Revista Científica Arbitrada de la Fundación MenteClara
ISSN 2469-0783
Fundación MenteClara
Investigación, docencia y asistencia
revista@fundacionmenteclara.org.ar

Artículos atravesados por (o cuestionando) la idea del sujeto -y su género- como una construcción psicobiológica de la cultura.
Articles driven by (or questioning) the idea of the subject -and their gender- as a cultural psychobiological construction.
Vol. 11 (2026), enero-diciembre
ISSN 2469-0783

CONTAMINACIÓN PLÁSTICA EN LA HIDROPONÍA: UN DESAFÍO EMERGENTE PARA LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA SOSTENIBLE

PLASTIC POLLUTION IN HYDROPONICS: AN EMERGING CHALLENGE FOR SUSTAINABLE AGRICULTURAL PRODUCTION

Jorge Eduardo Martinez Castelo jorgelink33@gmail.com
Universidada Autónoma Indígena de México, México
ORDID: https://orcid.org/0009-0004-3251-648X

Haylin Zukany Rodriguez Rojas Noa_zoe@outlook.com
Universidada Autónoma Indígena de México, México
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6722-0454

Raul Said Inzunza Bojorquez raulsaidinzunza123@gmail.com
Universidada Autónoma Indígena de México, México
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3219-1882

Israel Osuna Flores iosuna@uaim.edu.mx
Universidad Autónoma Indígena de México, México.
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0199-2983

Cómo citar este artículo / *Citation*: Martinez Castelo, J. E., Rodriguez Rojas, H. Z., Inzunza Bojórquez, R. S. & Osuna Flores, I. (2026). Contaminación plástica en la hidroponía: un desafio emergente para la producción agrícola sostenible. *Revista Científica Arbitrada de la Fundación MenteClara*, Vol. 11 (459).
DOI: https://doi.org/10.32351/rca.v11.459

Copyright: © 2026 RCAFMC. Este artículo de acceso abierto es distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).
Recibido: 02/11/2026. Aceptado: 06/11/2026. Publicación online: 10/11/2026.

Conflicto de intereses: Ninguno que declarar.

Resumen

La hidroponía es un sistema productivo que es eficiente en agua y espacio, aunque la relación que guarda con materiales plásticos está generando liberación y acumulación de microplásticos (MP) y nanoplásticos (NP) en las soluciones nutritivas. Se analiza la contaminación por MP y NP en sistemas hidropónicos, las cuales incluyen fuentes de emisión, mecanismos de absorción vegetal, consecuencias fisiológicas e implicaciones para la inocuidad alimentaria. Se hizo una revisión bibliográfica de tipo analítico y descriptiva entre

los años de 2020–2026, utilizando bases de datos mediante palabras clave en inglés y español. Los resultados muestran que los MP/NP se liberan principalmente de tuberías de PVC, tanques de HDPE, sustratos de poliuretano y agua contaminada. Partículas menores a 200 nm atraviesan tejidos radiculares por rutas apoplásticas y el modo crack-entry, y se trasladan por el xilema hacia órganos comestibles, como se ha confirmado en lechuga, tomate y rábano. Los efectos fisiológicos incluyen acumulación de ROS, peroxidación lipídica, secuestro de nutrientes (Fe, Zn, Cu) y reducción de biomasa. Además, los MP/NP actúan como vectores de ftalatos, bisfenol A, pesticidas y microorganismos patógenos. En México, se han documentado MP en acuíferos usados para riego, deposición atmosférica y alimentos. Se concluye que los sistemas hidropónicos, pese a su discurso de sostenibilidad, representan un posible vector de transferencia de MP/NP hacia la cadena alimentaria.

Abstract

Hydroponics is a production system that is efficient in terms of water and space; however, its reliance on plastic materials leads to the release and accumulation of microplastics (MPs) and nanoplastics (NPs) within nutrient solutions. This review analyzes MP and NP contamination in hydroponic systems, covering emission sources, plant uptake mechanisms, physiological consequences, and implications for food safety. An analytical and descriptive literature review was conducted for the period 2020–2026, utilizing academic databases and search terms in both English and Spanish. The findings indicate that MPs/NPs are primarily released from PVC piping, HDPE tanks, polyurethane substrates, and contaminated water. Particles smaller than 200 nm penetrate root tissues via apoplastic pathways or the "crack-entry" mechanism, subsequently translocating through the xylem to edible plant organs—a phenomenon confirmed in lettuce, tomatoes, and radishes. Physiological effects include the accumulation of reactive oxygen species (ROS), lipid peroxidation, the sequestration of essential nutrients (Fe, Zn, Cu), and a reduction in biomass. Furthermore, MPs/NPs serve as vectors for phthalates, bisphenol A, pesticides, and pathogenic microorganisms. In Mexico, the presence of MPs has been documented in aquifers used for irrigation, as well as in atmospheric deposition and food products. It is concluded that, despite their reputation for sustainability, hydroponic systems represent a potential pathway for the transfer of MPs/NPs into the food chain.

Keywords: Hidroponía; microplásticos; nanoplásticos; absorción vegetal; inocuidad alimentaria

Palabras Claves: Hydroponics; microplastics; nanoplastics; plant uptake; food safety

1. Introducción

Los sistemas hidropónicos son una evolución tecnológica destinada a incrementar la eficiencia en producción agrícola a través del control de nutrientes, agua y condiciones ambientales. Ha permitido elevar el rendimiento, con una reducción en el consumo de agua hasta en un 90 % y ha permitido reducir problemas asociados a la degradación del suelo y la erosión agrícola (Armenta López y Osuna-Flores, 2026). La hidroponía se ha extendió en varios países, presentada como una alternativa para la producción de alimentos. Se estima que la superficie global dedicada a este sistema productivo supera las 500,000 hectáreas, con tasas de crecimiento anual del 5–8 % en Asia, Europa y América del Norte (Yu et al., 2024).

La infraestructura utilizada depende principalmente de materiales sintéticos como policloruro de vinilo (PVC), polietileno de alta densidad (HDPE), poliestireno expandido y poliuretanos.

La degradación física, química y fotooxidante de estos polímeros produce la creación de microplásticos y nanoplásticos que son capaces de dispersarse dentro de la solución nutritiva (González et al., 2021; Zantis et al., 2023). Esto genera la liberación y acumulación de partículas plásticas en el interior de los circuitos hidropónicos, que recientemente pasaba desapercibido en la evaluación de sostenibilidad de estos sistemas.

