139	2.7	Protiocanazol	<i>Triticum aestivum</i>	Pesticida	Aumentó su actividad fungicida en las plantas de trigo.	Chunli <i>et al.</i> (2020).
Mesoporosa	260	7.61	Abamectina	Sin datos	Pesticida	Demostró excelentes propiedades toxicológicas contra <i>Plutella xylostella</i> .	Feng <i>et al.</i> (2020).
Mesoporosa	65	2.3	Procloraz	<i>Brassica napus</i>	Pesticida	Ofreció protección contra <i>Sclerotinia sclerotiorum</i> .	Gao <i>et al.</i> (2020a).
Mesoporosa	891.7	75	Tiametoxam	<i>Prunus persica</i>	Pesticida	Aumentó su resistencia contra <i>Myzus persicae</i> .	Li <i>et al.</i> (2021).
Mesoporosa	177	2.897	Avermectina	Sin datos	Pesticida	Aumentó su capacidad de absorción y descarga del pesticida.	Shen <i>et al.</i> (2019).
Mesoporosa	35	6	Quitosano	<i>Citrullus lanatus</i>	Pesticida	Aumentó su resistencia contra <i>Fusarium oxysporum</i> .	Buchman <i>et al.</i> (2019).

Fuente: Elaboración de los autores.

Panorama actual de la producción científica relacionada con la nanotecnología agrícola en México

Es pertinente hacer un breve análisis de la producción científica en el país, relacionada con la agronanotecnología. Esto con la finalidad de señalar su importancia y la relevancia de continuar fortaleciendo el desarrollo de esta línea de investigación en México.

Desde inicios del presente siglo, la política nacional de ciencia, tecnología e innovación considera las nanotecnologías como un área estratégica para el desarrollo de innovaciones, así como también, el soporte fundamental que permite el avance de otras disciplinas científicas. A lo largo del país, existen grupos académicos y centros de investigación con capacidades científicas destacadas na-

cional e internacionalmente. Algunos de estos grupos e instituciones, como es el caso del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR) o el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), al noroeste y centro de México, han logrado la creación de programas de posgrado que ofrecen la especialidad en agronotecnología o temas afines, haciendo que poco a poco comience a consolidarse como un tema relevante y línea de investigación estratégica.

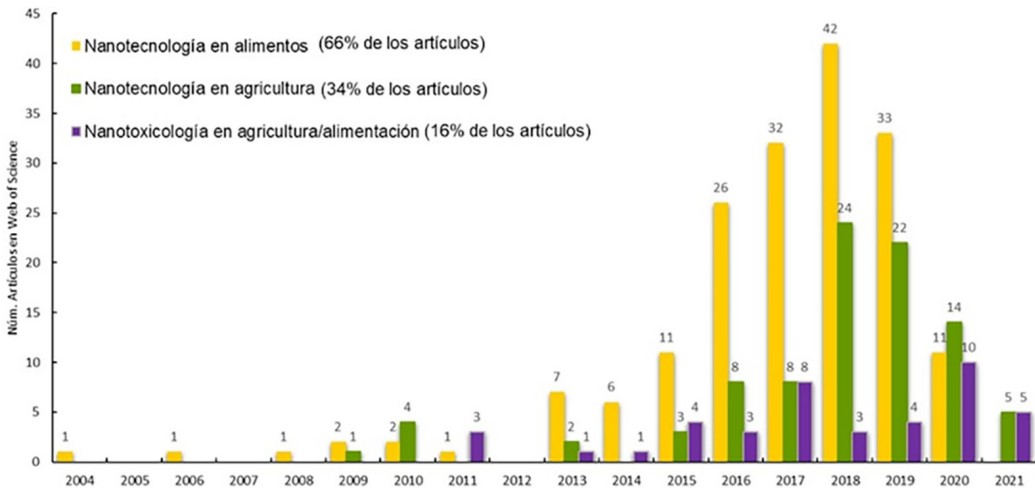
En cuanto a la producción científica en la región latinoamericana y que tiene relación con los diferentes temas de las nanotecnologías, México es uno de los países que más aporta al conocimiento en este campo. Para darnos una idea, entre 2004 y 2021, México publicó un promedio de 900 artículos al año (StatNano, 2022), siendo que, solo en 2020 se publicaron casi dos mil artículos entre todos los países de la región (StatNano, 2022). Dada la diversidad de sectores económicos en los que la nanotecnología puede ser utilizada, es importante conocer y considerar las capacidades científicas instaladas en nuestro país, la infraestructura disponible y el tipo de temas de investigación que se abordan en cada centro o región, esto con el fin de tener elementos para planear estrategias y rutas de desarrollo regional y nacional. En el caso de la nanotecnología aplicada a la agricultura y a la alimentación, son muy escasos los trabajos que tratan estos aspectos en el país (Hernández y Anzaldo, 2020), es por ello que, sin pretender profundizar en estos aspectos, en seguida se presenta un panorama de la producción científica en nanotecnología agrícola y alimentaria en México.

