

Potencial de los nanomateriales en la agricultura: retos y oportunidades[◊]

The potential of nanomaterials in agriculture: challenges and opportunities

Vicente Rodríguez-González,* Erik Díaz-Cervantes**

ABSTRACT: Climate change and society evolution ask for an optimization of agriculture practices and/or new trends to attain a sustainable agriculture. The materials science can provide the appropriate tools to agricultural activities and phenomena from germination, growth up to harvest and post-harvest of agricultural products. Here, relevant recent results focused on the sustainability features reports provided by the usage of nanomaterials are reviewed and discussed to point out the challenges and opportunities of nanoscience in the novel agriculture era. Nanomaterials offer a platform to fertilizer delivering, mediate pollution in water and air and control the pathogenic microorganisms which occur in agriculture processes. Those viable nanomaterials syntheses together with standardized evaluation are important aspects in generating new categories of technicians and scientists in this emerging interdisciplinary kind of agriculture. The correct legislation can be obtained if there are worldwide protocols to work with, that is, protocols which included the synthesis and characterization of nanomaterials that are reproducible worldwide and developed *in-situ* to obtain real results.

KEYWORDS: sustainable agriculture, nanomaterials, phytopathogen, environmental damage.

RESUMEN: El cambio climático y la evolución de la sociedad exigen una optimización de las prácticas agrícolas y/o nuevas tendencias para lograr una agricultura sostenible. La ciencia de los materiales se erige como una excelente alternativa para coayudar a la agricultura desde la germinación y cultivo hasta la cosecha, incluyendo la distribución-almacenamiento de bienes agrícolas. En el presente trabajo, se revisaron y discutieron estudios recientes novedosos y sustentables que utilizan nanomateriales, para destacar los desafíos y oportunidades de las nanociencias y nanotecnología en una nueva era de la agricultura, generando procesos de sustentabilidad. Los nanomateriales ofrecen una plataforma para el suministro controlado de fertilizantes, la mediación de contaminantes en el agua y el aire, así como para el control de algunos microrganismos fitopatógenos que colonizan cultivos en la agricultura actual. La síntesis de nanomateriales factibles, junto con su evaluación estandarizada a nivel mundial, es importante para obtener una nueva generación de técnicos y científicos en el desarrollo de técnicas emergentes y cambios en la agricultura. La correcta legislación puede obtenerse si se tienen protocolos internacionales para trabajar, es decir, protocolos de síntesis y caracterización de nanomateriales reproducibles a nivel mundial y desarrollados *in-situ* para obtener resultados reales.

PALABRAS CLAVE: agricultura sustentable, nanomateriales, fitopatógeno, daño ambiental.

Recibido: 14 de junio, 2023. Aceptado: 6 de octubre, 2023. Publicado: 30 de octubre, 2023.

[◊] Se agradece el apoyo a través del proyecto “Materiales activos para una agricultura sustentable” del programa Ciencia de Frontera de Conacyt. E. D.-C. Agradece a la Convocatoria Institucional de Investigación Científica 2023, por el apoyo al proyecto 270/2023.

* Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A. C.

** Universidad de Guanajuato, Gto.

Autor de correspondencia: vicente.rdz@ipicyt.edu.mx



Introducción

La agricultura actual conlleva diversos problemas ambientales, debido a estar enfocada en la producción masiva de productos agrícolas tratando de satisfacer la demanda mundial. Los problemas colaterales de esta agricultura van desde el uso intensivo de fertilizantes y pesticidas, para el control de microrganismos fitopatógenos en enormes monocultivos, hasta el cultivo de hortalizas en viveros en regiones poco factibles para bienes agrícolas, climas fríos o con baja irradiación solar anual o en zonas desérticas, por lo cual se requiere mayor cantidad de fertilizantes químicos y control de las condiciones de cultivo de los viveros. Lo anterior ha conllevado a la contaminación ambiental de campos agrícolas, al agotamiento y erosión de suelos, al incremento de filtraciones de sustancias químicas en mantos acuíferos, aire y bioacumulación en flora y fauna. La disruptión de los ecosistemas genera fauna nociva debido al cambio de biodiversidad por monocultivos y el crecimiento inesperado de floraciones de algas y microrganismos que pueden provocar efectos nocivos como la coloración de cuerpos de agua, mareas rojas, entre otros, que pueden liberar toxinas, disminuyendo la oxigenación y la irradiación solar al mismo tiempo. El cultivo masivo en grandes extensiones tiene como resultado hacerlos vulnerables a infecciones por microrganismos fitopatógenos, los cuales se reproducen fácilmente en las plantas ubicadas muy cercas unas de otras, y, por lo general, de la misma especie.

Adicionalmente, el agotamiento de acuíferos locales y/o su contaminación, aunando el daño que ocasiona el cavar pozos profundos para obtener el vital líquido, así como las diversas formas para utilizar agua salada, y recolectar agua evaporada, generando, a largo plazo, daño ambiental y deterioro de los ecosistemas.

En general podemos agrupar los problemas ocasionados por los actuales sistemas de agricultura, como se enumeran enseguida:

- Fertilización y uso de pesticidas indiscriminado.
- Agotamiento y contaminación de acuíferos.
- Alteración y pérdida de la biodiversidad.
- Cambio de uso de suelo y su agotamiento.
- Bioacumulación de contaminantes y residuos en flora y fauna.

A continuación se discuten, de forma concisa, investigaciones recientes versadas en tratar de dar solución a estos problemas generados por la agricultura moderna; claro, con el empleo de nanomateriales.

Potencial de los nanomateriales para solventar las prácticas perjudiciales de la agricultura actual

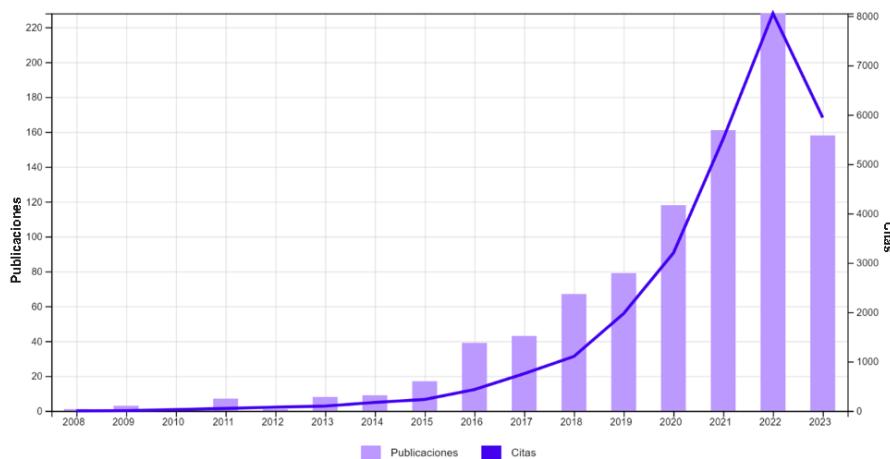
Los nanomateriales han mostrado ser una alternativa para generar una agricultura más amigable con el medio ambiente; diversos estudios presentan las



posibilidades de mejorar, mediar y remediar los problemas colaterales de la agricultura actual, previamente señalados. En el presente manuscrito se revisaron solo aquellas investigaciones que ofrecen un potencial real de generar una agricultura sostenible, considerando la naturaleza biocompatible, biodegradable y de reutilización o recuperación, así como el uso de métodos de síntesis prácticos, ecológicos y de naturaleza sostenible.