Los MP y NP son unos de los principales xebióticos emergentes en ecosistemas acuáticos y agrícolas (Zubair et al., 2026). Recientemente según en *Nature Sustainability* menciona que las partículas submicrométricas ingresan a los tejidos vegetales mediante un mecanismo de *crack-entry mode*, por medio de microfisuras generadas durante el crecimiento de las raíces laterales. Con este tipo de resultados se mantiene la teoría que los nanoplásticos permanecen adheridos a la superficie radicular y que pueden alcanzar estructuras vasculares internas y así mismo desplazarse hacia órganos aéreos mediante el flujo del xilema, (Li et al., 2020).

En sistemas agrícolas, el suelo actúa como filtro físico y biológico frente a los contaminantes , pero en la hidroponía las raíces están en contacto directo con soluciones acuosas recirculantes, lo cual aumenta considerablemente la probabilidad de absorción de partículas sintéticas en los tejidos vegetales (López-

Pérez et al., 2026); así es como partículas menores a 200 nm pueden atravesar barreras celulares, acumulándose en tejidos comestibles y actuar de esta manera como vectores de residuos tóxicos y microorganismos patógenos (Li et al., 2020; Sun et al., 2023).

La hidroponía generalmente se asocia a un sistema de producción eficiente. Y amigable con el medio ambiente Sin embargo, los materiales utilizados dentro de estos sistemas logran convertirse con el tiempo en fuentes de contaminación por MP. Esto ha comenzado a generar interés dentro de la biotecnología ambiental, la toxicología vegetal y la seguridad alimentaria.

El objetivo del presente trabajo es analizar la dinámica de contaminación por MP y NP en sistemas hidropónicos, describir las principales fuentes de emisión, los mecanismos de absorción vegetal y las consecuencias de tipo fisiológico y toxicológico derivadas de estos residuos.

2. Materiales y métodos

2.1. Diseño del estudio

El presente trabajo es una revisión bibliográfica de carácter analítico y descriptivo, sobre la contaminación por microplásticos (MP) y nanoplásticos (NP) en sistemas hidropónicos. Se sintetizo los resultados disponibles sobre fuentes de emisión, mecanismos de absorción vegetal, efectos fisiológicos y riesgos para la inocuidad alimentaria. La revisión se desarrolló entre enero y octubre de 2026.

2.2. Estrategia de búsqueda

Se realizaron búsquedas bibliográficas en bases de datos especializadas; como son: Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, Nature Sustainability, Environmental Science & Technology, Google Scholar, SciELO, Redalyc y Dialnet, estas bases de datos fueron complementada con repositorios institucionales de la Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma Metropolitana y la Universidad de Guanajuato. Se utilizaron combinaciones de palabras clave en inglés, español. En inglés se utilizaron términos como *microplastics*, *nanoplastics*, *hydroponics*, *soilless agriculture*, *plant uptake*, *root absorption*, *food safety*, *plastic pollution*, *nutrient solution contamination* y *crack-entry mode*. En español se emplearon

microplásticos, *nanoplásticos*, *hidroponía*, *absorción vegetal*, *inocuidad alimentaria*, *contaminación plástica* y *cultivo sin suelo*. La estrategia de búsqueda principal fue: (microplastics OR nanoplastics) AND (hydroponics OR soilless culture) AND (uptake OR translocation OR contamination OR food safety).

2.3. Criterios de selección de los estudios

Se seleccionaron estudios experimentales desarrollados en laboratorio, invernadero o hidroponía comercial que evaluaran la absorción, translocación o efectos fisiológicos de MP/NP en plantas, así como investigaciones que reportaran datos cuantitativos de concentración de partículas, tamaño, biomasa, ROS o clorofila. También se consideraron estudios sobre fuentes de liberación de MP/NP en agricultura protegida, revisiones con metodología explícita, artículos arbitrados publicados entre 2020 y 2026, y estudios con relevancia ambiental, agrícola o toxicológica. Se descartaron revisiones narrativas sin fundamento en datos, estudios sin información cuantitativa de efecto, investigaciones centradas exclusivamente en ambientes marinos sin vínculo agrícola, documentos duplicados o no disponibles en texto completo, y literatura gris no arbitrada, con excepción de informes institucionales de relevancia nacional.

2.4. Proceso de selección

La búsqueda inicial arrojó un conjunto amplio de documentos, de los cuales se seleccionaron aquellos que cumplían con los criterios anteriores. La selección se realizó mediante lectura de títulos y resúmenes, seguida de la revisión del texto completo de los estudios considerados pertinentes. Se priorizaron los trabajos que aportaran datos cuantitativos, describieran mecanismos de absorción o translocación, o analizaran fuentes de contaminación en sistemas hidropónicos o de agricultura protegida. Se consultaron 68 estudios, de los cuales se seleccionaron 35 para la síntesis final por su relevancia directa con los ejes temáticos del trabajo. De estos 35, aproximadamente 20 son estudios experimentales primarios, 8 abordan fuentes de contaminación plástica y 7 son revisiones sobre contaminación por MP/NP en agroecosistemas.

2.5. Extracción de datos

De cada estudio experimental se extrajo información sobre autores y año de publicación, tipo de cultivo y sistema (hidropónico, suelo o agar), tipo de polímero (poliestireno, polietileno, PVC, entre otros), tamaño de partícula en nanómetros o micrómetros, concentración experimental expresada en partículas por mililitro, miligramos por litro o porcentaje peso/peso, vía de exposición (raíz, foliar o solución nutritiva), método de detección (FTIR, Raman, Py-GC/MS, microscopía confocal o SEM), efectos reportados (absorción, translocación, ROS, biomasa, clorofila o estrés oxidativo) y condiciones experimentales (tiempo de exposición, pH, temperatura y fuerza iónica).

2.6. Análisis de la información

Los datos extraídos se organizaron en cuatro ejes temáticos: fuentes de emisión de MP/NP en sistemas hidropónicos; mecanismos de absorción y translocación en tejidos vegetales; efectos fisiológicos y bioquímicos sobre el metabolismo vegetal; y riesgos para la inocuidad alimentaria y perspectivas regulatorias. La síntesis se realizó de forma cualitativa, con apoyo de tablas comparativas que permitieron identificar patrones, contradicciones y vacíos de conocimiento. Cuando fue posible, se reportaron concentraciones y tamaños de partícula de manera estandarizada para facilitar la comparación entre estudios.

3. Fuentes de contaminación por microplásticos en sistemas hidropónicos

La contaminación por MP en los sistemas hidropónicos no surge de manera casual; son consecuencia ligada al uso de polímeros sintéticos en la agricultura protegida moderna, de tal manera que la liberación de MP/NP representa un proceso difuso y continuo que se acumula a lo largo del tiempo.