La figura 5 muestra el número de artículos científicos relacionados con nanotecnología agrícola y alimentaria publicados por autores con adscripción en alguna institución académica en México. La fuente es Web of Science y la información corresponde al periodo de 2004 a 2021. La metodología utilizada para recuperar las publicaciones también arrojó trabajos en nanotoxicología, esto es, el análisis de la bioseguridad y los efectos de los nanomateriales en la salud humana, otros seres vivos y el ambiente. Como puede verse, durante el periodo se publicaron un total de 267 artículos, de estos, el 66% corresponde a investigaciones en alimentos, 34% en agricultura y el 16% en nanotoxicología. Además, se observa que la producción científica en estos temas tuvo una tendencia creciente de 2005 a 2018, año en que comenzó a descender. En la gráfica, resulta importante señalar que, aparentemente, existe un mayor interés por las aplicaciones en el sector de alimentos que en el agrícola. De ahí, que sea significativo intensificar los trabajos de difusión que destaquen el potencial de la agronotecnología para atender los problemas actuales de los sistemas agroalimentarios.

El número de trabajos en nanotoxicología es bajo, no obstante, resulta uno de los temas de mayor relevancia, pues esto significa que se están generando capacidades básicas para evaluar potenciales riesgos de los nanomateriales, lo cual es imprescindible para apoyar la toma de decisiones de los reguladores en políticas públicas. Asimismo, es fundamental señalar que el escaso apoyo a la investigación relacionada con riesgos a la salud humana y ambiental es un mal común de las políticas de CyT de muchos gobiernos, al ser estos, por lo general, más propensos a destinar recursos a la investigación básica, al desa-

rollo de aplicaciones, e infraestructura, que a la evaluación de potenciales peligros de una tecnología que está en el laboratorio. De la misma manera, el análisis de las implicaciones sociales, económicas y legales continúa siendo poco valorado. A modo de ejemplo, solo el 3% del presupuesto del programa de investigación de la National Nanotechnology Initiative de 2021 correspondió a seguridad para la salud y ambiente.³

Figura 5. Producción científica relacionada con la nanotecnología en agricultura, alimentación y nanotoxicología en México, 2004-2021.



Fuente: Elaboración de los autores con datos de Web of Science.

El debate sobre los riesgos a la salud humana y al ambiente de las nanotecnologías tiene su antecedente principal en el reporte de la Royal Society y la Royal Academy of Engineering (RS&RAE) titulado “Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties”, publicado en 2004. Este reporte representó el consenso académico acerca de la necesidad de evaluar los riesgos de los nanomateriales dadas sus características singulares; la incertidumbre y más aún la ignorancia de lo que no se sabe, enfatizaron la importancia de generar conocimientos sobre la toxicidad de los nanomateriales, con la finalidad de que las expectativas de esta tecnología se acompañaran de elementos precautorios que mantuvieran la confianza de los actores interesados en su desarrollo, en gobiernos y consumidores, y fue la piedra de toque para que los gobiernos comenzaran a desarrollar instrumentos regulatorios. A partir de entonces, la actividad investigativa en nanotoxicología creció en importancia, y surge, en 2007, la revista *Nanotoxicology* con miras a comunicar los resultados de las investigaciones relacionadas con los peligros y riesgos asociados con el uso y desarrollo de materiales nanoes-