La búsqueda de publicaciones científicas recientes en la base de datos Web of Science, se realizó utilizando las palabras clave: agricultura sustentable (*sustainable agriculture*) y nanomateriales (*nanomaterials*), la plataforma arroja un total de 940 publicaciones internacionales desde el año 1900 al presente 2023, los estudios aún resultan incipientes, pero se nota un incremento notable en los últimos 5 años (2018-2023), con 8,055 citas en 2022 y 228 publicaciones, lo cual confirma un área de investigación en pleno crecimiento (figura 1).

FIGURA 1. Estadística de los trabajos publicados sobre agricultura sustentable y nanomateriales.



Obtenidos en la base de datos, Web of Science, el 29 de septiembre del 2023. Empleando las palabras clave: agricultura sustentable (*sustainable agriculture*) y nanomateriales (*nanomaterials*).

Fuente: Web of Science, *Citation report*, 2023.

En este orden, diferentes disciplinas estudian los nanomateriales como una alternativa para coadyuvar a generar una agricultura más sostenible. Las especialidades van desde la ciencia de materiales y nanociencias, la química, la ingeniería química y la química analítica. También se ha dado un enfoque de los nanomateriales biológicos (biomateriales) y el efecto de estos en fauna y flora, biología, bioquímica, biotecnología, ciencias ambientales, ciencia de los alimentos, agronomía. En el contexto de la evolución y dispersión de contaminantes y pérdida de ecosistemas, el área de geociencias, toxicología, además de las matemáticas aplicadas, la simulación computacional resulta una excelente herramienta para abordar y tratar de entender los problemas a base de estadísticas, y que podrían predecir futuros incidentes y retos para la agricultura.



Breve estado del arte

Los estudios científicos actuales sobre el uso de nanomateriales para establecer una agricultura sostenible se están incrementando año con año, las publicaciones son diversas, en numerosas áreas del conocimiento y multidisciplinarias. Se observa un conjunto con opciones que no son claramente sostenibles, o implican procesos de síntesis a altas temperaturas; por lo mismo, esta revisión se aborda con base en los temas enlistados a continuación, con el fin de dar un mejor entendimiento de las oportunidades que ofrecen los nanomateriales y los retos a estudiar. La revisión sobre los nanomateriales que pueden ser una alternativa es concisa, buscando destacar el potencial que la ciencia de los materiales puede ofrecer para solventar los problemas señalados y encaminarse a una agricultura sustentable.

De acuerdo con el compendio de artículos publicados recientemente, en esta revisión se realizó una búsqueda sistemática y se englobaron las publicaciones en los temas enlistados a continuación:

- I. Nanoestructuras para la liberación controlada de sustancias (fertilizantes y biocidas).
- II. Nanomateriales como fertilizantes (nutrición) o mediadores para asegurar la producción agrícola.
- III. Manejo de especies fitopatógenas con nanomateriales (microrganismos e insectos).
- IV. Nanomateriales para el tratamiento, monitoreo de aguas y suelos contaminados.
- V. Empaques de alimentos a base de nanomateriales y distribución y protección de plantas.
- VI. Toxicología y evolución, riesgos ocupacionales de las nanoestructuras.

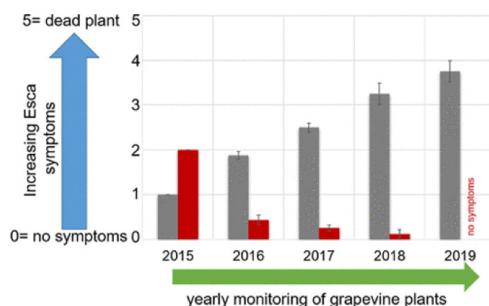
I. Nanoestructuras en la liberación controlada de sustancias fertilizantes y/o biocidas

Una de las primeras aplicaciones desarrolladas es el uso de nanoestructuras de SiO_2 (Espinosa Silva, 2015), zinc (Diáz Cervantes *et al.*, 2021) o dióxido de titanio (García Tejada *et al.*, 2022), para la adsorción y liberación controlada de fármacos en sitios específicos de una enfermedad o malestar crónico, área de investigación conocida como liberación controlada de fármacos (*drug-delivery*). Posteriormente, este tipo de aplicaciones se ha adaptado para usarse en la agricultura, para la liberación controlada de fertilizantes y moléculas antimicrobiales. T. O. Machado *et al.* sintetizaron bioportadores a partir de lignina mediante el proceso de polimerización en microemulsión de aza-Michael (Machado *et al.*, 2020; Aguilera-Granja *et al.*, 2022). Se realizó la encapsulación *in-situ* de los



fungicidas químicos, piraclostrobina, azoxistrobina y tebuconazol de 10, 15 y 5 mg, respectivamente, de bosalida, debido a su menor solubilidad en cloroformo. Los bioportadores de lignina de 200 nm de tamaño se utilizaron para encapsular los fungicidas que mostraron una actividad biológica sostenida contra *Phaeomoniella chlamydospora* y *Phaeoacremonium minimal*, hongos productores de lignosa asociados con la enfermedad fúngica del tronco de la vid, ESCA, enfermedad silenciosa que afecta los cultivos de vid en todo el mundo. En este mismo orden, ESCA es una enfermedad grave de la madera causada por diferentes hongos. Por eso se conoce como complejo de ESCA. Estos biomateriales son promisorios y de gran interés para el control de hongos que afectan el tronco de plantas como es el caso específico de ESCA que ataca seriamente el tronco de la vid. En la figura 2, los autores muestran el control de la enfermedad ESCA con los biomateriales aplicados a plantas de vid Portugieser, la plataforma es biodegradable y apta para la liberación de fungicidas al interior de la planta.

FIGURA 2. Aplicación de NCs de lignina.



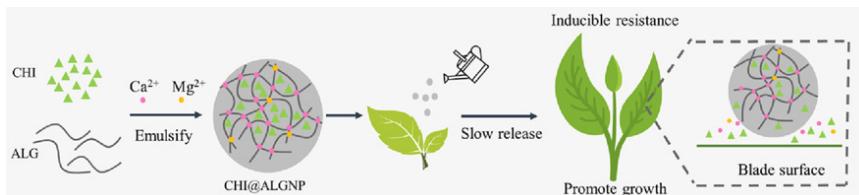
Gráfica que muestra la gravedad de los síntomas de la hoja de ESCA en cuatro plantas de vid Portugieser, monitoreadas anualmente, desde 2015 hasta 2019: comparación entre tratamientos con NC de lignina vacía (es decir, sin fungicida cargado, barras grises) y NC de lignina (cargadas con bosalid, barras rojas). (Observación: el eje y muestra la gravedad de los síntomas de la hoja de ESCA, 0 = planta sana, sin síntomas; 5 = planta muerta).

Fuente: Imagen tomada de Machado *et al.* (2020, open access).

Recientemente un nanogel a base de alginato fue utilizado como portador de cloroincezadina (CHI) un compuesto biocida (Lv *et al.*, 2021). El compuesto CHI@ALGNP incrementa su adhesión foliar en la planta de Nicotadina benthamiana, exhibiendo una liberación sostenida por 7 días. Los autores reportan que también presenta la activación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y liberación de los cationes Ca^{2+} y Mg^{2+} , estos compuestos presentan actividad antiviral contra el virus mosaico del tabaco y estimulan el crecimiento de la planta. El nanogel puede ser fácilmente aplicado como spray, implicando el desarrollo de un nuevo pesticida foliar. Como se representa esquemáticamente en la figura 3.

