



Revista Arbitrada de  
Ciencias Ambientales

# CIENCIA Y SOSTENIBILIDAD ANTE LOS DESAFÍOS AMBIENTALES

Volumen 1 | Número 1



**PERUVIAN SCIENCE**  
CENTRO EDITORIAL

ENERO - DICIEMBRE  
2025

---

# CIENCIA Y SOSTENIBILIDAD ANTE LOS DESAFÍOS AMBIENTALES

**Vol. 1 N° 1 – Diciembre 2025**

La Revista Arbitrada de Ciencias Ambientales es una publicación es una publicación científica de acceso abierto, que opera bajo el modelo de publicación continua, editada por Peruvian Science. Está dedicada a la difusión científica de investigaciones originales e inéditas, artículos de revisión, y contribuciones de autores provenientes de universidades, instituciones de investigación y organismos públicos. El principal criterio editorial es la publicación de manuscritos que presenten ideas novedosas, capaces de enriquecer la comprensión de los desafíos ambientales contemporáneos. Los estudios pueden centrarse en casos específicos, pero deben abordar problemáticas de relevancia y las metodologías empleadas deben representar un avance o una perspectiva innovadora frente a los enfoques actuales. La revista acepta contribuciones en español, inglés y portugués, e incluso quechua, reflejando la diversidad lingüística y la colaboración científica en América Latina. A través de sus publicaciones, la revista tiene como propósito fundamental fomentar el diálogo interdisciplinario y promover una investigación que impulse la sostenibilidad ambiental.

Edición: Diciembre – 2025

©CENTRO EDITORIAL PERUVIAN SCIENCE S.A.C.

Dirección: Mza. E Lt. 7 Urb. Santa Fe de Naranjal

San Martín de Porres

Lima, Perú

[peruvianscience.org](http://peruvianscience.org)

[revistas.peruvianscience.org](http://revistas.peruvianscience.org)

---

# CIENCIA Y SOSTENIBILIDAD ANTE LOS DESAFÍOS AMBIENTALES

**Vol. 1 N° 1 – Diciembre 2025**

La Revista Arbitrada de Ciencias Ambientales es una publicación semestral de acceso abierto, editada por Peruvian Science. Está dedicada a la difusión científica de investigaciones originales e inéditas, artículos de revisión, y contribuciones de autores provenientes de universidades, instituciones de investigación y organismos públicos. El principal criterio editorial es la publicación de manuscritos que presenten ideas novedosas, capaces de enriquecer la comprensión de los desafíos ambientales contemporáneos. Los estudios pueden centrarse en casos específicos, pero deben abordar problemáticas de relevancia y las metodologías empleadas deben representar un avance o una perspectiva innovadora frente a los enfoques actuales. La revista acepta contribuciones en español, inglés y portugués, e incluso quechua, reflejando la diversidad lingüística y la colaboración científica en América Latina. A través de sus publicaciones, la revista tiene como propósito fundamental fomentar el diálogo interdisciplinario y promover una investigación que impulse la sostenibilidad ambiental.

Edición: Diciembre – 2025

©CENTRO EDITORIAL PERUVIAN SCIENCE S.A.C.

Dirección: Mza. E Lt. 7 Urb. Santa Fe de Naranjal

San Martín de Porres

Lima, Perú

[peruvianscience.org](http://peruvianscience.org)

[revistas.peruvianscience.org](http://revistas.peruvianscience.org)

---

---

**Editor en Jefe**

Dr. Ricardo Ángel Yuli Posadas

**Coordinación Editorial**

Camila Valentina Marzal Rios

**Comité Editorial**

Dr. Juan Gabriel Brigido Morales

Dra. Cynthia Serna Abascal

Dr. Juan José Díaz Nigenda

Dr. Miguel Servín Palestina

Dr. Antonio José Obregón-La Rosa

Mg. Neiba Yadira Echeagaray  
Solorza

Mg. Irving Giovani Carbajal  
Suastegui

**Equipo de apoyo Editorial**

Ing. Ebed Guerra Borda

Lic. Benjamín Gregorio Alejos  
Cuchura

**Comité Científico**

Dr. Jorge Víctor Prado Hernández

Dra. Marisol Galicia Juárez

Dr. Ildefonso Narváez Ortiz

Dra. Maribel Pallanez Murrieta

Dra. Irma Baldovinos Leyva

Dr. Juan Carlos Lázaro Guillermo

Dra. Julieta Elizabeth Salazar  
Echeagaray

Dra. Nancy Esmeralda Sánchez  
Duarte

---

## ÍNDICE

|                              |          |
|------------------------------|----------|
| <b>Carta Editorial .....</b> | <b>4</b> |
|------------------------------|----------|

|                                                                                           |          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Sector industrial y emisiones de PM2.5 en las principales economías del mundo.....</b> | <b>7</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------|

Jonathan Hernández Pérez, Blanca Margarita Montiel Batalla\* y Jimena Achiquen Millán

|                                                                                                                                                      |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Efecto del diésel sobre el crecimiento y la composición bioquímica de <i>Chlorella</i> spp.: mixotrofía y consorcios microalga-bacteria .....</b> | <b>23</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|

Laugeny Díaz Borrego\*, Julio Marín Leal, Soiré Huerta Méndez y Ever Morales Avendaño

|                                                                                                                                                                                       |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Contaminación ambiental por residuos plásticos derivados del uso de sistemas de riego agrícola: una revisión bibliométrica de tendencias científicas globales (2015–2025).....</b> | <b>51</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|

Ana Paula Serna Abascal, Rubén Velasco Hernández\* y Ausel Horacio Gutiérrez Méndez

|                                                                                                                                         |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>El reciclaje en los estudiantes de secundaria y su contribución esencial al fortalecimiento de la sostenibilidad ambiental .....</b> | <b>76</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|

Oliviño Zegarra Arteaga\*

|                                                                                                                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Implementación de herramientas de IA (NotebookLM) para la capacitación técnica en normatividad relacionada con los residuos peligrosos bibliométrico.....</b> | <b>97</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|

José Ramón Laines-Canepa y Luis Fernando Botero-Mendoza.



# REVISTA ARBITRADA DE CIENCIAS AMBIENTALES

CIENCIA Y SOSTENIBILIDAD ANTE LOS DESAFÍOS  
AMBIENTALES

## Carta Editorial

Estimados autores, lectores y público en general:

Con entusiasmo presentamos el primer número de la Revista Arbitrada de Ciencias Ambientales, un espacio dedicado a la divulgación del conocimiento en este campo esencial.

En un mundo donde el medio ambiente enfrenta presiones debido a la actividad humana, las ciencias ambientales se erigen no solo como un testigo crítico, sino como un agente de transformación. En este número, se reúnen investigaciones que abordan, desde múltiples escalas y disciplinas, tanto la huella de la contaminación moderna como las respuestas científicas, tecnológicas y sociales.

La contaminación no es un fenómeno aislado, sino un mosaico interconectado donde podemos hablar desde las emisiones de las grandes industrias que afectan la calidad del aire en las principales economías del planeta, hasta los microplásticos que se infiltran silenciosamente en los suelos agrícolas, modificando sus características físicas, químicas y biológicas. O desde los accidentes en actividades mineras o industriales que pueden

---

provocar una afectación de los ecosistemas, hasta las respuestas que nacen desde la educación, la cultura y la innovación tecnológica aplicada a la formación de profesionales capaces de interpretar y gestionar marcos normativos ambientales que pudieran resultar complejos.

Cada una de las actividades que realiza el ser humano en pro del desarrollo no está exenta de afectar el medio ambiente; por lo que no podemos ignorar nuestra huella ecológica. En este contexto, los artículos aquí presentados ofrecen una mirada interdisciplinaria donde podemos resaltar la urgencia de políticas públicas ambientales basadas en evidencia, la existencia de vulnerabilidades ecológicas específicas, y el desarrollo de soluciones innovadoras que van desde la biotecnología, hasta la educación ambiental aplicada.

En conjunto, estos trabajos nos muestran un panorama en el que se observa cómo la ciencia ambiental puede diagnosticar, pero también ofrecer alternativas para un mundo resiliente. Sin embargo, este primer número también deja entrever el vasto horizonte de investigación que queda por explorar. Los hallazgos aquí publicados nos invitan a reflexionar, por ejemplo, en las políticas de descarbonización, la optimización de biorreactores para remediación a gran escala, el ciclo de vida completo de los materiales en la agricultura tecnificada, y el papel de las dinámicas sociales en la adopción de tecnologías verdes. Asimismo, surgen nuevas oportunidades para integrar herramientas emergentes, como la inteligencia ambiental, la economía circular y la ciencia de datos en la modelación de sistemas complejos y en la transición hacia la sostenibilidad.

Confiamos en que este primer número pueda repercutir en alguna medida tanto en investigadores, como en educadores e incluso en la ciudadanía comprometida con la consecución de un futuro más limpio y sostenible. Los invitamos a sumarse a este diálogo científico, cuyos próximos números estamos seguros de que serán tan diversos como los retos que enfrenta nuestro planeta.

**Dr. Juan Gabriel Brigido Morales**

 0000-0003-3442-9510

Universidad Autónoma de Baja California

[juan.brigido@uabc.edu.mx](mailto:juan.brigido@uabc.edu.mx)





## Sector industrial y emisiones de PM2.5 en las principales economías del mundo

Industrial sector and PM2.5 emissions in the world's major economies

**Jonathan Hernández-Pérez**

Instituto de Ciencias Agrícolas

Universidad Autónoma de Baja California, México

0000-0002-8892-8115 | [jonathan.hernandez80@uabc.edu.mx](mailto:jonathan.hernandez80@uabc.edu.mx)

**Blanca Margarita Montiel-Batalla\***

Instituto de Ciencias Agrícolas

Universidad Autónoma de Baja California, México

0000-0003-0959-5365 | [blanca.montiel@uabc.edu.mx](mailto:blanca.montiel@uabc.edu.mx)

\*Autor para correspondencia

**Jimena Achiquen-Millán**

Instituto de Ciencias Agrícolas

Universidad Autónoma de Baja California, México

0000-0003-4617-2759 | [jimena.achiquen@uabc.edu.mx](mailto:jimena.achiquen@uabc.edu.mx)

**Cita APA:** Hernández-Pérez, P. J., Montiel-Batalla, B. M. y Achiquen-Millán, J. (2025). Sector industrial y emisiones de PM2.5 en las principales economías del mundo. *Revista Arbitrada de Ciencias Ambientales*, 1(1), 7-21. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18487454>

## Resumen

La contaminación del aire es uno de los problemas que más aqueja a la población de las zonas urbanas y de los países más industrializados. Dentro de los contaminantes más comunes se encuentra el material particulado con diámetros aerodinámicos menores a 2.5 micrómetros (PM2.5), el cual proviene principalmente de la industria. El objetivo del presente trabajo fue determinar el efecto que tiene el tamaño del sector industrial en las emisiones de PM2.5 en las principales economías del mundo, mediante una regresión con datos de panel, con el método de mínimos cuadrados generalizados factibles (MCGF). El panel incluyó 11 países (India, China, México, Rusia, Alemania, Brasil, Francia, Inglaterra, Japón, Estados Unidos y Canadá) durante un periodo de 14 años (1998 a 2011). Los resultados sugieren que un aumento del 1% en la participación del sector industrial como proporción del producto interno bruto (PIB) se asocia con un incremento del 0.43% en las concentraciones de material particulado PM2.5. La descarbonización, la reducción de la dependencia de combustibles fósiles y la transición hacia el consumo de energías limpias, puede reducir las emisiones en la industria y los efectos negativos en la salud de la población, del medio ambiente y de la economía.

**Palabras clave:** combustibles fósiles, contaminación del aire, efectos aleatorios, energía renovable, panel.

## Abstract

Air pollution is one of the most pressing problems facing urban populations and the most industrialized countries. Among the most common pollutants is particulate matter with aerodynamic diameters less than 2.5 micrometers (PM<sub>2.5</sub>), which originates primarily from industry. The objective of this study was to determine the effect of the size of the industrial sector on PM<sub>2.5</sub> emissions in the world's major economies using panel data regression using the generalized least feasible squares (GLFS) method. The panel included 11 countries (India, China, Mexico, Russia, Germany, Brazil, France, England, Japan, the United States, and Canada) over a 14-year period (1998–2011). The results suggest that a 1% increase in the share of the industrial sector as a proportion of gross domestic product (GDP) is associated with a 0.43% increase in PM<sub>2.5</sub> particulate matter concentrations. Decarbonization, reducing dependence on fossil fuels, and transitioning toward clean energy consumption can reduce industrial emissions and the negative effects on people's health, the environment, and the economy.

**Key Words:** fossil fuels, air pollution, random effects, renewable energy, panel.

## Introducción

La contaminación atmosférica es uno de los principales desafíos que enfrentan las poblaciones urbanas y los países altamente industrializados. El sector manufacturero destaca como la mayor fuente de emisiones de material particulado menor a 2.5 micrómetros (PM2.5) (Mahapatra *et al.*, 2021; Mohyuddin *et al.*, 2024), producto del elevado consumo de combustibles fósiles en motores y calderas (Mo *et al.*, 2023).

Este fenómeno se ha intensificado con la globalización, ya que la creciente demanda internacional ha acelerado la industrialización, incrementando tanto el uso de recursos como los niveles de polución (Wang *et al.*, 2018). Como resultado, el desarrollo económico, la expansión industrial y el crecimiento urbano han elevado sostenidamente las concentraciones de PM2.5 en el aire (Li *et al.*, 2016). Esta incidencia del sector manufacturero en los niveles de PM2.5 no sigue un patrón constante a lo largo del tiempo. Si bien los procesos industriales, impulsados por una mayor producción y tecnologías contaminantes, son determinantes en la degradación de la calidad del aire, su impacto presenta variaciones no lineales (Zambrano-Monserrate *et al.*, 2024).

Las PM2.5 se encuentran entre los contaminantes más significativos a nivel mundial (Wang *et al.*, 2018); entran en el sistema respiratorio por inhalación, causando enfermedades respiratorias, cardiovasculares, del sistema nervioso central y cáncer (Manisalidis *et al.*, 2020). A nivel mundial, mueren prematuramente más de 3 millones de personas cada año por exposición prolongada a PM2.5, sobre todo en las regiones del este y sudeste asiático, que están experimentando una rápida industrialización y urbanización (Jerrett, 2015). La rápida industrialización y el desarrollo económico en el sur de Asia han causado graves problemas relacionados con la contaminación del aire (ul-Haq *et al.*, 2023).

Se estima que China tiene mayor exceso de mortalidad debido a la exposición a largo plazo a PM2.5, seguido de India y Pakistán (Chowdhury *et al.*, 2022). En 2019, el número de muertes por exposición a este contaminante fueron de 1.7 millones en China, 1.5 millones en India, 230 mil en Pakistán, 197 mil en Nigeria, 184 mil en Indonesia y 169 mil en Bangladesh, mientras que en México esta cifra fue 46 mil (Banco Mundial, 2022). En la región de Oriente Medio más del 90 % de la contaminación por partículas finas es de origen antrópico, principalmente proveniente de la producción de energía fósil, la industria petroquímica y el intenso transporte marítimo (Osipov *et al.*, 2022).

Consecuentemente, la exposición a largo plazo de PM2.5 incrementa los costos de vida de la población relacionados a problemas de salud (Xu *et al.*, 2025), especialmente en las personas mayores (Yin *et al.*, 2021). A nivel mundial, los costos económicos relacionadas a la salud y contaminación del aire por

PM2.5 representaron de 4.4 a 6.1% del Producto Interno Bruto (PIB). Sin embargo, los costos más altos fueron en la región Europa y Asia Central: Serbia en primer lugar (18.9%), Bulgaria (16.3%), Macedonia del Norte (15.9%); y en la región Asia Oriental y el Pacífico: China (12.9%), Nueva Guinea (12.0%) y Myanmar (11.4%) (Banco Mundial, 2022).

Según el Índice de Desempeño Ambiental 2024, en la categoría de calidad del aire, los países que ocupan las últimas posiciones entre los 180 evaluados son Nepal, Pakistán, Bangladesh e India. China se ubica en el puesto 168, mientras que México se encuentra en la posición 129 (Block *et al.*, 2024). Es decir, estos países tuvieron el peor desempeño en la gestión de la calidad del aire.

Luo *et al.* (2018) realizaron un estudio sobre los determinantes socioeconómicos que influyen sobre las concentraciones de PM2.5; de los cuales, la proporción del sector secundario de la economía es la que más contribuye al aumento de las concentraciones. Los factores que siguen son: el PIB per cápita, la urbanización, la población, la intensidad energética y la proporción del sector terciario. Por su parte, Xie y Sun (2020) analizaron los efectos que tienen la inversión extranjera directa (IED) sobre las concentraciones de PM2.5 concluyendo que a niveles más bajos de IED, estas tienen un efecto positivo en la reducción de las concentraciones.

La actual crisis climática y energética requiere una transición acelerada hacia un sistema energético verde, bajo en carbono y eficiente (Yang *et al.*, 2025) para lograr los objetivos del desarrollo sostenible 3 “salud y bienestar”, 7 “energía asequible y no contaminante”, y 9 “industria, innovación e infraestructura”. Adicionalmente, el aumento de los fenómenos meteorológicos extremos como el frío y el calor extremo aumentan la demanda de energía, disminuyen la eficiencia energética y amplifican el consumo de carbón; en consecuencia, elevan la intensidad de la contaminación por PM2.5 (Jiang *et al.*, 2024). Por lo tanto, mejorar la calidad del aire es clave para la salud pública, y se necesitan políticas para reducir tanto los riesgos ambientales como las enfermedades crónicas (Huibin Mo & Wang, 2024). Es necesario planificar y adoptar políticas de control para reducir la contaminación atmosférica y los impactos económicos (Salehi *et al.*, 2023).

Existen diversos estudios que analizan la hipótesis de la curva de Kuznets ambiental, aunque la mayoría se centra en el CO<sub>2</sub> como variable principal (Guo & Shahbaz, 2024). Sin embargo, las investigaciones sobre material particulado PM2.5 son escasas. Algunos trabajos han explorado los determinantes de sus concentraciones, pero estos suelen limitarse geográficamente, con un enfoque predominante en China. Esta omisión es particularmente relevante, pues las estrategias de mitigación requieren evidencia robusta sobre los determinantes específicos de estas emisiones en

diferentes contextos económicos. Este trabajo busca cuantificar la relación entre el tamaño del sector industrial y las emisiones de PM2.5 en las principales economías mundiales durante el periodo 1998-2011, empleando un enfoque de datos panel. A diferencia de estudios previos, el análisis distingue entre efectos estructurales y perturbaciones transitorias, con el fin de proporcionar bases empíricas para políticas ambientales diferenciadas según las características de cada economía.

## Materiales y métodos

Para determinar el efecto que tiene el sector industrial sobre las emisiones de PM2.5 se planteó un modelo de regresión con datos panel (Ecuación 1). El panel de datos consiste en una combinación de datos de corte transversal con una serie de tiempo, el cual incluyó 11 países: India, China, México, Rusia, Alemania, Brasil, Francia, Inglaterra, Japón, Estados Unidos y Canadá; y un periodo de 14 años, que va de 1998 a 2011. La selección del periodo analizado fue con base en la disponibilidad de datos del Banco Mundial. Sin embargo, la elección de los países fue con relación a la clasificación de las principales economías del mundo según el PIB en dólares estadounidenses a precio actuales, publicados por el Banco Mundial (BM, 2025).

$$PM2.5_{it} = \beta_0 + \beta_1 IND_{it} + \beta_2 EFOSIL_{it} + \beta_3 ERENOV_{it} + \beta_4 PIBPC_{it} + \epsilon_{it} \quad (Ec. 1)$$

Donde:

Los subíndices  $it$ , se refieren a los países y a los años, respectivamente.

$PM2.5_{it}$  es el logaritmo natural de la contaminación del aire por PM2.5, medida por la exposición anual media (microgramos por metro cúbico). La exposición se calcula ponderando las concentraciones medias anuales de PM2.5 por población, tanto en zonas urbanas como rurales.

$IND_{it}$  es el logaritmo natural del valor agregado de la industria como porcentaje del PIB. Se espera que, a mayor tamaño de la industria, mayor efecto positivo sobre las emisiones de PM2.5.

$EFOSIL_{it}$  representa el logaritmo natural del consumo de energía procedente de combustibles fósiles como porcentaje del total. El combustible fósil comprende los productos de carbón, aceite, petróleo y gas natural. Se espera que un mayor consumo de energía fósil genere un aumento en las emisiones contaminantes, lo cual se reflejaría en un coeficiente positivo para esta variable en el modelo de regresión.

$ERENOV_{it}$  representa el logaritmo natural del consumo de energía renovable como porcentaje del consumo total de energía final. La evidencia teórica y empírica sugiere que el uso de energías renovables está inversamente asociado con la concentración de PM2.5, por lo que su coeficiente en el modelo debería ser negativo.

$PIBPC_{it}$  es el logaritmo natural del PIB per cápita. Es decir, el producto interno bruto dividido por la población a mitad de año. El PIB es la suma del valor agregado bruto de todos los productores residentes en la economía más los impuestos sobre los productos y menos los subsidios no incluidos en el valor de los productos. Se calcula sin hacer deducciones por depreciación de activos fabricados o por agotamiento y degradación de recursos naturales. Los datos están en dólares estadounidenses constantes de 2015 (BM, 2025).

$\epsilon_{it}$  captura fluctuaciones aleatorias por país y período.

$\beta_{1-4}$  son los coeficientes que miden la relación entre las variables independientes y la variable dependiente.

Como señala Baltagi (2021), los datos de panel mejoran la eficiencia econométrica al combinar información transversal y temporal, controlando heterogeneidad no observable y reduciendo sesgos por variables omitidas. Además, permiten modelar estructuras flexibles de errores para abordar heterocedasticidad y autocorrelación. Se utilizó el comando `xtgls` en el paquete estadístico Stata con opciones de `panels(heteroskedastic)` y `corr(ar1)`.

