

The challenge of nanotechnology within the field of agricultural application: Nanofertilizers as emerging technology, a systematic review

Ana Henríquez-Alegría, Ing. ¹ [0000-0003-4094-3428], David Asmat-Campos, Dr. ^{2,*} [0000-0003-1144-1322]

¹ Universidad Privada del Norte, Facultad de Ingeniería, Carrera de Ingeniería Ambiental, Trujillo, Perú.

² Dirección de Investigación, Innovación y Responsabilidad Social, Universidad Privada del Norte, Campus Trujillo, Perú.

* david.asmat@upn.edu.pe, anace.ha20@gmail.com

Abstract– In recent years, the constant challenge of finding cost-effective and sustainable alternatives has become a difficult task for all researchers worldwide. While it is true, scientific advances have been rich within this branch of green chemistry; However, there are still methodologies to be improved. This systematic review was elaborated in relation to nanotechnology and its application in agricultural field as nanofertilizers; with the aim of contributing to the community, in terms of state of the art, with the latest scientific advances in the application of nanoparticles (NPs) as new emerging technologies, in favor of the phenological development of plants and/or crops. This research could be developed from the analysis of research articles, using the PRISMA methodology, with which it was possible to collect around 200 articles; of which, considering various inclusion and exclusion criteria, among the main ones, those articles published between 2019 and 2022, 50 indexed and Q1 articles were selected. Each of these were compiled into registration matrices, characteristics and categories; Thanks to this, it was determined that 48% were published in 2022; followed by 32% found in 2021, signaling that nanotechnology will continue to advance over the years. Similarly, various methods for improving agriculture were considered in the category matrix. Finally, it was determined that, although nanofertilizers as emerging technologies contribute a large percentage in the structural development of the phenological characteristics of the plant, there are side effects; So it is important to take into account background, in order to achieve the incorporation of this new green technology in agro-industrial development.

Keywords: *Nanofertilizers, emerging technologies, nanotoxicity, nanotechnologies, plant phenology.*

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

El desafío de la nanotecnología dentro del campo de aplicación agrícola: Nanofertilizantes como tecnología emergente. Una revisión.

Ana Henríquez-Alegría, Ing. ¹ [0000-0003-4094-3428], David Asmat-Campos, Dr. ^{2,*} [0000-0003-1144-1322]

¹ Universidad Privada del Norte, Facultad de Ingeniería, Carrera de Ingeniería Ambiental, Trujillo, Perú.

² Dirección de Investigación, Innovación y Responsabilidad Social, Universidad Privada del Norte, Campus Trujillo, Perú.

* david.asmat@upn.edu.pe, anace.ha20@gmail.com

Abstract– En los últimos años, el desafío constante de encontrar alternativas rentables y sostenibles se ha vuelto una tarea difícil para todos los investigadores a nivel mundial. Si bien es cierto, los avances científicos han sido ricos dentro de la esta rama de la química verde; sin embargo, aún existen metodologías por perfeccionar. La presente revisión sistemática se elaboró con relación a la nanotecnología y su aplicación en campo agrícola como nanofertilizantes; con el objetivo de aportar a la comunidad, en materia de estado del arte, con los últimos avances científicos de la aplicación de nanopartículas (NPs) como nuevas tecnologías emergentes, a favor del desarrollo fenológico de las plantas y/o cultivos. Esta investigación se pudo desarrollar a partir del análisis de artículos de investigación, empleando la metodología PRISMA, con la que se logró recolectar alrededor de 200 artículos; de los cuales, considerando diversos criterios de inclusión y exclusión, entre lo principal, aquellos artículos publicados entre los años 2019 y 2022, fueron seleccionados 50 artículos indexados y de Q1. Cada uno de estos, fueron recopilados en matrices de registro, características y categorías; gracias a ello se pudo determinar que 48% fueron publicados en el año 2022; seguidos de 32% encontrados en el año 2021, lo que señala que la nanotecnología seguirá avanzando a lo largo de los años. De igual forma, en la matriz de categoría se consideraron diversos métodos para la mejora de la agricultura. Finalmente se determinó que, si bien los nanofertilizantes como tecnologías emergentes aportan en gran porcentaje en el desarrollo estructural de las características fenológicas de la planta, existen efectos secundarios; por lo que es importante tener en cuenta antecedentes, para así lograr la incorporación de esta nueva tecnología verde en el desarrollo agroindustrial.

Keywords: *Nanofertilizers, emerging technologies, nanotoxicity, nanotechnologies, plant phenology.*

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

I. INTRODUCCIÓN

En el mundo entero, los recursos naturales siempre han cumplido un rol esencial, tanto para el desarrollo poblacional, como para el abastecimiento de necesidades humanas. Sin embargo, no se le ha dado la importancia ni el cuidado que cada uno de estos amerita [1]. Considerando el nivel de importancia y el papel crucial que este desempeña entre nosotros, el suelo es uno de nuestros recursos naturales más importantes; puesto que aporta en el crecimiento económico de diversos países alrededor del mundo; por ello, la preservación de su salud representa un gran desafío en el que estamos inmersos día a día, proporcionándole la prioridad que tanto requiere [2]. Debido al aumento de las actividades industriales y el mal manejo de sus residuos orgánicos e inorgánicos [3], los suelos se encuentran actualmente contaminados [4], con compuestos tanto inorgánicos (metales), como orgánicos (hidrocarburos, solventes, pesticidas) [5]. Esto se ha visto reflejado, especialmente, en los suelos agrícolas; provocando una baja productividad de los cultivos; y con ello, poca seguridad alimentaria [6]. Entre la clasificación de contaminantes ambientales más nocivos en la agricultura, los metales pesados tales como; Pb, Cr, Cd, Si, etc., presentes en fertilizantes químicos, pesticidas, plaguicidas, y otros químicos [5], empleados para el supuesto crecimiento y cuidado del cultivo, representan un peligro perjudicial e irreversible; puesto que pueden perturbar el equilibrio ecológico natural, debido a su poca biodegradabilidad y su alta toxicidad para la flora, fauna y seres humanos [2] [7].

Por otro lado, la seguridad alimentaria es un tema importante para el desarrollo sostenible y la salud humana [8]; por lo que es necesario cuidar todos y cada uno de los procesos de crecimiento y maduración de los cultivos [9] [10]. Las innovaciones basadas en nanotecnología ofrecen un potencial valioso y prometedor para revivir el sector agrícola de manera sostenible en medio de la actual crisis de contaminación y seguridad alimentaria [11]. En este momento, se estima que el 15% de todos los productos en el mercado global tienen alguna manipulación incorporada con nanotecnología, como nanopartículas [12], para su uso