Estos sistemas tienen un tamaño, en solución, en el rango de 10 a 100 nm, permitiendo su rociado sobre la superficie de las hojas. El alginato se de-

FIGURA 3. Representación esquemática de la síntesis del nanogel CHI@ALGPN.



El gel fue cargado con cloroincozadina por medio de emulsificación controlada. El nanogel fue rociado en las hojas de nicotina para el estudio de sus funciones antivirales y de promoción de crecimiento de la planta.

Fuente: Lv *et al.* (2020). Imagen reproducida con permiso de American Chemical Society (ACS).

grada a partir del cuarto día, lo cual posibilita una mayor liberación del biocida y biocompatibilidad. El efecto antiviral, liberación de cationes y de promoción del crecimiento se determinaron por fluorescencia, qPCR (reacción en cadena de la polimerasa) de la proteína del virus y HPLC de masas en complemento con la determinación de ROS, clorofila y medidas de tamaño de hojas peso y altura de la planta.

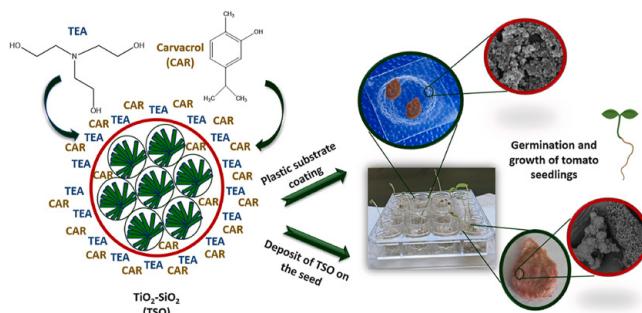
Los cationes de calcio y magnesio son indicadores de mejora de la fotosíntesis y acumulación de materia orgánica. El nanogel basado en alginato resulta ser un buen material para la dosificación controlada de biocidas y promover el crecimiento de plantas agrícolas por medio de liberación de cationes.

Materiales a base de silice mesoporoso fueron recientemente desarrollados, en búsqueda de una germinación sana de plantas de tomate, *Solanum lycopersicum* (Esquivel Castro *et al.*, 2023). La incorporación de cobalto durante la síntesis hidrotermal permitió obtener compuestos de $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ con especial ensamblaje similar a una coliflor. Los nanomateriales fueron funcionalizados con trietanolamina y cargados con carvacrol y posteriormente immobilizados en plásticos para germinar las semillas de tomate y estudiar el crecimiento temprano de la planta. Como control se cubrieron las semillas con los materiales mesoporosos. Se demostró que esta alternativa permite el control del tiempo de germinación, la longitud de la raíz/brote de la germinación y no se detectó la translocación de los cationes de cobalto a la plántula. El recubrimiento directo de los compósitos sobre la semilla resulta más eficiente en la germinación debido al contacto directo con el carvacrol y también genera brotes más largos de la planta de tomate. Sin embargo, la recuperación y el manejo de los nanomateriales depositados en plástico resulta práctico y la lixiviación o la translocación a la planta es más improbable (figura 4).

II. Nanomateriales como fertilizantes (nutrición) o mediadores para asegurar la producción agrícola

Wang *et al* (2017) reportan el uso de nanomateriales a base de carbono tales como, nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT, por su acrónimo en

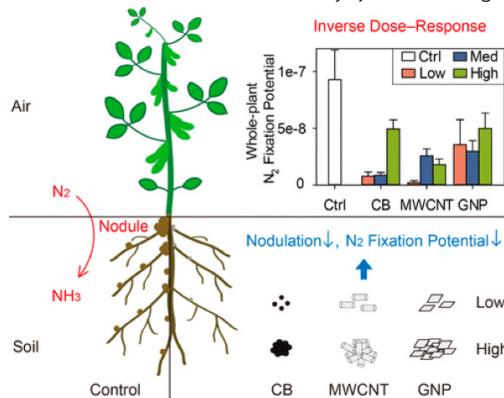
FIGURA 4. Compósitos de TiO₂-SiO₂ funcionalizados con trietanolamida (TEA)/carvacrol (CAR), utilizados para promover la germinación sana de semillas de tomate, usando un recubrimiento directo sobre la semilla y recubrimiento de un sustrato plástico.



Fuente: Esquivel-Castro *et al.* (2023). Imagen reproducida con permiso de ACS.

inglés), nanoplaquetas de grafeno (GNP) y negro de humo (CB), en concentraciones que van desde 0.1 mg Kg⁻¹ hasta una concentración máxima de 1000 mg Kg⁻¹. Estos materiales carbonados pueden mediar la biomasa del suelo y la fijación del nitrógeno en función de la concentración usada, y pueden mejorar el crecimiento de la planta de soya, a bajas concentraciones. La biodisponibilidad se ve afectada por aglomeración de los materiales carbonosos afectando el crecimiento en concentraciones mayores a 1000 mg Kg⁻¹. Cantidad bajas de MWCNT disminuyen notablemente la longitud del tallo de la soya y el área foliar. Todos los materiales de carbono aceleraron la floración de la soya, pero afectaron negativamente la nodulación y la fijación de nitrógeno. Por microscopía de trasmisión se identificó que los nanomateriales parecen acumularse dentro los nódulos, como se esquematiza en la figura 5 .

FIGURA 5. Efecto de materiales carbonosos en la nodulación y fijación de nitrógeno en plantas de soya.



CB significa negro de humo, MWCNT nanotubos de carbono de pared múltiple, y GNP nanoplaquetas de grafeno.

Fuente: Wang *et al.* (2017). Imagen reproducida con permiso de ACS.



La síntesis verde de NPs de ZnO por medio de extracto de hoja de ciruela de Java (*Syzygium cumini*) resulta un proceso amigable y que genera materiales con gran área superficial y buena actividad catalítica (Arumugam *et al.*, 2021). La evaluación en la línea celular de cáncer de pulmón humano A549 provocó un daño nuclear y la modificación del nivel celular ligada a la concentración de las NPs de ZnO. En una concentración de 5 mg/mL, las NPs de ZnO muestran un notable crecimiento en el desarrollo de la raíz y los brotes de la planta de ajonjolí (*Sesamum indicum*), en comparación con la planta control (figura 6). El extracto tiene alta proporción de ácido ferúlico, rutina, limonelo, flavonoides y catequinas, los cuales logran la reducción del acetato de zinc en nanopartículas de ZnO casi con morfología esférica. Las nanopartículas de ZnO tienen propiedades plasmónicas y un potencial zeta de -16.9 mV previniendo su aglomeración en solución.

FIGURA 6. Germinación de semillas de ajonjolí después del tratamiento con diferentes concentraciones de ZnO NPs durante 30 días.



A: control; B: 1 mg/mL; C: 3 mg/mL; D: 5 mg/mL; E: 7 mg/mL; F: 9 mg/mL.
Fuente: Arumugam *et al.* (2021). Imagen reproducida con permiso de Elsevier.