La regresión se estimó mediante el método de Mínimos Cuadrados Generalizados Factibles (MCGF) para corregir la heterocedasticidad y autocorrelación. El estimador MCGF supera a mínimos cuadrados ordinarios MCO en tres dimensiones clave: i) eficiencia asintótica bajo heterocedasticidad y/o autocorrelación, ii) intervalos de confianza con menor amplitud, y iii) mayor potencia en contrastes de hipótesis (Hansen, 2007).

## Resultados y discusión

Los países con mayores emisiones de PM2.5 son: India, China y México. Sin embargo, China tiene un sector industrial más grande que el resto de los países, seguido de México, Rusia y Japón. El consumo de energía fósil en todos los países incluidos en el panel representa más del 50%, mientras que Brasil destaca en el consumo energía renovable (Tabla 1).

**Tabla 1.** Media y desviación estándar de las variables por países, 1998-2011.

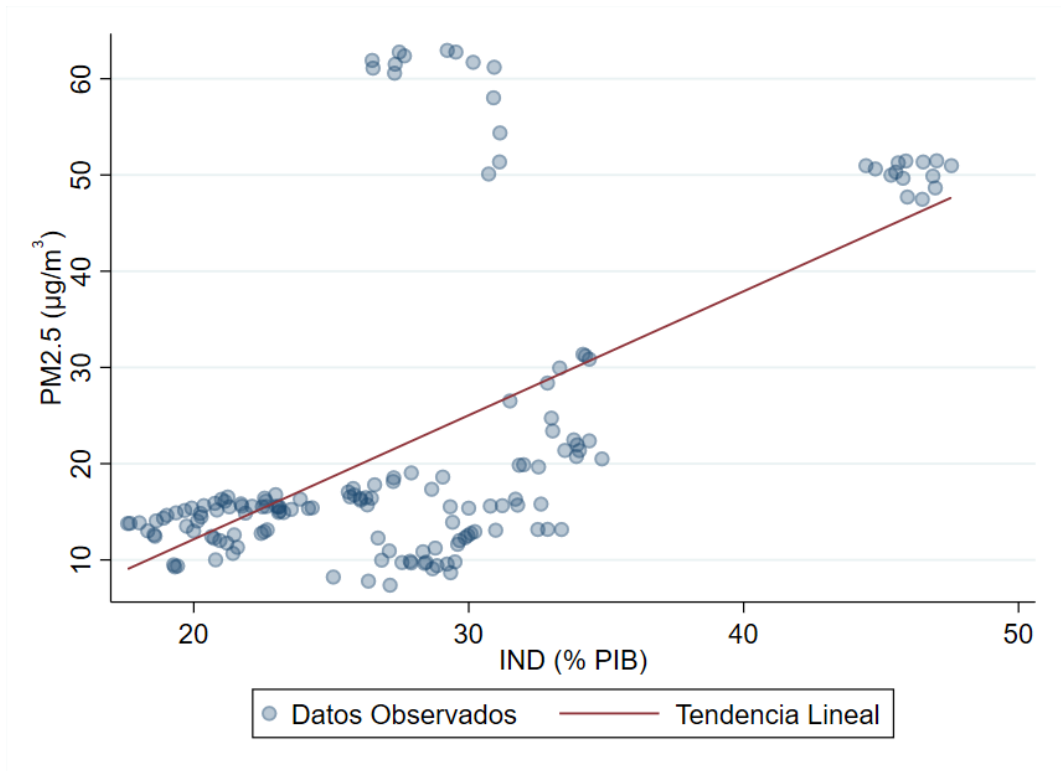
| País     | PM2.5  | IND    | EFOSIL | ERENOV | PIBPC      |
|----------|--------|--------|--------|--------|------------|
| India    | 59.478 | 29.036 | 66.499 | 43.021 | 948.866    |
|          | 4.35   | 1.825  | 3.205  | 4.388  | 192.921    |
| China    | 50.126 | 46.063 | 84.27  | 20.621 | 3,576.359  |
|          | 1.341  | 0.892  | 3.667  | 7.216  | 1,406.191  |
| México   | 25.189 | 33.439 | 88.845 | 10.479 | 9,452.947  |
|          | 4.429  | 0.991  | 1.179  | 1.203  | 256.105    |
| Rusia    | 17.409 | 31.269 | 90.872 | 3.5    | 7,048.572  |
|          | 2.601  | 1.809  | 0.454  | 0.171  | 1,635.802  |
| Alemania | 17.058 | 26.214 | 82.158 | 7.243  | 36,561.020 |
|          | 0.987  | 0.951  | 1.658  | 3.39   | 2,046.811  |

## Sector industrial y emisiones de PM2.5 en las principales economías del mundo

| País           | PM2.5  | IND    | EFOSIL | ERENOV | PIBPC      |
|----------------|--------|--------|--------|--------|------------|
| Brasil         | 15.331 | 22.97  | 55.042 | 45.207 | 7,540.511  |
|                | 0.269  | 0.758  | 2.354  | 2.089  | 816.357    |
| Francia        | 15.022 | 19.521 | 52.073 | 9.664  | 19.521     |
|                | 0.973  | 1.271  | 1.625  | 1.037  | 1.271      |
| Inglaterra     | 14.553 | 20.561 | 88.135 | 1.721  | 41,304.810 |
|                | 1.473  | 1.528  | 1.161  | 1.028  | 2,444.087  |
| Japón          | 12.289 | 30.006 | 82.272 | 4.143  | 32,277.260 |
|                | 0.84   | 1.976  | 2.533  | 0.411  | 1,089.808  |
| Estados Unidos | 11.427 | 21.035 | 85.5   | 6.021  | 50,879.470 |
|                | 1.405  | 1.134  | 0.888  | 1.14   | 2,716.938  |
| Canadá         | 9.183  | 27.941 | 75.425 | 21.136 | 27.941     |
|                | 0.84   | 1.259  | 0.604  | 0.884  | 1.259      |

La relación entre los datos observados del tamaño de la industria como porcentaje del PIB y la contaminación por PM2.5 es positiva (Figura 1). El coeficiente de correlación de Pearson fue 0.5919 y el de Spearman, 0.5183. Es decir, cuando la variable IND aumenta, la PM2.5 también lo hace. La correlación alta entre la proporción industrial del PIB y las emisiones de PM2.5, se debe a la mayor presencia de industrias basadas en carbón y a condiciones no favorables para la dispersión de contaminantes (S. Wang *et al.*, 2017).

El coeficiente de la variable IND para el modelo fue 0.43, con una significancia estadística menor al 5%, lo que sugiere que, dentro de este modelo, hay evidencia suficiente para afirmar que esta variable tiene un impacto determinante en la variable dependiente. Es decir, un aumento del 1% en la participación del sector industrial como proporción del PIB se asocia con un incremento del 0.43% en las concentraciones de material particulado PM2.5. El coeficiente estimado para el consumo de energía fósil revela una relación positiva y estadísticamente significativa con las emisiones contaminantes; específicamente, un incremento del 1% en el consumo de combustibles fósiles se asocia con un aumento del 0.25% en las emisiones de contaminantes atmosféricos. Los resultados indican que el consumo de energía renovable tiene un efecto reductor sobre las concentraciones de PM2.5, aunque este impacto es marginal y estadísticamente no significativo. También, muestran una relación negativa entre el ingreso per cápita y las emisiones de PM2.5; específicamente, un incremento del 1% en el PIBPC se asocia con una disminución del 0.02% en las concentraciones de este contaminante (Tabla 2).



**Figura 1.** Relación entre las variables IND y PM2.5

**Tabla 2.** Resultados de las estimaciones del modelo de regresión

|                   | 1                     |
|-------------------|-----------------------|
| IND               | 0.4302***<br>(0.0859) |
| EFOSIL            | 0.2582*<br>(0.1442)   |
| ERENOV            | -0.0007<br>(0.0238)   |
| PIBPC             | -0.0209*<br>(0.0112)  |
| CONSTANTE         | 0.4907<br>(0.5575)    |
| Observaciones     | 154                   |
| Grupos            | 11                    |
| Periodo           | 14                    |
| Wald $\chi^2$ (4) | 38.79***              |

Nota: significancia estadística: <0.1 \*, <0.05 \*\*, <0.01 \*\*\*. Error estándar entre paréntesis.

Los modelos lineales de datos de panel mediante mínimos cuadrados generalizados factibles permiten la estimación en presencia de autocorrelación AR(1) dentro de los paneles, así como correlación transversal y heterocedasticidad entre paneles. Sin embargo, debido a que este modelo hace una serie de transformaciones no estima R cuadrada (Wooldridge, 2010). El estadístico Wald  $\chi^2$  con 4 grados de libertad, significativamente menos de

1%, indica que al menos un coeficiente de las variables independientes es diferente de cero.

Los diferentes niveles de urbanización tienen efectos positivos sobre las emisiones de PM2.5 en aquellas ciudades con mayor presencia de industrias con uso intensivo de energía, como la producción de cemento y acero. El desarrollo económico de este sector ha estado acompañado de un alto consumo de combustibles fósiles (S. Wang *et al.*, 2017). No obstante, los impactos son menores en los países desarrollados debido a que durante la globalización, la industria manufacturera creció rápidamente en los países en desarrollo (Q. Wang *et al.*, 2019).

Los países con alto consumo de carbón para energía y para la industria, por ejemplo, China, India y Rusia, presentan severos problemas con las concentraciones de PM2.5, hasta 10 veces superiores al límite recomendado (OMS, 2021). Las exposiciones altas a contaminación por PM2.5 ocasiona problemas en la salud de la población y de los trabajadores en la industria, de manera que se incrementa el costo por problemas relacionados a la salud y reduce el bienestar de la población en general. Asimismo, puede mermar la productividad laboral en el sector industrial (Abidin *et al.*, 2023; Joshi *et al.*, 2025).

Los resultados son consistentes con los hallazgos de Zambrano-Monserrate *et al.* (2024), quienes identifican que la industrialización incrementa las concentraciones de PM2.5. No obstante, estos autores sugieren que es posible implementar políticas para reducir dichas emisiones sin comprometer el nivel de actividad industrial.

Mo *et al.*, (2023) proponen la transferencia de industrias tradicionales a zonas menos industrializadas, promover la descarbonización industrial y la modernización tecnológica industrial para reducir la dependencia de energía fósil. Lo anterior, exacerbaría la intensidad de la contaminación atmosférica con menor concentración de PM2.5 por unidad de PIB industrial. Las políticas para reducir las emisiones de PM2.5 deben enfocarse en estos factores estructurales.

El uso de tecnologías de energía renovable limpia y alternativa basadas en energía solar y eólica, reduciría los impactos económicos sobre la salud y de las economías (Chowdhury *et al.*, 2022; F. Yang *et al.*, 2024). Es decir, sustituir el consumo de combustibles fósiles por gas natural (Dong *et al.*, 2018) u otras fuentes de energías renovables, puede contribuir a reducir las emisiones de PM2.5 en los países más industrializados. Muestra de ello son Islandia y Finlandia, que gracias a un estricto control de la contaminación atmosférica en el sector industrial, así como a la expansión de los mercados de vehículos eléctricos, lograron reducir sus niveles de emisiones (Block *et al.*,

2024). Mientras que en India, pese a existir un marco regulatorio, su aplicación resulta inconsistente y fragmentada (X. Jiang, 2023).

En México el problema de la contaminación fue por la sobre industrialización en las ciudades más pobladas y al bajo consumo de energías renovables (Silva Rodríguez, 2018). Sin embargo, en los últimos años ha demostrado avances significativos mediante programas de gestión de calidad del aire, aunque persisten retos críticos, particularmente en el control de emisiones derivadas de la combustión de diésel y de procesos industriales (Amador-Muñoz *et al.*, 2022).

Pese a que los niveles de contaminación por PM<sub>2.5</sub> afectan los ingresos personales debido a los costos en la salud y a la reducción en la productividad laboral (Lian *et al.*, 2025; Lin *et al.*, 2024). También existe una relación entre niveles socioeconómicos más bajos con concentraciones de PM<sub>2.5</sub> más altas, debido a que las industrias contaminantes están ubicadas cerca de barrios de bajos ingresos (Chakraborti & Voorheis, 2025).

Un mayor nivel de ingresos contribuye a reducir la contaminación del aire mediante múltiples mecanismos interrelacionados. Según la hipótesis de la Curva de Kuznets Ambiental, al alcanzar cierto umbral de desarrollo, las sociedades priorizan políticas ambientales más estrictas e invierten en tecnologías limpias, facilitando la transición hacia economías menos intensivas en contaminación (Dinda, 2004). Sin embargo, este proceso puede generar injusticia ambiental, ya que los hogares de mayores ingresos suelen trasladarse a zonas menos contaminadas, mientras las comunidades vulnerables quedan expuestas a mayores riesgos (Banzhaf & Walsh, 2006). Además, la educación y conciencia ambiental, asociadas a mayores ingresos, impulsan demandas sociales por sostenibilidad (Hu *et al.*, 2025).

## Conclusiones

Se concluye que el crecimiento en el sector industrial tiene efectos sobre la contaminación por PM<sub>2.5</sub> en las principales economías del mundo. Estos efectos están relacionados con las características estructurales de cada país y no con shocks temporales, tales como crisis económicas, desastres naturales, conflictos geopolíticos o fluctuaciones en los precios de los energéticos. Es decir, a medida que incrementa el tamaño del sector industrial, la contaminación por PM<sub>2.5</sub> también incrementa, sobre todo en aquellas economías con alta dependencia en energías fósiles. Por lo que, una alternativa es descarbonizar y transitar hacia el consumo de energías limpias. Lo anterior puede contribuir a reducir los impactos negativos sobre la salud de la población, del medio ambiente y de la economía.

Si bien el ingreso per cápita muestra un efecto reductor, su magnitud es insuficiente para compensar el impacto de actividades contaminantes. La

transición hacia un modelo industrial y energético bajo en carbono no solo es deseable, sino urgente, para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible.

La mitigación de PM2.5 en países industrializados demanda políticas integradas que equilibren crecimiento económico y salud pública, priorizando tecnologías limpias y equidad territorial. La experiencia internacional muestra que acciones decididas pueden lograr reducciones significativas.

Se sugiere nuevas investigaciones con análisis de econometría espacial, debido a que el viento transporta contaminantes atmosféricos a través de las fronteras políticas. Consecuentemente, la calidad del aire en un país puede depender de las actividades de sus vecinos.

## Referencias

- Abidin, A. U., Maziya, F. B., Susetyo, S. H., Yoneda, M., & Matsui, Y. (2023). Exposure particulate matter (PM2.5) and health risk assessment on informal workers in landfill site, Indonesia. *Environmental Challenges*, 13, 100795. <https://doi.org/10.1016/J.ENVCL.2023.100795>
- Amador-Muñoz, O., González-Ramírez, A. E., & Villalobos-Pietrini, R. (2022). Polycyclic aromatic hydrocarbons in PM2.5 in the metropolitan zone of Mexico Valley: Impact of air quality management programmes. *Urban Climate*, 42, 101096. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2022.101096>
- Banco Mundial. (2022). The Global Health Cost of PM2.5 Air Pollution: A Case for Action Beyond 2021. The Global Health Cost of PM2.5 Air Pollution: A Case for Action Beyond 2021. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1816-5>
- Banzhaf, H. S., & Walsh, R. (2006). Do People Vote with Their Feet? An Empirical Test of Environmental Gentrification. RFF Working Paper Series. <https://ideas.repec.org/p/rff/dpaper/dp-06-10.html>
- Block, S., Emerson, J. W., Esty, D. C., de Sherbinin, A., & Wendling, Z. A. (2024). Environmental Performance Index 2024. Yale Center for Environmental Law & Policy. <https://epi.yale.edu/downloads/2024-epi-report-20250106.pdf>
- BM. (2025). Datos de libre acceso del Banco Mundial. <https://datos.bancomundial.org/indicador>
- Chakraborti, L., & Voorheis, J. (2025). Is air pollution increasing in poorer localities of Mexico? Evidence from PM 2.5 satellite data. *Environment and Development Economics*, 30(1), 52–69. <https://doi.org/10.1017/S1355770X24000251>
- Chowdhury, S., Pozzer, A., Haines, A., Klingmüller, K., Münzel, T., Paasonen, P., Sharma, A., Venkataraman, C., & Lelieveld, J. (2022). Global health burden of ambient PM2.5 and the contribution of anthropogenic black carbon and organic aerosols. *Environment International*, 159, 107020. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.107020>
- Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey. *Ecological Economics*, 49(4), 431–455. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2004.02.011>

- Dong, K., Sun, R., Dong, C., Li, H., Zeng, X., & Ni, G. (2018). Environmental Kuznets curve for PM<sub>2.5</sub> emissions in Beijing, China: What role can natural gas consumption play? *Ecological Indicators*, 93, 591–601. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.045>
- Guo, X., & Shahbaz, M. (2024). The existence of environmental Kuznets curve: Critical look and future implications for environmental management. *Journal of Environmental Management*, 351, 119648. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2023.119648>
- Hansen, C. B. (2007). Generalized least squares inference in panel and multilevel models with serial correlation and fixed effects. *Journal of Econometrics*, 140(2), 670–694. <https://doi.org/10.1016/J.JECONOM.2006.07.011>
- Hu, B., Wang, C., Xia, Z., Lu, C., & Ju, X. (2025). Environmental education in low-income and middle-income countries: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Environmental Psychology*, 104, 102613. <https://doi.org/10.1016/J.JENVP.2025.102613>
- Jerrett, M. (2015). Atmospheric science: The death toll from air-pollution sources. *Nature*, 525(7569), 330–331. <https://doi.org/10.1038/525330a>
- Jiang, L., Yang, Y., Wu, Q., Yang, L., & Yang, Z. (2024). Hotter days, dirtier air: The impact of extreme heat on energy and pollution intensity in China. *Energy Economics*, 130, 107291. <https://doi.org/10.1016/J.ENERCO.2023.107291>
- Jiang, X. (2023). A conversation on air pollution in India. *Nature Geoscience*, 16(11), 937–938. <https://doi.org/10.1038/S41561-023-01306-z>
- Joshi, D. C., Negi, P., Devi, S., Lohani, H., Kumar, R., Gupta, M., & Ming, L. C. (2025). Fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>): A silent catalyst for chronic lung diseases in India; a comprehensive review. *Environmental Challenges*, 20, 101215. <https://doi.org/10.1016/J.ENVC.2025.101215>
- Li, G., Fang, C., Wang, S., & Sun, S. (2016). The Effect of Economic Growth, Urbanization, and Industrialization on Fine Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub>) Concentrations in China. *Environmental Science and Technology*, 50(21), 11452–11459. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02562>
- Lian, L., Huang, J., Chen, S., Ma, J., Lian, X., Zhang, L., Du, S., & Zhao, D. (2025). Global health risk attributable to PM<sub>2.5</sub> pollution in relation to wealth inequality. *Journal of Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/J.JES.2025.03.045>
- Lin, J., Wan, H., & Yu, Y. (2024). What you breathe makes you poor: The effect of air pollution on income. *China Economic Review*, 83, 102103. <https://doi.org/10.1016/J.CHIECO.2023.102103>
- Luo, K., Li, G., Fang, C., & Sun, S. (2018). PM<sub>2.5</sub> mitigation in China: Socioeconomic determinants of concentrations and differential control policies. *Journal of Environmental Management*, 213, 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.044>
- Mahapatra, P. S., Panda, U., Mallik, C., Boopathy, R., Jain, S., Sharma, S. K., Mandal, T. K., Senapati, S., Satpathy, P., Panda, S., & Das, T. (2021). Chemical, microstructural,

- 
- and biological characterization of wintertime PM<sub>2.5</sub> during a land campaign study in a coastal city of eastern India. *Atmospheric Pollution Research*, 12(9), 101164. <https://doi.org/10.1016/J.APR.2021.101164>
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Frontiers in Public Health*, 8, 505570. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Mo, Haihua, You, Y., Wu, L., Yan, F., Chang, M., Wang, W., Wang, P., & Wang, X. (2023). Potential impact of industrial transfer on PM<sub>2.5</sub> and economic development under scenarios oriented by different objectives in Guangdong, China. *Environmental Pollution*, 316, 120562. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120562>
- Mo, Huibin, & Wang, S. (2024). Assessing the spatiotemporal evolution and socioeconomic determinants of PM<sub>2.5</sub>-related premature deaths in China from 2000 to 2021. *Science of The Total Environment*, 946, 174323. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174323>
- Mohyuddin, S., Alam, K., Zeb, B., Khokhar, M. F., Mir, K. A., Wexler, A. S., Haq, E. ul, Ikram, M., & Shahid, I. (2024). Characterization and source identification of PM<sub>2.5</sub> during intense haze episodes in an urban environment of Lahore. *Atmospheric Environment: X*, 23, 100276. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2024.100276>
- OMS. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- Osipov, S., Chowdhury, S., Crowley, J. N., Tadic, I., Drewnick, F., Borrmann, S., Eger, P., Fachinger, F., Fischer, H., Predybaylo, E., Fnais, M., Harder, H., Pikridas, M., Vouterakos, P., Pozzer, A., Sciare, J., Ukhov, A., Stenchikov, G. L., Williams, J., & Lelieveld, J. (2022). Severe atmospheric pollution in the Middle East is attributable to anthropogenic sources. *Communications Earth and Environment*, 3(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/S43247-022-00514-6>
- Salehi, M., Hashiani, A. A., Karimi, B., & Mirhoseini, S. H. (2023). Estimation of health-related and economic impacts of PM<sub>2.5</sub> in Arak, Iran, using BenMAP-CE. *PLOS ONE*, 18(12), e0295676. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295676>
- Silva Rodríguez, J. A. (2018). Management of air pollution in Mexico. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 30(3), 578–592. <https://doi.org/10.1108/MEQ-05-2018-0099>
- ul-Haq, Z., Mehmood, U., Tariq, S., & Mariam, A. (2023). Defining the role of renewable energy, economic growth, globalization, energy consumption, and population growth on PM<sub>2.5</sub> concentration: evidence from South Asian countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(14), 40008–40017. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-25046-6>
- Wang, N., Zhu, H., Guo, Y., & Peng, C. (2018). The heterogeneous effect of democracy, political globalization, and urbanization on PM<sub>2.5</sub> concentrations in G20 countries: Evidence from panel quantile regression. *Journal of Cleaner Production*, 194, 54–68. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.092>
-