3.1. Degradación de infraestructura agrícola

En las estructuras utilizadas en la hidroponía, las tuberías de PVC, conexiones hidráulicas, tanques y cisternas de bombeo presentan procesos de desgaste mecánico y degradación fotoquímica; además que, la extensa exposición a radiaciones ultravioleta aunado a los cambios de temperatura y soluciones salinas aceleran el

daño superficial de los polímeros, liberando con esto partículas microplásticas en el circuito de recirculación (Zhang et al., 2022; Armenta López y Osuna-Flores, 2026). Esto suele intensificarse en sistemas expuestos a radiación solar directa, en la que la fotodegradación reduce la vida útil de las tuberías en un 30–50 % con respecto a instalaciones bajo cubierta.

La liberación de partículas a partir de la infraestructura utilizada en la hidroponía es de tipo continuo, intensificando el envejecimiento de los materiales y la exposición a condiciones de operación. Una instalación hidropónica puede liberar entre 0.5 y 5 kg de MP por hectárea al año, dependiendo del tipo de polímero y las condiciones de operación (Yu et al., 2024).

En la selección de materiales debe considerarse el costo y resistencia mecánica, la tasa de degradación y su potencial de liberación de partículas materiales como el PVC, este presenta tasas de liberación de MP mayores a las del *polietileno de alta densidad* (HDPE) y el polipropileno en condiciones de exposición similares (Zhang et al., 2022).

3.2. Sustrato y soporte sintéticos

Los sustratos utilizados para sostener el desarrollo radicular también constituyen fuentes secundarias de MP; las espumas fenólicas, poliuretano y lana de roca encapsulada presentan una fragmentación progresiva debido al crecimiento radicular y a la fricción constante generada por el flujo de agua; a la vez que la presión ejercida por las raíces induce el desprendimiento de partículas, las cuales quedan suspendidas en la solución nutritiva, aumentando con esto la exposición directa de las plantas.

Materiales como lana de roca y espumas de poliuretano liberan entre 10^2 y 10^4 partículas por gramo durante 30 días de exposición a solución nutritiva (Yu et al., 2024). La fricción radicular y el flujo continuo de agua generan una liberación de partículas sostenida, las que se acumulan en el circuito cerrado. Esto ocurre en contacto directo en la zona de absorción radicular, incrementando la probabilidad de internalización en tejidos vegetales.

La elección del sustrato, por tanto, no es neutra desde el punto de vista de la inocuidad. Los sistemas que utilizan materiales cerámicos, fibra de coco tratada o medios inertes de vidrio reducen la carga de partículas, aunque sigue pendiente la evaluación de costos y su comportamiento a largo plazo (Zhang et al., 2022); La sustitución de materiales de origen mineral o biológico representan una línea de investigación en el diseño de sistemas hidropónicos más amigables con el medio ambiente.

3.3. Contaminación del agua de origen

La concentración de MP en el agua de riego varía enormemente según la región y la fuente. Jiang et al. (2023) reportaron concentraciones de 1.88–141 partículas/L en aguas de riego de Taiwán. Heinen et al. (2026) encontraron 169 ± 121 partículas/L en agua de estanque fuente de riego en el delta del Misisipi. En canales de riego de zonas agrícolas intensivas, las concentraciones pueden alcanzar niveles mucho más altos, como las 55,730 partículas/L reportados por García-León et al. (2026) en el canal Rodhe en Reynosa, México. Por su parte, Liu y Chen (2018) reportaron que las aguas tratadas para consumo humano pueden contener hasta 5,000 partículas/L, lo que hace que al agua de abastecimiento sea una fuente inicial complicado de eliminar sin tratamiento avanzado.

En sistemas hidropónicos de recirculación, esta carga inicial no se diluye si no se concentra. En cada ciclo de riego se devuelve la solución al tanque, acumulándose partículas plásticas progresivamente. Si no se tiene una filtración adecuada, la concentración de MP puede duplicarse cada 15–20 ciclos de recirculación (Yu et al., 2024).

3.4. Tabla 1. Principales fuentes de liberación de microplásticos en sistemas hidropónicos

Fuente	Tipo de polímero predominante	Mecanismo de liberación
Tubería hidráulica	PVC	Fotodegradación y desgaste mecánico
Tanques de almacenamiento	HDPE	Fricción y envejecimiento químico
Bombas y conexiones	Polímeros diversos	Abrasión mecánica
Espumas y sustratos	Poliuretano	Fragmentación por presión radicular
Agua de abastecimiento	Polietileno y polipropileno	Contaminación ambiental previa
Películas de invernadero	Polietileno de baja densidad	Fotodegradación y termooxidación

Fuente: elaboración propia con base en Armenta López y Osuna-Flores (2026), González et al. (2021), Zhang et al. (2022).

4. Mecanismos de absorción y transporte de microplásticos en plantas

Se tenía la idea que las paredes celulares vegetales eran una barrera eficaz contra el ingreso de partículas sólidas, y recientemente se ha demostrado que los NP atraviesan estructuras celulares vegetales dependiendo de su tamaño, carga superficial y composición química (Sun et al., 2023). Es importante entender estos mecanismos para evaluar el riesgo real de transferencia de MP/NP hacia tejidos comestibles.

4.1. Esquema de contaminación y transporte de microplásticos en hidroponía

Los procesos de contaminación y transporte de MP/NP en sistemas hidropónicos puede resumirse en las siguientes siete etapas sucesivas: liberación de MP desde tuberías y sustratos; suspensión de partículas dentro de la solución nutritiva; contacto directo entre raíces y NP; ingreso mediante vía apoplástica y endocitosis; transporte vascular a través de xilema; acumulación en hojas y tejidos comestibles; y generación de estrés oxidativo y riesgos alimentarios.

4.2. Ruta apoplástica

La ruta apoplástica es refreído al desplazamiento de partículas a través de espacios intercelulares y paredes celulares sin necesidad de pasar por membranas plasmáticas; en estos casos el flujo transpiratorio actúa como mecanismo impulsor de partículas suspendidas hacia tejidos internos. Se han realizado cultivos hidropónicos de lechuga (*Lactuca sativa*) que han demostrado la presencia de nanopartículas de poliestireno en tamaños aproximados a 100 nm logrando infiltrarse en tejidos radiculares y desplazándose de forma parcial hacia el sistema vascular (Li et al., 2020). Sun et al. (2023) encontraron nanopartículas de poliestireno de 50–200 nm que se acumularon en hojas de lechuga cultivada hidropónicamente, con concentraciones internas que alcanzan hasta 0.5 μg/g de peso fresco.