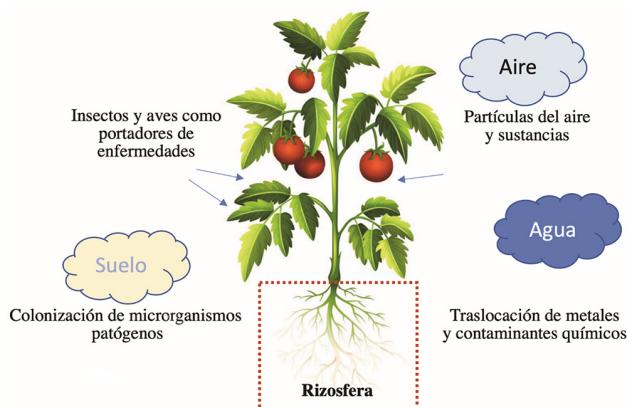
III. Manejo de especies fitopatógenas con nanomateriales microrganismos e insectos)

Gran parte de los sistemas actuales de agricultura presenta proliferación de fitopatógenos a causa de monocultivos, donde insectos, roedores, entre otras especies dominantes en el nuevo ecosistema, modifican la biodiversidad y/o son portadores de bacterias, hongos y virus que colonizan rápidamente plantíos de jitomate, fresa, vid, entre otros. También, frecuentemente se presenta la proliferación de hongos y bacterias en viveros con condiciones modificadas. Un estricto control de condiciones de crecimiento es desarrollado para controlar la contaminación afectando colateralmente los costos y calidad de los productos agrícolas.

Los nanomateriales presentan una alternativa con ventajas y desventajas en el control, dependiendo de la cantidad, el tiempo y la interacción del micrор-

ganismo con el nanomaterial, así como de los medios en que se desarrolla la propagación (Rodríguez-González *et al.*, 2020). La rizosfera de las plantas puede ser muy susceptible a la invasión de patógenos, es la principal fuente de nutrición de la planta, de hecho, la germinación y el crecimiento temprano son afectados frecuentemente. Los sistemas actuales de agricultura no pueden asegurar inocuidad, el agua de riego agrícola contiene residuos de la sobreertilización, biota, cuerpo de aguas contaminados con heces del ganado, atracción de roedores y lixiviación de químicos a los suelos, metales provenientes de mineras cercanas o micro plásticos y partículas emitidas por autos y el sector industrial. En la figura 7 se muestra una representación esquemática de las vías química y biología que pueden conferir contaminantes y material nanopartícululado a la planta (Rodríguez-González *et al.*, 2019) con el objetivo de identificar los puntos de infección y contaminación, que son áreas donde los nanomateriales podrían emplearse para controlar/mediar el sano crecimiento de los cultivos ya sea como biocida, biológica o ambas.

FIGURA 7. Esquema de la rizosfera del jitomate y la posible traslocación de contaminantes vía aire, agua y suelo.



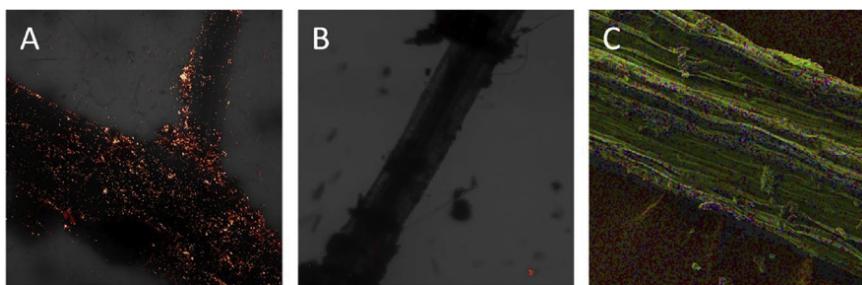
Fuente: Elaboración de los autores.

El efecto de nano-esferas de poliestireno funcionalizadas con grupos amina (PA-) y sulfato (PS+), así como el efecto de nanopartículas de TiO₂ al contacto con bacterias de la rizosfera de la planta de lechuga (*Lactuca sativa var. capiata*) fue reportado por Tohren *et al.* (2019). La germinación se desarrolló en suelo orgánico (Espoma, Miiville, NJ) en un tubo de centrífuga de 50 mL, las microscopías SEM-EDS y microscopía confocal fueron empleadas para entender las interacciones. La unidad formadora de colonias (UFC) fue determinada por conteos a 24, 48 y 72 horas en agar; así, la relación longitud de la rizosfera/UFC determinó que las partículas PA- y el TiO₂ inhiben el crecimiento de bacterias y de la longitud de la rizosfera, en tanto las partículas

PS+ favorecen el crecimiento de bacterias sin influencia notable en la dimensión de la rizosfera.

El tipo de bacterias estudiadas en la rizosfera de la lechuga no fue especificado, solo describen bacterias del suelo. La microscopía confocal muestra un recubrimiento en la superficie de los radiculares que puede ser la causa de inhibir el crecimiento de la rizosfera y del crecimiento de bacterias (figura 8). Los autores subrayan que los nanomateriales en el medio se aglomeran, lo cual previene o dificulta la traslocación de las NPs a la planta, pero también existe la posibilidad de acumulación en el medio y superficie de la rizosfera.

FIGURA 8. Imágenes de microscopía confocal-EDS para las raíces de la lechuga con: A: PA+; B: PS-, y C: TiO₂.

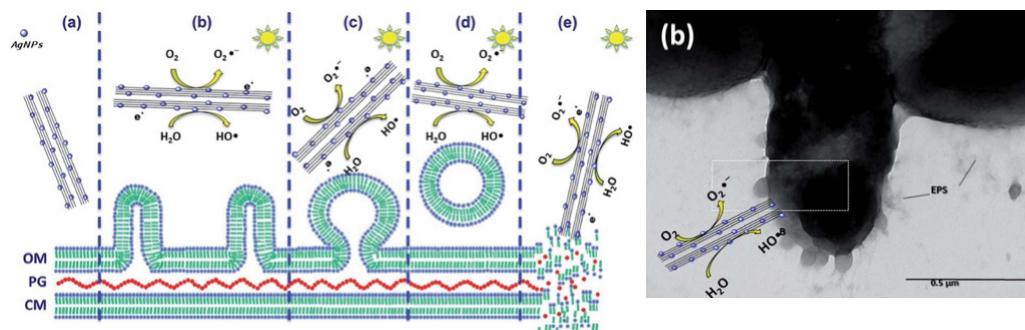


Fuente: Kibbey y Strevett (2019). Imagen reproducida con permiso de Elsevier.

También se estudia la morfología de los nanomateriales para entender su efecto al contacto con la pared de los fitopatógenos. Casas *et al.*, por ejemplo, emplearon materiales 1D funcionalizados con AgNPs de 4 nm en promedio. Se estudio la inactivación de la bacteria *P. syringae* (Casas-Flores *et al.*, 2019), la formación de ampollas y/o vesículas de la membrana externa (OMVs) es un mecanismo de resistencia de las células de *P. syringae* contra la lisis celular, conducente a la disrupción de la bacteria en 30 min. El mecanismo sinérgico de los nanotubos funcionalizados con 1%wt de AgNPs desafió los mecanismos de defensa de bacterias provocando la muerte celular rápida e irreversible del fitopatógeno, la morfología, fotoquímica y el poder bacteriostático de la plata parecen ser una herramienta promisoria para prevenir el desarrollo de resistencia bacteriana, como se esquematiza en la figura 9.