- Wang, Q., Kwan, M. P., Zhou, K., Fan, J., Wang, Y., & Zhan, D. (2019). The impacts of urbanization on fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) concentrations: Empirical evidence from 135 countries worldwide. *Environmental Pollution*, 247, 989–998. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2019.01.086>
- Wang, S., Zhou, C., Wang, Z., Feng, K., & Hubacek, K. (2017). The characteristics and drivers of fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) distribution in China. *Journal of Cleaner Production*, 142, 1800–1809. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.11.104>
- Wang, X., Dewancker, B. J., Tian, D., & Zhuang, S. (2024). Exploring the Burden of PM<sub>2.5</sub>-Related Deaths and Economic Health Losses in Beijing. *Toxics* 2024, Vol. 12, Page 377, 12(6), 377. <https://doi.org/10.3390/toxics12060377>
- Wooldridge, J. M. (2010). *The Econometric Analysis of Crosssection and Panel Data*. The MIT Press.
- Xie, Q., & Sun, Q. (2020). Assessing the impact of FDI on PM<sub>2.5</sub> concentrations: A nonlinear panel data analysis for emerging economies. *Environmental Impact Assessment Review*, 80, 106314. <https://doi.org/10.1016/J.EIAR.2019.106314>
- Xu, X., Huang, L., Yao, L., Yoshida, Y., & Long, Y. (2025). Rising socio-economic costs of PM<sub>2.5</sub> pollution and medical service mismatching. *Nature Sustainability* 2025 8:3, 8(3), 265–275. <https://doi.org/10.1038/s41893-025-01509-9>
- Yang, F., Yu, J., Zhang, C., Li, L., Lei, Y., Wu, S., Wang, Y., & Zhang, X. (2024). Spatio-temporal differentiation characteristics and the influencing factors of PM<sub>2.5</sub> emissions from coal consumption in Central Plains Urban Agglomeration. *Science of The Total Environment*, 945, 173778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173778>
- Yang, X., Sun, H., Hu, X., & Li, L. (2025). Study on the impact of air pollution on health economy under the perspective of energy transition: A case of the Yangtze River Delta region in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 219, 115839. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2025.115839>
- Yin, H., Brauer, M., Zhang, J. (Jim), Cai, W., Navrud, S., Burnett, R., Howard, C., Deng, Z., Kammen, D. M., Schellnhuber, H. J., Chen, K., Kan, H., Chen, Z. M., Chen, B., Zhang, N., Mi, Z., Coffman, D. M., Cohen, A. J., Guan, D., ... Liu, Z. (2021). Population ageing and deaths attributable to ambient PM<sub>2.5</sub> pollution: a global analysis of economic cost. *The Lancet Planetary Health*, 5(6), e356–e367. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00131-5](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00131-5)
- Zambrano-Monserrate, M. A., Subramaniam, Y., Adnan, N., Bergougui, B., & Adebayo, T. S. (2024). Dynamic factors driving PM<sub>2.5</sub> concentrations: Fresh evidence at the global level. *Environmental Pollution*, 362, 124940. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124940>





## **Efecto del diésel sobre el crecimiento y la composición bioquímica de *Chlorella* spp.: mixotrofía y consorcios microalga-bacteria**

Diesel effect on the growth and biochemical composition of *Chlorella* spp.: mixotrophy and microalgae-bacteria consortium

**Laugeny Díaz-Borrego\***

Facultad Experimental de Ciencias, Universidad del Zulia, Venezuela

Facultad de Ingeniería, Universidad Rafael Urdaneta, Venezuela

0000-0002-8263-081X | [ldiaz@fec.luz.edu.ve](mailto:ldiaz@fec.luz.edu.ve)

\*Autor para correspondencia

**Julio Marín-Leal**

Facultad de Ingeniería

Universidad del Zulia, Venezuela

0000-0003-2770-5978 | [jmarin@fing.luz.edu.ve](mailto:jmarin@fing.luz.edu.ve)

**Soiré Huerta-Méndez**

Facultad Experimental de Ciencias

Universidad del Zulia, Venezuela

0009-0009-4258-7325 |

**Ever Morales-Avendaño**

Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí

“Manuel Félix López” (ESPAM MFL), Ecuador

0000-0001-9006-4996 | [evermster@gmail.com](mailto:evermster@gmail.com)

**Cita APA:** Díaz-Borrego, L., Marín-Leal, J., Huerta-Méndez, S. y Morales-Avendaño, E. (2025). Efecto del diésel sobre el crecimiento y la composición bioquímica de *Chlorella* spp.: mixotrofía y consorcios microalga-bacteria. *Revista Arbitrada de Ciencias Ambientales*, 1(1), 23-49. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18487497>

## Resumen

La contaminación ambiental por compuestos orgánicos se agrava constantemente al aumentar las actividades mineras e industriales, lo que requiere el desarrollo de tecnologías de tratamiento para minimizar el impacto antropogénico sobre los ecosistemas. En este sentido, en el presente trabajo se evaluó el efecto del diésel sobre el crecimiento y la composición bioquímica de *Chlorella* spp., mediante ensayos discontinuos a escala de laboratorio con tratamientos de 0.25 (T1), 0.50 (T2) y 1.00 (T3) % v/v de diésel. Las concentraciones de clorofila a estuvieron entre 0.51 y 8.52  $\mu\text{g mL}^{-1}$ , de clorofila b entre 0.15 y 3.09  $\mu\text{g mL}^{-1}$ , de clorofila total entre 0.66 y 11.32  $\mu\text{g mL}^{-1}$  y de carotenoides entre 0.24 y 3.66  $\mu\text{g mL}^{-1}$ ; mientras que las de proteínas totales se presentaron entre 160.32 y 818.44  $\mu\text{g mL}^{-1}$ , de carbohidratos totales entre 43.80 y 209.22  $\mu\text{g mL}^{-1}$  y de lípidos totales entre 110.30 y 715.31  $\mu\text{g mL}^{-1}$ . Se evidenciaron cambios en los contenidos de pigmentos fotosintéticos de las microalgas (T1 y T2), así como una estimulación del crecimiento (T1) y de la producción de biomoléculas (todos los tratamientos), probablemente debido al crecimiento mixotrófico de la microalga y/o a la acción simbiótica con las bacterias asociadas (consorcio microbiano). El mejor desempeño en la degradación de hidrocarburos totales del petróleo se obtuvo a la menor proporción aplicada de diésel (T1: 75.8 %). El uso de microalgas bajo la forma de cultivo mixotrófico o en consorcios microbianos resulta altamente versátil para la degradación de hidrocarburos, reduciendo la contaminación y permitiendo la obtención de metabolitos con importancia comercial.

**Palabras clave:** efecto tóxico, diésel, macromoléculas orgánicas, microalgas, remoción de hidrocarburos.

## Abstract

Environmental pollution by organic compounds is constantly worsening with the increase in mining and industrial activities, which requires the development of treatment technologies to minimize the anthropogenic impact on ecosystems. Therefore, in this study, the effect of diesel on the growth and biochemical composition of *Chlorella* spp. was evaluated using batch tests at laboratory scale with treatments of 0.25 (T1), 0.50 (T2) and 1.00 (T3) % v/v of diesel. Chlorophyll a concentrations were between 0.51 and 8.52  $\mu\text{g mL}^{-1}$ , chlorophyll b between 0.15 and 3.09  $\mu\text{g mL}^{-1}$ , total chlorophyll between 0.66 and 11.32  $\mu\text{g mL}^{-1}$  and carotenoids between 0.24 and 3.66  $\mu\text{g mL}^{-1}$ ; while total protein concentrations ranged from 160.32 to 818.44  $\mu\text{g mL}^{-1}$ , total carbohydrates from 43.80 to 209.22  $\mu\text{g mL}^{-1}$ , and total lipids from 110.30 to 715.31  $\mu\text{g mL}^{-1}$ . Changes in the photosynthetic pigment contents of the microalgae (T1 and T2) were observed, as well as stimulation of growth (T1) and production of biomolecules (all treatments), probably due to the mixotrophic growth of the microalgae and/or the symbiotic action with the associated bacteria (microbial consortium). The best performance in the degradation of total petroleum hydrocarbons was obtained at the lowest proportion of diesel applied (T1: 75.8 %). The use of microalgae in the form of mixotrophic culture or in microbial consortia is highly versatile for hydrocarbon degradation, reducing pollution and enabling the production of commercially important metabolites.

**Key words:** diesel, hydrocarbon removal, microalgae, organic macromolecules, toxic effect.

## Introducción

Los hidrocarburos se presentan en gran diversidad estructural como productos biosintéticos de organismos vivos en la biósfera o como sustancias de transformación abiótica de materia orgánica biogénica en la geosfera. Son los principales constituyentes del petróleo y, por lo tanto, extremadamente abundantes en los sistemas geológicos. En la era moderna, los hidrocarburos tienen una amplia gama de usos, principalmente como combustibles y materia prima para la producción de diversos productos. Son esenciales en la industria, el transporte y la generación de energía (Chaudhuri, 2011; Wilkes *et al.*, 2020). El uso extensivo y diverso de estos combustibles fósiles en los diferentes ámbitos está relacionado con graves problemas de contaminación ambiental, debido a su inadecuada manipulación, por accidentes relacionados con su extracción, transporte, contención o distribución, acciones indebidas sin la correspondiente conciencia ambiental requerida, falta de control y fiscalización (Jiménez-Guanipa y Viedma, 2018). En los ecosistemas acuáticos, por ejemplo, la mancha generada por los hidrocarburos vertidos flota por diferencia de densidades impidiendo la entrada de luz y el intercambio gaseoso, dando comienzo a la solubilización de compuestos hidrosolubles y a la afección de la comunidad; la primera población afectada por un derrame es el plancton, seguido de los macroinvertebrados, y por último el bentos o población de macroinvertebrados que viven en los fondos de los océanos, lagos, ríos y ciénagas (Bento *et al.*, 2003; López *et al.*, 2006).

Esta situación puede generar diversos efectos adversos sobre los organismos vivos, como su acumulación en los tejidos grasos del cuerpo, permitiendo su presencia en las cadenas tróficas que llegan hasta el ser humano. Los impactos visibles de los derrames se manifiestan en el corto plazo como mortandad de las especies más sensibles, pero existen otras complicaciones de largo plazo no perceptibles como la afectación del sistema reproductivo y de la alimentación. Estos impactos también tienen una incidencia negativa en las actividades de pesca y del turismo en la zona afectada (Sánchez, 2021). Por ello, en el mejor de los casos, deben implementarse acciones correctivas que minimicen dichos efectos en pro de la conservación y sustentabilidad de los ecosistemas naturales. Entre las tecnologías de descontaminación usadas en la recuperación de zonas degradadas por el derrame de hidrocarburos, se encuentran: procesos físicos, como contención y recolección mecánica, separación y reciclaje, solidificación, vitrificación, estabilización, desorción térmica, incineración y extracción por vapor; procesos químicos, como oxidación-reducción, oxidación fotocatalítica y ultravioleta, adsorción con carbón activado y sistemas electroquímicos; y procesos biológicos, como biorremediación (uso de microorganismos, especialmente bacterias y hongos) y fitorremediación (con plantas,

microalgas y especies simbiotes) (Ambaye *et al.*, 2022; Okeke *et al.*, 2022; Manasseh y Humphrey, 2024).

Las microalgas desempeñan un papel fundamental en la fitorremediación de compuestos tóxicos, incluidos los hidrocarburos, mediante el desarrollo de varios mecanismos de desintoxicación, entre ellos: bioabsorción, bioacumulación, biotransformación, biomineralización y biodegradación (Chekroun *et al.*, 2014; El-Sayed-Touliabah *et al.*, 2022). Diversos estudios sobre la degradación microalgal de hidrocarburos han develado que varias especies son capaces de utilizar dichos compuestos como fuente de carbono (de-Bashan y Bashan, 2010; Hammed *et al.*, 2016; Hamouda *et al.*, 2023), siendo *Prototheca zopfii* la especie más conocida (Yamaguchi *et al.*, 1999; El-Sayed-Touliabah *et al.*, 2022). También se ha reportado que las microalgas desempeñan un papel importante en la degradación de hidrocarburos usando consorcios microbianos (alga-bacteria), aportando el oxígeno producido en la fotosíntesis y ciertas sustancias orgánicas para que las bacterias aerobias puedan actuar sobre los hidrocarburos (Hammed *et al.*, 2016; Radice *et al.*, 2023; León-Vaz *et al.*, 2025). Así, Hamouda *et al.* (2023), por ejemplo, destacaron la capacidad de *Chlorella vulgaris* y de *Synechococcus* sp. (cianobacteria) para degradar el queroseno, utilizando además la biomasa para producir biocombustible. Tras 15 días de cultivo se detectó la presencia de subproductos de la degradación, con valores de 19.9 % para *C. vulgaris* y de 82.2 % para *Synechococcus* sp. No obstante, la capacidad fitorremediadora de las microalgas para absorber y transformar contaminantes puede impactar su metabolismo y composición bioquímica, generando cambios en su constitución celular, como la alteración en la producción de pigmentos fotosintéticos y la variación en las proporciones de ciertas biomoléculas, como proteínas, carbohidratos y lípidos (Cortez-Mago *et al.*, 2007; Díaz-Borrego *et al.*, 2012; Hamouda *et al.*, 2023).

En el presente trabajo se evaluó el efecto del diésel sobre el crecimiento y la composición bioquímica (contenido de clorofila, carotenoides, proteínas, carbohidratos y lípidos) de la microalga clorofita *Chlorella spp.*, aislada de aguas del puerto de lanchas de Isla de Toas (municipio insular Almirante Padilla del estado Zulia, Venezuela). Esta localidad presenta problemas ambientales recurrentes debido al derrame constante de diésel y otros hidrocarburos en las zonas adyacentes al puerto y al taller lacustre, develado por la formación de una gran mancha superficial de combustible. Dicha situación genera inquietud entre los habitantes y visitantes de la isla por posibles problemas relacionados con la salud pública, turismo, pesca comercial y de subsistencia, así como el funcionamiento del ecosistema en general, por tratarse de una comunidad dedicada a la actividad turística y pesquera. También se discute sobre las evidencias observadas respecto al

crecimiento mixotrófico de la microalga y de las versatilidades del uso de consorcios microbianos en la degradación de contaminantes del petróleo.

## **Materiales y métodos**

### ***Recolección de muestras de agua***

Se recolectaron muestras de agua en las inmediaciones del puerto de lanchas de Isla de Toas (coordenadas geográficas: 10°57'36.52"N - 71°40'54.12"O), Lago de Maracaibo (Venezuela), tomando como referencia los derrames de combustible (manchas tornasoladas). La colecta se hizo manualmente utilizando envases de vidrio (capacidad de 5 L) previamente desinfectados con hipoclorito de sodio 5 %, haciendo inmersión completa de los envases hasta una profundidad de aprox. un metro. Las muestras se rotularon y se trasladaron en una cava con hielo hasta el laboratorio.

### ***Crecimiento de la comunidad de microalgas***

Para estimular el crecimiento de los microorganismos fotosintéticos presentes en las muestras de agua, se prepararon cultivos en frascos de vidrio estériles de 250 mL de capacidad con 150 mL de muestra, 16 mL L<sup>-1</sup> de medio algal (composición (Fabregas *et al.*, 1984): ZnCl<sub>2</sub> 100 µM, ZnSO<sub>4</sub> 100 µM, MnCl<sub>2</sub>•4H<sub>2</sub>O 100 µM, Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>•2H<sub>2</sub>O 100 µM, CoCl<sub>3</sub> 10 µM o CoCl<sub>2</sub>•6H<sub>2</sub>O 10 µM, CuSO<sub>4</sub>•5H<sub>2</sub>O 10 µM, EDTA 640 µM, citrato férrico 2 mM + EDTA 2 mM, tiamina, biotina, B12, NaNO<sub>3</sub> 0.2 M y NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>•2H<sub>2</sub>O 10 mM) y fertilizante foliar Nitrofoska® (0.5 mL L<sup>-1</sup>) (composición: N 10.0 %, P 4.0 %, K 7.0 %, Mg 0.2 %, S 0.8 %, Fe 70 ppm, B 11 ppm, Cu 12 ppm, Mn 8 ppm, Zn 2 ppm, Co 12 ppm y Mo 1 ppm), a una salinidad a 3 ups. Los frascos fueron monitoreados frecuentemente e incubados bajo condiciones de temperatura ambiental de 30 ± 2 °C, fotoperíodo luz: oscuridad de 12:12 h a 78 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> y agitación manual diaria, durante 30 días.

### ***Aislamiento e identificación taxonómica de microalgas***

Para el aislamiento de las microalgas se empleó la técnica de rayado en placas de medio algal con agar a una salinidad a 3 ups, a partir de los frascos de cultivos microalgales. Después de un periodo de incubación de aprox. 8 días bajo las condiciones ambientales descritas anteriormente, se evidenció el crecimiento de microalgas en las placas por la presencia de colonias verdes, las cuales fueron sembradas en medio algal con agar hasta obtener cultivos puros, realizando verificaciones bajo el microscopio óptico.

Para identificar taxonómicamente las microalgas aisladas se realizaron preparaciones al fresco y fijadas con lugol para su observación al microscopio óptico, haciendo uso de claves taxonómicas (pictóricas y dicotómicas) para su clasificación hasta el nivel de género, de acuerdo con Yacubson (1969), Needham y Needham (1978), Hanif *et al.* (2024).

**Bioensayos con *Chlorella* spp. en presencia de diésel**

De las microalgas aisladas a partir de las muestras de aguas, la más abundante fue identificada como *Chlorella* spp., perteneciente al orden Chlorellales (Needham y Needham, 1978; Hanif *et al.*, 2024). A partir de esta cepa contenida en tubos de vidrio estériles de 25 mL con medio algal, se escalaron progresivamente cultivos microalgales en medio algal + fertilizante Nitrofoska® a 0.5 mL L<sup>-1</sup>, con una salinidad a 3 ups, hasta obtener aproximadamente 2.5 L de cultivo en fase exponencial, para iniciar los bioensayos de exposición al diésel.

Los bioensayos se realizaron por triplicado con volumen de 250 mL en frascos de vidrio estériles que contenían el cultivo de *Chlorella* spp., fertilizante Nitrofoska® y diésel como contaminante de referencia, previamente filtrado a través de una membrana de nitrocelulosa de 0.22 µm para su esterilización. El hidrocarburo se obtuvo de una estación de suministro de combustible de la ciudad y se aplicó a concentraciones de 0.25, 0.50 y 1.00 % v/v por 32 días, de acuerdo con la matriz experimental que se presenta en la tabla 1. Los bioensayos siguieron un régimen discontinuo y se iniciaron a una densidad microalgal de 2x10<sup>6</sup> cél mL<sup>-1</sup> a partir de cultivos desarrollados hasta fase exponencial, siendo incubados bajo condiciones de temperatura ambiental de 30 ± 2 °C, fotoperíodo luz:oscuridad de 12:12 h a 78 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> y agitación manual diaria (figura 1).

**Tabla 1.** Matriz experimental para los bioensayos con *Chlorella* spp. en presencia de diésel.

| Tratamiento | <i>Chlorella</i> spp. | Fertilizante<br>(0.5 mL L <sup>-1</sup> ) | Diésel<br>(% v/v) |
|-------------|-----------------------|-------------------------------------------|-------------------|
| T1          | X                     | X                                         | 0.25              |
| T2          | X                     | X                                         | 0.50              |
| T3          | X                     | X                                         | 1.00              |
| Control     | X                     | X                                         | 0                 |



**Figura 1.** Diferentes fases del cultivo de *Chlorella* spp. y bioensayos de exposición al diésel

### **Análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos**

El análisis de pH se utilizó como medida de control para monitorear cada 2 días las condiciones óptimas de tratamiento, mediante el uso de tiras indicadoras pH-Fix marca I.C.T, S.L.; recomendadas para la medida rápida del pH en muestras de agua. Las determinaciones de hidrocarburos totales del petróleo (HTP), por su parte, se realizaron al inicio y al final de los ensayos, aplicando el método gravimétrico estándar (APHA *et al.*, 2023), usando cloroformo (marca Merck) como solvente de extracción.

Para estimar la densidad celular microalgal en los bioensayos se utilizó la técnica de conteo directo (Lobban *et al.*, 1988; APHA *et al.*, 2023), realizando observaciones cada 4 días con un microscopio óptico y una cámara Neübauer de 0.1 mm de profundidad. Con los valores obtenidos en fase exponencial, se calcularon los parámetros de crecimiento: velocidad de crecimiento y tiempo de duplicación (Madigan *et al.*, 2015), además del porcentaje de inhibición con respecto al control (densidad celular media). Adicionalmente, se realizó la estimación de bacterias heterótrofas asociadas a los cultivos por la técnica de recuento en placas (APHA *et al.*, 2023), mediante diluciones seriadas a los días 16, 24 y 32 de ensayo. El protocolo para la cuantificación de pigmentos fotosintéticos (clorofila *a*, *b*, total (*a+b*) y carotenoides), estuvo basado en la extracción con una mezcla de acetona:metanol 2:1 y mediciones espectrofotométricas a 480, 665 y 649 nm, cada 4 días, para carotenoides, clorofila *a* y *b*, respectivamente (Strickland y Parsons, 1972; Jeffrey y Humphrey, 1975; APHA *et al.*, 2023).