Existe un sistema de protección denominada la banda de Caspary en la endodermis que limita el paso de partículas de mayor tamaño, teniendo la función de una barrera selectiva frente a contaminantes externos. Liu et al. (2023) describieron que la ruta apoplástica es predominante para partículas entre 20 y 100 nm, mientras que partículas mayores a 200 nm quedan retenidas en la rizodermis o en la corteza radicular. La banda de Caspary, compuesta por suberina y lignina, es impermeable al agua y a los solutos, por lo que las partículas solo pueden atravesarla en regiones donde aún no se ha completado su deposición, como los ápices radiculares y los sitios de emergencia de raíces laterales; esto adquiere implicaciones importantes para el diseño de sistemas hidropónicos: las regiones de crecimiento activo de raíces, donde la barrera endodérmica es incompleta, constituyen puntos críticos de entrada de NP por lo que estrategias de manejo que minimicen el daño

radicular o que controlen la exposición en estas zonas pueden reducir la absorción de partículas.

4.3. Internalización celular y endocitosis

Las partículas plásticas de dimensiones ultrafinas son capaces de entrar de forma directa a la célula, llevando a cabo procesos similares a la endocitosis. Es bien conocido que, se da una interacción electrostática que ocurre entre los NP y los exudados radiculares de las plantas, esto, modifica la permeabilidad de las membranas celulares y a su vez, favorece la absorción celular. Se han identificado nanopartículas menores a 50 nm, llegan a presentar una mayor capacidad de incorporación intracelular, por efecto de su alta movilidad (Roy et al., 2022; Zubair et al., 2026).

Por su parte, Roy et al. (2022) demostraron mediante microscopía confocal que nanopartículas de poliestireno de 20–50 nm son internalizadas en células de raíz de lechuga en menos de 6 h de exposición, con una eficiencia de internalización que se incrementa, cuando el tamaño de partícula es reducido. Mientras que, Sun et al. (2025) confirmaron que este proceso ocurre también en plantas de tomate, puesto que, se da una translocación posterior a frutos en un plazo de 14 días. Dichos datos experimentales confirman que la internalización celular no es un fenómeno marginal, sino más bien, es un proceso cuantitativamente relevante en condiciones hidropónicas reales.

La internalización depende de la carga superficial de las partículas, aquellas con carga positiva (amino-modificadas) muestran una mayor afinidad por membranas celulares, en comparación con las carboxiladas o neutras (Zubair et al., 2026). Además, los exudados radiculares, proteínas y ácidos orgánicos modifican la corona superficial de las partículas, lo que altera su interacción con las células vegetales (Liu et al., 2023). Todo esto, indica que las partículas difieren en cuanto a su potencial de absorción, ello, complica la evaluación de los riesgos y sugiere, la necesidad de profundizar en la caracterización, es decir, no sólo referenciar el tamaño, sino también la carga y la composición de las superficies de los MP/NP que se encuentran presentes en los sistemas hidropónicos.

4.4. Tabla 2. Estudios experimentales sobre absorción y translocación de MP/NP en plantas

Autor (año)	Cultivo	Polímero	Tamaño	Concentración	Efecto principal
Li et al. (2020)	Lechuga, trigo	PS	100–700 nm	10–100 mg/L	Absorción por *crack-entry*, translocación a xilema
Sun et al. (2023)	Lechuga	PS	50–200 nm	1–50 mg/L	Acumulación en hojas, estrés oxidativo
Sun et al. (2025)	Tomate	PS	20–100 nm	5–25 mg/L	Translocación por xilema a frutos
Jia et al. (2023)	*Arabidopsis*	PE	100–500 nm	10–100 mg/L	Aumento de ROS, peroxidación lipídica
Jiang et al. (2024)	Lechuga	PS/PE	100–1000 nm	50–200 mg/L	Inhibición de absorción de N, reducción de biomasa
Hassinger-Lino et al. (2026)	*Arabidopsis*	PS	50–200 nm	1–100 mg/L	Reducción de elongación radicular

Autor (año)	Cultivo	Polímero	Tamaño	Concentración	Efecto principal
Roy et al. (2023)	Lechuga	PS	20–100 nm	10–50 mg/L	Internalización celular por endocitosis
Liu et al. (2023)	Trigo	PS	20–200 nm	10–100 mg/L	Ruta apoplástica predominante

Fuente: elaboración propia con base en los estudios citados.

5. Efectos fisiológicos sobre el metabolismo vegetal

El ingreso de partículas plásticas al interior de las células vegetales, tiende a provocar que las plantas generen especies reactivas de oxígeno (ROS), cuando esta respuesta se intensifica, se ocasionan daños en diversas estructuras celulares, tales como: membranas, proteínas y demás que participan en el metabolismo. En tanto que la generación de ROS supera la capacidad antioxidante de la planta, pueden desencadenarse ciertos procesos, entre los que destacan la peroxidación lipídica y muerte celular programada (Taiz et al., 2015; Jia et al., 2023).

En diversas investigaciones sobre sistemas hidropónicos, se ha demostrado que los MP pueden actuar como acarreadores de contaminantes, ya que son capaces de transportar pesticidas, metales pesados y compuestos orgánicos. Esta capacidad puede incrementar la toxicidad en los tejidos vegetales (Kajal y Thakur, 2024; Bryant et al., 2025); la magnitud del daño fisiológico en las plantas está estrechamente relacionada con factores como el tamaño de las partículas, la carga superficial, la composición química y el tiempo de exposición. Las nanopartículas presentan una mayor reactividad biológica debido a su elevada superficie específica (Rillig et al., 2019; Zubair et al., 2026).

5.1. Alteraciones nutricionales

La capacidad de absorción superficial alta en los MP, favorecen la retención de nutrientes esenciales para las plantas, como el hierro (Fe), zinc (Zn) y cobre (Cu), que forman complejos con menor biodisponibilidad, lo que afecta la salud y nutrición de las plantas.

Cuando existe deficiencia nutricional en las plantas, presentan síntomas como clorosis foliar, reducción fotosintética, crecimiento radicular y disminución de la biomasa.

Jiang et al. (2024) desarrollando cultivos de lechuga en sistemas hidropónicos a 100 mg/L de poliestireno, observaron que redujo la absorción de nitrógeno en un 34% y la de hierro en un 28% respecto al control y que se presentó una disminución del 22% en la clorofila total. Estos resultados confirman el secuestro de nutrientes en condiciones hidropónicas y muestran que la reducción en la absorción de nitrógeno equivale a cerca de un tercio, esto comprometiendo el rendimiento y la calidad de los productos cosechados.

Los MP y NP a nivel molecular obstruyen la absorción de nutrientes al competir por los transportadores de membrana y modificar el potencial redox de la rizosfera; sus grupos funcionales oxidativos pueden quelan cationes metálicos y reducir su biodisponibilidad antes de llegar a la raíz (Kajal, y Thakur, 2024; Jiang et al., 2024); alterando el metabolismo del nitrógeno y la absorción de nutrientes esenciales, lo que afecta los procesos de síntesis de proteínas y el crecimiento vegetal.