³ <https://www.nano.gov/2021BudgetSupplement>.

estructurados. El análisis de los riesgos de los nanomateriales ha sido de interés de organismos internacionales y académicos (p.e., OCDE, 2015, Hansen *et al.*, 2013; Clausen y Hansen, 2018); las preocupaciones sobre los efectos en el sector agroalimentario también están siendo analizadas (Kah *et al.*, 2018).

En México, la actividad regulatoria en materia de nanotecnología se ha dado fundamentalmente en el terreno de los estándares técnicos de carácter voluntario, y no existe otro tipo de normatividad obligatoria en la materia. En 2013, el gobierno mexicano creó el Comité Técnico Nacional de Normalización en Nanotecnologías (CTNNN) bajo la coordinación del Centro Nacional de Metrología (Cenam) y la Dirección General de Normas (DGN) de la Secretaría de Economía. El CTNNN tiene la función de elaborar estándares técnicos para las nanotecnologías, y se rige por la Ley de la Infraestructura de la Calidad, publicada en julio de 2020, este se integra por representantes del sector académico, organismos públicos como el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA) o el Instituto Mexicano del Petróleo, empresas y asociaciones relacionadas con procesos de certificación como la ANCE (Asociación de Normalización y Certificación A. C.) (Tanaka, 2022).

La creación del CTNNN es un indicativo del interés que tuvo el gobierno mexicano por incentivar el desarrollo de esta tecnología al considerarla estratégica para la competitividad, sin embargo, esta acción también está relacionada con los compromisos que tiene el país al formar parte de organizaciones internacionales y tratados de libre comercio que favorecen las normas voluntarias o lo que se conoce como autorregulación, pues su interés es la armonización internacional de estándares para no generar barreras al comercio. En este caso, México es miembro de la Organización Internacional de Estándares (ISO, por sus siglas en inglés) —que estableció en 2005 el Comité Técnico ISO TC 229, dedicado a producir estándares internacionales para las nanotecnologías—, y de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) que cuenta, desde 2006, con el Grupo de Trabajo en Nanomateriales Manufacturados, el cual coordina la elaboración de guías y recomendaciones para evaluar aspectos de seguridad, salud humana y ambiental de los nanomateriales manufacturados (Anzaldo y Chauvet, 2016).

En suma, por el momento, en México solo existe un esquema de normas voluntario para las nanotecnologías del cual se han emitido diecinueve estándares técnicos en aspectos como terminología, mediciones y caracterización, especificaciones de los materiales y riesgos para la salud humana. Los estándares para la gestión de riesgos son los siguientes:⁴

1. NMX-R-13830-SCFI-2020 Guía para el etiquetado de nano-objetos manufacturados y de productos que contengan nano-objetos manufacturados.

⁴ Los estándares pueden consultarse en: <https://www.sinec.gob.mx/SINEC/Vista/Normalizacion/BusquedaNormas.xhtml>.

2. NMX-R-12901-1-SCFI-2020 Gestión de riesgo ocupacional aplicado a nanomateriales manufacturados. Parte 1: principios y enfoques.
3. NMX-R-13121-SCFI-2019 Evaluación de riesgos en nanomateriales.
4. NMX-R-16197-SCFI-2018 Compendio y descripción de métodos toxicológicos y ecotoxicológicos de detección para nanomateriales manufacturados.
5. NMX-R-12901-2-SCFI-2016 Gestión de riesgo ocupacional aplicado a nanomateriales manufacturados. Parte 2: uso del enfoque de control por bandas.