Por otra parte, se reporta cuáles insectos se alimentan de las plantas, y que además pueden infectar plantas como el haba (*Vicia faba*) o soya (*Glycine max*) (Thabet *et al.*, 2021). Para repeler o controlar los insectos, una concentración de 400 mg/L de NPs de SiO₂ redujo las poblaciones de *S. littoralis* larvae, leaf worm *Spodoptera littoralis* y *A. craccivora* que están directamente asociados como pestes y patógenos incluyendo escarabajos errantes; las NPs pueden actuar como pesticida contra insectos. Las NPs de SiO₂ fueron dispersadas en agua a diferentes concentraciones, y, posteriormente, las semi-

FIGURA 9. Etapas de la inactivación de la *P. syringie*.



(a) Antes del tratamiento; (b) fotogeneración de ROS con radiación visible generando (c) la formación de ampollas en la bacteria, y, (d) formación de vesículas (OMS) secretadas terminando en la disrupción del mecanismo de sobrevivencia y debilitamiento de la pared de la bacteria, como se observa en la imagen SEM de la *P. syringie*.

Fuente: Imágenes tomadas de Casas-Flores et al. (2019, open access).

llas fueron sumergidas en las suspensiones. La aplicación de SiO_2 no afectó el porcentaje, ni el tiempo de germinación, así como la longitud de los brotes y su vigor. La NPs SiO_2 comerciales tienen un diámetro de 19.6 nm en promedio, y probablemente se agregan a concentraciones altas de 400 mg/L, lo cual provocaría la obstrucción de aire y agua a través de la cubierta de la semilla. La aplicación de estas nanopartículas en concentraciones bajas de 50-75 mg/L puede controlar plagas de insectos y atraer depredadores en habas y soya, reduciendo los riesgos de inhibir el crecimiento de las plantas o disminuyendo de manera crítica las poblaciones de depredadores.

IV. Nanomateriales para el tratamiento, monitoreo de aguas y suelos contaminados

Entre los procesos de oxidación avanzada existentes, la fotocatálisis es uno que ofrece potencial para depurar aguas contaminadas por la agricultura o para adecuar su uso en agricultura empleando nanomateriales. Es en los cuerpos de agua donde, principalmente, se encuentran contaminantes como pesticidas, microrganismos provenientes de la composta y el estiércol del ganado, así como algunos residuos de sales y fertilizantes químicos.

La depuración del agua contaminada con 12 pesticidas fue evaluada en un reactor piloto solar (Kushniarou et al., 2019), empleando $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ como oxidante. La optimización de la depuración se ejecutó primeramente en un reactor de lote bajo radiación UVA-UVB y, más adelante, en un reactor piloto a las condiciones de radiación solar de Torreblanca, España. El monitoreo se llevó a cabo vía cromatografía líquida de alta resolución con espectrometría de masas HPLC-MS, parámetros como la interfaz MRM (*multiple reaction monitoring*), carbón orgánico disuelto (DOC) y luminiscencia producida por la

bacteria *Vibrio fischeri*. Los experimentos se llevaron a cabo a presión y temperatura ambiente, 200 mg/L de TiO₂ alcanzaron porcentajes de 90% de remoción en verano. Los herbicidas cypodrinil y cyproconazole mostraron porcentajes análogos tanto en verano como invierno. Un punto importante es que los materiales pueden recuperarse mediante una membrana de ultrafiltración, lo cual parece una alternativa para aplicarse en monocultivos reales. La pérdida de eficacia es atribuida a los subproductos generados y coadyunates en solución, estos son adsorbidos por photocatalizador reduciendo los sitios fotoactivos. Esta tecnología resulta factible para la remoción de pesticidas persistentes en aguas residuales agrícolas, a pesar de que la mineralización completa de los pesticidas no se alcanza, la ecotoxicidad a la bacteria *Vibrio fischeri* disminuye sustancialmente; mencionando así los autores que es posible regresar el agua a su ciclo normal.

Buscando una analogía con la biorremediación para transformar los pesticidas del suelo a especies menos tóxicas o llevar a su estado reducido en el caso de metales lixiviados en suelos agrícolas. Las interacciones de nanopartículas metálicas con los suelos se estudiaron a diferentes concentraciones; plata (nAg), óxido de zinc (nZnO), óxido de cobre (nCuO), y/o TiO₂ (nTiO₂). Estas nanopartículas sintéticas se suspendieron en un extracto acuoso de suelo agrícola (Asadishad *et al.*, 2018).

La actividad enzimática de los extractos de suelo fue monitoreada para evaluar la condición del suelo, en conjunto con la disolución de las nanopartículas en agua que se determinó por espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS). El estudio arroja que de acuerdo con la dosis (1, 10 o 100 mg/kg) de las partículas, estas pueden afectar los factores de fertilidad del suelo en 30 días de exposición. Con la mayor dosis, 100 mg/kg, el nTiO₂ no mostró efectos, no hay diferencia en la actividad enzimática. Efectos leves se observaron con nAg, nZnO, nCuO en la composición microbiana. El Cu es un micronutriente, de tal forma que puede aumentar la actividad enzimática. El nTiO₂ incrementa su tamaño hidrodinámico después de 30 días de exposición debido a la agregación, en general no hay una tendencia de agregación para los demás elementos. La incorporación de nanopartículas puede influenciar la composición microbiana, es decir, la fertilidad de los suelos, los cambios pueden ser positivos o negativos dependiendo la cantidad y el tipo, concentraciones bajas son más benéficas, concentraciones de 100 mg/kg pueden alterar medianamente la actividad enzimática de los suelos.

Por otra parte, la detección y monitoreo de compuestos nitro aromáticos en medio acuoso tales como nitro-fenoles y cationes metálicos fue reportada mediante el uso de estructuras metalorgánicas (MOF) funcionalizadas con moléculas fluorescentes (Liu *et al.*, 2023). La síntesis se realizó por el método solvotermal adicionando el ligante H₂PBBA (*rigid pyrazine-contained carboxylic acid*) antes del tratamiento solvotérmico. Estas MOFs poseen centros metálicos d¹⁰ y electrones conjugados pi que pueden emplearse para sensar aniones, cationes y compuestos nitrogenados. Muchos de los químicos em-

pleados en agricultura como pesticidas y fertilizantes industriales poseen nitrógeno en su estructura y son contaminantes de cuerpos de agua y suelos. Los MOFs basados en Cd²⁺ y Zn²⁺ comúnmente exhiben buenas propiedades fluorescentes debido a la transferencia de carga ligando-metal. Los materiales obtenidos fueron utilizados para sensar cationes Fe³⁺ alcanzando una eficiencia del 93% si se compara con otros cationes como el Cu²⁺, Cr³⁺, y Zn²⁺. En el caso de los nitrocompuestos en medio acuoso la detección es atribuida a absorción competitiva y la transferencia de energía de resonancia. De acuerdo con lo reportado los materiales de Zn-MOF obtenido por método solvoter-mical pueden monitorear diversos contaminantes como pesticidas herbicidas y metales en suelos contaminados.