agrícola, en donde se tiene una amplia gama de aplicaciones; otorgándole ventajas a la planta, como la absorción efectiva de macro/micronutrientes (nanofertilizantes) y una mejor permeabilidad de los compuestos activos en la lucha contra las plagas (nanopesticidas) [13] [14]. Asimismo, avances científicos han demostrado que la entrega de pesticidas y fertilizantes basada en estas biotecnologías podría reducir la huella ecológica de las actividades agrícolas, logrando aumentar la producción de cultivos mientras mejora la producción de plantas; y con ellos, los alimentos [15]. En todo el mundo, el 30 % de la tierra cultivable requiere fertilizante fosforado, esto debido a que el fósforo inorgánico se une al calcio [11]; así como también requiere de otras sustancias indispensables, como nitrógeno (30%) y potasio (40%). Dentro de la innovación biotecnológica en la industria agraria, se ha logrado sintetizar nanopartículas de diversos elementos y compuestos basados en metales; tales como Hierro (Fe NPs) [16] [17], Silicio (Si NPs) [18], Dióxido de Titanio (TiO₂ NPs) [19], Cobre (Cu NPs) [11] [20]; dentro de los cuales, se ha demostrado que las Si NPs ayudan a las plantas a resistir la toxicidad de metales tóxicos como el aluminio, el cobre, el manganeso, el zinc y el hierro [21] [22] [23] [24]; así como también, a reducir la pérdida de agua en la planta al polimerizarse, transformarse en Sílice amorfa y ser absorbida por la pared celular de los tejidos vasculares [18]. De igual manera, las Cu NPs son consideradas una de las más importantes por sus altas propiedades conductoras, ópticas, metálicas y catalíticas; por lo que, en la actualidad, son constantemente elaboradas [21] [25]. Por otra parte, las TiO₂ NPs aportan grandes beneficios en el desarrollo de la planta mediante la absorción de fertilizantes, ayudando a aumentar la biomasa vegetal, la actividad fotosintética, la absorción de nutrientes y reducir el estrés de los metales [26]; al igual que las Si NPs. Así también, se han descubierto compuestos mezclados una vez sintetizados; como, por ejemplo, la adición de TiO₂ NPs, ZnO NPs y CuO NPs, lo que aporta considerablemente en el crecimiento y el rendimiento de los cultivos, al confirmar que este logra estimular la fotosíntesis y la respiración de las plantas [27] [28] [29] [30]. Sin embargo, no todas estas aplicaciones son siempre favorecedoras para el suelo y/o cultivo, también existen aquellas que, por lo contrario, evitan el fortalecimiento; y con ello, la optimización de la planta, afectando el crecimiento de éstas. Este es el caso

de las Fe NPs; sin embargo, estudios señalan que la respuesta de la planta ante este nanofertilizante, depende directamente de los niveles de las NPs en los medios de cultivo, el tiempo de exposición y las especies de plantas [13] [14].

Con todo lo anteriormente mencionado y considerándose un tema de recientes investigaciones y de importancia global para su aplicación, se pretende responder mediante una detallada revisión sistemática a la interrogante de: ¿Cuál es el potencial de la nanotecnología dentro del campo de aplicación agrícola como nanobiofertilizantes? En tal sentido, el tema decantará en explicar los diversos beneficios brindados por esta nueva tecnología, con relación al cuidado y mejora en el crecimiento de los cultivos, a partir del análisis de artículos científicos de alto impacto y relevancia científica comprobada. La falta de importancia brindada a los temas inclinados al cuidado del suelo, agricultura sana e invención de nuevas tecnologías limpias y económicas, tanto a nivel nacional como mundial, es realmente alarmante; por ello, frente a este hecho, es sumamente importante, implementar con urgencia, estrategias y soluciones rentables y respetuosas con el medio ambiente, salvaguardando la salud alimentaria, y logrando proporcionar alimentos sanos y ricos en nutrientes a cada una de las personas.

II. METODOLOGÍA

Las bases de datos sobre las que se realizó la búsqueda para esta revisión sistemática fueron fuentes confiables y de gran trayectoria; aquellas que donde se encontró una amplia gama de información fiable acerca de la evolución de la nanotecnología en la ciencia, a lo largo de los años. Por ello, se consideró por selección revistas internacionales con artículos indexados en base de datos como Scopus y Web of Science (WoS); como, ScienceDirect, IOPScience, SAGE Journals, ACS Publications, Royal Society of Chemistry (RSC), Wiley, Applied Microbiology International, Wiley Analytical Science, British Society of Soil Science, The Institution of Engineering and Technology, y Taylor & Francis.

Para la búsqueda y selección de artículos empleados en esta revisión, la estrategia de búsqueda fue mediante las palabras claves: “Nanotechnology”, y “Nanofertilizer”, y frases como: “Nanoparticle biosynthesis”, “Application of nanoparticles in agricultural soil”, “Crop fertilization with nanoparticles”, “Nanofertilizers and nanopesticides”, “Application of nanoparticles for crop growth”, “Influence of nanoparticles on plant growth”, “Relationship of nanoparticles in plant optimization”, considerando el intervalo 2019 – 2022.

De esta manera, se logró recolectar un total de 200 documentos, con criterios de inclusión como; artículos de investigación netamente científico con diseño experimental o cuasi experimental, y revisiones sistemáticas, de lengua portuguesa, inglesa o española; las cuales analizan la relación entre las nanopartículas y la optimización de la planta. Así también, se tuvo en cuenta criterios de exclusión como aquellos artículos que no contaban con una o las dos variables de la revisión sistemática; asimismo, es importante señalar que se tuvo en cuenta aquellos estudios que cumplieran con el intervalo de tiempo establecido.

El procedimiento de selección se hizo a través de la búsqueda en las bases de datos, anteriormente mencionadas, en función de los términos de búsqueda principalmente el formato IMRD

Resultados y Discusión) y su indexación. De esta forma se logró localizar aquellos que inicialmente cumplían los criterios de inclusión. Posteriormente se leyeron a texto completo y se excluyeron aquellos que no cumplían todos los requisitos. Finalmente, se lograron seleccionar un total de 50 artículos; de los cuales, se extrajo la información empleando una matriz de recolección de datos, diseñada previamente, incluyendo; autor, título de la investigación, año, resumen, variables, y calidad del estudio, con el fin de facilitar la simplificación de su análisis.

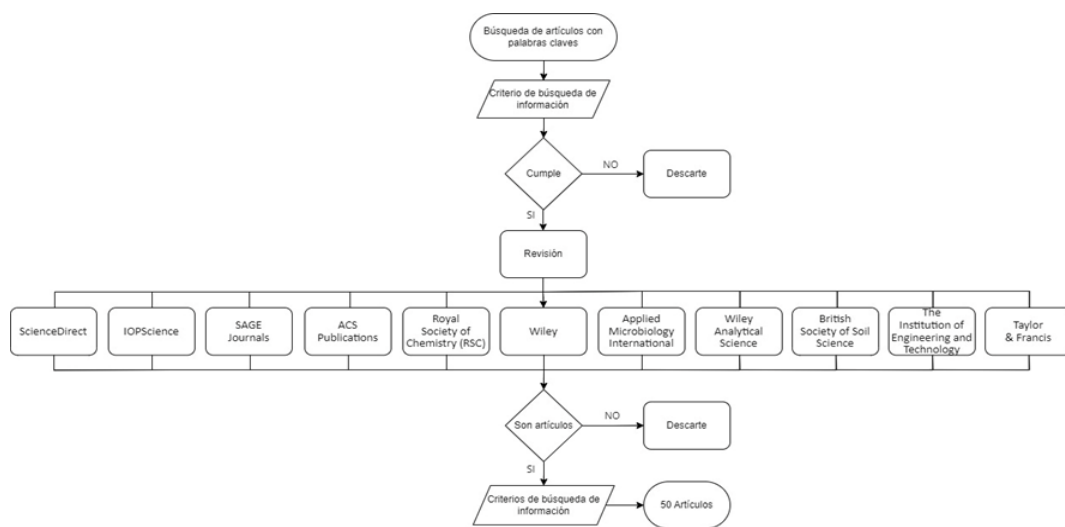


Figura 1. Diagrama de flujo para la selección de artículos científicos.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se logró obtener un total de 200 artículos científicos, mediante las bases ScienceDirect, Royal Society of Chemistry, Wiley, British Society of Soil Science, Multidisciplinary Digital Publishing, Taylor & Francis. Para revisión y selección de artículos, se tuvo en cuenta palabras clave en inglés; asimismo, se consideró un periodo de tiempo entre 2019 al 2022. Posteriormente, se seleccionó alrededor de 50 artículos; los cuales cumplían con los criterios de inclusión. De esta forma, se registraron cada uno de los artículos seleccionados, en la primera tabla presentada a continuación, donde se consideró información como; título, año de publicación, autor, y base de datos (Tabla 1). Así también, en la segunda tabla, se observa los artículos clasificados según el año de antigüedad, tipo de documento y revista de publicación; información que fue seleccionada considerando el método IMRD (Tabla 2). Finalmente, los artículos fueron clasificados en 5 categorías: Aplicación de NP en cultivos, respuesta del suelo ante la aplicación de NP, respuesta de la planta ante la aplicación de NP, aplicación de nanotecnologías en la nutrición del suelo y seguridad y sostenibilidad agrícola.