Con respecto a la existencia de empresas y productos nanotecnológicos en México, existen algunos estudios e inventarios que señalan un aproximado de entre 100 y 150 empresas en todo el país (Záyago *et al.*, 2013; ESIDET-INEGI, 2017; y el inventario de la Red Latinoamericana de Nanotecnología y Sociedad).⁵ Los estudios indican que las empresas que utilizan nanomateriales en México son principalmente el sector químico, componentes eléctricos, plástico y hule, construcción, entre otros (Záyago *et al.*, 2013). En este sentido, es prioritario que en el país se lleve a cabo un registro obligatorio de productos que contienen nanomateriales, ya sea importados o fabricados, pues su ausencia genera un espacio de incertidumbre para todos aquellos interesados en el desarrollo de esta tecnología y para los consumidores y población en general.

Conclusiones

La aplicación de la nanotecnología en el sector agrícola es un área muy prometedora. Esta ciencia, conduce el desarrollo de una gama de novedosas aplicaciones y productos en beneficio de la agricultura. Para el caso de las SiNPs, estas parecen ser una excelente alternativa para reducir el uso de agroquímicos, además de ser sistemas eficaces para administrar nutrientes y compuestos químicos en plantas y cultivos de interés agrícola.

En relación con la innovación nanotecnológica e infraestructura en México, existen las capacidades científicas suficientes para que esta tecnología contribuya a resolver algunos de los problemas que aquejan a los sistemas agroalimentarios del país. Esto será posible en la medida en que la investigación que se desarrolla en universidades y centros de investigación públicos se oriente a responder las necesidades de las unidades de producción de pequeña escala, que es el 85% de los agricultores del país (FAO, 2021); que desde etapas tempranas de la investigación involucre las preocupaciones de los productores y otros actores interesados; que se promueva la

⁵ El registro de empresas de ReLANS puede consultarse en: <https://relans.org/empresas-nano-en-mexico>.

investigación interdisciplinaria con las ciencias sociales a fin de evitar los errores y omisiones cometidos por la biotecnología agrícola al no considerar seriamente los aspectos socioculturales y que decantó en la pérdida de confianza y rechazo total a algunas aplicaciones. Esta situación implicó la pérdida de esfuerzos de investigación en las instituciones de investigación del país.

Referencias

- Abdelrahman, T., Qin, X., Li, D., Senosy, I., Mmby, M. y Wan, H. (2021). Pectinase-responsive carriers based on mesoporous silica nanoparticles for improving the translocation and fungicidal activity of prochloraz in rice plants. *Chemical Engineering Journal*, 404, 126440. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126440>.
- Angel-Olarte, C., Hernández-Adame, L., Méndez-Blas, A., Palestino, G. (2019). Eu³⁺/Yb³⁺ co-doped gadolinium oxysulfide upconverting nanorods: Morphological, physicochemical and optical evaluation. *Journal of Alloys and Compounds*, 787: 1032-1043. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.02.113>.
- Angulo, C., Tello-Olea, M., Reyes-Becerril, M., Monreal-Escalante, E., Hernández-Adame, L., Angulo, M., Mazon-Suastegui, J. M. (2021). Developing oral nanovaccines for fish: A modern trend to fight infectious diseases. *Reviews in Aquaculture*, 13(3): 1172-1192. <https://doi.org/10.1111/raq.12518>.
- Anzaldo, M. y Chauvet, M. (2016). Technical standards in nanotechnology as an instrument of subordinated governance: Mexico case study. *Journal of responsible innovation*. 3(2): 135-153. <https://doi.org/10.1080/23299460.2016.1196098>.
- Aryadeep, R. (2020). Silicon-nanoparticles in crop improvement and agriculture. *International Journal on Recent Advancement in Biotechnology & Nanotechnology*, 3(1): 54-65.
- Asgari, F., Majd, A., Jonoubi, P., Najafi, F. (2018). Effects of silicon nanoparticles on molecular, chemical, structural and ultrastructural characteristics of oat (*Avena sativa L.*). *Plant Physiology and Biochemistry*, 127: 152-160. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.03.021>.
- Bilal, M., Xu, C., Cao, L., Zhao, P., Cao, C., Li, F., Huang, Q. (2020). Indoxacarb-loaded fluorescent mesoporous silica nanoparticles for effective control of *Plutella xylostella L.* with decreased detoxification enzymes activities. *Pest Management Science*, 76(11): 3749-3758. <https://doi.org/10.1002/ps.5924>.
- Borda, O., Barón, F., Gómez, M. (2007). Silicon as a beneficial element in forage oat (*Avena sativa L.*): physiological responses of growth and management. *Agronomía Colombiana*, 25(2): 273-279.
- Buchman, J., Elmer, W., Ma, C., Landy, K., White, J., Haynes, C. (2019). Chitosan-coated mesoporous silica nanoparticle treatment of *Citrullus lanatus* (watermelon): Enhanced fungal disease suppression and modulated expression of stress-related genes. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(24): 19649-19659. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b04800>.
- Cao, B., Ma, Q., Zhao, Q., Wang, L., Xu, K. (2015). Effects of silicon on absorbed light