Considerando la estabilidad de los cultivos de *Chlorella* spp., a partir del día 16 (final de la fase de crecimiento exponencial), también se monitorearon cada 4 días las siguientes macromoléculas orgánicas: proteínas, carbohidratos y lípidos, con la finalidad de observar su variabilidad en el tiempo bajo la influencia del diésel. Las proteínas totales se determinaron según el método colorimétrico de Lowry (Lowry *et al.*, 1951), modificado por Herbert *et al.* (1971), tratando las muestras con el reactivo Folin-Ciocalteu y realizando las lecturas espectrofotométricas a 700 nm. El análisis de carbohidratos totales estuvo basado en el método colorimétrico fenol-sulfúrico (Dubois *et al.*, 1956; Kochert, 1978), con mediciones espectrofotométricas a 490 nm, mientras que los lípidos totales de la biomasa microalgal fueron cuantificados según el método de carbonización simple descrito por Marsh y Weinstein (1966), previa extracción de acuerdo con el método de Bligh y Dyer (1959).

### **Análisis estadístico de datos**

En el conjunto de datos se comprobaron los supuestos de normalidad de residuos utilizando la prueba de Shapiro-Wilk y de homogeneidad de varianzas con la prueba de Levene, haciendo énfasis en esta última para discernir entre el uso de estadística paramétrica y no paramétrica. Realizadas

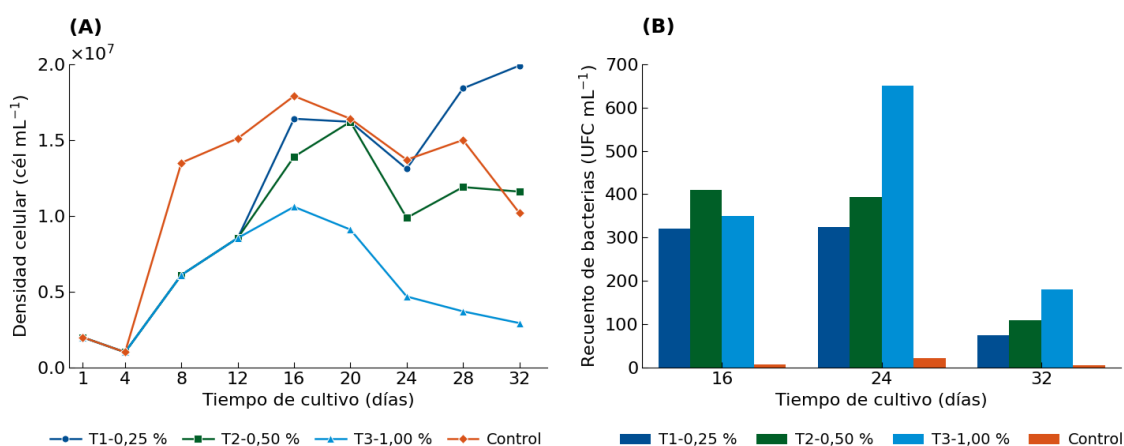
estas pruebas, se estableció un análisis de varianza y la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ) *a posteriori*, para observar si existían diferencias significativas entre el control y los tratamientos aplicados, en cuanto a la densidad celular, producción de pigmentos, contenido de biomoléculas y remoción de HTP. También se aplicó un análisis de correlación de Pearson, para observar las relaciones significativamente lineales entre las variables estudiadas. Estos análisis estadísticos fueron realizados con el paquete IBM SPSS Statistics 25.

## Resultados

Los valores de pH al inicio de los bioensayos se mantuvieron cerca de la neutralidad en todos los tratamientos, pero a partir del día 12, se incrementaron ligeramente en los controles y en los tratamientos con menor presencia de diésel (T1 y T2). Durante el resto del tiempo de experimentación, el pH osciló entre 7 y 8 en todas las unidades de ensayo.

### Densidad celular de *Chlorella* spp. y recuento de bacterias asociadas en los bioensayos de exposición al diésel

La densidad celular microalgal se encontró entre  $1.02 \times 10^6$  y  $1.99 \times 10^7$  cél  $\text{mL}^{-1}$ , con los mayores niveles en el control y T1 y los menores en T3 (figura 2A). Los valores medios para T1, T2, T3 y el control fueron de  $1.13 \times 10^7 \pm 7.10 \times 10^6$ ,  $9.01 \times 10^6 \pm 5.16 \times 10^6$ ,  $5.41 \times 10^6 \pm 3.37 \times 10^6$  y  $1.16 \times 10^7 \pm 6.12 \times 10^6$  cél  $\text{mL}^{-1}$ , respectivamente. Fue notorio el aumento de la densidad celular con relación a la edad del cultivo, sin diferencias significativas entre los tratamientos en los primeros 24 días ( $p > 0.05$ ) y registrando el desarrollo de la fase exponencial entre los días 4 y 16; fase en la que el control mostró los mayores recuentos celulares, alcanzando valores de  $1.19 \times 10^7 \pm 7.46 \times 10^6$  cél  $\text{mL}^{-1}$ , seguido por T1 con  $8.01 \times 10^6 \pm 6.40 \times 10^6$  cél  $\text{mL}^{-1}$ , T2 con  $7.40 \times 10^6 \pm 5.36 \times 10^6$  cél  $\text{mL}^{-1}$  y T3 con la densidad más baja de *Chlorella* spp. de  $6.56 \times 10^6 \pm 4.12 \times 10^6$  cél  $\text{mL}^{-1}$ .



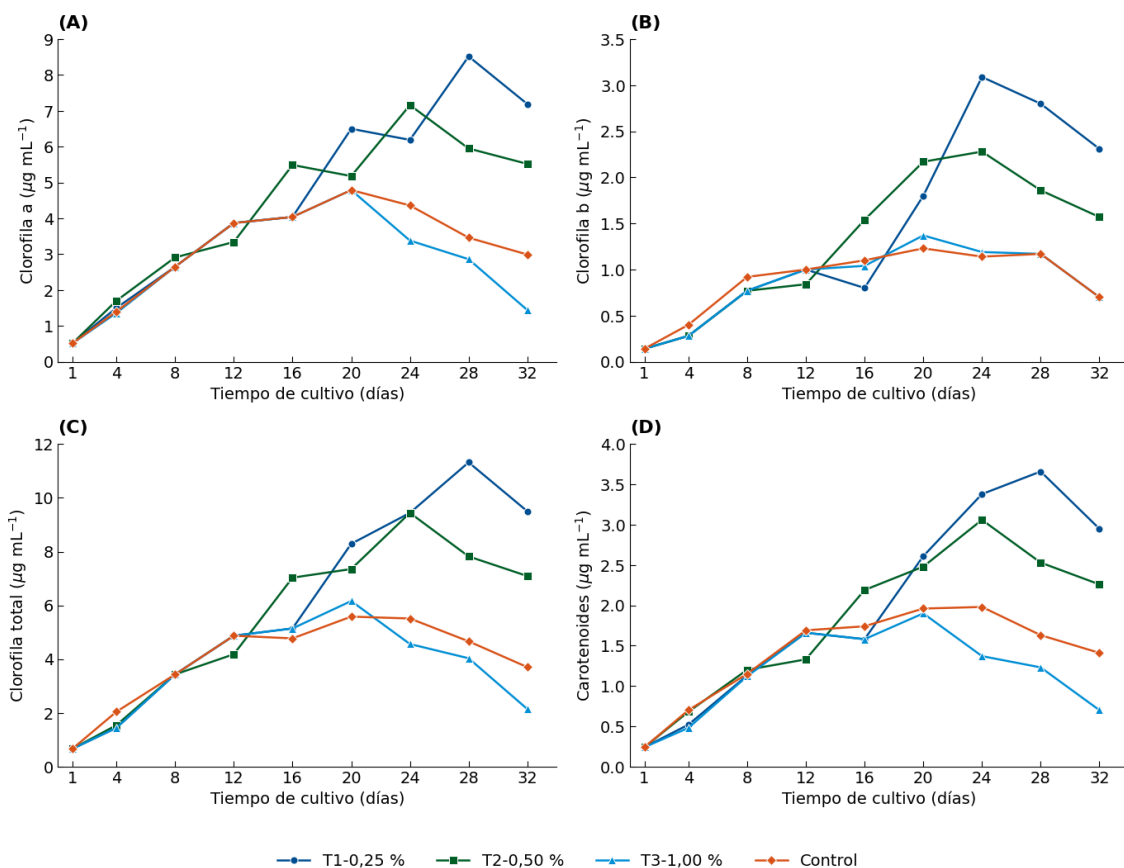
**Figura 2.** Densidad celular de *Chlorella* spp. (A) y recuento de bacterias heterótrofas asociadas (B) en los cultivos expuestos al diésel. Tratamientos: T1-0.25, T2-0.50 y T3-1.00 % de diésel.

La fase estacionaria pudo identificarse entre los días 16 y 24, con  $1.60 \times 10^7 \pm 2.19 \times 10^6$  cél mL<sup>-1</sup> para T1,  $1.30 \times 10^7 \pm 2.70 \times 10^6$  cél mL<sup>-1</sup> para T2,  $7.02 \times 10^6 \pm 3.33 \times 10^6$  cél mL<sup>-1</sup> para T3 y  $1.57 \times 10^7 \pm 1.78 \times 10^6$  cél mL<sup>-1</sup> para el control (figura 2A). A partir del día 28 decrecieron los recuentos celulares en T2, T3 y el control, obteniéndose densidades celulares de  $1.91 \times 10^7 \pm 1.04 \times 10^6$ ,  $1.17 \times 10^7 \pm 2.47 \times 10^5$ ,  $3.33 \times 10^6 \pm 5.44 \times 10^5$  y  $1.26 \times 10^7 \pm 3.37 \times 10^6$  cél mL<sup>-1</sup> para T1, T2, T3 y el control, respectivamente. Se observaron diferencias significativas ( $p < 0.01$ ; factor  $F = 6.916$ ) entre los tratamientos, incluyendo el control, para esta última fase del ensayo, con la conformación de tres grupos distinguibles (prueba de Tukey,  $p < 0.05$ ): T3, T2 y T1-control. Del mismo modo, se detectó una relación significativa e inversa entre la densidad celular de *Chlorella* spp. y las concentraciones de diésel aplicadas ( $r = -0.450$ ,  $p = 0.001$ ), revelando su efecto inhibitorio general el crecimiento de la microalga.

En el recuento de bacterias asociadas a los cultivos de *Chlorella* spp. expuestos al diésel (figura 2B), se observó la presencia y en densidad creciente de unidades formadoras de colonias por mililitro, a medida que aumentaba la concentración de diésel, alcanzándose los mayores recuentos en T3 durante el día 24 de ensayo (fase estacionaria para el crecimiento de la microalga), con un valor medio de  $650.0 \pm 216.9$  UFC mL<sup>-1</sup>, seguido por T2 con  $392.8 \pm 15.3$  UFC mL<sup>-1</sup>, T1 con  $324.8 \pm 3.5$  UFC mL<sup>-1</sup> y el control con  $21.8 \pm 11.6$  UFC mL<sup>-1</sup>. Las menores densidades bacterianas se observaron a los 32 días, debido posiblemente al agotamiento de la fuente de carbono y/o energía (diésel).

#### **Niveles de pigmentos fotosintéticos en los cultivos de *Chlorella* spp. expuestos al diésel**

Con respecto a la producción de pigmentos fotosintéticos por parte de *Chlorella* spp. durante los bioensayos, se observaron fluctuaciones en sus concentraciones (figura 3), corroborando una fase estacionaria para el crecimiento de la microalga entre los días 16 y 24, cuando finalmente disminuyen las magnitudes. Las concentraciones de clorofila *a* estuvieron entre 0.51 y 8.52 µg mL<sup>-1</sup>, clorofila *b* entre 0.15 y 3.09 µg mL<sup>-1</sup>, clorofila total entre 0.66 y 11.32 µg mL<sup>-1</sup> y carotenoides entre 0.24 y 3.66 µg mL<sup>-1</sup>. De manera general, los tenores de clorofila *a* se incrementaron con el tiempo para luego decrecer en el día 24, presentándose las mayores concentraciones en T1 con una media aritmética de  $4.55 \pm 2.72$  µg mL<sup>-1</sup> y las menores en T3 con  $2.77 \pm 1.42$  µg mL<sup>-1</sup> (figura 3A), mostrando diferencias significativas ( $p < 0.05$ , factor  $F = 4.995$ ) entre todos los tratamientos y su separación en tres grupos distintivos: T3, control y T2-T1.



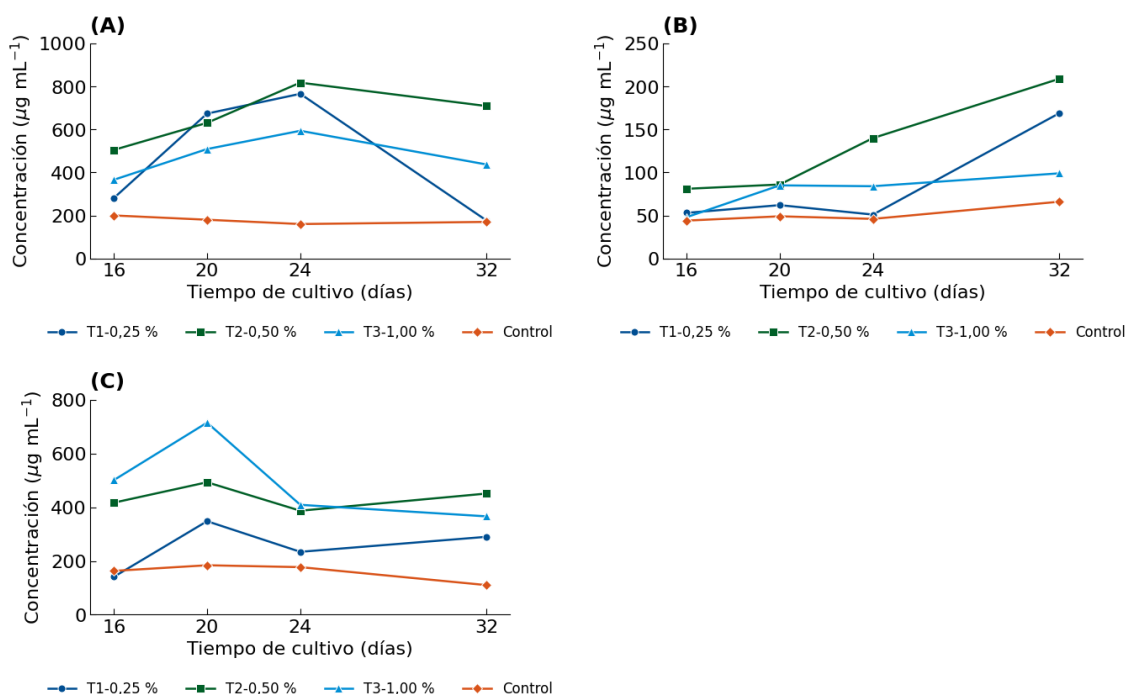
**Figura 3.** Concentraciones de pigmentos fotosintéticos en los cultivos de *Chlorella* spp. expuestos al diésel. (A) Clorofila  $a$ , (B) Clorofila  $b$ , (C) Clorofila total, (D) Carotenoides. Tratamientos: T1-0.25, T2-0.50 y T3-1.00 % de diésel.

Los mayores niveles de clorofila  $b$  en las unidades experimentales se obtuvieron en T1 con  $1.44 \pm 1.09 \mu\text{g mL}^{-1}$ , seguido de T2 con  $1.27 \pm 0.79 \mu\text{g mL}^{-1}$ , el control con  $0.87 \pm 0.38 \mu\text{g mL}^{-1}$  y por último T3 con  $0.86 \pm 0.42 \mu\text{g mL}^{-1}$  (figura 3B), sin diferencias significativas entre todos los casos ( $p > 0.05$ , factor  $F = 3.440$ ). En el control la clorofila  $b$  correlacionó significativamente con la clorofila  $a$  ( $r = 0.983$ ,  $p < 0.05$ ). Las concentraciones de clorofila total, por su parte, develaron el siguiente orden de magnitud: T1 ( $6.01 \pm 3.80 \mu\text{g mL}^{-1}$ ) > T2 ( $5.39 \pm 3.05 \mu\text{g mL}^{-1}$ ) > control ( $3.91 \pm 1.65 \mu\text{g mL}^{-1}$ ) > T3 ( $3.60 \pm 1.84 \mu\text{g mL}^{-1}$ ) (figura 3C). Durante la fase estacionaria los niveles de clorofila total fueron de  $7.63 \pm 2.23 \mu\text{g mL}^{-1}$  en T1,  $7.94 \pm 1.31 \mu\text{g mL}^{-1}$  en T2,  $5.29 \pm 0.81 \mu\text{g mL}^{-1}$  en T3 y  $5.28 \pm 0.45 \mu\text{g mL}^{-1}$  en el control, mostrando diferencias significativas ( $p < 0.01$ , factor  $F = 6.086$ ) y cuatro grupos distinguibles (prueba de Tukey,  $p < 0.05$ ): T3, control, T2 y T1. En el control, se obtuvieron correlaciones significativas de las concentraciones de clorofila total respecto a clorofila  $a$  ( $r = 0.977$ ,  $p < 0.05$ ) y clorofila  $b$  ( $r = 0.960$ ,  $p < 0.05$ ), al igual que en T3 ( $r = 0.999$ ,  $p < 0.001$  y  $r = 0.964$ ,  $p < 0.05$ , respectivamente). En T2 la clorofila total correlacionó significativamente con la clorofila  $a$  ( $r = 0.958$ ;  $p < 0.05$ ). Finalmente, los carotenoides siguieron la misma tendencia de las concentraciones mayores

en T1 ( $1.97 \pm 1.24 \mu\text{g mL}^{-1}$ ) y menores en T3 ( $1.14 \pm 0.56 \mu\text{g mL}^{-1}$ ), mientras que T2 y el control mostraron niveles de  $1.77 \pm 0.95$  y  $1.39 \pm 0.59 \mu\text{g mL}^{-1}$ , respectivamente (figura 3D), con diferencias significativas en todos los casos ( $p < 0.05$ , factor  $F = 5.223$ ) y la conformación de tres grupos distintivos, de acuerdo con la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ): T2, T1 y T3-control. Realizando un análisis general, se observó una estimulación del crecimiento microalgal en el tratamiento con 0.25 % (T1) de diésel (figura 2A) y de la producción de pigmentos fotosintéticos con 0.25 (T1) y 0.50 % (T2) de diésel (figura 3).

#### Niveles de macromoléculas orgánicas en los cultivos de *Chlorella* spp. expuestos al diésel

Las concentraciones de proteínas totales en las unidades experimentales estuvieron entre  $160.32$  y  $818.44 \mu\text{g mL}^{-1}$ , con diferencias significativas ( $p < 0.05$ , factor  $F = 5.867$ ) entre los tratamientos con diésel y el control (figura 4A), siendo T2 el que develó los mayores valores con una media de  $655.75 \pm 131.78 \mu\text{g mL}^{-1}$ , seguido de T3 con  $476.50 \pm 97.70 \mu\text{g mL}^{-1}$ , T1 con  $474.25 \pm 289.43 \mu\text{g mL}^{-1}$  y el control con  $177.50 \pm 17.08 \mu\text{g mL}^{-1}$  (tres grupos diferentes según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ): control, T1-T3 y T2). Durante la fase estacionaria, la mayor producción de proteínas se obtuvo en T2 y T1 con  $724.50 \pm 65.05$  y  $720.01 \pm 132.23 \mu\text{g mL}^{-1}$ , respectivamente. Las proteínas totales correlacionaron de manera inversa con los carotenoides ( $r = -0.997$ ,  $p < 0.001$ ) en el control.



**Figura 4.** Concentraciones de macromoléculas orgánicas en los cultivos de *Chlorella* spp. expuestos al diésel. (A) Proteínas totales, (B) Carbohidratos totales, (C) Lípidos totales. Tratamientos: T1-0.25, T2-0.50 y T3-1.00 % de diésel.

La producción de carbohidratos totales se presentó entre 43.80 y 209.22  $\mu\text{g mL}^{-1}$ . La mayor concentración en fase estacionaria se obtuvo en T2 y T3, con medias aritméticas de  $112.90 \pm 37.76$  y  $84.62 \pm 0.57 \mu\text{g mL}^{-1}$  (figura 4B), respectivamente. Los valores medios generales en T1, T2, T3 y el control fueron de  $83.58 \pm 57.01$ ,  $129.05 \pm 59.61$ ,  $79.18 \pm 21.71$  y  $50.93 \pm 9.92 \mu\text{g mL}^{-1}$ , respectivamente, sin diferencias significativas entre los tratamientos ( $p > 0.05$ , factor  $F = 2.246$ ). Los carbohidratos totales correlacionaron inversamente con los carotenoides ( $r = -0.952$ ,  $p < 0.05$ ) en T2. En cuanto a los lípidos totales en los cultivos de *Chlorella* spp. expuestos al diésel, sus niveles variaron entre 110.30 y 715.31  $\mu\text{g mL}^{-1}$  (figura 4C), con diferencias significativas ( $p < 0.001$ , factor  $F = 11.350$ ) entre las cuatro condiciones experimentales (cuatro grupos diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey,  $p < 0.05$ : control, T1, T2 y T3). Las mayores magnitudes en fase estacionaria se presentaron en T3 con  $562.25 \pm 216.45 \mu\text{g mL}^{-1}$ , seguido de T2 con  $439.90 \pm 75.09 \mu\text{g mL}^{-1}$ . Los valores medios de lípidos totales fueron de  $253.03 \pm 88.31 \mu\text{g mL}^{-1}$  en T1,  $437.10 \pm 45.65 \mu\text{g mL}^{-1}$  en T2,  $498.08 \pm 155.44 \mu\text{g mL}^{-1}$  y  $158.45 \pm 33.27 \mu\text{g mL}^{-1}$  en el control. Las concentraciones de lípidos totales correlacionaron significativamente con las de clorofila *a* ( $r = 0.985$ ,  $p < 0.05$ ), clorofila *b* ( $r = 0.995$ ,  $p < 0.01$ ) y clorofila total ( $r = 0.982$ ,  $p < 0.05$ ) en el control. De manera general, se presentó una estimulación en la producción de las macromoléculas orgánicas analizadas a todos los niveles aplicados de diésel en los cultivos microalgales (figura 4).