5.2. Disminución del crecimiento vegetal

La exposición prolongada a MP y NP afecta de manera significativa el rendimiento fisiológico de las plantas. Se ha llegado a presentar una reducción en la longitud de las raíces de cultivos expuestos a concentraciones elevadas de nanopartículas (NP) (Caro-Martínez et al., 2025; Hassinger-Lino et al., 2026). Hassinger-Lino et al. (2026), observaron que *Arabidopsis thaliana* presentó una reducción del 40% en la longitud de las raíces tras 14 días de exposición a 100 mg/L de nanopartículas de poliestireno. En un estudio paralelo Jia et al. (2023) observaron una disminución del 35% en la biomasa fresca y un aumento del 200% en las especies reactivas de oxígeno (ROS) bajo las mismas condiciones. En lechuga hidropónica, Sun et al. (2023) reportaron una reducción del 25% en el peso seco tras 21 días de exposición a 50 mg/L.

Los MP reducen la concentración de clorofila, alteran la actividad de las enzimas antioxidantes y limitan la elongación de las raíces; la magnitud y la dirección de estos efectos pueden variar según el tipo de plástico y las condiciones de exposición (Jia et al., 2023; Jiang et al., 2024). Esto puede comprometer el rendimiento de los cultivos hidropónicos al afectar procesos fisiológicos de las plantas.

Las reducciones de biomasa de entre el 25 y el 40 % podrían traducirse en pérdidas económicas para los productores de cultivos hidropónicos comerciales .Ahora bien, para sostener esa estimación económica se requieren datos sobre costos, precios y rendimiento comercial;. la alteración de las respuestas antioxidantes también podría modificar la tolerancia de las plantas a otros tipos de estrés.

El estrés oxidativo, las deficiencias nutricionales y la reducción de biomasa representan riesgos potenciales para la producción hidropónica. No obstante, su impacto productivo y económico aún requiere evaluación específica.

6. Riesgos para la inocuidad alimentaria

Los MP/NPs son portadores químicos y por lo tanto pueden transportar compuestos tóxicos que suelen ser utilizados durante la fabricación industrial de polímeros, como los ftalatos, bisfenol A (BPA), retardantes de flama y residuos de pesticidas.

En cultivos hidropónicos experimentales se ha evidenciado que los MP alteran la movilidad y biodisponibilidad de los contaminantes químicos presentes en los medios nutritivos. La carga electroquímica superficial de las partículas hacen que éstas se adjunten con nutrientes, metales y compuestos orgánicos, transportando así una mayor cantidad de sustancias tóxicas a tejidos vegetales destinados al consumo humano (Kajal y Thakur, 2024; Bryant et al., 2025); la presencia de MP y NP en sistemas hidropónicos altera la transferencia de metales pesados desde la solución nutritiva hacia los tejidos comestibles, aunque el efecto depende del tipo de metal, el polímero y las condiciones del cultivo (Yu et al., 2024; Bryant et al., 2025).

Otra cara de los MP es actuar como una matriz en la colonización bacteriana, permitiendo que microorganismos que pueden producir patologías se adhieran fácilmente en su superficie (González et al., 2021; Kumar et al., 2024). Además, se ha observado biogeneración de partículas plásticas en ambientes acuáticos que pueden constituir amenazas para la actividad hidropónica, donde las condiciones de temperatura y nutrientes permiten que ciertos microorganismos se multipliquen con

rapidez (Wang et al., 2020). Se han registrado MP en leche y en agua embotellada, que ponen de relieve el hecho de que el ser humano ya está ingiriendo estos residuos microscópicos a través de diversos productos alimenticios (Kutralam-Muniasamy et al., 2020; López-Velázquez et al., 2026).

Las NP se acumulan en los tejidos de las plantas y de los animales, son el ejemplo más visible de la contaminación por MP, y además revelan los principales conflictos a nivel de regulación y supervisión entre los organismos responsables de las normas internacionales de seguridad y salubridad de los alimentos (WHO, 2023). En la gran mayoría de países de todo el mundo no se ha elaborado ninguna regulación oficial sobre el contenido máximo permisible de MP/NP en los alimentos: se traza una línea de discontinuidad a nivel internacional, situación que dificulta hacer un cálculo detallado de los riesgos ligados a MP/NP y por tanto la toma de medidas concretas de prevención y de control.

7. Discusión

La contaminación por MP/NP en sistemas hidropónicos requiere ser abordado desde la perspectiva medioambiental, agronómica y sanitaria. La hidroponía tiene sus pros frente a otros sistemas productivos; por ejemplo, la eficiencia en el uso del agua, aprovechamiento del espacio, incorporación de materiales poliméricos y recirculación de soluciones nutritivas o nutrientes, dando lugar a vías adicionales de exposición a partículas plásticas. Por lo que, la sostenibilidad no debe evaluarse solamente desde una perspectiva productiva, sino dentro de un enfoque integral, que considere aspectos como la calidad del agua, la durabilidad de los materiales utilizados y la seguridad alimentaria (Rillig et al., 2019; Zantis et al., 2023; Yu et al., 2024).

Respecto a las fuentes de contaminación, es sabido que las tuberías, los depósitos, los sustratos artificiales y el agua de boca son también vías de entrada y liberación de MP/NP. La destrucción y el desgaste de estos polímeros es fuente de emisión ininterrumpida de este tipo de partículas, mientras que la recirculación es garantía de su persistencia en el sistema, es necesario determinar experimentalmente cuánto se acumula de esta sustancia en las instalaciones a escala comercial, ya que las condiciones de laboratorio no reproducen con exactitud las de los sistemas productivos (González et al., 2021; Yu et al., 2024).

El tamaño, composición y carga superficial influyen en su interacción con las raíces. Algunas partículas submicrométricas ingresan a las plantas a través de

fisuras en las raíces y de las rutas apoplásticas, así como se desplazan por los tejidos vasculares bajo determinadas condiciones experimentales. En lechugas y otras especies vegetales los nanoplásticos (NP) se translocan hacia los órganos aéreos; aunque, la magnitud de este proceso depende de las características de las partículas y de las condiciones de exposición. Es importante recalcar que la detección de partículas en los tejidos vegetales no implica que todas las partículas presentes en la solución nutritiva ingresen a las plantas y se desplacen todos sus órganos comestibles (Li et al., 2020; Liu et al., 2023; Sun et al., 2023).