- allocation, antioxidant enzymes and ultrastructure of chloroplasts in tomato leaves under simulated drought stress. *Scientia Horticulturae*, 194: 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.07.037>.
- Cao, L., Zhang, H., Cao, C., Zhang, J., Li, F., Huang, Q. (2016). Quaternized chitosan-capped mesoporous silica nanoparticles as nanocarriers for controlled pesticide release. *Nanomaterials*, 6(7): 126. <https://doi.org/10.3390/nano6070126>.
- Cao, L., Zhang, H., Zhou, Z., Xu, C., Shan, Y., Lin, Y., Huang, Q. (2018). Fluorophore-free luminescent double-shelled hollow mesoporous silica nanoparticles as pesticide delivery vehicles. *Nanoscale*, 10(43): 20354-20365. <https://doi.org/10.1039/C8NR04626C>.
- Cao, L., Zhou, Z., Niu, S., Cao, C., Li, X., Shan, Y., Huang, Q. (2017). Positive-charge functionalized mesoporous silica nanoparticles as nanocarriers for controlled 2,4-dichlorophenoxy acetic acid sodium salt release. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26): 6594-6603. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b01957>.
- Chen, H., Chen, L., Shen, Z., Zhou, H., Hao, L., Xu, H., Zhou, X. (2020). Synthesis of mesoporous silica post-loaded by methyl eugenol as an environment-friendly slow-release bio pesticide. *Scientific Reports*, 10(1): 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63015-6>.
- Chen, H., Lin, Y., Zhou, H., Zhou, X., Gong, S., Xu, H. (2016). Synthesis and characterization of chlorpyrifos/copper(II) schiff base mesoporous silica with pH sensitivity for pesticide sustained release. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(43): 8095-8102. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b03262>.
- Chunli, X., Bilal, M., Bo, X., Gangchao, R., Pengyue, Z., Chong, C., Fengmin, L., Lidong, C., Qiliang, H. (2020). Preparation and characterization of prothioconazole-loaded fluorescent mesoporous silica nanoparticles. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 22(2): 214-224. <https://doi.org/10.16801/J.ISSN.1008-7303.2020.0046>.
- Clausen, L. P. W. y Hansen, S. F (2018). The ten decrees of nanomaterials regulations. *Nature Nanotech*, 13: 766-768. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0256-2>.
- Dannon, E., Wydra, K. (2004). Interaction between silicon amendment, bacterial wilt development and phenotype of *Ralstonia solanacearum* in tomato genotypes. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 64(5): 233-243. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2004.09.006>.
- Food and Agriculture Organization, FAO (2022). *México en una Mirada*. <https://www.fao.org/mexico/fao-en-mexico/mexico-en-una-mirada/es/>.
- Feng, J., Chen, W., Shen, Y., Chen, Q., Yang, J., Zhang, M. *et al.* (2020). Fabrication of abamectin-loaded mesoporous silica nanoparticles by emulsion-solvent evaporation to improve photolysis stability and extend insecticidal activity. *Nanotechnology*, 31(34): 345705. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab91f0>.
- Feng, J., Yang, J., Shen, Y., Deng, W., Chen, W., Ma, Y. (2021). Mesoporous silica nanoparticles prepared via a one-pot method for controlled release of abamectin: Properties and applications. *Microporous and Mesoporous Materials*, 311, 110688. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110688>.