## Discusión

### ***Dinámica de la comunidad microbiana en los cultivos de Chlorella spp. expuestos al diésel***

Durante los ensayos de exposición al diésel con la microalga *Chlorella* sp., se pudieron identificar las diferentes fases del crecimiento microbiano mediante el conteo directo de células al microscopio (figura 2A). Una primera fase de adaptación de 4 días fue característica para todos los tratamientos, incluyendo el control, donde la microalga se adaptó a las nuevas condiciones ambientales imperantes; una segunda fase de crecimiento exponencial de aprox. 12 días, con máximo aprovechamiento de los recursos disponibles; una tercera fase estacionaria de aprox. 8 días, donde se intensificaron las condiciones de productividad mediante la estabilidad del crecimiento; y finalmente, una fase de senescencia con desaceleración del crecimiento y escasez de nutrientes (Madigan *et al.*, 2015). Este desarrollo por parte de *Chlorella* spp. estuvo favorecido por las condiciones ambientales y nutricionales establecidas, como indicaron las mediciones de pH durante el ensayo, pero perjudicado por la presencia del diésel, particularmente a las concentraciones de 0.50 (T2) y 1.00 % (T3); mientras que con 0,25 % (T1) de diésel se observó la estimulación del crecimiento microalgal hacia el final de los bioensayos. Comparativamente, Muñoz-Peñuela *et al.* (2012) obtuvieron una

densidad celular de  $10.9 \times 10^6 \pm 1.6 \times 10^6$  cél mL<sup>-1</sup> para un cultivo de *C. vulgaris* de 22 días, aplicando un fertilizante complejo de N, P y K, la cual resulta inferior a la observada en el presente estudio, debido posiblemente a la edad del cultivo, a las condiciones de crecimiento y a la densidad del inóculo inicial, entre otros factores (Madigan *et al.*, 2015; Hammed *et al.*, 2016).

También los pigmentos fotosintéticos experimentaron gran variabilidad durante los ensayos (figura 3), debido al desarrollo de la población microalgal. El incremento de los niveles de clorofilas (figuras 3A, 3B y 3C) y carotenoides (figura 3D) en T1 y T2 por encima de los valores del control a partir del día 16 de cultivo, responde al estímulo provocado por el diésel sobre las tasas de crecimiento de *Chlorella* spp. De modo contrastante, en T3 se evidenció la inhibición en la producción de pigmentos, como resultado del alto contenido de diésel (1.00 %). Esta respuesta estaría relacionada con el tipo de crecimiento mixotrófico en microalgas, en el que se combina el metabolismo autotrófico con el heterotrófico, permitiendo que estos microorganismos usen también compuestos de carbono orgánico como fuentes de carbono y/o energía, lo que puede aumentar significativamente la productividad primaria (Hammed *et al.*, 2016; Proietti-Tocca *et al.*, 2024). Bajo condiciones de cultivo con bajas intensidades de luz, con una cantidad adecuada de carbono orgánico y nutrientes, el crecimiento mixotrófico puede predominar sobre el crecimiento autotrófico (Ji *et al.*, 2014; Hammed *et al.*, 2016). No obstante, a veces resulta difícil diferenciar el crecimiento mixotrófico del crecimiento sinérgico de las microalgas y las bacterias asociadas al sistema de tratamiento (cultivo no axénico o mixto) (Hammed *et al.*, 2016). En tal sentido, Das *et al.* (2019) reportaron que *Chlorella* sp. alcanzó el mayor rendimiento de biomasa (1.72 g L<sup>-1</sup>) en condiciones mixotróficas con la adición de agua de producción petrolera pretratada, en comparación con los cultivos a régimen autotrófico y heterotrófico, eliminando el 92 % del nitrógeno total y el 73 % del carbono orgánico total presentes.

El efecto de los hidrocarburos sobre la proliferación de las microalgas puede ser diverso, estando asociado, entre otros factores, al tipo de hidrocarburo, su concentración, condiciones de exposición, disponibilidad de nutrientes y al tipo de microorganismo (El-Sayed-Touliabah *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2022; Hamouda *et al.*, 2023; Hammed *et al.*, 2023). Por una parte, a concentraciones relativamente elevadas, pueden generar muerte o inhibición del crecimiento mediante estrés oxidativo que daña las biomoléculas, alteración de la permeabilidad y fluidez de membranas que interfiere sobre la función celular, al igual que daños en orgánulos celulares como mitocondrias y cloroplastos que dificultan la producción de energía y la fotosíntesis, respectivamente, etc. (Satpati *et al.*, 2023; Lee *et al.*, 2023); y por otra, a bajas concentraciones, pueden estimular el crecimiento debido a su uso como fuente de carbono o por asociación simbiótica con bacterias en consorcios

microbianos para la degradación aeróbica de estas sustancias (Hammed *et al.*, 2023; Radice *et al.*, 2023; León-Vaz *et al.*, 2025), como ha sido comentado al inicio de este trabajo.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, la inhibición del crecimiento de *Chlorella* spp. expuesta al diésel respecto al control, fue de 3.1 % en T1, 22.6 % en T2 y de 53.6 % en T3. Similarmente, Otero-Paternina *et al.* (2013) reportaron un 59 % de inhibición del crecimiento de *C. vulgaris* para concentraciones de fenantreno por encima de 1 µg L<sup>-1</sup>, mencionando además que los niveles de clorofila *a* no se afectaron por acción de las diferentes concentraciones del hidrocarburo aplicado (desde 0.001 hasta 10 mg L<sup>-1</sup>). De esta manera, los datos de inhibición encontrados son congruentes con los parámetros de crecimiento de *Chlorella* spp., calculados en la fase de crecimiento exponencial (tabla 2). Estos valores evidencian la disminución de la velocidad de crecimiento y el aumento del tiempo de duplicación celular desde T1 hasta T3, como consecuencia del efecto del diésel sobre el crecimiento microbiano. En concordancia, la correlación significativa y negativa entre la densidad microalgal y la abundancia de las bacterias heterótrofas asociadas a las unidades experimentales ( $r = -0.948$ ,  $p < 0.05$ , figura 2), evidenció la proliferación bacteriana conforme aumentaba la proporción de diésel añadido, participando activamente en los procesos de degradación aeróbica del contaminante, gracias a la disponibilidad de una mayor cantidad de materia orgánica.

**Tabla 2.** Parámetros de crecimiento para los cultivos de *Chlorella* spp. expuestos al diésel.

| Tratamiento | Diésel<br>(% v/v) | Velocidad de<br>crecimiento<br>(div/días) | Tiempo de<br>duplicación<br>(días) |
|-------------|-------------------|-------------------------------------------|------------------------------------|
| T1          | 0.25              | 0.813                                     | 0.848                              |
| T2          | 0.50              | 0.607                                     | 1.137                              |
| T3          | 1.00              | 0.668                                     | 1.033                              |
| Control     | 0                 | 0.782                                     | 0.882                              |

La estimulación del crecimiento de microalgas a ciertas concentraciones de hidrocarburos ha sido reportada en la literatura. Hamouda *et al.* (2016) demostraron que *Chlorella kessleri* crece a concentraciones de petróleo crudo de 0.5, 1 y 1.5 %, pero 1 % fue la concentración óptima para su máximo crecimiento. También señalaron que el contenido de clorofila *a* aumentó desde el primer día de incubación con 0.5 y 1 % de crudo hasta los 14 días. El contenido de carotenoides se incrementó al aumentar la concentración de crudo desde 0.5 hasta 1 %. De igual manera, se detectó que algunos compuestos alifáticos, como: 3-metil-decano, heptadecano, octadecano, nonadecano, docosano y tetracosano, desaparecieron por

completo tras el periodo de incubación con 1 % de petróleo crudo. Por su parte, Hamouda et al. (2023) indicaron que la mayor cantidad de biomasa (peso seco) producida por *C. vulgaris* se obtuvo después de diez días de cultivo aplicando 1.5 % de queroseno; mientras que, después de 15 días de cultivo con 1 % de queroseno, se produjo la máxima cantidad de lípidos (32 %).

### **Variabilidad de macromoléculas orgánicas en los cultivos de *Chlorella* spp. expuestos al diésel**

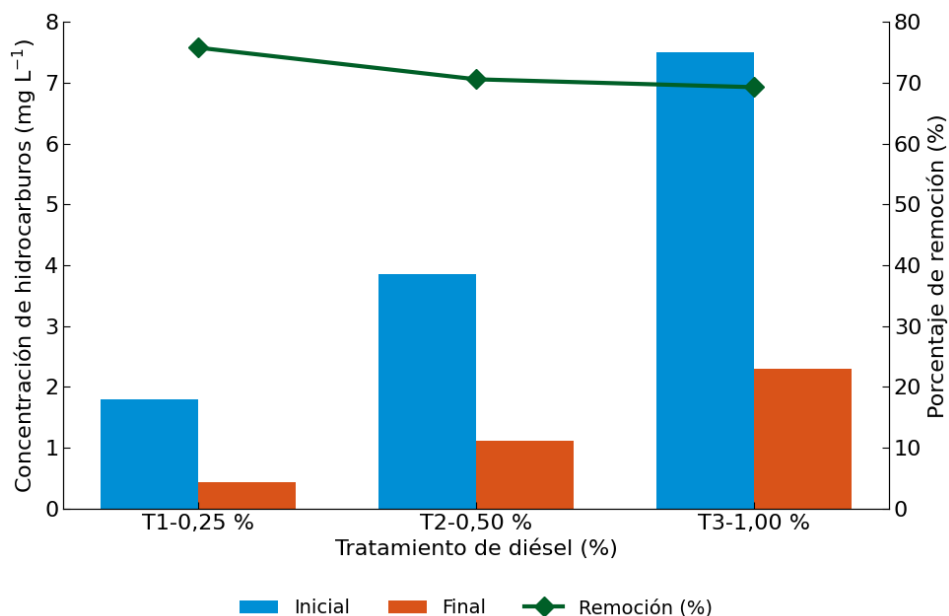
El crecimiento y desarrollo metabólico de *Chlorella* spp. durante los ensayos de exposición estuvo acompañado de una variabilidad en los niveles de las biomoléculas analizadas (figura 4). La estimulación en la producción de estos componentes celulares a las diferentes cantidades de diésel aplicadas con respecto al control, actúa como una variable de respuesta ante un factor de estrés, que provoca cambios metabólicos. Estos cambios influyen en la forma en que las microalgas sintetizan y almacenan biomoléculas. Por lo tanto, el uso de hidrocarburos como fuente de carbono y energía puede alterar significativamente la composición interna de las microalgas al modificar el tipo y la cantidad de sus proteínas, la composición y las reservas de carbohidratos, y el perfil de sus lípidos, que se acumulan como reserva de energía o como respuesta al estrés. Por ejemplo, las microalgas pueden producir enzimas específicas para descomponer los contaminantes hidrocarbonados, lo que altera la producción de proteínas, y sus vías metabólicas se adaptan para utilizar estos compuestos, lo que puede afectar sus reservas de carbohidratos e influir en la acumulación de lípidos (Hachicha et al., 2022; Roy et al., 2023).

Muñoz-Peñuela et al. (2012) estudiaron el efecto del medio de cultivo sobre el crecimiento y el contenido proteico de *C. vulgaris*, encontrando variaciones desde 18.6 hasta 56.8 % en correspondencia con la fuente nutritiva disponible. A su vez, Guldhe et al. (2017) estudiaron el potencial de medios de cultivo alternativos para la generación de biomasa microalgal de alto valor comercial a partir de *Chlorella sorokiniana* en modo heterotrófico; bajo condiciones específicas se mejoró el crecimiento de *C. sorokiniana*, así como la productividad de lípidos, carbohidratos y proteínas. Hamouda et al. (2023), por su parte, reportaron una máxima producción de lípidos de 32 % en *C. vulgaris* después de 15 días de cultivo con 1 % de queroseno, como resultado del régimen mixotrófico utilizado por la microalga para la degradación del carbono orgánico disponible. También se debe tomar en cuenta que la proliferación bacteriana pudo haber intervenido sobre las magnitudes encontradas de estas biomoléculas en las unidades experimentales, como en el caso de las proteínas totales, considerando que en la pared celular bacteriana las proteínas se encuentran en alta proporción (Lucana y Huanca, 2014), pudiéndose generar sobrestimaciones de los valores.

La producción de biomoléculas por microalgas ofrece ventajas como el cultivo rápido en sistemas controlados sin requerir grandes extensiones de terreno ni instalaciones complejas; la capacidad de producir compuestos de alto valor nutricional y terapéutico (lípidos, proteínas, vitaminas, pigmentos), y la fijación de CO<sub>2</sub>, hace que esta tecnología sea un recurso valioso para las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética, además de las relacionadas con los biocombustibles y la biorremediación de aguas residuales. Estas microalgas se aprovechan en modos de cultivo que pueden variar desde estanques hasta fotobiorreactores, adaptando las condiciones de producción para optimizar la obtención de biomoléculas específicas con aplicaciones en alimentos funcionales, piensos, cosméticos, biofertilizantes y otros materiales de alto valor humano y tecnológico (Miazek *et al.*, 2017; Lopes da Silva *et al.*, 2021; Hachicha *et al.*, 2022).

### **Remoción de hidrocarburos totales del petróleo en los cultivos de *Chlorella* spp. expuestos al diésel**

Las concentraciones finales de HTP fueron de  $0.43 \pm 0.12$ ,  $1.12 \pm 0.23$  y  $2.30 \pm 0.37$  mg L<sup>-1</sup> para T1, T2 y T3, respectivamente (figura 5), originando remociones de 75.8 % en T1, 70.6 % en T2 y de 69.3 % en T3, con diferencias significativas entre ellas ( $p < 0.001$ , factor  $F = 419.9$ ). La prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ) indicó la conformación de tres grupos distintos respecto a los niveles de remoción de HTP (T1, T2 y T3), demostrando que fueron dependientes de los contenidos iniciales de diésel en las unidades de ensayo (1.79, 3.85 y 7.50 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente).



**Figura 5.** Concentraciones de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) en los cultivos de *Chlorella* spp. expuestos al diésel. Tratamientos: T1-0.25, T2-0.50 y T3-1.00 % de diésel.

Diferentes estudios han reportado la remoción de HTP utilizando microalgas y señalando la versatilidad metabólica de estos microorganismos. En tal sentido, Aldaby y Mawad (2019) denotaron la capacidad de degradación por *Chlorella* spp. sobre el hidrocarburo aromático pireno, con valores de 78.71 % después de 30 días de cultivo con luz y una concentración inicial de 50 mg L<sup>-1</sup>. Bajo estas mismas condiciones, obtuvieron también los mayores contenidos de peso seco, clorofila total y carotenoides, debido a la intensificación del proceso de fotosíntesis (estimulación del crecimiento). Similarmente, Egberomoh y Fagade (2016) experimentaron con consorcios microbianos que contenían *Chlorella minutissima* y *Aphanocapsa* sp. como componentes microalgales, así como *Citrobacter* sp. SB9, *Pseudomonas aeruginosa* SA3 y *Bacillus subtilis* SA7 como componentes bacterianos. Los tres tipos de consorcios configurados: BCC (inóculos bacterianos y *Chlorella minutissima*), BCCA (todos los inóculos) y BCA (inóculos bacterianos y *Aphanocapsa* sp.), exhibieron porcentajes de degradación de hidrocarburos poliaromáticos (HPA) de 92.09, 67.76 y 47.19 %, respectivamente en 10 días, demostrando que se puede lograr una sinergia microbiana efectiva y una excelente degradación de HPA con un consorcio microalga-bacteria adecuado. Estos valores resultan comparables a los observados con el diésel en el presente trabajo, donde *Chlorella* spp. junto a las bacterias asociadas, lograron degradar >70 % del hidrocarburo presente, a concentraciones iniciales entre 0.25 y 1.00 %.

De manera general, las microalgas tienen tres formas específicas de eliminar los contaminantes orgánicos de su entorno, incluyendo los HTP: i) adsorción en los sitios activos de la pared celular a través de atracción electrostática y formación de complejos; ii) bioacumulación dentro de la célula, cuya capacidad de bioabsorción y acumulación está relacionada con sus grupos funcionales, incluyendo grupos hidroxilo, carboxilato, sulfato, fosfato y amino, e involucrando diversas reacciones químicas que ocurren en la superficie celular, como intercambio iónico con grupos activos en la superficie de las algas, reacciones de acomplejamiento superficial, quelación y microprecipitación; y iii) conversión en sustancias químicas beneficiosas, como dióxido de carbono y agua, mediante enzimas redox involucradas en reacciones enzimáticas de oxidación-reducción (Schmitt *et al.*, 2001; Mona *et al.*, 2011; Khan *et al.*, 2020; El-Sayed-Touliabah *et al.*, 2022).

Los consorcios microbianos, por su parte, presentan ciertas ventajas en comparación al uso de cultivos de organismos individuales, como: versatilidad ambiental, ya que se han aplicado en sistemas de naturaleza diversa con otros beneficios asociados (remoción conjunta de N y P, captura de CO<sub>2</sub> y producción de biomasa de importancia económica); y base funcional robusta, considerando que la degradación descansa en enzimas oxigenasas, peroxidases y reductasas bacterianas; además, en consorcios, las interacciones

interespecíficas (*cross-feeding*, consumo de intermediarios tóxicos, etc.) mitigan el estrés y evitan la acumulación de metabolitos (Patowary *et al.*, 2016; González-González y de-Bashan, 2023; Hamouda *et al.*, 2023). A este respecto, en la tabla 3 se presenta una comparación de la eficiencia en la degradación de hidrocarburos por cultivos bacterianos uniespecíficos y consorcios microbianos (bacteria-bacteria y microalga-bacteria). La fortaleza de los consorcios microalgas-bacterias radica en: *i*) autosuficiencia de oxígeno, ya que la fotosíntesis disminuye o elimina la necesidad de aireación externa, un problema típico en la biorremediación aerobia; *ii*) mayor espectro de sustratos, considerando la diversidad enzimática y el cometabolismo, que permiten atacar mezclas complejas del petróleo (alcanos+HPA); *iii*) más rapidez y rendimiento global, observándose frecuentemente tasas y conversiones superiores a las de monocultivos; *iv*) estabilidad y resiliencia, porque los consorcios amortiguan las fluctuaciones de luz, nutrientes, salinidad y toxicidad; los miembros consumen intermediarios que inhibirían el crecimiento de una población individual; *v*) mayor biodisponibilidad, en este sentido, los exopolisacáridos y biosurfactantes aumentan el contacto con microgotas de petróleo y facilitan la emulsificación; *vi*) cotratamiento de distintos contaminantes, removiendo simultáneamente nutrientes y sustancias orgánicas para mejorar la calidad del efluente; *vii*) sinergias metabólicas dirigibles, ya que es factible diseñar consorcios específicos para rutas objetivo y estabilidad funcional; y *viii*) valorización de la biomasa, mediante la generación de bioproductos por parte de la fracción algal (biocombustibles y biofertilizantes), cerrando así los ciclos de economía circular (Hamouda *et al.*, 2023; Radice *et al.*, 2023; Vo *et al.*, 2024).

**Tabla 3.** Comparación de la eficiencia de degradación de hidrocarburos por cultivos bacterianos uniespecíficos y consorcios microbianos (bacteria-bacteria y microalga-bacteria).

| Tipo de cultivo | Tipo de hidrocarburo     | Microorganismo o consorcio                                                              | % de degradación (tiempo)                                              | Características                                                                     | Referencia               |
|-----------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Bacteria        | Diésel<br>aceite quemado | y <i>Pseudomonas</i> sp.                                                                | Diésel (4 % v/v): 14.19 % y aceite quemado (8 % v/v): 11.97 % (7 días) | Degradación moderada, superior a <i>Acinetobacter</i> sp. y <i>Enterobacter</i> sp. | Hossain et al. (2022)    |
| Bacteria        | Diésel<br>aceite quemado | y <i>Acinetobacter</i> sp.                                                              | Diésel: 8.2 % y aceite quemado: 6.09 % (7 días)                        | Baja eficiencia comparativa                                                         | Hossain et al. (2022)    |
| Bacteria        | Petróleo                 | <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Bacillus subtilis</i> y <i>Acinetobacter lwoffii</i> | 77.8, 76.7 y 74.3 % (28 días)                                          | Degradación progresiva creciente; cada cepa mostró un rango limitado                | Al-Wasify y Hamed (2014) |

## Efecto del diésel sobre el crecimiento y la composición bioquímica de *Chlorella* spp.: mixotrofia y consorcios microalga-bacteria

| Tipo de cultivo                  | Tipo de hidrocarburo              | Microorganismo o consorcio                                                                                            | % de degradación (tiempo)                                                          | Características                                                                              | Referencia                           |
|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Consortio bacteriano             | Petróleo                          | <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Bacillus subtilis</i> y <i>Acinetobacter lwoffii</i>                               | 88.5 % (28 días)                                                                   | Mejor rendimiento que las cepas aisladas; sinergia efectiva                                  | Al-Wasify y Hamed (2014)             |
| Consortio bacteriano             | Petróleo                          | <i>Pseudomonas putida</i> (A2), <i>Acinetobacter calcoaceticus</i> (A4), <i>Sphingomonas</i> sp. (L5) y consorcio (C) | A2: 42.8 %, A4: 48.01 %, L5: 26.56 % y C: 81.07 % (28 días)                        | Consortio supera a cada cepa aislada; efecto sinérgico                                       | Wei et al. (2021)                    |
| Consortio bacteriano             | HTP                               | 14 consorcios diferentes                                                                                              | Mejor consorcio: 68.12 % (semana 3)                                                | Algunos consorcios presentaron efectos antagonistas; se requiere optimización de condiciones | Patowary et al. (2016)               |
| Consortio bacteriano             | Diésel, hexano y hexadecano       | Consortios autóctonos                                                                                                 | Diésel: 40-92 %, hexano: 45-74 % y hexadecano: 61-87 %                             | Degradación variable según tipo de hidrocarburo; requiere adaptación previa del consorcio    | Rodriguez et al. (2023)              |
| Consortio bacteriano (cocultivo) | Petróleo (saturados + aromáticos) | <i>Bacillus subtilis</i> SL + <i>Pseudomonas aeruginosa</i> WJ-1                                                      | Petróleo: >58.6 % y saturados: 75.06 % (7 días)                                    | El cocultivo mejora la adhesión (hidrofobicidad) y emulsificación                            | Wu et al. (2023)                     |
| Consortio microalga-bacteria     | HPA                               | <i>Chlorella</i> spp. + <i>Rhodococcus wratislaviensis</i>                                                            | Fenantreno, pireno y benzo[a]pireno: degradados a niveles no detectables (30 días) | La microalga reduce la toxicidad para la bacteria; mejora de crecimiento conjunto            | Gonzalez-Gonzalez y de-Bashan (2023) |
| Consortio microalga-bacteria     | Pireno                            | <i>Selenastrum capricornutum</i> + <i>Mycobacterium</i> spp.                                                          | Pireno degradado completamente en 10 días                                          | El alga protegida de toxicidad; sinergia en crecimiento mutuo                                | Gonzalez-Gonzalez y de-Bashan (2023) |
| Consortio microalga-bacteria     | Diésel                            | <i>Chlorella</i> spp. + bacterias asociadas                                                                           | T1: 75.8 %<br>T2: 70.6 %<br>T3: 69.3 % (32 días)                                   | Estimulación del crecimiento y de la producción de biomoléculas                              | Este trabajo                         |

HTP: hidrocarburos totales del petróleo, HPA: hidrocarburos poliaromáticos; T1: 0.25 %, T2: 0.50 %, T3: 1.00 %.