Tabla 1. Matriz de registro de artículos Científicos.

| N° | Base de Datos | Autor / Autores | Año | Título de Artículo |
|----|----------------|---|------|--|
| 1 | Science Direct | Eman A. Attia & Nevien Elhawaw | 2021 | La aplicación foliar y al suelo combinada de nanopartículas de sílice mejora el crecimiento, el período de floración y las características de la flor de la caléndula (<i>Tagetes erecta L.</i>). |
| 2 | Science Direct | S. Phziya Tariq Waani, Shagufta Irum, Iram Gul, Khurram Yaqoo, Muhammad Usman Khalid, Muhammad Arif Ali, Umair Manzoor, Tayyaba Noor Shafaqat Ali, Muhammad Rizwan & Muhammad Arshad | 2021 | La dosis de nanopartículas de TiO ₂ , el método de aplicación y los niveles de fósforo influyen en la genotoxicidad en el arroz. |
| 3 | Science Direct | Mansi bakshi & Arun Kumar | 2021 | Nanopartículas a base de cobre en el entorno suelo-planta: Evaluación de sus aplicaciones, interacciones, destino y toxicidad. |
| 4 | Science Direct | June Hidalgo, MikelAnza, Lur Epelde, José M.Becerril & Carlos Garbisu | 2022 | Nanopartículas de hierro de valencia cero y rizorremediación asistida por enmiendas orgánicas de suelos mixtos contaminados usando <i>Brassica napus</i> . |
| 5 | Science Direct | D. Bsravano, R. Forjan, N. Alvarez, Jr. Gallego & A. gonzalez | 2022 | Fitorremediación asistida por nanopartículas de hierro cerivalente y fertilizantes orgánicos en un suelo minero: Acumulación de arsénico y mercurio y efectos sobre el sistema antioxidante de <i>Medicago sativa L.</i> |
| 6 | Science Direct | Ved Prakash, José Peralta-Videa, Durgesh Kumar Tripathi & Xingmao Ma | 2021 | Conocimientos recientes sobre el impacto, el destino y el transporte de las nanopartículas de óxido de cerio en el continuo planta-suelo. |
| 7 | Science Direct | Qi Zhang, Peng Yuan, WeiyuLiang, Zhihuaqiao, Xue Chun Shao, Wei Zhang & Cheng peng | 2022 | El hierro exógeno altera la absorción y translocación de nanopartículas de CuO en el sistema suelo-arroz: Un estudio del ciclo de vida. |
| 8 | Science Direct | Sukanya Panikar, Ayyakannu Usha Raja Nanthini, Vidhya Rekha Umapatía, C. SumathiJones, Amitava | 2022 | Comparación morfológica, quimioperfil y análisis de suelo de <i>Corymbia citriodora</i> (Hook.) KD Hill y LAS Johnson junto con la síntesis verde de nanopartículas de óxido de hierro. |
| 9 | Science Direct | Mukherjee, Palanistami Prakash & Taimoor Hassan Farooq Fuad Amén. Khawla Alsamhary, Jamila A. Alabdullatif & Saleh ALNadhari | 2021 | Una revisión de las nanopartículas de base metálica y su toxicidad para las bacterias y hongos beneficiosos del suelo. |
| 10 | Science Direct | Sangeeta Chavan, Vishwas Sarangdhar & Nadanathanagam Vigneshwaran | 2022 | Análisis metagenómico basado en nanoporos del impacto de las nanopartículas en las comunidades microbianas del suelo. |
| 11 | Science Direct | Chaoyi Deng, Yi 4 esú, 4 esús M. Cantù, Carolina Valdés, Gilberto Navarro, Keni Cota-Ruiz, José Ángel Hernández-Viezcas, Chunqiang Li, Wade H. Elmer, Christian O. Dimkpa, Jason C Blanco & Jorge L. Gardea-Torresdey | 2022 | Exposición foliar y del suelo de la soja (<i>Glycine max</i>) a Cu: Respuestas de plantas dependientes del recubrimiento de nanopartículas. |
| 12 | Science Direct | Minxue Guo, Hong Tongb, Dongqing Cai, Wei Zhang, Pengyuan, Yihao Shen & Cheng Peng | 2022 | Efecto de los ciclos de humectación-secado sobre la biodisponibilidad de Cu en el suelo de arroz enmendado con nanopartículas de CuO. |
| 13 | Science Direct | Mohamed Usman, Muhammad Zia-ur - Rehman, Muhammad Rizwan, Tahir Abbas, Muhammad Ashar Ayub, Asif Naeem, Hesham F. Alhrby, Nadiyah M. Alabdallah, Basmah M. Alharbi, Muhammad Javid Qamar & Shafaqat Ali | 2022 | Efecto de la textura del suelo y las nanopartículas de óxido de zinc sobre el crecimiento y la acumulación de cadmio en el trigo: Un estudio del ciclo de vida. |
| 14 | Science Direct | Fu Chen, Arooj Bashir, Muhammad Zia ur Rehman, Muhammad Adreesc, Muhammad Farooq Qayyum, Jing Maa, Muhammad Rizwanc & Shafaqat Ali | 2022 | Efectos combinados de abono verde y nanopartículas de óxido de zinc sobre la absorción de cadmio por el trigo (<i>Triticum aestivum L.</i>). |
| 15 | Science Direct | Wenxiao Lv, Huanhuan geng, Beihai Zhou, Huilun Chenb, Rongfang Yuan, Chuan Xin Ma, Ruiping Liu, Baoshan Xing & FeiWang | 2022 | El mecanismo de comportamiento, transporte y regulación positiva de las nanopartículas de ZnO en un entorno planta-suelo-microbio. |
| 16 | Science Direct | Dun Chen, Zihan Li, Fuxun Ai, Yan Xia, Wenchao Du, Yin Ying & Hongyan Guoa | 2022 | Respuestas divergentes y riesgos ecológicos del trigo (<i>Triticum aestivum L.</i>) a las nanopartículas de óxido de cerio en diferentes tipos de suelo. |
| 17 | Science Direct | Sol Hongda, Wei Guo, Qianqian Zhou, Yafang Gong, Zhiyuan LV, QuanWang, Hui Mao & Peter M. Kopittke | 2022 | Absorción, transformación e impacto ambiental de nanopartículas de óxido de zinc en un sistema suelo-trigo. |
| 18 | Science Direct | Ekta Tiwari, Nisha Singh, Nitin Khandelwal, Zhaid Ahmad Ganie, Aniket Choudhari, Fazel Abdolapur Monikh & Gopala Krishna Darbhaa | 2022 | Impacto de los desechos nanoplasticos en la estabilidad y el transporte de nanopartículas de óxidos metálicos: papel de la química variable de la solución del suelo. |
| 19 | Science Direct | Hongda Sun, Qingqing Peng, Jiao Guo, Haoyue Zhang, Junrui Bai | 2022 | Efectos de la exposición a corto plazo del suelo a diferentes dosis de nanopartículas de ZnO sobre el medio ambiente del suelo y el crecimiento y la fijación de nitrógeno |