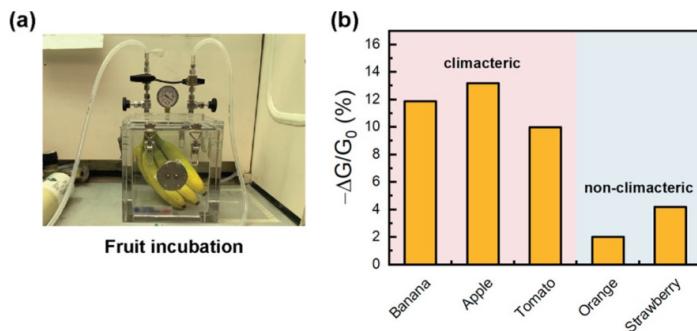
v. Empaques de alimentos a base de nanomateriales y distribución y protección de plantas

Normalmente, durante el proceso de empacado y distribución, diversos productos agrícolas suelen sufrir contaminación por hongos y bacterias que disminuyen su tiempo de vida y calidad. Diversas investigaciones han sido realizadas con el propósito de prolongar su vida de anaquel. Además, las enfermedades microbianas o plagas son más comunes debido al cultivo más cerrado entre plantas, haciendo el uso de pesticidas inevitable.

La maduración natural de frutas implica la emisión de moléculas, como el etileno, hidrógeno, y/o enzimas. Una propuesta reportada para sensar la producción de etileno en frutas como plátanos, manzanas, tomates, fresas y naranjas, es el uso de películas de nanocopos de disulfuro de molibdeno con nanotubos de carbono de una capa (MoS₂-SCNT) (Chen *et al.*, 2020). Esta preparación fue depositada sobre electrodos de plata impresos sobre tereftalato de polietileno flexible (PET). Finalmente, una capa semiconductora de complejos de cobre (Cu(I)-tris(mercaptoimidazol)borato) como se muestra en la figura 10. El monitoreo se efectuó mediante un dispositivo *bluetooth*, proporcionando independencia a la incubación de las frutas evaluadas. El sensor inalámbrico diseñado 2-MoS₂-SCNT registró las respuestas conductimétricas en función del tiempo a temperatura ambiente. La detección selectiva de etileno con una sensibilidad es 100 ppb tanto en frutos climatéricos como no climatéricos (figura 10), resultando en una alternativa práctica para monitorear frutas en condiciones de almacenaje, que podrían ser escalables comercialmente.

Por otra parte, el quitosano es un biopolímero que puede modificarse o combinarse con moléculas para emplearse como película de almacenaje de productos naturales, que podría emplearse para la prevención del crecimiento o colonización de microrganismos patógenos (Coronado-Partida *et al.*, 2023). El hongo *R. stolonifer* causa grandes pérdidas en el fruto conocido como yaca, enfermedad conocida como pudrición blanda. Una combinación de quitosano con benzoato de sodio logra inhibir el desarrollo de este hongo, el quitosano

FIGURA 10. (a) Arreglo experimental que permite hacer observaciones sobre el etileno monitoreado por diferentes frutas a temperatura ambiente empleando el sensor inalámbrico MoS₂-SCNT. (b) Gráfico de la respuesta conductimétrica de las diferentes frutas incubadas durante 8 horas.



Fuente: Imagen tomada de Chen et al. (2020). Con permiso de ACS.

solo disminuye el crecimiento micelar en un 48%, es decir, menos producción de esporas. La aplicación de benzoato en 2.0% muestra una inhibición del 98% del crecimiento micelar. Pero la combinación inhibió el desarrollo total del hongo en las pruebas *in vitro* realizadas. Por lo tanto, el empleo de nanomateriales de origen natural son una alternativa para inhibir el crecimiento de fitopatógenos y el sensado de los gases de descomposición producidos.

vi. Toxicología y evolución, riesgos ocupacionales de las nanoestructuras

El trabajar con productos agrícolas implica tener un control estricto con las cantidades mínimas de materiales bioinfecciosos y nanométricos, para prevenir que afecten al humano o que puedan bioacumularse provocando efectos que pongan en riesgo la salud humana al contacto, ingesta o en el futuro cercano por bioacumulación. La legislación actual aún está en desarrollo a nivel mundial y se nutre principalmente del marco riguroso que reglamenta todos los productos químicos y mezclas contenidos en el Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de Productos Químicos (CLP-REACH) del Observatorio de Nanomateriales de la Unión Europea (EUON) (European Chemicals Agency, 2023).

De manera análoga, la agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA) considera los nanomateriales como sustancias químicas para su regulación como se reporta en la Ley de Control de Sustancias Tóxicas (TSCA) y coopera con Canadá a través del Consejo de Cooperación Regulatoria Cánada-Estados Unidos, cuyo objetivo es mejorar la regulación en diversas áreas, incluida la nanotecnología (US Environmental Protection Agency, 2023). En Asia, Corea y Japón se ha adoptado una estrategia similar basándose en la Ley de Control de sustancias Venenosas y Perjudiciales del Instituto Nacional de Ciencias de la Salud de Japón (NIHS, 2023) desde el punto de vista de la salud e higiene.

La ley clasifica las sustancias primeramente como sustancias venenosas, listadas en una tabla al final del documento, indicando que no sean productos farmacéuticos o quasi-farmacéuticos. La ley, en su artículo 2, cita otra lista contenida en la tabla 2 para clasificar las sustancias perjudiciales, y, finalmente, enumera las sustancias venenosas específicas listadas en la tabla 3 de la ley. Dentro de las prohibiciones, el artículo 3 indica que ninguna persona puede dedicarse a la fabricación o venta de las sustancias referidas a menos que cuente con un registro específico para esas actividades. En artículos subsiguientes de la ley, se hacen constar los requisitos de la importación y debidos registros para estas actividades.

Tomando como guía la ley mencionada (Ley de Control de Sustancias Venenosas y Perjudiciales), se pueden otorgar regulaciones temporales a algunos de los diversos nanomateriales con miras a obtener una regulación adecuada, o bien para tener un diseño con base en las regulaciones, además se debe considerar que Asia es la región con el desarrollo más importante en microchips, alimentos instantáneos procesados y alimentos envasados en plásticos, por lo cual la legislación está en desarrollo constante.

La evolución de estos productos del sector agrícola y alimenticio, su efecto en la salud y su acumulación en el medio ambiente debe ser un tema de suma importancia y a tratarse con urgencia por las agencias reguladoras a nivel mundial y en las cumbres mundiales sobre regulaciones de nanomateriales y cambio climático.

En cooperación internacional, estas agencias están en contacto con la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) que buscan entender y reglamentar de manera completa las aplicaciones ambientales y agrícolas así como las implicaciones de los nanomateriales con la salud a nivel mundial.

En específico, la regulación de nanomateriales usados en agricultura está en proceso y se basa en lo que se ha establecido en nanomateriales y en estudios de algunos grupos de investigación y productos que se han tenido que caracterizar para saber su toxicidad y riesgo, en materiales como dióxido de titanio y dióxido de silicio que son los más estudiados en cuestiones de salud y aditivos en alimentos (Allan *et al.*, 2021). En Latinoamérica, Chile y México son los países que siguen las prerrogativas de la EPA como guía para establecer su legislación. La correcta legislación puede obtenerse si se tienen protocolos internacionales para trabajar, esto es, protocolos de síntesis y caracterización de nanomateriales reproducibles a nivel mundial y desarrollados *in situ* para obtener resultados reales (Rodríguez Gonález *et al.*, 2019). Sería recomendable también, considerar ecológicamente zonas adecuadas para el crecimiento natural de cultivos para un mejor cuidado del ambiente y disminución del cambio climático.