De lo anterior se desprende que, las microalgas son excelentes organismos para utilizar en los procesos de bioeliminación de los contaminantes del petróleo. Actualmente, se sigue investigado sobre otros

mecanismos específicos mediante los cuales ocurren estos procesos de degradación. No obstante, las microalgas son potencialmente adecuadas para la mitigación de los efectos de diversos compuestos químicos en el ambiente, particularmente en consorcios microbianos, constituyendo un elemento vivo fundamental en los sistemas de tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos.

## Conclusiones

En el presente trabajo sobre el efecto del diésel en el crecimiento y la composición bioquímica (contenido de clorofilas, carotenoides, proteínas, carbohidratos y lípidos) de la microalga clorofita *Chlorella* spp., se observó una estimulación del crecimiento microalgal en el tratamiento con 0.25 % (T1) de diésel y de la producción de pigmentos fotosintéticos con 0.25 (T1) y 0.50 % (T2) de diésel. También se presentó un incremento en la producción de las macromoléculas orgánicas analizadas (proteínas, carbohidratos y lípidos totales) a todos los niveles aplicados de diésel, probablemente debido al crecimiento mixotrófico de la microalga y/o a la acción simbiótica de las bacterias asociadas (consorcio microbiano). Estos procesos resultaron en una reducción de los HTP dependiente de los contenidos iniciales de diésel en las unidades experimentales. El mejor desempeño se obtuvo a la menor proporción aplicada de diésel (75.8 % a 0.25 % v/v).

El uso de microalgas, bajo la forma de cultivo mixotrófico, resulta altamente versátil para el tratamiento de áreas impactadas por derrames de hidrocarburos porque se reduce la contaminación generada a la vez que se obtienen metabolitos de importancia comercial. De igual manera, los consorcios microbianos microalga-bacteria ofrecen mayor rapidez y rendimiento global de los procesos degradativos en comparación a los monocultivos, además de actuar en cotratamiento sobre distintos contaminantes, removiendo simultáneamente nutrientes y sustancias orgánicas para mejorar la calidad del efluente tratado, entre otras ventajas.

## Referencias

- Aldaby, E. S. E. y Mawad, A. M. M. (2019). Pyrene biodegradation capability of two different microalgal strains. *Global Nest Journal*, 21(3), 290-295. <https://doi.org/10.30955/gnj.002767>
- Al-Wasify, R. S. y Hamed, S. R. (2014). Bacterial biodegradation of crude oil using local isolates. *International Journal of Bacteriology*, 2014, 863272. <https://doi.org/10.1155/2014/863272>
- Ambaye, T. G., Chebbi, A., Formicola, F., Prasad, S., Gomez, F. H., Franzetti, A. y Vaccari, M. (2022). Remediation of soil polluted with petroleum hydrocarbons and its reuse for agriculture: recent progress, challenges, and perspectives. *Chemosphere*, 293, 133572. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133572>

- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) y Water Environment Federation (WEF). (2023). Standard methods for the examination of water and wastewater. (24th edition). W. C. Lipps, E. B. Braun-Howland y T. E. Baxter (Eds.). American Public Health Association.
- Bento, F. M., de Oliveira-Camargo, F. A., Okeke, B. y Frankenberger-Júnior, W. T. (2003). Bioremediation of soil contaminated by diesel oil. *Brazilian Journal of Microbiology*, 34(1), 65-68. <http://doi.org/10.1590/S1517-83822003000500022>
- Bligh, E. G. y Dyer, W. J. (1959). A rapid method of total lipid extraction and purification. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*, 37(8), 911-917. <https://doi.org/10.1139/o59-099>
- Chaudhuri, U. R. (2011). Fundamentals of petroleum and petrochemical engineering. CRC Press.
- Chekroun, K. B., Sánchez, E. y Baghour, M. (2014). The role of algae in bioremediation of organic pollutants. *International Research Journal of Public and Environmental Health*, 1(2), 19-32. <https://journalissues.org/wp-content/uploads/2014/07/Chekourn-et-al.pdf>
- Cortez-Mago, R., Guevara, M., Vásquez, A. y Lodeiros-Seijo, C. (2007). Influencia del petróleo crudo en el crecimiento de microalgas del nororiente de Venezuela. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*, 41(4), 471-483. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/boletin/article/view/100>
- Das, P., AbdulQuadir, M., Thaher, M., Khan, S., Chaudhary, A. K., Alghasal, G. y Al-Jabri, H. M. (2019). Microalgal bioremediation of petroleum-derived low salinity and low pH produced water. *Journal of Applied Phycology*, 31, 435-444. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1571-6>
- de-Bashan, L. E. y Bashan, Y. (2010). Immobilized microalgae for removing pollutants: review of practical aspects. *Bioresource Technology*, 101(6), 1611-1627. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.043>
- Díaz-Borrego, L., Vera, A., Marín, J., Aiello, C., Briceño, B. y Morales, E. (2012). Efecto del queroseno y de la concentración de nutrientes en el crecimiento de un cultivo mixto de microalgas (Chlorophyta). *Revista de la Universidad del Zulia 3ra Época*, 3(6), 102-118. <https://www.produccioncientifica.luz.edu.ve/index.php/rluz/article/view/31185>
- Dubois, M., Guilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A. y Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350-356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
- Egberomoh, G. O. y Fagade, O. E. (2016). Microalgal-bacterial consortium in polyaromatic hydrocarbon degradation of petroleum – based effluent. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, 7, 359. <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000359>
- El-Sayed-Touliabah, H., El-Sheekh, M. M., Ismail, M. M. y El-Kassas, H. (2022). A review of microalgae- and cyanobacteria-based biodegradation of organic pollutants. *Molecules*, 27, 1141. <https://doi.org/10.3390/molecules27031141>

- Fabregas, J., Herrero, C. y Veiga, M. (1984). Effect of oil and dispersant on growth and chlorophyll  $\alpha$  content of the marine microalga *Tetraselmis suecica*. *Applied and Environmental Microbiology*, 47(2), 445-447. <https://doi.org/10.1128/aem.47.2.445-447.1984>
- Gonzalez-Gonzalez, L. M. y de-Bashan, L. E. (2023). The potential of microalgae-bacteria consortia to restore degraded soils. *Biology*, 12(5), 693. <https://doi.org/10.3390/biology12050693>
- Guldhe, A., Ansari, F. A., Singh, P. y Bux, F. (2017). Heterotrophic cultivation of microalgae using aquaculture wastewater: A biorefinery concept for biomass production and nutrient remediation. *Ecological Engineering*, 99, 47-53. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.11.013>
- Hachicha, R., Elleuch, F., Ben-Hlima, H., Dubessay, P., de Baynast, H., Delattre, C., Pierre, G., Hachicha, R., Abdelkafi, S., Michaud, P. y Fendri, I. (2022). Biomolecules from microalgae and cyanobacteria: applications and market survey. *Applied Sciences*, 12, 1924. <https://doi.org/10.3390/app12041924>
- Hammed, A. M., Prajapati, S. K., Simsek, S. y Simsek, H. (2016). Growth regime and environmental remediation of microalgae. *Algae*, 31(3), 189-204. <http://dx.doi.org/10.4490/algae.2016.31.8.28>
- Hamouda, R. A., Alhumairi, A. M. y Saddiq, A. A. (2023). Simultaneous bioremediation of petroleum hydrocarbons and production of biofuels by the micro-green alga, cyanobacteria, and its consortium. *Heliyon*, 9, e16656. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16656>
- Hamouda, R. A., Sorour, N. M. y Yeheia, D. S. (2016). Biodegradation of crude oil by *Anabaena oryzae*, *Chlorella kessleri* and its consortium under mixotrophic conditions. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 112, 128-134. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.05.001>
- Hanif, A., Shah, F. H., Mumtaz, A. S., Ullah, T., Azeem, M. A., Ahmad, M. y Shah, A. A. (2024). Taxonomic study of freshwater microalgal diversity and its optimum culturing condition of District Karak, Pakistan. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 24(3), 96-116. <https://www.innspub.net/wp-content/uploads/2024/06/JBES-V24-No3-p97-116.pdf>
- Herbert, D., Phipps, P. J. y Strange, R. E. (1971). Chemical analysis of microbial cells. *Methods in Microbiology*, 5, 209-344. [http://dx.doi.org/10.1016/S0580-9517\(08\)70641-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0580-9517(08)70641-X)
- Hossain, M. F., Akter, M. A., Sohan, M. S. R., Sultana, D. N., Reza, M. A. y Hoque, K. M. F. (2022). Bioremediation potential of hydrocarbon degrading bacteria: isolation, characterization, and assessment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(1), 211-216. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.08.069>
- Jeffrey, S. W. y Humphrey, G. F. (1975). New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*, 167(2), 191-194. [http://doi.org/10.1016/S0015-3796\(17\)30778-3](http://doi.org/10.1016/S0015-3796(17)30778-3)

- Ji, Y., Hu, W., Li, X., Ma, G., Song, M. y Pei, H. (2014). Mixotrophic growth and biochemical analysis of *Chlorella vulgaris* cultivated with diluted monosodium glutamate wastewater. *Bioresource Technology*, 152, 471-476. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.11.047>
- Jiménez-Guanipa, H. y Viedma, E. (2018). Energía, cambio climático y desarrollo sostenible. Impacto sobre los derechos humanos. Fundación Heinrich Böll.
- Khan, Z. I., Ahmad, K., Siddique, S., Ahmad, T., Bashir, H., Munir, M., Mahpara, S., Malik, I. S., Wajid, K., Ugulu, I., Nadeem, M., Noorka, I. R. y Chen, F. (2020). A study on the transfer of chromium from meadows to grazing livestock: an assessment of health risk. *Environmental Science and Pollution Research International*, 27(21), 26694-26701. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10660-z>
- Kochert, G. (1978). Carbohydrate determination by the phenol-sulfuric acid method. En: J. Hellebust y J. Craigie (Eds.). *Handbook of Phycological Methods. Physiological and Biochemical Methods*. Cambridge University Press.
- Lee, J., Hong, S., An, S. A. y Khim, J. S. (2023). Methodological advances and future directions of microalgal bioassays for evaluation of potential toxicity in environmental samples: a review. *Environment International*, 173, 107869. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107869>
- León-Vaz, A., Torres-Franco, A. F., García-Encina, P. A. y Muñoz, R. (2025). Developing a microalgal-bacterial consortium for the removal of organic pollutants from petrochemical industry. *Journal of Water Process Engineering*, 73, 107663. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107663>
- Lobban, C., Chapman, D. y Kremer, B. (1988). *Experimental phycology: a laboratory manual*. Cambridge University Press.
- Lopes da Silva, T., Moniz, P., Silva, C. y Reis, A. (2021). The role of heterotrophic microalgae in waste conversion to biofuels and bioproducts. *Processes*, 9, 1090. <https://doi.org/10.3390/pr9071090>
- López, J., Quintero, G., Guevara, A., Jaimes, D., Gutiérrez, S. y García, J. (2006). Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo. *Nova*, 4(5), 82-90. <https://doi.org/10.22490/24629448.351>
- Lowry, H., Rosebrough, J., Farr, L. y Randall, J. (1951). Protein measurement with the Folin phenol reagent. *Journal of Biological Chemistry*, 193(1), 265-275. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14907713/>
- Lucana, N. y Huanca, R. (2014). Estructura bacteriana. *Revista de Actualización Clínica*, 49, 2589- 2593. [http://revistasbolivianas.umsa.bo/pdf/raci/v49/v49\\_a01.pdf](http://revistasbolivianas.umsa.bo/pdf/raci/v49/v49_a01.pdf)
- Madigan, M. T., Martinko, J. M., Bender, K. S., Buckley, D. H. y Stahl, D. A. (2015). *Brock, Biología de microorganismos*. (14ta edición). Pearson Educación S. A.
- Manasseh, I. M. y Humphrey, S. S. (2024). Bioremediation of oil spill: concept, methods and applications. *Discover Chemistry*, 1, 42. <https://doi.org/10.1007/s44371-024-00038-2>

- Marsh, J. y Weinstein, D. (1966). Simple charring method for determination of lipids. *Journal of Lipid Research*, 7(4), 574-576. [https://doi.org/10.1016/S0022-2275\(20\)39274-9](https://doi.org/10.1016/S0022-2275(20)39274-9)
- Miazeck K., Kratky, L., Sulc, R., Jirout, T., Aguedo, M., Richel, A. y Goffin, D. (2017). Effect of organic solvents on microalgae growth, metabolism and industrial bioproduct extraction: a review. *International Journal of Molecular Sciences*, 18, 1429. <https://doi.org/10.3390/ijms18071429>
- Mona, S., Kaushik, A. y Kaushik, C. P. (2011). Biosorption of reactive dye by waste biomass of *Nostoc linckia*. *Ecological Engineering*, 37(10), 1589-1594. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.04.005>
- Muñoz-Peñuela, M., Ramírez, J., Otero-Paternina, A. M., Medina-Robles, V. M., Cruz-Casallas, P. E. y Velasco-Santamaría, V. (2012). Effect of culture medium on growth and protein content of *Chlorella vulgaris*. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 25(3), 438-449. <http://www.scielo.org.co/pdf/rccp/v25n3/v25n3a12.pdf>
- Needham, J. y Needham, P. R. (1978). *Guía de estudio de los seres vivos de las aguas dulces*. Editorial Reverté, S. A.
- Okeke, E. S., Okoye, C. O., Chidike-Ezeorba, T. P., Mao, G., Chen, Y., Xu, H., Song, C., Feng, W. y Wu, X. (2022). Emerging bio-dispersant and bioremediation technologies as environmentally friendly management responses toward marine oil spill: a comprehensive review. *Journal of Environmental Management*, 322, 116123. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116123>
- Otero-Paternina, A., Cruz-Casallas, P. E. y Velasco-Santamaría, Y. M. (2013). Evaluación del efecto del hidrocarburo fenantreno sobre el crecimiento de *Chlorella vulgaris* (Chlorellaceae). *Acta Biológica Colombiana*, 18(1), 87-98. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/actabiol/article/view/24558/39935>
- Patowary, K., Patowary, R., Kalita, M. C. y Deka, S. (2016). Development of an efficient bacterial consortium for the potential remediation of hydrocarbons from contaminated sites. *Frontiers in Microbiology*, 14(7), 1092. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01092>
- Proietti-Tocca, G., Agostino, V., Menin, B., Tommasi, T., Fino, D. y Di Caprio, F. (2024). Mixotrophic and heterotrophic growth of microalgae using acetate from different production processes. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 23, 93-132. <https://doi.org/10.1007/s11157-024-09682-7>
- Radice, R. P., De Fabrizio, V., Donadoni, A., Scopa, A. y Martelli, G. (2023). Crude oil bioremediation: from bacteria to microalgae. *Processes*, 11, 442. <https://doi.org/10.3390/pr11020442>
- Rodriguez, K. N. D., Santos, R. T., Nagpala, M. J. M. y Opulencia, R. B. (2023). Metataxonomic characterization of enriched consortia derived from oil spill-contaminated sites in Guimaras, Philippines, reveals major role of *Klebsiella* sp. in hydrocarbon degradation. *International Journal of Microbiology*, 2023, 3247448. <https://doi.org/10.1155/2023/3247448>

- Roy, U. K., Wagner, J. y Radu, T. (2023). Production of metabolites in microalgae under alkali halophilic growth medium using a dissolved inorganic carbon source. *Waste and Biomass Valorization*, 14, 3339-3354. <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02053-3>
- Sánchez, J. C. (2021). Afectación de los ecosistemas marino-costeros por los derrames de hidrocarburos. *Boletín de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales*, LXXXI(1), 35-39. <https://acfiman.org/wp-content/uploads/2022/07/LXXXI.N1.P35-39.2021.pdf>
- Satpati, G. G., Gupta, S., Biswas, R. K., Choudhury, A. K., Kim, J. W. y Davoodbasha, M. A. (2023). Microalgae mediated bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons: strategies, advancement and regulations. *Chemosphere*, 344, 140337. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140337>
- Schmitt, D., Müller, A., Csögör, Z., Frimmel, F. H. y Posten, C. (2001). The adsorption kinetics of metal ions onto different microalgae and siliceous earth. *Water Research*, 35(3), 779-785. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00317-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00317-1)
- Silva, D. A., Cardoso, L. G., Silva, J. S., Oliveira de Souza, C., França-Lemos, P. V., de Almeida, P. F., de Souza-Ferreira, E., Lombardi, A. T. y Druzian, J. I. (2022). Strategy for the cultivation of *Chlorella vulgaris* with high biomass production and biofuel potential in wastewater from the oil industry. *Environmental Technology & Innovation*, 25, 102204. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102204>
- Strickland, J. y Parsons, T. (1972). A practical handbook of seawater analysis. (2nd edition). Fisheries Research Board Canadian.
- Vo, T. P., Danaee, S., Chaiwong, C., Pham, B. T., Poddar, N., Kim, M., Kuzhiumparambil, U., Songsomboon, C., Pernice, M., Ngo, H. H., Ralph, P. J. y Vo, P. H. N. (2024). Microalgae-bacteria consortia for organic pollutants remediation from wastewater: a critical review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, (6)12, 114213. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114213>
- Wei, X., Peng, P., Meng, Y., Li, T., Fan, Z., Wang, Q. y Chen, J. (2021). Degradation performance of petroleum-hydrocarbon-degrading bacteria and its application in remediation of oil contaminated soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 766, 012096. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/766/1/012096>
- Wilkes, H., Jarling, R. y Schwarzbauer, J. (2020). Hydrocarbons and lipids: an introduction to structure, physicochemical properties, and natural occurrence. En: H. Wilkes (Ed.). *Hydrocarbons, oils and lipids: diversity, origin, chemistry and fate*. Handbook of hydrocarbon and lipid microbiology. Springer Nature. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-90569-3\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-319-90569-3_34)
- Wu, B., Xiu, J., Yu, L., Huang, L., Yi, L. y Ma, Y. (2023). Degradation of crude oil in a co-culture system of *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa*. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1132831. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1132831>
- Yacubson, S. (1969). Algas de ambientes acuáticos continentales, nuevas para Venezuela (Cyanophyta, Chlorophyta). *Boletín del Centro de Investigaciones*

Biológicas, 3, 1-87.  
<https://produccioncientificaluz.org/index.php/boletin/article/view/168>

Yamaguchi, T., Ishida, M. y Suzuki, T. (1999). Biodegradation of hydrocarbons by *Prototheca zopfii* in rotating biological contactors. *Process Biochemistry*, 35, 403-409. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(99\)00086-2](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(99)00086-2)





## **Contaminación ambiental por residuos plásticos derivados del uso de sistemas de riego agrícola: una revisión bibliométrica de tendencias científicas globales (2015–2025)**

Environmental pollution from plastic waste derived from the use of agricultural irrigation systems: a bibliometric review of global scientific trends (2015–2025)

**Ana Paula Serna-Abascal**

Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua

Universidad Autónoma Chapingo, México

0009-0006-2532-0272 | [a.ps.a@hotmail.com](mailto:a.ps.a@hotmail.com)

**Rubén Velasco-Hernández\***

Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua

Universidad Autónoma Chapingo, México

0009-0000-8200-3552 | [rvelascoh@chapingo.mx](mailto:rvelascoh@chapingo.mx)

\*Autor para correspondencia

**Ausel Horacio Gutiérrez-Méndez**

Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua

Universidad Autónoma Chapingo, México

0009-0006-0986-7542 | [gutmenah@gmail.com](mailto:gutmenah@gmail.com)

**Cita APA:** Serna-Abascal, A. P., Velasco-Hernández, R. y Gutiérrez-Méndez, A. H. (2025). Contaminación ambiental por residuos plásticos derivados del uso de sistemas de riego agrícola: una revisión bibliométrica de tendencias científicas globales (2015–2025). *Revista Arbitrada de Ciencias Ambientales*, 1(1), 51-74. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18487590>

## Resumen

Esta revisión de literatura con análisis bibliométrico examina la evolución de la producción científica y las principales corrientes de investigación en torno a la contaminación ambiental asociada al uso de cintas y tuberías plásticas en sistemas de microirrigación agrícola durante el periodo 2015–2025. Se utilizó la base de datos Scopus®, junto con las herramientas VOSviewer y Bibliometrix, para identificar tendencias temáticas, patrones de colaboración y enfoques metodológicos predominantes. Los resultados evidencian un incremento sostenido en la producción científica, con una concentración relevante en países como China e Italia, así como una creciente colaboración internacional. Instituciones europeas y asiáticas destacan como actores clave en el desarrollo del conocimiento en este campo. Las palabras clave predominantes reflejan un enfoque central en la contaminación del suelo agrícola, los microplásticos, los residuos plásticos y su interacción con los sistemas de riego por goteo. La literatura analizada confirma que la degradación y fragmentación de los plásticos agrícolas influyen en las propiedades físicas y químicas del suelo, así como en la movilidad de contaminantes. En conjunto, los hallazgos subrayan la necesidad de fortalecer estrategias de gestión, recuperación y reciclaje de plásticos agrícolas, así como de promover enfoques de economía circular para mitigar los impactos ambientales asociados a la agricultura tecnificada.