| | | | | | | | | | |
|----|---------------------------------|---|------|---|----|----------------------------|--|------|--|
| | | & Hui Mao | | de la alfalfa. | | | Mahmoud M El-Saber, Asmaa A Mahdi, Ahmed H. Hassan, Khaled Yehia Farroh & Ali Osman | | Efectos de las nanopartículas de magnetita en los procesos fisiológicos para aliviar el daño oxidativo inducido por la salinidad en el trigo. |
| 20 | Science Direct | Yutong XUE, Prashank MISHRA, Frieda EIVAZI & Zahra AFRASIABI | 2022 | Efectos del tamaño, la concentración y el recubrimiento de las nanopartículas de plata en la calidad del suelo según lo indicado por las actividades de arilsulfatasa y sulfito oxidasa. | 32 | Wiley | | 2021 | |
| 21 | Science Direct | Ali Seiphoori & Mostafa Zamanian | 2022 | Mejora del comportamiento mecánico de suelos colapsables mediante la inyección de nanopartículas de arcilla. | 33 | Science Direct | | 2019 | Respuestas de plantas de trigo (<i>Triticum aestivum</i>) cultivadas en un suelo contaminado con Cd a la aplicación de nanopartículas de óxido de hierro. |
| 22 | Science Direct | Andrés Pinto-Poblete, Jorge Retamal Salgado, Nelson Zapata, Ángela Sierra-Almeida & Mauricio Schoebitz | 2022 | Impacto de los microplásticos de polietileno y las nanopartículas de cobre: Respuestas de las propiedades microbiológicas del suelo y el crecimiento de la fresa. | | | Afzal Hussain, Shafaqat Ali, Muhammad Rizwan, Muhammad Zia Rehmanb, Farooq Qayyumc, Hailong Wang & Jörg Rinklebe | | |
| 23 | Science Direct | Xiaoping Xin, Jaya Nepal, Alan I Wright, Xiaoe Yang & Zhenli Hea | 2022 | Las nanopartículas de carbono mejoran el crecimiento del maíz (<i>Zea mays L.</i>) y la calidad del suelo: Comparación de la aplicación de rociado foliar y suelo. | 34 | Science Direct | | 2020 | Mitigación simultánea del estrés por cadmio y sequía en trigo mediante la aplicación al suelo de nanopartículas de hierro. |
| 24 | Royal Society of Chemistry | Devin A. Rippner, Andrew J. Margenot, C. Fakra, L. Andrea Aguilera, Chongyang Li, Jaeun Sohg, Katherine A. Dynarski, Hannah Waterhouse, Natalie McElroy, Jordon Wade, Sarah R. Hind, Peter G.Green, Derek Peak, Andrew J. McElrone, Ning Chen, Renfei Feng, Kate M. Scow & Sanjai J. Parikh | 2021 | La respuesta microbiana a las nanopartículas de óxido de cobre en los suelos está controlada por el uso de la tierra más que por el destino del cobre. | 35 | Wiley | | 2021 | Nanofósforo de infrarrojo cercano integrado en nanopartículas de sílice mesoporosas con alta eficiencia de captación de luz para la mejora del fotosistema dual. |
| 25 | Royal Society of Chemistry | Ting Wu, Yangzhi Liu, Kun Yang, Lizhong Zhu, Jason C. White & Daohui Lin | 2021 | Remediación sinérgica de suelos contaminados con PCB con nanopartículas de hierro de valencia cero y alfalfa: Cambios específicos en la comunidad microbiana dependiente de metabolitos de la raíz. | 37 | ACS Publications | | 2020 | Nano-Biotecnología en Agricultura: Uso de Nanomateriales para Promover el crecimiento de las plantas y la tolerancia al estrés. |
| 26 | Royal Society of Chemistry | Jie Hong, Chao Wang, Dane C. Wagner, Jorge L. Gardea Torresdey, Feng He & Cyren M. Rico | 2021 | Aplicación foliar de nanopartículas: Mecanismos de absorción, transferencia y múltiples impactos. | 38 | Royal Society of Chemistry | | 2022 | Interacción de nanopartículas de base metálica con el microambiente de la rizosfera vegetal: implicaciones para la nanoseguridad y la agricultura sostenible nanohabilitada. |
| 27 | Royal Society of Chemistry | Harpreet Singha, Archita Sharmaa, Sanjeev K. Bhardwajb, Shailendra Kumar Aryaa, Neha Bhardwaj & Madhu Khatr | 2021 | Avances recientes en las aplicaciones de los nanoagroquímicos para el desarrollo agrícola sostenible. | 39 | Royal Society of Chemistry | | 2022 | Nanopartículas de óxido de metal biosintetizadas para la agricultura sostenible: Nanotecnología de última generación para la producción, protección y gestión de cultivos. |
| 28 | British Society of Soil Science | Xiaopeng Chen, Manli Duan, Beibei Zhou & Lei Cui | 2021 | Efectos de las nanopartículas de biocarbón como enmienda del suelo sobre la estructura y las características hidráulicas de un suelo franco arenoso. | 40 | Royal Society of Chemistry | | 2020 | La adición de nanopartículas de grafito a los fertilizantes reduce la lixiviación de nitratos en el crecimiento de la lechuga (<i>Lactuca sativa</i>). |
| 29 | Wiley | Milena Pelegrino, Joana C Pieretti, Camila Neves Lange, Marcio Yukihiro Kohatsu, Bruna Moreira Freire, Bruno Lemos Batista, Paola Fincheira, Gonzalo R Tortella, Olga Rubilar & Amedea B Seabra | 2021 | La aplicación de aspersión foliar de nanopartículas de CuO (NP) y S-nitrosoglutatión mejora la productividad y los parámetros fisiológicos y bioquímicos de las plantas de lechuga. | 41 | Wiley | | 2020 | Efecto de las nanopartículas de ingeniería en la biota del suelo: ¿Mejoran la calidad del suelo y la producción de cultivos o las ponen en peligro? |
| 30 | Wiley | Sen Li, Juan Liu, Yibo Wang, Yang Gao, Zhipeng Zhang, Jin Xu & Guoming Xing | 2021 | Los análisis fisiológicos y metabólicos comparativos revelaron que la aspersión foliar con óxido de zinc y nanopartículas de sílice modula los perfiles de metabolitos en pepino (<i>Cucumis sativus L.</i>). | 42 | Wiley | | 2020 | Hacia una viticultura más sostenible: aplicación foliar de nanopartículas de fosfato cálcico dopadas con N en uva Tempranillo. |
| 31 | Wiley | Mateo A. Campea, Michael J. Majcher, Andrew Lofts & Todd Hoare | 2021 | Una revisión de los métodos de diseño y fabricación de hidrogeles en red de nanopartículas para aplicaciones biomédicas, ambientales e industriales. | | | | | |

y la fisiología de la planta, sino que también mejoró las características de la flor y el período de floración; brindándole mejora en relación planta-agua, la absorción de nutrientes, el alargamiento de las células, los pigmentos fotosintéticos y capacidad antioxidante [36]. La aplicación de ZnONP disminuye significativamente el cadmio (Cd) biodisponible en los suelos, lo que conduce a la disminución de las concentraciones de Cd en los tejidos del trigo, esto depende de las tasas de aplicación de ZnONPs y la proporción de suelo separado. En general, las tasas más altas de ZnONP (300 mg/kg) aumentaron predominantemente las concentraciones de Zn (317,5 %, 380,4 %, 212,9 % y 221,4 %) y disminuyeron las concentraciones de Cd en la planta (82,6 %, 77 % y 71 %) [37]. Los residuos de berseem y maíces aplicados como abono verde junto con el tratamiento foliar de ZnONP condujeron a un aumento en los atributos de rendimiento y biomasa del trigo; aumentando el contenido de clorofila y las actividades enzimáticas antioxidantes de las hojas. Asimismo, se ayuda a disminuir en el Cd disponible en el suelo y en los tejidos de trigo, especialmente en los granos donde las concentraciones de Cd estaban por debajo de rango seguro (0,2 mg/kg) [38].