Los efectos fisiológicos que se reportan, incluyen el estrés oxidativo, alteraciones en la absorción de nutrientes, disminución de clorofila y reducción del crecimiento. Esto sugiere que la exposición a MP/NP interfiere con los procesos metabólicos esenciales; pero, su intensidad depende de la concentración, el tiempo de exposición, el tipo de polímero y las propiedades fisicoquímicas de las partículas. Estos efectos observados no deben extrapolarse de forma directa a lo que sucede en todos los cultivos comerciales. Se requieren estudios, en donde se empleen concentraciones ambientalmente representativas y ciclos productivos completos para determinar la relevancia agronómica que poseen dichos resultados (Rillig et al., 2019; Jia et al., 2023; Jiang et al., 2024; Hassinger-Lino et al., 2026).

El aspecto de las diferencias metodológicas existentes constituye uno de los principales obstáculos para la comparación e interpretación de los resultados publicados; esto es en relación al tamaño de las partículas, las concentraciones empleadas, los tiempos de exposición, las especies vegetales estudiadas y las técnicas analíticas utilizadas dificultan la integración y comparación de los resultados; dado que cada técnica proporciona información específica y complementaria. Por consiguiente, es necesario avanzar hacia la estandarización de los procedimientos de muestreo, preparación de muestras y detección y cuantificación de MP y NP-

Se requiere implementar protocolos rigurosos de control de calidad que mitiguen el riesgo de contaminación durante las distintas etapas del análisis. El uso combinado de técnicas analíticas complementarias constituye una estrategia para mejorar la confiabilidad de las mediciones y fortalecer la interpretación de los resultados (Rillig et al., 2019; Sun et al., 2023; Zantis et al., 2023).

Es importante saber si existe una presencia efectiva de partículas poliméricas en los alimentos, si estas contienen o transportan contaminantes asociados y si la exposición humana a estos contaminantes pueden ocasionar efectos adversos para

la salud. Es esencial profundizar en investigaciones sobre el transporte y la acumulación de MP) y NP en tejidos vegetales comestibles; así como, en su posible transferencia a través de la dieta. La información actual es insuficiente para realizar una evaluación integral del riesgo para la salud derivado del consumo de hortalizas hidropónicas potencialmente contaminadas (WHO, 2023; Kumar et al., 2024).

La presencia de MP y NP en aguas subterráneas y la atmósfera, así como en productos de consumo, demuestran la necesidad de investigar su posible incorporación a los sistemas hidropónicos; la detección de estas partículas en el ambiente no demuestra la acumulación en cultivos comerciales. Para establecer esta relación, es requiere analizar el agua de entrada, la solución nutritiva, los materiales que componen la instalación, las raíces y los órganos comestibles de las plantas. Lo cual permitirá identificar las principales fuentes de contaminación y determinar si la presencia de MP y NP se deben al agua de abastecimiento o a su liberación desde los materiales y componentes del propio sistema (Kutralam-Muniasamy et al., 2020; Shruti et al., 2022; Méndez et al., 2023; Flores-García et al., 2026).

Entre las principales estrategias de mitigación a considerar, se encuentran: la prevención de las fuentes de emisión, la selección de materiales resistentes al envejecimiento y la evaluación de sustratos alternativos; así como, los sistemas de filtración del agua y de las soluciones recirculantes que podría disminuir la concentración de partículas, aunque su eficacia depende del tamaño de estas últimas, las características del sistema y las condiciones de operación.

El empleo de materiales biodegradables, es recomendable, más no garantiza automáticamente un proceso más inocuo, por lo que deben de evaluarse su durabilidad y la posible fragmentación y/o liberación de subproductos. Las medidas preventivas deben de acompañarse de un monitoreo periódico, aplicando los procedimientos analíticos estandarizados y evaluaciones de viabilidad técnica y económica (Adamczyk et al., 2024; Nizzetto et al., 2024).

La presencia de MP y NP en los sistemas hidropónicos constituye una preocupación científica fundamentada; aunque es importante señalar que la magnitud de este fenómeno y sus posibles consecuencias para la salud aún presentan importantes incertidumbres.

Entre las principales prioridades de investigación se encuentran el estudio de instalaciones comerciales, la determinación de la acumulación de MP y NP a lo largo del tiempo en sistemas con recirculación de la solución nutritiva, la cuantificación de

su transferencia a los tejidos comestibles y la evaluación de la exposición alimentaria en condiciones reales de producción.

La integración de estas líneas de investigación con la implementación de tecnologías de tratamiento, la selección adecuada de materiales y la vigilancia sistemática de la calidad del agua, permitirá fortalecer la sostenibilidad de los sistemas hidropónicos; en donde se podrán desarrollar estrategias de prevención y control basadas en evidencia científica, antes de asumir que todos los productos obtenidos mediante hidroponía presentan niveles de riesgo similares (Rillig et al., 2019; Sun et al., 2023; WHO, 2023; Yu et al., 2024).

8. Conclusiones

La contaminación por MP en sistemas hidropónicos es un desafío emergente para los sistemas agrícolas que utilizan sistemas hidropónicos, estos fueron diseñados para incrementar la eficiencia y sostenibilidad productiva, pero muestran una dependencia del empleo de materiales poliméricos, que se ha traducido en nuevas dinámicas de contaminación microscópica, la cual afecta tanto a los aspectos de metabolismo vegetal como la seguridad alimentaria.

Se demuestra que los NP logran atravesar barreras celulares vegetales, pudiendo acumularse en los tejidos comestibles y provocar alteraciones en los procesos fisiológicos mediante estrés oxidativo y desequilibrio nutricional en las plantas. Los datos cuantitativos que fueron recopilados en la presente revisión indican reducciones de biomasa del 25 – 40 % y disminuciones en la absorción de nutrientes esenciales de hasta un 34 % en condiciones experimentales. Lo anterior, sugiere que el impacto productivo podría ser significativo en sistemas comerciales expuestos a concentraciones elevadas de este tipo de partículas.

La capacidad potencial de los MP submicrométricos para atravesar las barreras radiculares y desplazarse a través del xilema plantea la posibilidad de que los cultivos hidropónicos actúen como una vía de transferencia de estas partículas hacia los productos vegetales destinados al consumo humano. Por consiguiente, si las partículas presentes en el sistema de cultivo son incorporadas por las plantas y alcanzan sus tejidos comestibles, podrían llegar a formar parte de la cadena alimentaria. Esta posibilidad adquiere especial relevancia si se considera que los productos hidropónicos suelen asociarse comercialmente con conceptos como «limpios» o «libres de contaminantes», lo que puede generar en los consumidores una

percepción de inocuidad. Sin embargo, estas características de producción no garantizan, por sí mismas, la ausencia de contaminantes, por lo que resulta necesario evaluar la calidad e inocuidad de estos productos mediante evidencia científica. Las investigaciones científicas que se lleva cabo en todo el mundo son muy exhaustivas, se demuestra que los MP están presentes en ecosistemas acuáticos, atmósfera, y alimentos, lo que se ha convertido en un reto prioritario para la sostenibilidad agrícola y la seguridad alimentaria. Asimismo, es necesario ampliar la investigación sobre los efectos de los MP en los cultivos hidropónicos, especialmente mediante estudios realizados en condiciones reales de producción. Paralelamente, el desarrollo e implementación de tecnologías de filtración, el uso de materiales biodegradables y la incorporación de sistemas de monitoreo permitirían mejorar el control de la contaminación y reducir la incorporación y acumulación de estas partículas en los sistemas de cultivo.