Características de los nanomateriales con potencial en agricultura sustentable

Las características de los nanomateriales que se buscan en agricultura son aquellos con una alta área superficial y con un valor mayor o igual a los 100 m² por gramo, que la porosidad de estos materiales sea mesoporosa con poros con un diámetro de poro de 5 nm, lo cual permitirá absorber y liberar sustancias biocidas y preferentemente con porosidad ordenada. La morfología resulta también importante, pues permite fluir el material si llegara a translocarse a la planta disminuyendo la bioacumulación. Una morfología esférica o quasi-esférica maximizaría el área superficial disponible con porosidad abierta, además de ofrecer una estabilidad mecánica importante.

Otras morfologías deberían evaluarse, su reacción al cuerpo, su posible retención en la planta o bien podrían emplearse como recubrimientos para evitar o disminuir la lixiviación. Materiales con características biocidas intrínsecas como el quitosano, alginatos, etc., con otra morfología, podrían incorporarse usando sustancias biocidas naturales o nanopartículas biocidas como la plata, cobre, entre otras convenientemente inmovilizadas, y cantidades abajo del 1% en peso de material total, para impedir su lixiviación y evitar la contaminación de los cultivos. Deben ser estables en medio acuosos a diferentes pH, de básico a ácido. Materiales de carbono que no son sintetizados fisicoquímicamente pudieran resultar buenos adsorbentes de contaminantes y mediar el crecimiento; sin embargo, no son de rápida degradación y los métodos de síntesis son a alta temperatura y con diversos remanentes metálicos que ponen en juicio su biocompatibilidad. En general, la mayoría los materiales sintetizados por métodos químicos o físicos difícilmente aseguran una biocompatibilidad apropiada y degradación en corto tiempo, además, son difícilmente escalables debido a los costos de fabricación.

Los materiales más adecuados para su aplicación en agricultura sustentable serían aquellos de comprobada biocompatibilidad, que sean biodegradables a corto tiempo y que puedan reusarse. Por biocompatibilidad debe considerarse la capacidad de un nanomaterial para desempeñar la función para la cual fue ideado en agricultura sustentable sin tener efecto indeseable prejudicial a la salud del cultivo o del consumidor, y preferentemente evitar las bioacumulaciones en alguna parte de la planta o tejidos del consumidor.

Los nanomateriales que no sean 100% biocompatibles podrían aplicarse como recubrimiento en sustratos biodegradables regulando su lixiviación y la biocompatibilidad del material empleado como sustrato; complementándose con un estudio de su evolución en función del tiempo y/o concentración y que pueda reutilizarse. Siempre es necesario considerar toda la reglamentación existente sobre sustancias y equipo para control, con características germicidas, pesticidas, fungicidas, etc., para uso hospitalario, doméstico e industrial, lo cual complementaría la reglamentación de nanomateriales con potencial para la agricultura sustentable.



Existen diversos artículos de revisión, principalmente publicados en los últimos 3 años, pero que no analizan todos los tipos de materiales biocompatibles estudiados; en general, no se discute claramente la viabilidad ecológica de los materiales propuestos, la biocompatibilidad, el tiempo de biodegradación y el posible escalamiento en la agricultura o distribución y conservación de los productos reales. Como se constató, el enfoque empleado está encaminado a una nueva era de la agricultura considerando la transición y/o conjunción de enormes monocultivos y viveros a fábricas de plantas verticales con control de plagas con nanomateriales que tengan el potencial de hacerlo con sustentabilidad. Es importante tomar en cuenta el cultivo a pequeña escala, viveros o fábricas de plantas verticales para una colonia, un fraccionamiento, una pequeña empresa, o hasta en el empleo de viveros caseros.

Finalmente, involucrar a los organismos gubernamentales encargados de regular y normar estos rubros y con participación de expertos en el área; para el caso de México, la encargada es la Secretaría de Salud a través de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (Cofepris) y el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario.

Conclusiones

Diferentes nanomateriales han sido estudiados, entre ellos el quitosano y materiales a base de carbono (fullerenos, nanotubos de carbono) silica-mesoporosa y sus compósitos, así como materiales de origen biológico como celulosa, quitosano, lípidos sólidos, hidrogeles y algunas sustancias orgánicas como el ácido poli glutámico y el alginato. La mayoría de las síntesis son a escala laboratorio y no todos los materiales fueron evaluados en términos de sanidad y toxicidad. Es decir, difícilmente pueden asegurar su sustentabilidad para aplicaciones de agricultura y comparados con resultados de otros grupos de investigación.

Los materiales que pueden emplearse para elaborar una legislación más de acuerdo con la realidad, son los materiales a base de sílice y a base de dióxido de titanio, que son los más estudiados y se encuentran en un estado del arte más amplio y también se pueden conformar en compósitos con otros materiales de origen natural. Varios materiales de SiO_2 , y TiO_2 ya se encuentran en uso como vehículos de fármacos, aditivos para alimentos, productos de belleza y en pinturas vinílicas.

Este tipo de aplicaciones de nanomateriales para agricultura es de carácter multidisciplinario por lo cual se requiere de la formación de nuevos especialistas con estudios en disciplinas de química y biología que les permitan abordar investigaciones en agricultura sustentable en estudios de posgrado, y así, más fácilmente entender y manejar técnicas de caracterización como HPLC-MS, rPCR, viabilidad celular, estudios de ADN, entre otros, enfocados en la caracterización y estudio de las interacciones y evolución de los nanoma-

teriales en las diversas plantas. Y, por ende, tener caracterizaciones más reproducibles y comparables a nivel internacional.

La regulación de estos materiales con aplicación a agricultura se está realizando con base en la experiencia de uso de nanomateriales en alimentos, en medicina, fármacos y productos para la salud e higiene personal. En las normas para la elaboración de alimentos procesados, y en las emisiones atmosféricas donde pueden encontrarse nanopartículas sintéticas en el aire. También debe contemplarse la experiencia de los agricultores que por décadas controlan insectos, hongos y bacterias con métodos tradicionales usando humos, preparados de plantas y otros preparados caseros.

La creación de un Centro especializado en estudios de nanomateriales que compagine la biología, la química y las técnicas de caracterización, y donde se establezcan protocolos a nivel internacional para la aplicación en la agricultura, sería una herramienta potencial que permitiría una legislación más *ad hoc* de estos materiales, así como el desarrollo de métodos específicos para su aplicación en agricultura y que puedan generar normas apropiadas.

Aunado a lo anterior, una educación ambiental de las sociedades actuales en manejo de desperdicios, consumo de alimentos procesados, empleo de pesticidas, la urbanización de zonas rurales, y el impacto que tienen estas actividades en los ecosistemas ayudará a entender y concientizar sobre el consumismo y desperdicio de productos agrícolas y en el uso excesivo de herbicidas.

En general, los nanomateriales ofrecen un amplio potencial para coadyuvar a una agricultura sustentable, todos los trabajos son valiosos para entender la ciencia de los nanomateriales y encaminarse a materiales de carácter biocompatibles y biodegradables.