La biomasa de alfalfa es inversamente proporcional a la concentración de exposición de ZnO NP. Una alta concentración de ZnO NP disminuye el área de fijación de nitrógeno de los nódulos de la raíz, afectando la capacidad de fijación de nitrógeno de la alfalfa; por otro lado, una dosis alta de NP de ZnO disminuye la abundancia relativa y la diversidad de los microorganismos del suelo. En síntesis, la exposición a dosis altas y a corto plazo de NP de ZnO causan múltiples toxicidades en las plantas y el suelo [39]. Las nanopartículas de Cu al ser aplicadas aumentan la biomasa seca de la raíz y el volumen de la raíz en comparación del tratamiento con MPs (microplásticos); sin embargo, la presencia de nanopartículas de Cu combinadas con MPs de polietileno favorecen la biodisponibilidad de Cu en el suelo y raíces de plantas de fresa cultivadas. Aun así, la adición de MPs, nanopartículas de Cu y MPs de Cu⁺ resultó en una disminución en la altura de la planta, el diámetro del tallo y el número de florescencias; así como también, el número total de frutos, el peso del fruto y la deshidrogenasa, debido a la bioacumulación de nanopartículas o iones Cu [40].

c) Categoría respuesta de la planta ante la aplicación de NP: Aportes

Algunas nanopartículas metálicas se adsorben en la superficie de la célula microbiana o se internalizan en células/micelio bacteriano y fúngico, dañando el funcionamiento normal de la célula; por lo que los productos de nanotecnología agrícola también deben diseñarse para aplicaciones específicas [41]. La pulverización foliar de NP es muy eficaz para proporcionar nanofertilizantes, las NP rociadas foliarmente pueden ingresar a las hojas a través de las estomas, la endocitosis y la absorción directa. El tamaño de las partículas juega un papel fundamental en la absorción de las hojas; puesto que las ceras y la pared celular pueden dificultar

la absorción de las NP y, una vez absorbidas, la mayoría de las NP se acumulan en las vacuolas; sin embargo, esta aplicación se puede ver afectada por condiciones ambientales [42]. La aplicación foliar de CuO NP a 300 mg/L y CuO-CA NP a 75 mg/L aumenta el rendimiento de soja en un 169,5 % y un 170,1 %, respectivamente; asimismo, las NP de CuO-CA a 300 mg/L reducen la concentración de Cu en las semillas en un 46,7 %, en comparación con el control, y en un 44,7 %, en comparación con la concentración equivalente de NP de CuO [43]. La aspersión foliar de NP de CuO sintetizados con té verde, aumentan las tasas de liberación de NO de GSNO, CuO NP, GSNO y CuO NP + GSNO, al ser roseadas sobre las hojas de lechuga, agrandando el nivel nutricional de K, Na, Ca, Mg, S y Cu en la planta. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los parámetros fisiológicos, las enzimas y moléculas antioxidantes, pueden verse afectadas debido al estrés del metal [44]. La pulverización foliar con ZnONP y SiO₂-NP mejora el rendimiento de la planta de pepino, aumentando el contenido de clorofila, los parámetros de fluorescencia de la clorofila y los pesos fresco/seco de hojas y raíces. Así también, la aplicación de estos NP ayuda a regular el alza o a la baja el contenido de aminoácidos, ácidos orgánicos, azúcares, glucósidos y metabolitos; concluyendo así que ambas NP afectan tanto al metabolismo primario como al secundario, lo que implica que estos regulan potencialmente la resistencia al estrés en las plantas [33].

d) Categoría estabilidad y eficiencia de las NP: Aportes

La presencia de partículas de plástico de tamaño nanométrico afecta significativamente la estabilidad y el comportamiento de sedimentación de las NP de CuO 7 varían significativamente en presencia de NPD (desecho de nanopartícula). El k_{sed} para CuO NPs disminuyó a la mitad y encontró $<0.25 \text{ h}^{-1}$ en presencia de NPDs en todos los SS.C / C_0 los valores en las curvas de avance aumentaron drásticamente (negro < aluvial < laterita < rojo). Por otro lado, en ausencia de NPD, la estabilidad y movilidad de CuO NP se rigen principalmente por IS, DOM y tipos de especies iónicas presentes en el sistema [45]. El extracto de *C. sativum* posee propiedades reductoras de la sal metálica de zinc y la formación de nanoestructuras, lo que permite una excelente biocompatibilidad como nanofertilizantes. En tal sentido, la aplicación de NPs de ZnO, en el tratamiento de semillas de *L. esculentum*, son ideales en una concentración cercanas a 100 ppm de las NPs, demostrando una excelente promoción de la actividad enzimática y metabólica para lograr alargamiento [46].

La aplicación de bio-Mn NPs a $100 \mu\text{g mL}^{-1}$ aumenta el manganeso en raíces/brotos de sandía, mejorando el rendimiento y crecimiento mediante la mejora de múltiples procesos fisiológicos, incluida la capacidad antioxidante. Por otro lado, los bio-Mn NP a $100 \mu\text{g mL}^{-1}$ evitan el marchitamiento por Fusarium mediante la inhibición de la colonización y el crecimiento invasivo de Fon en raíces/tallos

de sandía, e inhiben el crecimiento vegetativo, la conidiación, la morfología conidial y la integridad celular de *Fon*, gracias al mecanismo ex planta e in planta [23].

e) **Categoría fitotoxicidad de NP en el suelo: Aportes**

Las NPs de ceria cuentan con la posibilidad de inducir una fitotoxicidad en concentraciones bajas de hasta 0,1 ppm en microvegetales de rábano Daikon en condiciones hidropónicas. Asimismo, puede provocar una acumulación correlacionada estadísticamente con el crecimiento atrofiado de las raíces de las plantas y el crecimiento lento de los tallos de estas, demostrando diferencias significativas en la biodisponibilidad de macrominerales y microminerales en el periodo de crecimiento (día 12) [47]. Las AgNP y los iones Ag difieren en sus efectos sobre las actividades de la arilsulfatasa y el sulfito oxidasa, afectando las actividades enzimáticas principalmente por la concentración de AgNP (1, 10 y 100 mg Ag kg⁻¹ de suelo) y la duración de la exposición (30 días); por lo que se reconoce que el tiempo de exposición desempeña un papel mucho más importante que el tipo de recubrimiento y el tamaño de partícula en los efectos de las AgNP en las actividades de las enzimas del suelo [48].

f) **Categoría respuesta del suelo y/o planta frente a la combinación de NP y otras remediaciones: Aportes**

La combinación de los tres tratamientos (rizorremediación con *B. napus*, nanorremediación con nZVI, bioestimulación con enmiendas orgánicas) condujo a valores significativamente más altos de biomasa microbiana del suelo, actividad y biodiversidad, lo que resultó en una mejora en la salud del suelo [2]. La aplicación de nZVI y fertilizantes orgánicos para la remediación de suelos promovió un aumento de la biomasa vegetal, debido a una disminución en la disponibilidad de As y Hg en el suelo. Con respecto al sistema antioxidante de *Medicago sativa*, el estrés oxidativo en hojas y raíces también se vio disminuido en respuesta a nZVI, como lo refleja el bajo contenido de H_2O_2 y MDA, y el alto contenido de prolina, principalmente en raíces [49]. Se ha podido evidenciar que el 88% de artículos son netamente investigaciones científicas; a diferencia de aquellas investigaciones inclinadas a la revisión sistemática y/o estado del arte. Esto, demuestra que la nanotecnología en el campo de aplicación agrícola es de interés científico en constante actualización y crecimiento. Por otro lado, se observa que los años con mayor cantidad de artículos publicados fueron; el año 2022 con un total de 24 publicaciones, seguida del año 2021 con 16, y por último los años 2020 y 2019 con un total de 6 y 4 artículos indexados. Asimismo, el repositorio con más información recolectada fue ScienceDirect, con un 50% del total de artículos seleccionados; demostrando así que el mayor porcentaje de artículos fueron recopilados de una base confiable y de gran veracidad, demostrando que esta base de datos cuenta con una calidad inigualable, en materia de

investigación, al contar con un gran porcentaje de artículos indexados y de Q1, revisados previamente por expertos. Posteriormente, se encontró el mayor número de revisiones en la categoría de respuesta del suelo y/o planta ante la aplicación de NP como nanofertilizante; seguida de la categoría aplicación de NP en cultivos, según el tipo de suelo y la categoría de respuesta de la planta ante la aplicación de NP, demostrando la gran similitud ante el interés científico de estos hallazgos. Así también, en la categoría estabilidad y eficiencia de las NP, solo se hallaron investigaciones publicadas en el 2022; a diferencia de la categoría fitotoxicidad de NP en el suelo y la categoría de respuesta del suelo y/o planta frente a la combinación de NP y otras remediaciones; todos los artículos empleados en esta investigación, provienen de países como Egipto, Pakistán, España, EE.UU, China, Australia, Brasil, Chile y Perú, lo que confirma que el tema de las nuevas biotecnologías aplicadas en beneficio de cultivo y/o plantas, es de interés de investigadores a nivel mundial. Asimismo, es importante señalar que, para la elaboración de esta revisión sistemática, se consideró solo publicaciones de clasificación Q1 indexadas en revistas prestigiosas de carácter internacional; con el fin de garantizar una veracidad en la toma de datos de cada investigación hallada. Finalmente, con los aportes obtenidos se puede afirmar que la aplicación de nanopartículas dentro del campo de la agricultura es considerada un método prometedor y con gran potencial científico, para lograr la seguridad en el área agrícola y agroalimentaria.