Esta problemática demuestra que los sistemas agrícolas modernos considerados sostenibles, resuelven problemáticas, pero generan nuevos tipos de contaminación con el uso intensivo de materiales plásticos. Por ello, resulta necesario continuar investigando alternativas más seguras que nos permitan mantener la sostenibilidad de la agricultura hidropónica moderna sin comprometer la inocuidad alimentaria. Se requiere realizar una integración de enfoques, considerando a la biotecnología ambiental, ingeniería de materiales y toxicología vegetal, puesto que será esencial para desarrollar soluciones que aborden este problema de manera integral.

Autoría y Contribución (CRediT)

Los autores de este artículo, Jorge Eduardo Martínez Castelo, Haylin Zukany Rodríguez Rojas, Raúl Said Inzunza Bojórquez e Israel Osuna Flores declaran que contribuyeron de manera distributiva en las siguientes actividades de acuerdo con la Taxonomía de Roles de Colaboración Académica (CRediT):

Conceptualización: Jorge Eduardo Martínez Castelo (50 %) Haylin Zukany Rodríguez Rojas (25 %) Israel Osuna Flores (25 %).

Metodología: Jorge Eduardo Martínez Castelo (33 %) Haylin Zukany Rodríguez Rojas (33%) %), Israel Osuna Flores (33%).

Investigación / Recolección de datos: Jorge Eduardo Martínez Castelo (20 %), Haylin Zukany Rodríguez Rojas (20 %), Raúl Said Inzunza Bojórquez (20 %), Israel Osuna Flores (20 %).

Análisis y Validación de datos: Israel Osuna Flores (50 %), Jorge Eduardo Martínez Castelo (50 %).

Redacción – Borrador original: Jorge Eduardo Martínez Castelo (33%), Haylin Zukany Rodríguez Rojas (33%), Raúl Said Inzunza Bojórquez (33 %).

Redacción – Revisión y edición: Israel Osuna Flores (40 %), Jorge Eduardo Martínez Castelo (20 %), Haylin Zukany Rodríguez Rojas (20%), Raúl Said Inzunza Bojórquez (20%).

Supervisión: Israel Osuna Flores (50 %) Jorge Eduardo Martínez Castelo (50 %).

Financiamiento y recursos: Jorge Eduardo Martínez Castelo (33%), Haylin Zukany Rodríguez Rojas (33%), Raúl Said Inzunza Bojórquez (33%).

Los autores aprueban la versión final del manuscrito y se responsabilizan de la integridad de todo el trabajo presentado.

Referencias

Adamczyk, S., Zantis, L. J., van Loon, S., van Gestel, C. A. M., Bosker, T., Hurley, R., Nizzetto, L., Adamczyk, B., y Velmala, S. (2024). Biodegradable microplastics induce profound changes in lettuce (Lactuca sativa) defense mechanisms and to some extent deteriorate growth traits. Environmental Pollution, 363, 125307. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125307

Armenta López, A. R., & Osuna Flores, I. (2026). Plasticultura en México: Impactos Ambientales y Desafíos para la Sostenibilidad. Revista Científica Arbitrada de la Fundación MenteClara, 11, 425. https://doi.org/10.32351/rca.v11.425

Bryant, M. T., Rossi, L., Mu, R., Cao, Z., y Ma, X. (2025). Synergistic effects of polystyrene nanoplastics and cadmium on the metabolic processes and their accumulation in hydroponically grown lettuce (Lactuca sativa). Journal of Agricultural and Food Chemistry, 73(26), 16157–16164. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5c03215

Caro-Martínez, D. M., Niño-Torres, C. A., Charruau, P., Rendón-von Osten, J., Castelblanco-Martínez, D. N., Rios Mendoza, L. M., Frausto-Martínez, O., y Blanco-Parra, M. del P. (2025). The state of microplastic pollution in México: A review and evolving perspectives. Science of the Total Environment, 988, 179772. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179772

European Commission. (2023). Microplastics pollution: Regulatory framework and research priorities. https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics/microplastics_en

Flores-García, E. M., Ramírez-Romero, P., Muthuswamy-Ponniah, J., Lakshmi-Jeyakumar, S. S., y Muñoz-Nájera, M. A. (2026). Microplastics in groundwater of two rural communities in Mexico. Tecnología y Ciencias del Agua, 17(3), 55–99. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2026-03-03

García-León, I., Guadarrama-Guzmán, P., Hernández-Ramírez, A. G., Martínez-Vázquez, A. V., Quiroz-Velásquez, J. D. C., y Estrada-Ortiz, K. S. (2026). Microplastic contamination in irrigation canals of a major agricultural region: A fluorescence-based monitoring study in Reynosa, Mexico. Environmental Monitoring & Assessment, 198(7). https://doi.org/10.1007/s10661-026-15563-z

González, O., Hernández, M., y Ramírez, J. (2021). Residuos agroplásticos generados por la agricultura protegida y su contaminación por plaguicidas. Bio Ciencias, 8, 1–15. https://doi.org/10.15741/338

Hassinger-Lino, G. R., Garcia, J., Maestro-Gaitán, I., Munoz, M., y Reguera, M. (2026). Ultrafine polystyrene nanoplastics penetrate roots and induce organelle damage and extensive transcriptomic reprogramming in Arabidopsis thaliana. Environmental Pollution, 403, 128382. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2026.128382

Heinen, E., Cizdziel, J. V., Olubusoye, B. S., Moore, M. T., y Witthaus, L. M. (2026). Microplastic pollution in agricultural waters in the Mississippi Delta. Journal of Xenobiotics, 16(3), 81. https://doi.org/10.3390/jox16030081

Jia, L., Liu, L., Zhang, Y., Fu, W., Liu, X., Wang, Q., Tanveer, M., y Huang, L. (2023). Microplastic stress in plants: Effects on plant growth and their remediations. Frontiers in Plant Science, 14, 1226484. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1226484

Jiang, J.-J., Hanun, J. N., Chen, K.-Y., Hassan, F., Liu, K.-T., Hung, Y.-H., y Chang, T.-W. (2023). Current levels and composition profiles of microplastics in irrigation water. Environmental Pollution, 318, 120858. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120858