Referencias

- Agency, US Environmental Protection (EPA). (2023). *Control of Nanoscale Materials under the Toxic Substances Control Act*.
- Aguilera-Granja, Faustino, Rodrigo H. Aguilera-del-Toro y Erik Díaz-Cervantes. (2022). Adsorption of selected molecules on $(\text{TiO}_2)_{20}$ nano-clusters: a density-functional-theory study. *Nanomanufacturing*, 2(3): 124-45, septiembre 1. <https://doi.org/10.3390/nanomanufacturing2030010>.
- Allan, Jacqueline, Susanne Belz, Arnd Hoeveler, Marta Hugas, Haruhiro Okuda, Anil Patri, Hubert Rauscher *et al.* (2021). Regulatory landscape of nanotechnology and nanoplastics from a global perspective. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 122: 104885, junio. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2021.104885>.
- Arumugam, Manikandan, Dinesh Babu Manikandan, Elayaraja Dhandapani, Arun Sridhar, Karthiyayini Balakrishnan, Manickavasagam Markandan y Thirumurugan Ramasamy. (2021). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) using Syzygium cumini: potential multifaceted applications on antioxidants, cytotoxic and as nanonutrient for the growth of *Sesamum indicum*. *Environmental Technology & Innovation*, 23: 101653, agosto. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101653>.

- Asadishad, Bahareh, Shawninder Chahal, Ali Akbari, Vanessa Cianciarelli, Mehrnoosh Azodi, Subhasis Ghoshal y Nathalie Tufenkji. (2018). Amendment of agricultural soil with metal nanoparticles: effects on soil enzyme activity and microbial community composition. *Environmental Science & Technology*, 52(4): 1908-18, febrero 20. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05389>.
- Casas-Flores, Sergio, Ruth B. Domínguez-Espíndola, Roberto Camposeco-Solis, Olga A. Patrón-Soberan y Vicente Rodríguez-González. (2019). Unraveling the photoactive annihilation mechanism of nanostructures as effective green tools for inhibiting the proliferation of the phytopathogenic bacterium *Pseudomonas syringae*. *Nanoscale Advances*, 1(6): 2258-67. <https://doi.org/10.1039/C8NA00307F>.
- Coronado-Partida, L., Patrón-Soberano, A., Rodríguez-González, V. et al. (2023). Antifungal potential of eco-friendly chitosan-sodium benzoate to inhibit the development of Rhizopus stolonifer isolated from jackfruit. *J Plant Dis Prot*, 130: 905-913. <https://doi.org/10.1007/s41348-023-00746-4>
- Chen, Winston Yenyu, Aiganyum Yermembetova, Benjamin M. Washer, Xiaofan Jiang, Shoumya Nandy Shuvo, Dimitrios Peroulis, Alexander Wei y Lia A. Stanciu. (2020). Selective detection of ethylene by MoS₂ – carbon nanotube networks coated with Cu(I)-pincer complexes. *ACS Sensors*, 5(6): 1699-1706, junio 26. <https://doi.org/10.1021/acssensors.0c00344>.
- Díaz-Cervantes, Erik, Cristal Zenteno-Zúñiga, Vicente Rodríguez-González y Faustino Aguilera-Granja. (2021). Design of ZnO-drug nanocarriers against the main protease of SARS-CoV-2 (COVID-19): an *in silico* assay. *Applied Nano*, 2(3): 257-66, septiembre 3. <https://doi.org/10.3390/applnano2030018>.
- Esquivel-Castro, Tzipatly A., Jorge Oliva, Vicente Rodríguez-González y Haret C. Rosu. (2023). Immobilized mesoporous materials for carvacrol delivery to the germination and early growth of tomato plants (*Solanum lycopersicum*). *Environmental Research*, 228: 115860, julio. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115860>.
- Espinosa Silva, Claudia V. (2015). *Síntesis de nanopartículas de SiO₂ como potenciales vehículos para administración de fármacos*. Tesis de maestría. División de Materiales Avanzados, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica.
- European Chemicals Agency. (2023). *Toxicidad*. Unión Europea.
- García-Tejada, Esthela-Paola, Faustino Aguilera-Granja, Ángel Albino-Flores, Adán Bazán-Jiménez y Erik Díaz-Cervantes. (2022). TiO₂ como nanoacarreadores de antibióticos (quinolonas): ensayo de acoplamiento molecular. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 15(29): 1e-18e, febrero 22. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2022.29.69703>.
- Kibbey, Tohren C. G., Keith A. Strevett. (2019). The effect of nanoparticles on soil and rhizosphere bacteria and plant growth in lettuce seedlings. *Chemosphere*, 221: 703-7, abril. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.091>.
- Kushniarou, Aliaksandr, Isabel Garrido, José Fenoll, Nuria Vela, Pilar Flores, Ginés Navarro, Pilar Hellín y Simón Navarro. (2019). Solar photocatalytic reclamation of agro-waste water polluted with twelve pesticides for agricultural reuse. *Chemosphere*, 214: 839-45, enero. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.180>.

- Liu, Wenhao, Junyi Qiao, Jiaming Gu y Yunling Liu. (2023). Hydrogen-bond-connected 2D Zn-LMOF with fluorescent sensing for inorganic pollutants and nitro aromatic explosives in the aqueous phase. *Inorganic Chemistry*, 62(3): 1272-78, enero 23. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.2c04155>.
- Lv, Xing, Mengting Yuan, Yuehong Pei, Changyun Liu, Xiangchuan Wang, Lei Wu, Daoquan Cheng, Xiaozhou Ma y Xianchao Sun. (2021). The enhancement of antiviral activity of chloroinconazole by aglycone-based nanogel and its plant growth promotion effect. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(17): 4992-5002, mayo 5. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c00941>.
- Machado, Thiago O., Sebastian J. Beckers, Jochen Fischer, Beate Müller, Claudia Sayer, Pedro H. H. de Araújo, Katharina Landfester y Frederik R. Wurm. (2020). Bio-based lignin nanocarriers loaded with fungicides as a versatile platform for drug delivery in plants. *Biomacromolecules*, 21(7): 2755-63, julio 13. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.0c00487>.
- Rodríguez-González, Vicente, Sergio Obregón, Olga A. Patrón-Soberano, Chiaki Terashima y Akira Fujishima. (2020). An approach to the photocatalytic mechanism in the TiO₂-nanomaterials microorganism interface for the control of infectious processes. *Applied Catalysis B: Environmental*, 270: 118853, agosto. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.118853>.
- Rodríguez-González, Vicente, Chiaki Terashima y Akira Fujishima. (2019). Applications of photocatalytic titanium dioxide-based nanomaterials in sustainable agriculture. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 40: 49-67, septiembre. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2019.06.001>.
- Science, Web of. (2023). *Citation report*.
- Sciences, National Institute of Health. (2023). *Poisonous and Deleterious Substances Control Law*.
- Thabet, Ahmed F., Hessien A. Boraei, Ola A. Galal, Magdy F. M. El-Samahy, Kareem M. Mousa, Yao Z. Zhang, Midori Tuda, Eman A. Helmy, Jian Wen y Tsubasa Nozaki. (2021). Silica nanoparticles as pesticide against insects of different feeding types and their non-target attraction of predators. *Scientific Reports*, 11(1): 14484, julio 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93518-9>.
- Wang, Ying, Chong Hyun Chang, Zhaoxia Ji, Dermont C. Bouchard, Roger M. Nisbet, Joshua P. Schimel, Jorge L. Gardea-Torresdey y Patricia A. Holden. (2017). Agglomeration determines effects of carbonaceous nanomaterials on soybean nodulation, dinitrogen fixation potential, and growth in soil. *ACS Nano*, 11(6): 5753-65, junio 27. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b01337>.