IV. CONCLUSIONES

Esta revisión sistemática demuestra que el desafío de la nanotecnología dentro del campo de aplicación agrícola es constantemente un reto para los investigadores; sobre todo porque aún existe un vacío en cuanto al control de la nanotoxicidad presente en la mayoría de las investigaciones. Si bien los nanofertilizantes como tecnologías emergentes aportan en gran porcentaje al desarrollo estructural de las características fenológicas de la planta, en cuanto a su crecimiento y mejora, existen efectos secundarios; tanto en la planta, como en el suelo, perjudicando a gran escala; no solo el sistema agroecológico, las propiedades texturales, nutritivas y sensoriales de los cultivos y alimentos; sino también el impacto sobre la salud humana ocasionada indirectamente. Por esta razón, es importante tener en cuenta antecedentes verídicos de investigaciones pasadas, con el fin de encontrar las concentraciones adecuadas para cada una de las aplicaciones foliares, mejorando las metodologías; y con ello, lograr la incorporación de esta nueva tecnología verde en el desarrollo agroindustrial.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a la Dirección de Investigación, Innovación & Responsabilidad Social (DIIRS) de la Universidad Privada del Norte por su apoyo y gestión.

REFERENCIAS

- [1] A. H. da Silva Júnior, J. Mulinari, P. V. de Oliveira, C. R. S. de Oliveira, and F. W. Reichert Júnior, "Impacts of metallic nanoparticles application on the agricultural soils microbiota," *Journal of Hazardous Materials Advances*, vol. 7, p. 100103, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.HAZADV.2022.100103.
- [2] J. Hidalgo, M. Anza, L. Epelde, J. M. Becerril, and C. Garbisu, "Zero-valent iron nanoparticles and organic amendment assisted rhizoremediation of mixed contaminated soil using Brassica napus," *Environ Technol Innov*, vol. 28, p. 102621, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.ETI.2022.102621.
- [3] E. A. Boom and R. Peñabaena, "Opportunities and challenges for the waste management in emerging and frontier countries through industrial symbiosis," *J Clean Prod*, vol. 363, p. 132607, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.132607.
- [4] S. Liu, R. Yuan, X. Wang, and Z. Yan, "Soil tungsten contamination and health risk assessment of an abandoned tungsten mine site," *Science of The Total Environment*, vol. 852, p. 158461, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2022.158461.
- [5] I. O. Adisa *et al.*, "Recent advances in nano-enabled fertilizers and pesticides: a critical review of mechanisms of action," *Environ Sci Nano*, vol. 6, no. 7, pp. 2002–2030, May 2019, doi: 10.1039/C9EN00265K.
- [6] P. Zhang, Z. Guo, Z. Zhang, H. Fu, J. C. White, and I. Lynch, "Nanomaterial Transformation in the Soil-Plant System: Implications for Food Safety and Application in Agriculture," *Small*, vol. 16, no. 21, p. 2000705, May 2020, doi: 10.1002/SMLL.202000705.
- [7] M. Adrees *et al.*, "Simultaneous mitigation of cadmium and drought stress in wheat by soil application of iron nanoparticles," *Chemosphere*, vol. 238, p. 124681, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2019.124681.
- [8] F. N. Maluin, M. Z. Hussein, A. Wayayok, N. nor L. Nik Ibrahim, and N. Hashim, "Chitosan nanoparticles as a sustainable alternative nutrient formulation in hydroponically grown Brassica rapa subsp. chinensis (L.) Hanelt microgreen and its adult vegetable," <https://doi.org/10.1080/03650340.2022.2155952>, 2022, doi: 10.1080/03650340.2022.2155952.
- [9] H. Pérez, F. Fernández, E. Huerta, J. Mendoza, and D. Álvarez, "Effect of engineered nanoparticles on soil biota: Do they improve the soil quality and crop production or jeopardize them?," *Land Degrad Dev*, vol. 31, no. 16, pp. 2213–2230, Oct. 2020, doi: 10.1002/LDR.3595.
- [10] D. Maity, U. Gupta, and S. Saha, "Biosynthesized metal oxide nanoparticles for sustainable agriculture: next-generation nanotechnology for crop production, protection and management," *Nanoscale*, vol. 14, no. 38, pp. 13950–13989, Oct. 2022, doi: 10.1039/D2NR03944C.
- [11] M. Bakshi and A. Kumar, "Copper-based nanoparticles in the soil-plant environment: Assessing their applications, interactions, fate and toxicity," *Chemosphere*, vol. 281, p. 130940, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.130940.
- [12] A. Hussain *et al.*, "Responses of wheat (*Triticum aestivum*) plants grown in a Cd contaminated soil to the application of iron oxide nanoparticles," *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 173, pp. 156–164, May 2019, doi: 10.1016/J.ECOENV.2019.01.118.
- [13] C. O. Dimkpa *et al.*, "Synthesis and characterization of novel dual-capped Zn-urea nanofertilizers and application in nutrient delivery in wheat," *Environmental Science: Advances*, vol. 1, no. 1, pp. 47–58, Mar. 2022, doi: 10.1039/D1VA00016K.
- [14] K. Parveen, N. Kumar, D. Sharma, and L. Ledwani, "Evaluation of Efficacy of 'Cassia renigera' Leaf Extract Mediated ZnO Nanoparticles as Nano Fertilizer for Cauliflower Plant," *ChemistrySelect*, vol. 7, no. 23, p. e202200367, Jun. 2022, doi: 10.1002/SLCT.202200367.
- [15] L. Zhao *et al.*, "Nano-Biotechnology in Agriculture: Use of Nanomaterials to Promote Plant Growth and Stress Tolerance," *J Agric Food Chem*, vol. 68, no. 7, pp. 1935–1947, Feb. 2020, doi: 10.1021/ACS.JAFC.9B06615/ASSET/IMAGES/MEDIUM/JF9B06615_0004.GIF.
- [16] N. Thi, N. N. Son, V. H. Phuong, C. T. Dung, P. T. M. Huong, and L. T. Son, "Synthesis Fe₃O₄/Talc nanocomposite by coprecipitation-ultrasonication method and advances in hexavalent chromium removal from aqueous solution," *Adsorption Science and Technology*, vol. 38, no. 9–10, pp. 483–501, Dec. 2020, doi: 10.1177/0263617420969112/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_0263617420969112-FIG2.JPEG.
- [17] J. Le, M. C. Law, Y. S. Chan, S. Y. Choy, and A. N. T. Tiong, "The Potential of Fe-Based Magnetic Nanomaterials for the Agriculture Sector," *ChemistrySelect*, vol. 7, no. 17, p. e202104603, May 2022, doi: 10.1002/SLCT.202104603.
- [18] D. Pan *et al.*, "Foliar application of silica nanoparticles alleviates arsenic accumulation in rice grain: co-localization of silicon and arsenic in nodes," *Environ Sci Nano*, vol. 9, no. 4, pp. 1271–1281, Apr. 2022, doi: 10.1039/D1EN01132D.
- [19] A. Daryabeigi, A. M. Tabrizi, and A. V. Heir, "Co-application of biochar and titanium dioxide nanoparticles to promote remediation of antimony from soil by Sorghum bicolor: metal uptake and plant response," *Heliyon*, vol. 6, no. 8, p. e04669, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.HELIYON.2020.E04669.
- [20] S. V. Lebedev and I. A. Vershinina, "Study of the effect of nanoparticles Cu, Zn and Mo on vermiculture to create new technologies for bioremediation of contaminated soils," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 624, no. 1, p. 012209, Jan. 2021, doi: 10.1088/1755-1315/624/1/012209.
- [21] F. Ahmed, B. Javed, A. Razzaq, and Z. U. R. Mashwani, "Applications of copper and silver nanoparticles on wheat plants to induce drought tolerance and increase yield," *IET Nanobiotechnol*, vol. 15, no. 1, pp. 68–78, Feb. 2021, doi: 10.1049/NBT2.12002.
- [22] O. Fedorova, T. Grodetskaya, N. Evtushenko, P. Evlakov, A. Gusev, and O. Zakharova, "The impact of copper oxide and silver nanoparticles on woody plants obtained by in vitro method," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 875, no. 1, p. 012048, Oct. 2021, doi: 10.1088/1755-1315/875/1/012048.
- [23] M. Noman *et al.*, "Bio-Functionalized Manganese Nanoparticles Suppress Fusarium Wilt in Watermelon (*Citrullus lanatus* L.) by Infection Disruption, Host Defense Response Potentiation, and Soil Microbial Community Modulation," *Small*, vol. 19, no. 2, p. 2205687, Jan. 2023, doi: 10.1002/SMLL.202205687.
- [24] T. A. Coll *et al.*, "Growth responses of tomato plants (*Solanum lycopersicum*) to aluminium and nickel from nanoparticle suspensions and ionic solutions," <https://doi.org/10.1080/15320383.2022.2134293>, 2022, doi: 10.1080/15320383.2022.2134293.
- [25] X. Zhao, Y. Chen, H. Li, and J. Lu, "Influence of seed coating with copper, iron and zinc nanoparticles on growth and yield of