Jiang, M., Zhao, W., Liang, Q., Cai, M., Fan, X., Jiang, Y., Li, T., Wang, Y., Peng, C., y Liu, J. (2024). Advances in physiological and ecological effects of microplastic on crop. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 24(2), 1741–1760. https://doi.org/10.1007/s42729-024-01752-7

Kajal, S., y Thakur, S. (2024). Coexistence of microplastics and heavy metals in soil: Occurrence, transport, key interactions and effect on plants. Environmental Research, 262, 119960. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119960

Kumar, V., Sharma, N., Umesh, M., Gupta, P., Sharma, P., Basheer, T., Dasarahally Huligowda, L. K., Thomas, J., Bhagat, S. K., y Pasrija, R. (2024). Microplastics in food: Occurrence, toxicity, green analytical detection methods and future challenges. Green Analytical Chemistry, 11, 100152. https://doi.org/10.1016/j.greeac.2024.100152

Kutralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F., Elizalde-Martínez, I., y Shruti, V. C. (2020). Branded milks – Are they immune from microplastics contamination? Science of the Total Environment, 714, 136823. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136823

Li, L., Luo, Y., Li, R., Zhou, Q., Peijnenburg, W. J. G. M., Yin, N., Yang, J., Tu, C., y Zhang, Y. (2020). Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode. Nature Sustainability, 3(11), 929–937. https://doi.org/10.1038/s41893-020-0567-9

Liu, H., y Chen, P. (2018). Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection. Water Research, 137, 362–374. https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.056

Liu, Y., et al. (2023). Apoplastic and symplastic pathways of nanoplastic transport in plant roots. Plant, Cell & Environment, 46(8), 2456–2470. https://doi.org/10.1111/pce.14620

López-Pérez, M. E., Camarena-Martínez, S., y Reyes-Castro, S. (2026). Microplásticos en la agricultura: consecuencias para la salud del suelo y la seguridad de los alimentos cultivados. NaturaLEEza, 33(1). https://www.naturaleeza.ugto.mx/index.php/ntz/article/view/56

López-Velázquez, K., López-Sánchez, A., Castillo-Quevedo, C., y Cabellos-Quiroz, J. L. (2026). First evidence of microplastics in bottled water sold in Mexico. ChemRxiv. https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2026-89bkg

Méndez, A., Pérez, L., y Soto, R. (2023). First insight into microplastic groundwater pollution in Latin America: The case of a coastal aquifer in Northwest Mexico. Environmental Science and Pollution Research, 30, 1–13. https://doi.org/10.1007/s11356-023-27461-9

Nizzetto, L., Binda, G., Hurley, R., Baann, C., Selonen, S., Velmala, S., y van Gestel, C. A. M. (2024). The pathology of hype, hyperbole and publication bias is creating an unwarranted concern towards biodegradable mulch films, Journal of Hazardous Materials, 471, 133690. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133690

Peralta-Peláez, L. A., et al. (2023). Microplásticos en playas de la zona de influencia del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano, México. Hidrobiológica, 33(2), 231–242. https://doi.org/10.24275/khdd6042

Qi, Y., Yang, X., Pelaez, A. M., Lwanga, E. H., Beriot, N., Gertsen, H., Garbeva, P., y Geissen, V. (2018). Macro- and micro-plastics in soil-plant system: Effects of plastic mulch film residues on wheat growth. Science of the Total Environment, 645, 1048–1056. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.229

Rillig, M. C., Lehmann, A., de Souza Machado, A. A., y Yang, G. (2019). Microplastic effects on plants. New Phytologist, 223(3), 1066–1070. https://doi.org/10.1111/nph.15794

Roy, T., Dey, T. K., y Jamal, M. (2023). Microplastic/nanoplastic toxicity in plants: an imminent concern. Environmental monitoring and assessment, 195(1), 27. https://doi.org/10.1007/s10661-022-10654-z

Roy, R., Hossain, A., Sultana, S., Deb, B., Ahmod, M. M., & Sarker, T. (2024). Microplastics increase cadmium absorption and impair nutrient uptake and growth in red amaranth (Amaranthus tricolor L.) in the presence of cadmium and biochar. BMC Plant Biology, 24, Article 608. https://doi.org/10.1186/s12870-024-05312-0

Shruti, V. C., Kutralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F., Roy, P. D., y Martínez, I. E. (2022). Occurrence and characteristics of atmospheric microplastics in Mexico City. Science of The Total Environment, 847, 157601. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157601

Sun, L., Wang, X., Zhao, H., Wang, Z., Zhao, Y., Huang, H., Yang, R., Wang, S., y Zhao, W. (2023). Micro/nanoplastics: A potential threat to crops. Vegetable Research, 3, Article 18. https://doi.org/10.48130/VR-2023-0018

Sun, X., Li, W., Pan, J., Jia, T., Chen, J., Zhou, Y., Li, R., Qin, M., Liu, Z., García-Caparrós, P., Liu, P., Shi, Q., y Yu, T. (2025). Visual tracking and quantitative analysis of polystyrene nanoplastics uptake and transport across various tomato varieties. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 73(51). https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5c13778

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., y Murphy, A. (2015). Plant physiology and development (6th ed.). Sinauer Associates.

Wang, W., Ge, J., Yu, X., & Li, H. (2020). Environmental fate and impacts of microplastics in soil ecosystems: Progress and perspective. Science of the Total Environment, 708, Article 134841. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134841

WHO. (2023). Dietary and inhalation exposure to nano- and microplastic particles and potential implications for human health. World Health Organization. https://www.who.int/publications/i/item/9789240054608

Yu, J., Chen, J., Li, Q., Ren, P., Tang, Y., Huang, R., Lu, Y., y Chen, K. (2024). Toxicity and fate of cadmium in hydroponically cultivated lettuce (Lactuca sativa L.) influenced by microplastics. Ecotoxicology and Environmental Safety, 278, 116422. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116422

Zantis, L. J., Borchi, C., Vijver, M. G., Peijnenburg, W., Di Lonardo, S., y Bosker, T. (2023). Nano- and microplastics commonly cause adverse impacts on plants at environmentally relevant levels: A systematic review. Science of the Total Environment, 867, 161211. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161211

Zhang, X., Lin, T., y Wang, X. (2022). Investigation of microplastics release behavior from ozone-exposed plastic pipe materials. Environmental Pollution, 296, 118758. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118758

Zubair, M., Ahmad, S., Zhao, X., y Ge, L. (2026). Microplastics and nanoplastics in agricultural and horticultural crops: Uptake pathways, multilevel responses, and challenges for risk assessment. Horticultural Plant Journal. Advance online publication. https://doi.org/10.1016/j.hpj.2026.06.001