- Gad, M., Li, M., Ahmed, F., Almoammar, H. (2020). Nanomaterials for gene delivery and editing in plants: Challenges and future perspective. *Multifunctional Hybrid Nanomaterials for Sustainable Agri-Food and Ecosystems*, 135-153. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821354-4.00006-6>.
- Gao, Y., Liang, Y., Dong, H., Niu, J., Tang, J., Yang, J. *et al.* (2020a). A bioresponsive system based on mesoporous organosilica nanoparticles for smart delivery of fungicide in response to pathogen presence. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(14): 5716-5723. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c00649>.
- Gao, Y., Xiao, Y., Mao, K., Qin, X., Zhang, Y., Li, D. *et al.* (2020b). Thermoresponsive polymer-encapsulated hollow mesoporous silica nanoparticles and their application in insecticide delivery. *Chemical Engineering Journal*, 383, 123169. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123169>.
- Gao, Y., Zhang, Y., He, S., Xiao, Y., Qin, X., Zhang, Y., Li, D., Ma, H., You, H., Li, J. (2019). Fabrication of a hollow mesoporous silica hybrid to improve the targeting of a pesticide. *Chemical Engineering Journal*, 364: 361-369. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.01.105>.
- Guntamukkala, B. y Pusarla, S. (2017). Silicon uptake, transportation and accumulation in Rice. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6(6): 290-293.
- Hansen S. F., Maynard A., Baun A., Tickner, J. A. y Bowman D. M. (2013). Nanotechnology — Early lessons from early warnings. En EEA “*Late lessons from early warnings: science, precaution, innovation*”. EEA Report No 1/2013: 530-559. <https://doi.org/10.2800/70069>.
- Hernández-Adame, L., Angulo, C., García-Silva, I., Palestino, G., Rosales-Mendoza S. (2019). An overview of nanogel-based vaccines. *Expert Review of Vaccines*, 18(9): 951-968. <https://doi.org/10.1080/14760584.2019.1647783>.
- Hernández-García, Y. I., Anzaldo Montoya, M. (2021). Flow of ideas in the study of communication channels and references in publications on nanotechnology applied to food and agriculture in Mexico. *Scientometrics*, 126: 995-1017. <https://doi.org/10.1007/s11192-020-03793-y>.
- INEGI-Conacyt. (2017). *Encuesta sobre investigación y desarrollo tecnológico (ESIDET), indicadores sobre nanotecnología y biotecnología*. <https://www.inegi.org.mx/programas/esidet/2017/default.html#Tabulados>.
- Kah, M., Kookana, R. S., Gogos, A. y Bucheli, T. D. (2018). A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues. *Nature nanotechnology*, 13(8): 677-684. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0131-1>.
- Kang, Z., Liu, Y., Lee, S. (2011). Small-sized silicon nanoparticles: new nanolights and nanocatalysts. *Nanoscale*, 3(3): 777-791. <https://doi.org/10.1039/C0NR00559B>.
- Karupannan, S., Dowlath, M., Arunachalam, K. (2020). Phytonanotechnology: Challenges and future perspectives. *Phytonanotechnology*, 303-322. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822348-2.00015-2>.
- Le, V., Rui, Y., Gui, X., Li, X., Liu, S., Han, Y. (2014). Uptake, transport, distribution and bio-effects of SiO₂ nanoparticles in Bt-transgenic cotton. *Journal of Nanobiotechnology*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s12951-014-0050-8>.