- tomato,” *IET Nanobiotechnol*, vol. 15, no. 8, pp. 674–679, Oct. 2021, doi: 10.1049/NBT2.12064.
- [26] S. P. T. Waani *et al.*, “TiO₂ nanoparticles dose, application method and phosphorous levels influence genotoxicity in Rice (*Oryza sativa* L.), soil enzymatic activities and plant growth,” *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 213, p. 111977, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.ECOENV.2021.111977.
- [27] R. A. Solano and A. P. Herrera, “Cypermethrin elimination using Fe-TiO₂ nanoparticles supported on coconut palm spathe in a solar flat plate photoreactor,” <https://doi.org/10.1177/2633366X20906164>, vol. 28, Apr. 2020, doi: 10.1177/2633366X20906164.
- [28] W. Umar, M. K. Hameed, T. Aziz, M. A. Maqsood, H. M. Bilal, and N. Rasheed, “Synthesis, characterization and application of ZnO nanoparticles for improved growth and Zn biofortification in maize,” <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1782893>, pp. 1–13, 2020, doi: 10.1080/03650340.2020.1782893.
- [29] Y. Liu *et al.*, “Application of low dosage of copper oxide and zinc oxide nanoparticles boosts bacterial and fungal communities in soil,” *Science of The Total Environment*, vol. 757, p. 143807, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.143807.
- [30] M. Guo *et al.*, “Effect of wetting-drying cycles on the Cu bioavailability in the paddy soil amended with CuO nanoparticles,” *J Hazard Mater*, vol. 436, p. 129119, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2022.129119.
- [31] V. Prakash, J. Peralta, D. K. Tripathi, X. Ma, and S. Sharma, “Recent insights into the impact, fate and transport of cerium oxide nanoparticles in the plant-soil continuum,” *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 221, p. 112403, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.ECOENV.2021.112403.
- [32] S. Panikar *et al.*, “Morphological, chemoprofile and soil analysis comparison of *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill and L.A.S. Johnson along with the green synthesis of iron oxide nanoparticles,” *J King Saud Univ Sci*, vol. 34, no. 5, p. 102081, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.JKSUS.2022.102081.
- [33] S. Li *et al.*, “Comparative physiological and metabolomic analyses revealed that foliar spraying with zinc oxide and silica nanoparticles modulates metabolite profiles in cucumber (*Cucumis sativus* L.),” *Food Energy Secur*, vol. 10, no. 1, p. e269, Feb. 2021, doi: 10.1002/FES3.269.
- [34] L. Azeez, S. A. Adebisi, R. O. Adetoro, A. O. Oyedeji, W. B. Agbaje, and O. A. Olabode, “Foliar application of silver nanoparticles differentially intervenes remediation statuses and oxidative stress indicators in *Abelmoschus esculentum* planted on gold-mined soil,” <https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1949578>, vol. 24, no. 4, pp. 384–393, 2021, doi: 10.1080/15226514.2021.1949578.
- [35] H. Sun *et al.*, “Uptake, transformation, and environmental impact of zinc oxide nanoparticles in a soil-wheat system,” *Science of The Total Environment*, vol. 857, p. 159307, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2022.159307.
- [36] E. A. Attia and N. Elhawat, “Combined foliar and soil application of silica nanoparticles enhances the growth, flowering period and flower characteristics of marigold (*Tagetes erecta* L.),” *Sci Hortic*, vol. 282, p. 110015, May 2021, doi: 10.1016/J.SCIENTA.2021.110015.
- [37] M. Usman *et al.*, “Effect of soil texture and zinc oxide nanoparticles on growth and accumulation of cadmium by wheat: a life cycle study,” *Environ Res*, vol. 216, p. 114397, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.ENVRES.2022.114397.
- [38] F. Chen *et al.*, “Combined effects of green manure and zinc oxide nanoparticles on cadmium uptake by wheat (*Triticum aestivum* L.),” *Chemosphere*, vol. 298, p. 134348, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.134348.
- [39] H. Sun, Q. Peng, J. Guo, H. Zhang, J. Bai, and H. Mao, “Effects of short-term soil exposure of different doses of ZnO nanoparticles on the soil environment and the growth and nitrogen fixation of alfalfa,” *Environmental Pollution*, vol. 309, p. 119817, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2022.119817.
- [40] A. Pinto, J. Retamal, N. Zapata, A. Sierra, and M. Schoebitz, “Impact of polyethylene microplastics and copper nanoparticles: Responses of soil microbiological properties and strawberry growth,” *Applied Soil Ecology*, vol. 184, p. 104773, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.APSOIL.2022.104773.
- [41] F. Ameen, K. Alsamhary, J. A. Alabdullatif, and S. ALNadhari, “A review on metal-based nanoparticles and their toxicity to beneficial soil bacteria and fungi,” *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 213, p. 112027, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.ECOENV.2021.112027.
- [42] J. Hong, C. Wang, D. C. Wagner, J. L. Gardea, F. He, and C. M. Rico, “Foliar application of nanoparticles: mechanisms of absorption, transfer, and multiple impacts,” *Environ Sci Nano*, vol. 8, no. 5, pp. 1196–1210, May 2021, doi: 10.1039/D0EN01129K.
- [43] C. Deng *et al.*, “Soil and foliar exposure of soybean (*Glycine max*) to Cu: Nanoparticle coating-dependent plant responses,” *NanoImpact*, vol. 26, p. 100406, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.IMPACT.2022.100406.
- [44] M. T. Pelegrino *et al.*, “Foliar spray application of CuO nanoparticles (NPs) and S-nitrosoglutathione enhances productivity, physiological and biochemical parameters of lettuce plants,” *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol. 96, no. 8, pp. 2185–2196, Aug. 2021, doi: 10.1002/JCTB.6677.
- [45] E. Tiwari *et al.*, “Impact of nanoplastic debris on the stability and transport of metal oxide nanoparticles: role of varying soil solution chemistry,” *Chemosphere*, vol. 308, p. 136091, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.136091.
- [46] D. Asmat *et al.*, “ZnO Nanoparticles Obtained by Green Synthesis as an Alternative to Improve the Germination Characteristics of *L. esculentum*,” *Molecules* 2022, Vol. 27, Page 2343, vol. 27, no. 7, p. 2343, Apr. 2022, doi: 10.3390/MOLECULES27072343.
- [47] A. K. Both, E. Shaker, and C. L. Cheung, “Phytotoxic Effect of sub-3-nm Crystalline Ceria Nanoparticles on the Hydroponic Growth of Daikon Radish Microgreens,” *ChemNanoMat*, vol. 8, no. 4, p. e202200023, Apr. 2022, doi: 10.1002/CNMA.202200023.
- [48] Y. XUE, P. MISHRA, F. EIVAZI, and Z. AFRASIABI, “Effects of silver nanoparticle size, concentration and coating on soil quality as indicated by arylsulfatase and sulfite oxidase activities,” *Pedosphere*, vol. 32, no. 5, pp. 733–743, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.PEDSPH.2022.06.006.
- [49] D. Baragaño, R. Forján, N. Álvarez, J. R. Gallego, and A. González, “Zero valent iron nanoparticles and organic fertilizer assisted phytoremediation in a mining soil: Arsenic and mercury accumulation and effects on the antioxidative system of *Medicago sativa* L.,” *J Hazard Mater*, vol. 433, p. 128748, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2022.128748.
- [50] Q. Zhang *et al.*, “Exogenous iron alters uptake and translocation of CuO nanoparticles in soil-rice system: A life cycle study,” *Environ Int*, vol. 168, p. 107479, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.ENVINT.2022.107479.