**Palabras clave:** microirrigación, plásticos agrícolas, contaminación del suelo.

## Abstract

This literature review with bibliometric analysis examines the evolution of scientific production and the main research trends related to environmental contamination associated with the use of plastic tapes and pipes in agricultural micro-irrigation systems during the period 2015–2025. The Scopus® database was used, together with the VOSviewer and Bibliometrix tools, to identify thematic trends, collaboration patterns, and prevailing methodological approaches. The results reveal a sustained increase in scientific output, with a significant concentration in countries such as China and Italy, as well as a growing level of international collaboration. European and Asian institutions emerge as key contributors to knowledge development in this field. Predominant keywords indicate a central focus on agricultural soil contamination, microplastics, plastic residues, and their interaction with drip irrigation systems. The analyzed literature confirms that the degradation and fragmentation of agricultural plastics affect the physical and chemical properties of soils, as well as the mobility of contaminants. Overall, the findings highlight the need to strengthen management, recovery, and recycling strategies for agricultural plastic waste, and to promote circular economy approaches to mitigate the environmental impacts associated with technologically intensive agriculture.

**Key words:** micro-irrigation, agricultural plastics, soil pollution.

## Introducción

La agricultura moderna depende cada vez más de la implementación de sistemas de riego eficientes para garantizar rendimientos elevados para responder al crecimiento de la demanda alimentaria, garantizar la seguridad alimentaria y optimizar el uso de recursos naturales como el agua y el suelo. En este contexto, el uso racional del agua y una gestión adecuada de los nutrientes (fertirriego) se han vuelto estrategias clave para alcanzar mayores rendimientos agrícolas. La microirrigación como riego por goteo, las cintas y las tuberías de baja densidad, son parte de estos sistemas que han ganado adopción amplia en múltiples regiones. Sin embargo, asociado a estos beneficios, emergen preocupaciones ambientales significativas relacionadas con los desechos que se generan con el uso de estos métodos de riego que, junto a los residuos de los agroquímicos, son residuos difíciles de manejar; la degradación y fragmentación de estos materiales plásticos favorece la liberación de microplásticos que se acumulan en agroecosistemas y ecosistemas circundantes, con potenciales impactos negativos sobre la calidad del suelo y el funcionamiento ambiental (Serna-Abascal *et al.*, 2022; Castro *et al.*, 2025).

En este contexto, investigaciones recientes han empezado cuestionar la vida útil de los materiales plásticos utilizados en los sistemas de riego agrícola, su durabilidad (tiempo en descomponerse) e impacto ambiental, tales como: la toxicidad asociada a aditivos y la interacción con procesos agroecológicos; como la microbiología del suelo, fisicoquímica de suelos y sanidad de cultivos (Khalid *et al.*, 2023). Gündoğdu *et al.* (2022), encontraron fragmentos plásticos en el suelo provenientes de líneas de riego y películas de invernadero, lo que confirma que la quema abierta, el desgaste y la fragmentación de estos materiales son fuentes duraderas de contaminación en la agricultura. Asimismo, trabajos desarrollados en Alemania, Italia y China concuerdan que los residuos plásticos agrícolas son actualmente uno de los retos más importantes para la sostenibilidad del riego intensivo (Blanco *et al.*, 2018; Wen *et al.*, 2023; Yu *et al.*, 2025).

Sumado a esta problemática, se han identificado riesgos asociados a la interacción entre los residuos plásticos derivados de los sistemas de fertirriego y los agroquímicos utilizados en la agricultura. El polietileno (PE) que es uno de los plásticos más empleados en la fabricación de invernaderos, empaques, acolchados y tuberías para microirrigación, presenta la capacidad de adsorber y liberar residuos de pesticidas y fertilizantes durante su vida útil, debido a su composición química que involucra largas cadenas poliméricas (Castro *et al.*, 2025).

En este sentido, aunque el foco principal de la contaminación analizada corresponde a los residuos plásticos agrícolas, diversos estudios han señalado

que su interacción con agroquímicos puede intensificar los impactos ambientales en los suelos agrícolas. Desde una perspectiva más amplia, Xiuzhi et al. (2020) estudiaron el impacto ambiental del proceso de construcción y los materiales empleados, mediante la cuantificación de la huella hídrica y de carbono, a través del análisis del ciclo de vida de los materiales; determinaron que es necesario evaluar los impactos ambientales de los proyectos de construcción de sistemas de riego desde una perspectiva de ciclo de vida, en lugar de centrarse únicamente en el aumento del rendimiento agrícola y la reducción de la cantidad de agua de riego. Asimismo, el uso de aguas residuales tratadas para la irrigación agrícola se ha promovido como una estrategia de reutilización hídrica frente a la escasez de agua. No obstante, diversos estudios han evidenciado que esta práctica puede favorecer la acumulación de microplásticos en suelos agrícolas, debido a la limitada eficiencia de los sistemas convencionales de tratamiento para su remoción (Aydin et al., 2025). Estos microplásticos pueden persistir en los agroecosistemas, interactuar con las propiedades fisicoquímicas del suelo y representar un riesgo ambiental a largo plazo. Como consecuencia del manejo inadecuado de residuos agroindustriales y agroquímicos, estos contaminantes pueden incorporar elementos orgánicos e inorgánicos persistentes que permanecen en el ambiente y se dispersan en distintas matrices agrícolas, contribuyendo al desequilibrio de los agroecosistemas (Velázquez et al., 2022). Las metodologías empleadas para la identificación y cuantificación de microplásticos y otros contaminantes asociados en matrices ambientales agrícolas incluyen: 1) el análisis de isótopos estables de carbono y nitrógeno para entender la bioacumulación; 2) el uso de microscopía óptica y espectroscopía infrarroja (EIR) para identificar la composición y concentración en diversas matrices (agua, sedimentos, biota), y 3) el conteo directo de partículas en muestras.

Bollaín y Agulló (2019), señalan que no existe una metodología normalizada de métodos analíticos, como tampoco rigor en la definición y descripción de los microplásticos que permitan la comparación de resultados entre estudios. Por su parte Junhao et al. (2021), analizaron diferentes metodologías y sugieren la combinación de técnicas para dar mejor certeza en los resultados, proponen la implementación de análisis de bajos costos debido a la cantidad de información que se maneja. Ambas investigaciones analizan las metodologías empleadas para el análisis de estos contaminantes, la segunda más enfocada a la agricultura, sin embargo, no existen estudios que analicen de forma específica el impacto ambiental que tienen los materiales utilizados en la microirrigación.

En el ámbito agrícola, Junhao et al. (2022), mostraron que la dinámica hídrica y el transporte de sales en sistemas de goteo se ven afectadas por los residuos plásticos presentes en el perfil del suelo, lo cual influye

negativamente en la eficiencia del fertirriego. Sun et al. (2023) y Zhou et al. (2025), estudiaron cómo los microplásticos interactúan con elementos traza como el arsénico, resaltando la importancia de tener en cuenta los efectos sinérgicos entre contaminantes químicos y físicos en sistemas de riego agrícola.

Serna-Abascal et al. (2022) realizaron una revisión de alcance con análisis bibliométrico de la literatura científica sobre materiales alternativos utilizados en la agricultura. Dentro de los enfoques metodológicos identificados en los estudios analizados, se reporta el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) como una herramienta empleada para evaluar los impactos ambientales asociados a materiales convencionales y biobasados a lo largo de su ciclo de vida. No obstante, los autores señalan que este tipo de evaluaciones integrales sigue siendo limitado en el ámbito agrícola, particularmente en lo referente a procesos de degradación y fin de vida de los materiales. Por último, estudios como los de Blanco et al. (2018) y Cillis et al. (2022) demostraron que el uso de herramientas digitales como los SIG (Sistemas de Información Geográfica) son de gran utilidad para recopilar, gestionar y analizar los coeficientes espaciales de plástico agrícola; con el propósito de calcular volúmenes de desechos y poder planear infraestructura para reciclaje en el sur de Europa.

En general, la evidencia indica que entre 2015 y 2025 se ha registrado un aumento en el nivel de contaminación por plásticos agrícolas, en el cual los sistemas de microirrigación pueden actuar como medio de dispersión de residuos plásticos derivados de su uso y degradación, más que como la causa primaria de la contaminación. Cuando no se cuenta con planes adecuados de gestión, recuperación y reciclaje de residuos plásticos agrícolas, los beneficios hídricos asociados a la eficiencia y al ahorro de agua del riego por goteo pueden verse contrarrestados por la acumulación de residuos plásticos duraderos y sustancias potencialmente tóxicas en el ambiente.

La finalidad de este trabajo fue examinar, mediante un enfoque sistemático y bibliométrico de carácter descriptivo y exploratorio, la evidencia científica más reciente sobre el impacto ambiental asociado al uso y la disposición de cintas y tuberías empleadas en el riego agrícola. El análisis integró investigaciones relacionadas con la contaminación por plásticos, su interacción con los químicos del fertirriego y la gestión de estos residuos a escala global, con el propósito de identificar tendencias, patrones de investigación y vacíos de conocimiento en este campo de estudio.

## **Materiales y métodos**

Se realizó un estudio mixto para caracterizar las corrientes científicas en torno a este tema, mediante un análisis bibliométrico de carácter descriptivo

y exploratorio, basado en los enfoques clásicos de la bibliometría científica propuestos por Garfield (1972) y desarrollados posteriormente por Callon et al. (1991), así como en los aportes metodológicos contemporáneos de Aria y Cuccurullo (2017). Este enfoque permitió mapear indicadores de tendencias temporales, redes de colaboración, matrices de citación y los principales actores científicos involucrados (autores, instituciones y países). El procesamiento y análisis de los datos bibliográficos se realizó mediante el paquete Bibliometrix y su interfaz gráfica Biblioshiny (Aria y Cuccurullo, 2017), complementado con el software VOSviewer, utilizado para la visualización de redes de coautoría y colaboración internacional. Adicionalmente, se llevó a cabo una revisión sistemática para evaluar críticamente la evidencia empírica disponible sobre los impactos ambientales asociados al uso de sistemas de microirrigación, así como las estrategias de mitigación y las prácticas de gestión de residuos plásticos reportadas en la literatura científica.

Dando respuestas a las siguientes preguntas:

1. ¿Cuáles son las consecuencias ambientales más importantes que derivan del uso y deterioro de tuberías y cintas de riego de polietileno?
2. ¿Cuáles han sido las estrategias y enfoques aplicados para investigar la contaminación por plásticos en suelos agrícolas entre 2015 y 2025?
3. ¿Cuáles son las áreas del mundo que generan más producción científica en el tema y qué redes de cooperación son las más comunes?

En la búsqueda se utilizó la base de datos Scopus® por su alta cobertura temática, funcionalidad analítica y su proceso de búsqueda estructurado; además, es una base de datos completa en términos de ciencias agronómicas, ambientales e ingenierías. Para registrar la evolución reciente de las investigaciones, se eligió el periodo entre 2015 y 2025; el sistema de palabras utilizado para localizar y recuperar información científica relevante de la vasta colección de datos en Scopus®, fue el siguiente: "TITLE-ABS-KEY (("drip irrigation" OR "microirrigation" OR "plastic irrigation" OR "irrigation tube" OR "irrigation pipe") AND ("plastic waste" OR "agricultural plastics" OR "plastic pollution" OR "microplastics" OR "plastic residues") AND ("environmental impact" OR "soil pollution" OR "water contamination" OR "waste management" OR "open burning" OR "agricultural waste")) AND PUBYEAR > 2014"

Para contestar las preguntas, se utilizó un método combinado basado en las pautas PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) y en el planteamiento de Koutsos et al. (2019) para estudios que incorporan análisis bibliométrico, que constó de las siguientes etapas:

- 1) Identificación: exploración a fondo en la base de datos Scopus (Elsevier).
- 2) Cribado: eliminación de estudios fuera del enfoque temático y de duplicados.

- 3) Elegibilidad: evaluación de título, resumen y texto completo.
- 4) Inclusión: elección definitiva de artículos pertinentes para análisis y síntesis.

La elección de artículos se realizó siguiendo la metodología de embudo propuesta por Koutsos et al. (2019) mediante tres etapas de filtrado (L1-L3). Aplicando como primer filtro, el análisis de los títulos, en la segunda etapa la revisión del resumen y, por último, el estudio del documento, los filtros y sus características se detallan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Cribado de artículos mediante la metodología de embudo de Koutsos.

| Nivel          | Tipo de cribado           | Criterios de inclusión                                                                                                                   | Criterios de exclusión                                                         |
|----------------|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| L1 – Título    | Revisión temática inicial | Estudios que mencionen plásticos agrícolas, cintas, tuberías o sistemas de riego.                                                        | Publicaciones sobre contaminación marina o industrial sin relación agrícola.   |
| L2 – Resumen   | Evaluación de relevancia  | Artículos experimentales, revisiones o estudios de análisis de ciclo de vida relacionados con contaminación por plásticos o fertirriego. | Trabajos sin enfoque ambiental o sin vinculación con riego o fertilización.    |
| L3 – Totalidad | Revisión a texto completo | Investigaciones con datos sobre acumulación, migración o gestión de residuos plásticos agrícolas.                                        | Documentos sin texto completo, duplicados o carentes de sustento metodológico. |

Fuente: Elaboración propia, con datos de Koutsos et al. (2019)

En la construcción de los mapas y del análisis bibliométrico, la información de los artículos seleccionados se extrajo de la base de datos Scopus® en formato CSV. El procesamiento, análisis y visualización de los datos se realizó mediante el paquete Bibliometrix y su interfaz gráfica Biblioshiny, desarrollados por Aria y Cuccurullo (2017), ejecutados en el entorno R (versión 4.3.1).

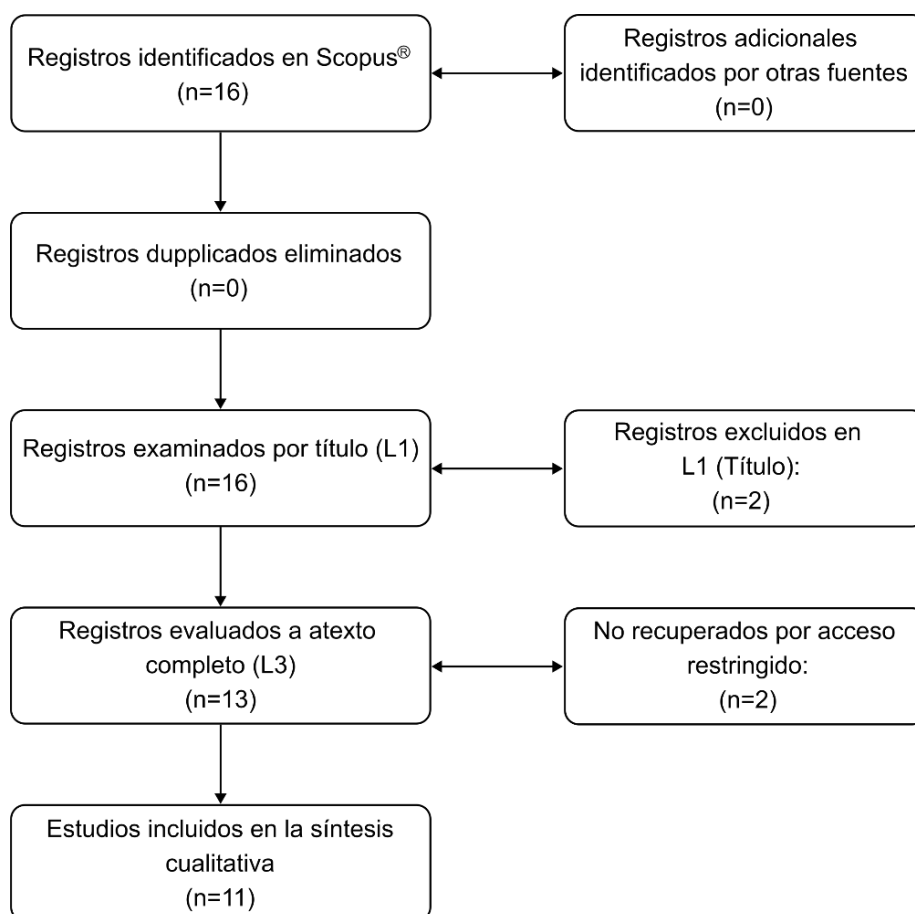
A partir de esta base de datos se generaron indicadores de desempeño científico y de estructura intelectual del área, orientados a describir la evolución temporal de la producción científica entre 2015 y 2025, así como a identificar redes de coautoría y colaboración internacional entre países e instituciones. Adicionalmente, se analizaron las relaciones de coocurrencia de palabras clave y los patrones de citación con el fin de reconocer autores, revistas y líneas de investigación con mayor influencia en el campo de estudio. La visualización de las redes de colaboración internacional y coautoría entre países se realizó mediante el software VOSviewer (versión 1.6.20), desarrollado por van Eck y Waltman (2010), el cual permite representar gráficamente la

intensidad y estructura de los vínculos científicos entre nodos. Por su parte, el análisis de palabras clave se llevó a cabo a partir de las palabras clave de autor extraídas de Scopus®, y su representación gráfica se realizó mediante Bibliometrix/Biblioshiny, generando análisis descriptivos de frecuencia y agrupamiento temático.

En conjunto, estos procedimientos se aplicaron bajo un enfoque descriptivo y exploratorio, con el objetivo de identificar patrones, tendencias y dinámicas de investigación relacionadas con la contaminación por plásticos derivados del uso de sistemas de microirrigación agrícola

## Resultados

En la búsqueda se recuperaron dieciséis artículos, durante análisis sistemático un artículo no continuó al siguiente paso por el título, debido a los criterios de inclusión; en la etapa L2 por el criterio del contenido del resumen, se excluyó un registro; cuando se leyeron en pares a totalidad se retiraron tres, al no encontrar los artículos completos, proceso mostrado en la Figura 1. Posteriormente se dispusieron los resultados en orden cronológico de 2015 a 2025 para identificar patrones geográficos y también a lo largo del tiempo.



**Figura 1.** Diagrama de flujo, resultado del proceso de selección de estudios (criterios PRISMA).

En el análisis bibliométrico se investigó el avance, la estructura y la dinámica de la producción científica vinculada al tema durante el periodo 2015–2025. Los resultados obtenidos con la base de datos procesada en Biblioshiny muestran un incremento progresivo en la producción científica a partir de 2015, con una concentración de publicaciones en un número reducido de países e instituciones, así como patrones de colaboración internacional incipientes. El procesamiento de la base de datos mediante Biblioshiny permitió identificar los principales autores, revistas y núcleos temáticos predominantes, evidenciando un interés creciente de la comunidad científica por los impactos ambientales asociados a los sistemas de microirrigación.

La Tabla 2 sintetiza los datos generales de la información que se analizó, el periodo (2015-2025), la procedencia de los documentos (8 fuentes), con 10 artículos científicos y una ponencia de congreso. Se tuvo en promedio 1.3 artículos por año, con un promedio de citas de 41.36 por documento y una colaboración internacional entre autores de 18.18%.

**Tabla 2.** Información principal.

| Descripción                            | Resultados |
|----------------------------------------|------------|
| INFORMACIÓN PRINCIPAL SOBRE LOS DATOS  |            |
| Periodo de análisis                    | 2015-2025  |
| Fuentes (revistas, libros)             | 8          |
| Documentos                             | 11         |
| Tasa de crecimiento anual (%)          | 21.9       |
| Edad promedio de los documentos        | 2.09       |
| Promedio de citas por documento        | 41.36      |
| Referencias totales                    | 102        |
| CONTENIDO DE LOS DOCUMENTOS            |            |
| Palabras clave Plus (ID)*              | 348        |
| Palabras clave de autor (DE)**         | 52         |
| AUTORES                                |            |
| Número total de autores                | 74         |
| Autores con publicaciones individuales | 0          |
| COLABORACIÓN ENTRE AUTORES             |            |
| Documentos de autor único              | 0          |
| Coautores por documento                | 7          |
| Colaboración internacional (%)         | 18.18      |
| TIPOS DE DOCUMENTOS                    |            |
| Artículos                              | 10         |
| Ponencias en congresos                 | 1          |
| INFORMACIÓN PRINCIPAL SOBRE LOS DATOS  |            |
| Periodo de análisis                    | 2015-2025  |
| Fuentes (revistas, libros)             | 8          |
| Documentos                             | 11         |

| Descripción                     | Resultados |
|---------------------------------|------------|
| Tasa de crecimiento anual (%)   | 21.9       |
| Edad promedio de los documentos | 2.09       |
| Promedio de citas por documento | 41.36      |
| Referencias totales             | 102        |

\*ID (Palabras clave plus) corresponde a las palabras clave generadas automáticamente por la base de datos a partir de los títulos de las referencias citadas, mientras que \*\*DE (Palabras clave de autor) hace referencia a las palabras clave proporcionadas por los autores de los documentos analizados. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Scopus® mediante Bibliometrix (2025).