- Li, W., Wang, Q., Zhang, F., Shang, H., Bai, S., Sun, J. (2021). pH-sensitive thiamethoxam nanoparticles based on bimodal mesoporous silica for improving insecticidal efficiency. *Royal Society Open Science*, 8(2). <https://doi.org/10.1098/rsos.201967>.
- Li, Z., Yingwen, M., Cheng, P., Martin, F., Hua, S., Zhongjun, D. (2021). Understanding the mechanisms of silica nanoparticles for nanomedicine. *WIREs Nanomedicine and Nanobiotechnology* 13 (1): 1658. <https://doi.org/10.1002/wnan.1658>.
- Mandlik, R., Thakral, V., Raturi, G., Shinde, S., Nikolić, M., Tripathi, D. (2020). Significance of silicon uptake, transport, and deposition in plants. *Journal of Experimental Botany*, 71(21): 6703-6718. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa301>.
- Martin-Ortigosa, S., Peterson, D., Valenstein, J., Lin, V., Trewyn, B., Lyznik, L., Wang, K. (2013). Mesoporous silica nanoparticle-mediated intracellular Cre protein delivery for maize genome editing via loxP site excision. *Plant Physiology*, 164(2): 537-547. <https://doi.org/10.1104/pp.113.233650>.
- Mitani, N. (2005). Uptake system of silicon in different plant species. *Journal of Experimental Botany*, 56(414): 1255-1261. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri121>.
- Moraes, J., Goussain, M., Carvalho, G., Costa, R. (2005). Feeding non-preference of the corn leaf aphid *Rhopalosiphum maidis* (Fitch, 1856) (Hemiptera: Aphididae) to corn plants (*Zea mays* L.) treated with silicon. *Ciência E Agrotecnologia*, 29(4): 761-766.
- OCDE (2015). Developments in delegations on the safety of manufactured nanomaterials. Tour de table. *Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials*, 61. ENV/JM/MONO.
- Plohl, O., Gyergyek, S., Zemljič, L. (2021). Mesoporous silica nanoparticles modified with N-rich polymer as a potentially environmentally-friendly delivery system for pesticides. *Microporous and Mesoporous Materials*, 310: 110663. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110663>.
- Rastogi, A., Tripathi, D., Yadav, S., Chauhan, D., Živčák, M., Ghorbanpour, M. (2019). Application of silicon nanoparticles in agriculture. *3 Biotech*, 9(3). <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1626-7>.
- Royal Society & Royal Academy of Engineering. (2004). *Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties*. Cardiff, UK: Clyvedon Press.
- San, N., Kurşungöz, C., Tümtaş, Y., Yaşa, Ö., Ortaç, B., Tekinay, T. (2014). Novel one-step synthesis of silica nanoparticles from sugarbeet bagasse by laser ablation and their effects on the growth of freshwater algae culture. *Particuology*, 17: 29-35. <http://dx.doi.org/10.1016/j.partic.2013.11.003>.
- Shan, Y., Cao, L., Xu, C., Zhao, P., Cao, C., Li, F. (2019). Sulfonate-functionalized mesoporous silica nanoparticles as carriers for controlled herbicide diquat dibromide release through electrostatic interaction. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(6): 1330. <https://doi.org/10.3390/ijms20061330>.
- Shen, Z., Wen, H., Zhou, H., Hao, L., Chen, H., Zhou, X. (2019). Coordination bonding-based polydopamine-modified mesoporous silica for sustained avermectin release. *Materials Science and Engineering, C*, 105, 110073. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110073>.