- [51] S. Chavan, V. Sarangdhar, and N. Vigneshwaran, "Nanopore-based metagenomic analysis of the impact of nanoparticles on soil microbial communities," *Heliyon*, vol. 8, no. 6, p. e09693, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.HELIYON.2022.E09693.
- [52] W. Lv *et al.*, "The behavior, transport, and positive regulation mechanism of ZnO nanoparticles in a plant-soil-microbe environment," *Environmental Pollution*, vol. 315, p. 120368, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2022.120368.
- [53] D. Chen *et al.*, "Divergent responses and ecological risks of wheat (*Triticum aestivum* L.) to cerium oxide nanoparticles in different soil types," *Science of The Total Environment*, vol. 860, p. 160429, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2022.160429.
- [54] A. Seiphoori and M. Zamanian, "Improving mechanical behaviour of collapsible soils by grouting clay nanoparticles," *Eng Geol*, vol. 298, p. 106538, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.ENGCEO.2022.106538.
- [55] X. Xin, J. Nepal, A. L. Wright, X. Yang, and Z. He, "Carbon nanoparticles improve corn (*Zea mays* L.) growth and soil quality: Comparison of foliar spray and soil drench application," *J Clean Prod*, vol. 363, p. 132630, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.132630.
- [56] D. A. Rippner *et al.*, "Microbial response to copper oxide nanoparticles in soils is controlled by land use rather than copper fate," *Environ Sci Nano*, vol. 8, no. 12, pp. 3560–3576, Dec. 2021, doi: 10.1039/D1EN00656H.
- [57] T. Wu, Y. Liu, K. Yang, L. Zhu, J. C. White, and D. Lin, "Synergistic remediation of PCB-contaminated soil with nanoparticulate zero-valent iron and alfalfa: targeted changes in the root metabolite-dependent microbial community," *Environ Sci Nano*, vol. 8, no. 4, pp. 986–999, Apr. 2021, doi: 10.1039/D1EN00077B.
- [58] H. Singh, A. Sharma, S. K. Bhardwaj, S. K. Arya, N. Bhardwaj, and M. Khatri, "Recent advances in the applications of nano-agrochemicals for sustainable agricultural development," *Environ Sci Process Impacts*, vol. 23, no. 2, pp. 213–239, Mar. 2021, doi: 10.1039/D0EM00404A.
- [59] X. Chen, M. Duan, B. Zhou, and L. Cui, "Effects of biochar nanoparticles as a soil amendment on the structure and hydraulic characteristics of a sandy loam soil," *Soil Use Manag*, vol. 38, no. 1, pp. 836–849, Jan. 2022, doi: 10.1111/SUM.12740.
- [60] M. A. Campea, M. J. Majcher, A. Lofts, and T. Hoare, "A Review of Design and Fabrication Methods for Nanoparticle Network Hydrogels for Biomedical, Environmental, and Industrial Applications," *Adv Funct Mater*, vol. 31, no. 33, p. 2102355, Aug. 2021, doi: 10.1002/ADFM.202102355.
- [61] M. M. El-Saber, A. A. Mahdi, A. H. Hassan, K. Y. Farroh, and A. Osman, "Effects of magnetite nanoparticles on physiological processes to alleviate salinity induced oxidative damage in wheat," *J Sci Food Agric*, vol. 101, no. 13, pp. 5550–5562, Oct. 2021, doi: 10.1002/JSFA.11206.
- [62] W.-T. Huang *et al.*, "Near-Infrared Nanophosphor Embedded in Mesoporous Silica Nanoparticle with High Light-Harvesting Efficiency for Dual Photosystem Enhancement," *Angewandte Chemie*, vol. 133, no. 13, pp. 7031–7035, Mar. 2021, doi: 10.1002/ANGE.202015659.
- [63] Q. Wang *et al.*, "Interplay of metal-based nanoparticles with plant rhizosphere microenvironment: implications for nanosafety and nano-enabled sustainable agriculture," *Environ Sci Nano*, 2022, doi: 10.1039/D2EN00803C.
- [64] M. Pandorf, L. Pourzahedi, L. Gilbertson, G. V. Lowry, P. Herckes, and P. Westerhoff, "Graphite nanoparticle addition to fertilizers reduces nitrate leaching in growth of lettuce (*Lactuca sativa*)," *Environ Sci Nano*, vol. 7, no. 1, pp. 127–138, Jan. 2020, doi: 10.1039/C9EN00890J.
- [65] E. P. Pérez *et al.*, "Towards a more sustainable viticulture: foliar application of N-doped calcium phosphate nanoparticles on Tempranillo grapes," *J Sci Food Agric*, vol. 101, no. 4, pp. 1307–1313, Mar. 2021, doi: 10.1002/JSFA.10738.
- [66] M. Á. Guzmán, B. Rebollo, A. de J. Joaquín, and M. G. Gómez, "Green synthesis and antimicrobial mechanism of nanoparticles: applications in agricultural and agrifood safety," *J Sci Food Agric*, 2022, doi: 10.1002/JSFA.12162.
- [67] L. Li *et al.*, "Extraction Method Development for Quantitative Detection of Silver Nanoparticles in Environmental Soils and Sediments by Single Particle Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry," *Anal Chem*, vol. 91, no. 15, pp. 9442–9450, Jun. 2019, doi: 10.1021/ACS.ANALCHEM.8B05575/SUPPL_FILE/AC8B05575_SI_001.PDF.
- [68] Y. Ma *et al.*, "Effects of Ceria Nanoparticles and CeCl₃ on Plant Growth, Biological and Physiological Parameters, and Nutritional Value of Soil Grown Common Bean (*Phaseolus vulgaris*)," *Small*, vol. 16, no. 21, p. 1907435, May 2020, doi: 10.1002/SMLL.201907435.
- [69] P. M. Kopittke, E. Lombi, P. Wang, J. K. Schjoerring, and S. Husted, "Nanomaterials as fertilizers for improving plant mineral nutrition and environmental outcomes," *Environ Sci Nano*, vol. 6, no. 12, pp. 3513–3524, Oct. 2019, doi: 10.1039/C9EN00971J.