- Siddiqui, H., Ahmed, K., Sami, F., Hayat, S. (2020). Silicon nanoparticles and plants: current knowledge and future perspectives. *Sustainable Agriculture Reviews*, 41: 129-142. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33996-8_7.
- Siddiqui, M., Al-Whaibi, M. (2014). Role of nano-SiO₂ in germination of tomato (*Lycopersicon esculentum* seeds Mill.). *Saudi Journal of Biological Sciences*, 21(1): 13-17. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2013.04.005>.
- Soundararajan, P., Manivannan, A., Park, Y., Muneer, S., Jeong, B. (2015). Silicon alleviates salt stress by modulating antioxidant enzyme activities in *Dianthus caryophyllus* 'Tula'. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 56(2): 233-239. <https://doi.org/10.1007/s13580-015-0111-4>.
- Stamatakis, A., Papadantonakis, N., Savvas, D., Lydakakis-Simantiris, N., Kefalas, P. (2003). Effects of silicon and salinity on fruit yield and quality of tomato grown hydroponically. *Acta Horticulturae*, (609): 141-147. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.609.18>.
- StatNano. (2022). *Nanotechnology publications* (article). <https://statnano.com/report/s29>. (Consultado, mayo 28, 2022).
- Sweryda-Krawiec, B., Cassagneau, T., Fendler, J. (1999). Surface modification of silicon nanocrystallites by alcohols. *The Journal of Physical Chemistry B*, 103(44): 9524-9529. <https://doi.org/10.1021/jp992298p>.
- Tanaka, L. (2022). Recomendaciones de política pública de nanociencias y nanotecnología en México: privilegiar el bienestar humano y ambiental. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 15(28): 1e-23e. <https://doi.org/10.22201/ceich.24485691e.2022.28.69655>.
- Torney, F., Trewyn, B., Lin, V., Wang, K. (2007). Mesoporous silica nanoparticles deliver DNA and chemicals into plants. *Nature Nanotechnology*, 2(5): 295-300. <https://doi.org/10.1038/nnano.2007.108>.
- Wang, W., Martin, J., Fan, X., Han, A., Luo, Z., Sun, L. (2012). Silica nanoparticles and frameworks from rice husk biomass. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 4(2): 977-981. <https://doi.org/10.1021/am201619u>.
- Xia, T., Kovochich, M., Liang, M., Meng, H., Kabehie, S., George, S. (2009). Polyethyleneimine coating enhances the cellular uptake of mesoporous silica nanoparticles and allows safe delivery of siRNA and DNA constructs. *ACS Nano*, 3(10): 3273-3286. <https://doi.org/10.1021/nn900918w>.
- Xu, C., Cao, L., Zhao, P., Zhou, Z., Cao, C., Li, F., Huang, Q. (2018). Emulsion-based synchronous pesticide encapsulation and surface modification of mesoporous silica nanoparticles with carboxymethyl chitosan for controlled azoxystrobin release. *Chemical Engineering Journal*, 348: 244-254. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.05.008>.
- Xu, C., Shan, Y., Bilal, M., Xu, B., Cao, L., Huang, Q. (2020). Copper ions chelated mesoporous silica nanoparticles via dopamine chemistry for controlled pesticide release regulated by coordination bonding. *Chemical Engineering Journal*, 395, 125093. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125093>.
- Xu, Y., Xu, C., Huang, Q., Cao, L., Teng, F., Zhao, P., Jia, M. (2021). Size effect of mesoporous silica nanoparticles on pesticide loading, release, and delivery in cucum-

- ber plants. *Applied Sciences*, 11(2): 575. <https://doi.org/10.3390/app11020575>.
- Záyago, E., Foladori, G., Appelbaum, R. P. y Arteaga, E. R. (2013). Empresas nanotecnológicas en México: hacia un primer inventario. *Estudios sociales (Hermosillo, Son.)*, 21(42): 9-25.
- Zhao, P., Cao, L., Ma, D., Zhou, Z., Huang, Q., Pan, C. (2017). Synthesis of pyrimethanil-loaded mesoporous silica nanoparticles and its distribution and dissipation in cucumber plants. *Molecules*, 22(5): 817. <https://doi.org/10.3390/molecules22050817>.
- Zhao, P., Cao, L., Ma, D., Zhou, Z., Huang, Q., Pan, C. (2018). Translocation, distribution and degradation of prochloraz-loaded mesoporous silica nanoparticles in cucumber plants. *Nanoscale*, 10(4): 1798-1806. <https://doi.org/10.1039/C7NR08107C>.
- Zhao, P., Yuan, W., Xu, C., Li, F., Cao, L., Huang, Q. (2018). Enhancement of spirotetramat transfer in cucumber plant using mesoporous silica nanoparticles as carriers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(44): 11592-11600. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b04415>.
- Zhu, F., Liu, X., Cao, L., Cao, C., Li, F., Chen, C. (2018). Uptake and distribution of fenoxanil-loaded mesoporous silica nanoparticles in rice plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(10): 2854. <https://doi.org/10.3390/ijms19102854>.