**Producción científica y colaboración internacional por país**

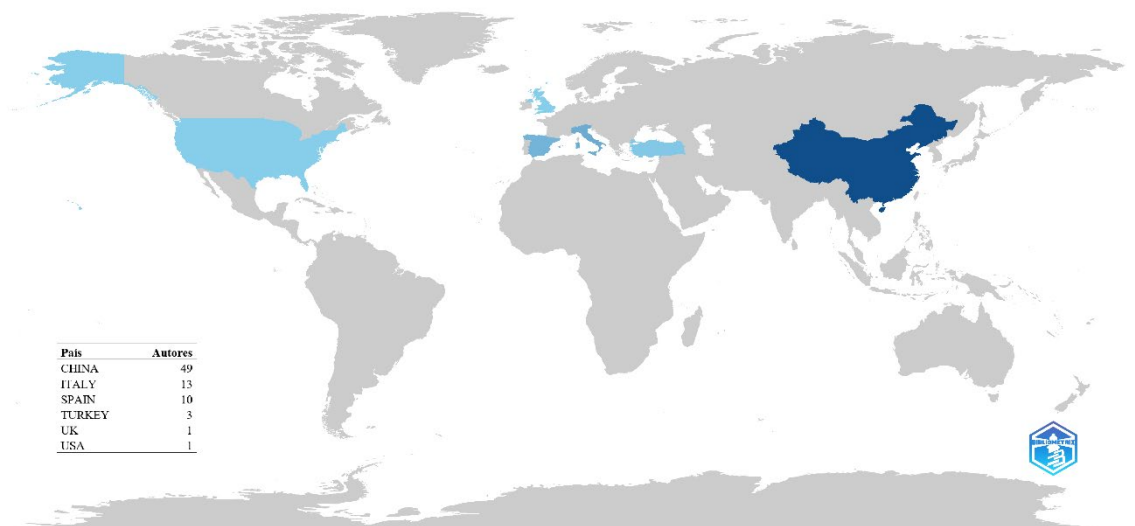
En la Tabla 3 se presenta la producción científica por país según la afiliación de los autores. Los resultados muestran que China concentra el mayor número de afiliaciones, seguida por Italia y España. Este indicador refleja la frecuencia con la que cada país aparece en las afiliaciones de los autores, por lo que un mismo documento puede contabilizarse más de una vez cuando incluye coautores de distintas nacionalidades.

**Tabla 3.** Producción científica por país según afiliación de autores.

| País   | Autores |
|--------|---------|
| CHINA  | 49      |
| ITALY  | 13      |
| SPAIN  | 10      |
| TURKEY | 3       |
| UK     | 1       |
| USA    | 1       |

Elaboración propia a partir de datos de Scopus® mediante Bibliometrix (2025).

La distribución geográfica de la producción científica por nación se muestra en la Figura 2. Se observa una notable concentración en Europa y Asia, siendo China la nación con el mayor número de publicaciones, seguida por España e Italia, tal como se indicó en la Tabla 3. Esta tendencia refleja o demuestra que la investigación se encuentra concentrada en regiones con infraestructura académica sólida, y también el hecho de que Asia está emergiendo como un centro importante para la producción de conocimiento científico en las distintas áreas.



**Figura 2.** Distribución geográfica de la producción científica por país. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Scopus®, mediante Bibliometrix (2025).

Por otro lado, la Figura 3 ilustra la red de cooperación internacional entre naciones, creada mediante VOSviewer, que permite observar los vínculos de coautoría y el grado de interacción. En esta red, China es el nodo principal, conectándose directamente con Estados Unidos y, en menor medida, con Reino Unido, Turquía y España.



**Figura 3.** Red de colaboración internacional entre países. Elaboración propia a partir de datos de Scopus®, mediante VOSviewer (2025).

La Tabla 3, junto con las Figuras 2 y 3, permite analizar la producción científica y los patrones de colaboración internacional en el tema. Los resultados muestran que China concentra el mayor número de afiliaciones, posicionándose como el principal eje articulador de la cooperación científica, con vínculos directos principalmente con Estados Unidos y, en menor medida, con países europeos.

La distribución geográfica evidencia una concentración de la producción científica en Asia y Europa; sin embargo, mientras China presenta una red de colaboración más estructurada, los países europeos exhiben

conexiones más dispersas, lo que sugiere una menor intensidad de cooperación entre ellos. En este contexto, el hecho de que Italia no forme parte del clúster principal indica que, aunque su producción científica es relevante en términos de volumen, esta se desarrolla con mayor independencia o con una participación más limitada en redes internacionales de colaboración.

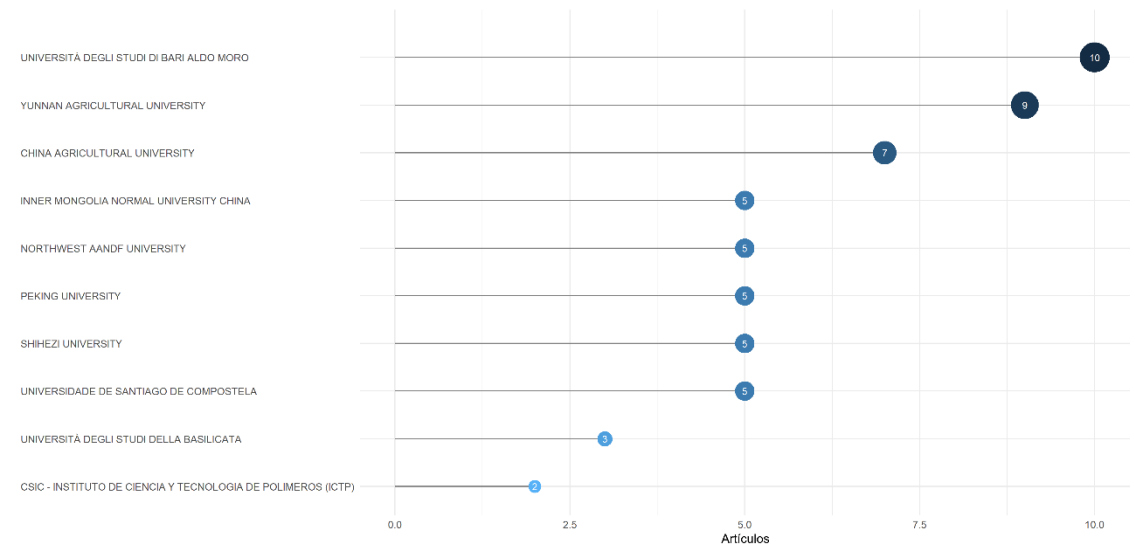
En conjunto, estos hallazgos evidencian un proceso de internacionalización científica liderado por Asia, en el que la colaboración se articula principalmente a través de nodos centrales, más que mediante redes regionales densamente interconectadas.

### ***Instituciones y autores más productivos***

En la Figura 4 se identifican las instituciones con mayor número de publicaciones en el periodo analizado. Cabe precisar que los valores mostrados corresponden al número de documentos en los que aparece al menos un autor afiliado a cada institución, por lo que un mismo documento puede contabilizarse en más de una institución cuando existe coautoría interinstitucional. Las instituciones más productivas son la Università degli Studi di Bari Aldo Moro (Italia), con 10 artículos, y la Yunnan Agricultural University (China), con 9 publicaciones, seguidas por la China Agricultural University (7), la Inner Mongolia Normal University (5), la Northwest A&F University (5), la Peking University (5), la Shihezi University (5) y la Universidad de Santiago de Compostela (5). La distribución institucional confirma la concentración de la producción científica en China, en concordancia con los resultados obtenidos en el análisis por país. Asimismo, se observa una participación relevante de instituciones europeas, particularmente de Italia y España, lo que evidencia la contribución de Europa en el área, aunque con un volumen de publicaciones menor en comparación con el liderazgo asiático, especialmente chino, en investigación agrícola, ambiental y tecnológica.

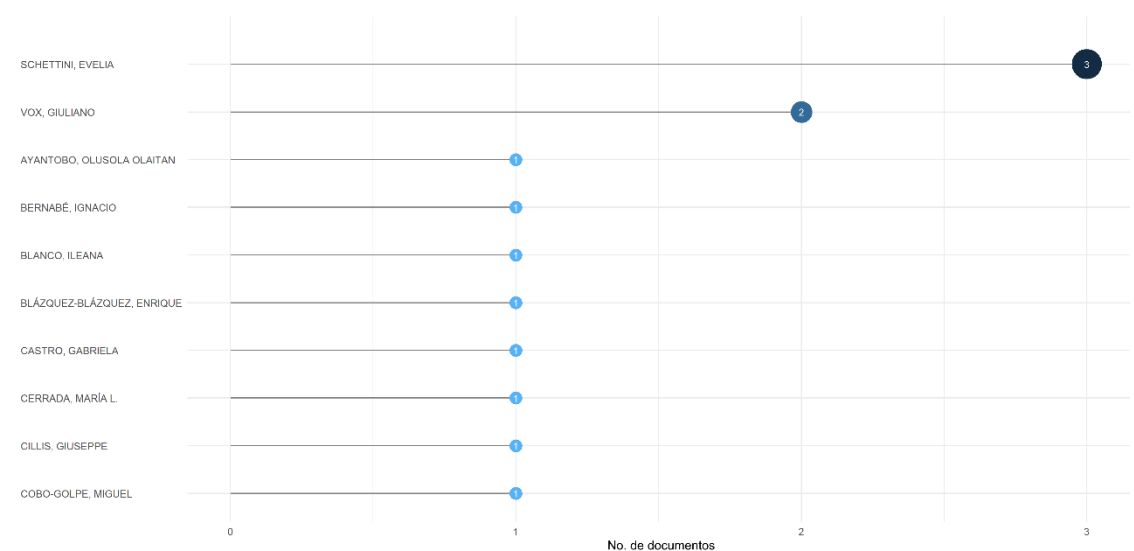
De los datos analizados durante la revisión se encontraron los autores más productivos, los cuales están representados en la Figura 5. Donde destacan Evelia Schettini, con tres publicaciones, y Giuliano Vox con dos, ambos de la Università degli Studi di Bari Aldo Moro (Italia). Después de ellos, el resto de autores, encontrados en el análisis, tienen una única publicación individual, entre estos se encuentran Ignacio Bernabé, Ileana Blanco, Enrique Blázquez-Blázquez, Gabriela Castro, María L. Cerrada, Giuseppe Cillis y Miguel Cobo-Golpe. La concentración de publicaciones en un reducido número de autores italianos y la dispersión de los demás indican que la producción científica en el área aún no presenta redes consolidadas de colaboración autoral, sino contribuciones puntuales desde distintos contextos institucionales. En resumen, los hallazgos indican que la Università degli Studi di Bari Aldo Moro es un referente institucional, incluyendo a los investigadores más activos y a la mayor producción de este ámbito. Esto indica que en Europa

hay un núcleo académico consolidado, que se ha visto enriquecido por la expansión sostenida de las universidades chinas en años recientes.



**Figura 4.** Instituciones con mayor número de publicaciones. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Scopus®, mediante Bibliometrix (2025).

A partir del análisis bibliométrico se identificaron los autores más productivos, los cuales se presentan en la Figura 5. Destacan Evelia Schettini, con tres publicaciones, y Giuliano Vox, con dos, ambos afiliados a la Università degli Studi di Bari Aldo Moro (Italia). El resto de los autores identificados en el corpus cuenta con una sola publicación dentro del periodo analizado, generalmente como coautores en distintos trabajos. Esta distribución refleja una alta concentración de la producción científica en un número reducido de investigadores, así como la ausencia de redes consolidadas de colaboración autorial en el área, predominando contribuciones puntuales desde diversos contextos institucionales. Cabe señalar que, si bien China fue identificada previamente como el país con mayor impacto en términos de afiliaciones y redes de colaboración, este liderazgo se manifiesta principalmente a través de una participación colectiva de múltiples autores, más que en la presencia de investigadores individuales altamente productivos. En conjunto, los resultados indican que la Università degli Studi di Bari Aldo Moro constituye un referente institucional relevante, al concentrar a los investigadores más activos del tema, mientras que la expansión reciente de universidades chinas ha contribuido a diversificar la producción científica en años recientes.



**Figura 5.** Autores con mayor número de publicaciones. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Scopus®, mediante Bibliometrix (2025).

**Análisis de palabras clave**

La nube de palabras conocida como “Word Cloud” que se muestra en la Figura 6 se creó con las palabras clave de autor que se obtuvieron de los documentos analizados. La frecuencia de aparición de cada término se refleja en su tamaño, lo que indica su importancia temática dentro del conjunto total de publicaciones. Las palabras con mayor frecuencia y tamaño en la nube corresponden a soil pollution, plastic waste, microplastics, irrigation (agriculture), drip irrigation, agricultural soil y polyethylene, lo que evidencia un núcleo temático centrado en la contaminación del suelo agrícola asociada al uso de plásticos y microplásticos en sistemas de riego. De manera complementaria, la presencia de términos como waste management, biodegradation, environmental monitoring y polypropylene indica una línea de investigación orientada a la gestión, mitigación y monitoreo ambiental de los residuos plásticos en agroecosistemas productivos. En conjunto, la nube de palabras muestra que la literatura científica reciente se concentra en la interacción entre la contaminación plástica, entendida como la contaminación ambiental derivada de la presencia y degradación de residuos plásticos provenientes de insumos e infraestructura agrícola y los sistemas de riego agrícola, con una tendencia creciente hacia el desarrollo de soluciones tecnológicas y prácticas sustentables. Cabe señalar que las palabras clave analizadas corresponden a términos en idioma inglés, dado que la estrategia de búsqueda bibliográfica se realizó en la base de datos Scopus mediante cadenas TITLE-ABS-KEY, conforme se describe en la sección de Materiales y métodos.



**Figura 6.** Nube de palabras generada a partir de las palabras clave de autor. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Scopus®, mediante Bibliometrix (2025).

La Tabla 4 aborda el contexto temático de este resultado con más profundidad, en la que se muestra el producto o resultado de un examen más detallado del contenido, las perspectivas y las contribuciones de cada artículo examinado.

**Tabla 4.** Enfoques y hallazgos de las principales investigaciones recuperadas del análisis bibliométrico realizado referente al tema.

| Año  | Autores / País                                                   | Objetivo o enfoque del estudio                                                                                       | Principales hallazgos                                                                                                                                                                                                                          | Implicaciones ambientales o de manejo                                                                                                                                                    |
|------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2018 | Blanco, I.; Loisi, R.V.; Sica, C.; Schettini, E. Vox G. (Italia) | Crear un sistema SIG para calcular los residuos plásticos agrícolas en función de la superficie y el tipo de cultivo | Cuantifica los volúmenes de residuos de plásticos agrícolas para cada cultivo y zona.<br><br>Identifica áreas problemáticas con acumulación de manguera y acolchado.<br><br>Evidencia la viabilidad de una metodología geoespacial replicable. | Facilitar la organización a nivel regional de centros destinados al reciclaje y acopio.<br><br>Proponer un fundamento para las políticas de manejo de desechos agrícolas y trazabilidad. |

| Año  | Autores / País                                                                              |                                | Objetivo o enfoque del estudio                                                                         | Principales hallazgos                                                                                                                                                                                                                         | Implicaciones ambientales o de manejo                                                                                            |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2022 | Cillis, G.; Statuto, D.; Schettini, E.; Vox, G.; Picuno, P. (Italia)                        | G.; D.; E.;                    | Utilizar (SIG) para crear un atlas digital del empleo de plásticos agrícolas.                          | Establece el coeficiente de plástico agrícola. Mapea la distribución por provincia y cultivo. Identifica los flujos de desechos plásticos.                                                                                                    | Proporcionar un instrumento práctico para medir la logística de recolección y fomentar estrategias de economía circular.         |
| 2022 | Gündoğdu, R.; Önder, D.; Gündoğdu, S.; Gwinnett, C. (Turquía)                               | R.; D.; S.; C.                 | Calcular el residuo plástico proveniente de películas y sistemas de riego en terrenos agrícolas.       | Identificar una alta concentración de micro-, meso- y macroplásticos (hasta $1.2 \times 10^4$ partículas $\text{kg}^{-1}$ ). Determina que la fuente principal de contaminación es la fragmentación de cintas de riego y acolchados plásticos | Promover la instauración de protocolos de gestión posterior y prevenir la quema a cielo abierto de residuos plásticos agrícolas. |
| 2022 | Jia, W.; Karapetrova, A.; Zhang, M.; Xu, L.; Li, K.; Huang, M.; Wang, J.; Huang, Y. (China) | W.; A.; M.; L.; K.; M.; J.; Y. | Desarrollar un método automatizado para la detección y cuantificación de microplásticos.               | Demuestra que los métodos visuales infravaloran concentraciones hasta en un 60 %. Verifica que la exactitud y la comparabilidad aumentan con los sistemas automatizados.                                                                      | Contribuir a la estandarización del monitoreo de microplásticos en zonas de fertirriego.                                         |
| 2022 | Junhao, C.; Pengpeng, C.; Xiaodong, G.; Qifang, Z.; Yunjie, F.; Xiaobo, G.; Xining, Z.      | C.; C.; G.; Z.; F.; G.; Z.     | Examinar el impacto que tienen el caudal de los emisores y los residuos plásticos sobre la circulación | La migración de agua y sales se ve alterada por los residuos plásticos. La movilidad de microplásticos se                                                                                                                                     | Proponer mejoras en el diseño hidráulico del fertirriego para reducir el traslado de contaminantes.                              |

Contaminación ambiental por residuos plásticos derivados del uso de sistemas de riego agrícola: una revisión bibliométrica de tendencias científicas globales (2015–2025)

| Año  | Autores / País                                                                                             | Objetivo o enfoque del estudio                                                                                       | Principales hallazgos                                                                                                                                           | Implicaciones ambientales o de manejo                                                                                                      |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|      | Yuannong, L. (China)                                                                                       | de agua y sales bajo riego por goteo.                                                                                | aumenta con caudales más altos, mientras que la salinización disminuye.                                                                                         |                                                                                                                                            |
| 2023 | Sun, H., Shi, Y., Zhao, P., Long, G., Li, C., Wang, J., Qiu, D., Lu, C., Ding, Y., Liu, L., He, S. (China) | Analizar cómo los microplásticos biodegradables y los de polietileno afectan la movilidad del arsénico y el fósforo. | Los microplásticos alteran la biodisponibilidad de metales y nutrientes.<br>Los materiales biodegradables no disminuyen el riesgo ambiental en todos los casos. | Requerir la evaluación de materiales alternativos con base en su comportamiento químico y ambiental.                                       |
| 2023 | Wen, Y., Liu, J., Zhang, J., Li, W., Ayantobo, O. O., Wang, Z. (China)                                     | Examinar el impacto de los residuos macroplásticos en las condiciones hidrotérmicas del terreno.                     | Aumentarla temperatura del suelo y disminuye la humedad.<br>Se impacta negativamente el desarrollo y crecimiento de las plantas.                                | Recomendar el retiro posterior a la cosecha y la mejora de los sistemas de recolección mecanizada.                                         |
| 2025 | Castro, G.; Fernández-Fernández, V.; Cobo-Golpe, M. (España)                                               | Detectar la huella química de pesticidas adsorbidos en polietileno agrícola.                                         | Los plásticos retienen compuestos organoclorados y organofosforados.<br>La contaminación persiste incluso después del lavado                                    | Prevenir la contaminación secundaria mediante la limpieza de residuos antes del reciclaje.                                                 |
| 2025 | Yu, H., Zhang, W., Li, J., Yang, J., Yang, X., Hai, C., Wang, Y., Yang, Y. (China)                         | Medir la distribución vertical y las vías de transporte de microplásticos en suelos agrícolas con riego por goteo.   | Los suelos bajo riego contienen hasta tres veces más microplásticos que los no irrigados.<br>Los microplásticos penetraron hasta                                | Monitorear sistemáticamente los microplásticos en suelos agrícolas bajo riego por goteo para prevenir su acumulación y migración profunda. |

| Año  | Autores / País                                                                               | Objetivo o enfoque del estudio                                                                                                                      | Principales hallazgos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Implicaciones ambientales o de manejo                                                                                                                                                    |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|      |                                                                                              |                                                                                                                                                     | 100 cm de profundidad.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                          |
| 2025 | Zhou, Y., Du, Y., Sheng, J., Liu, Y., Wan, C., Dong, H., Gu, J., Long, H., Zhang, H. (China) | Examinar la capacidad medioambiental del suelo y el riesgo ecológico asociado a la presencia de microplásticos en la cuenca agrícola del río Tarim. | Se registro una alta abundancia de microplásticos ( $8.9 \times 10^3$ partículas $\text{kg}^{-1}$ ).<br><br>El análisis basado en la capacidad ambiental del suelo (SECC) indico una capacidad de carga ambiental elevada, cercana a los umbrales de riesgo ecológico.<br><br>Capacidad de carga ambiental elevada.                                                                               | Proponer umbrales de riesgo y planes de mitigación regional basados en la capacidad ambiental del suelo para la gestión de micro plásticos.                                              |
| 2025 | Dell'Acqua, A. C., Convertino, F., Schettini, E. (Italia-España-Brasil)                      | Analizar de forma global la contaminación de suelos agrícolas con plásticos y sus consecuencias ambientales.                                        | El estudio resume los principales mecanismos de degradación de los plásticos en suelos agrícolas, incluyendo fotooxidación y abrasión. Identifica como fuentes predominantes de contaminación plástica el uso de acolchados (mulching), cintas y tuberías de riego. Asimismo, evidencia alteraciones en la estructura del suelo y en el microbiota edáfico asociadas a la presencia de plásticos. | Recomendar la incorporación de plásticos agrícolas en políticas de protección de suelos y fortalecer estrategias de circularidad para reducir su acumulación y sus impactos ambientales. |

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Scopus®.

## Discusión

Los resultados del análisis de los once artículos incluidos en la revisión, sintetizados en la Tabla 4, permiten visualizar el avance del conocimiento científico sobre la contaminación por plásticos agrícolas desde una perspectiva temática, metodológica y geográfica en el periodo 2015–2025. Este avance se evidencia a través de la evolución de los enfoques de investigación, el incremento en la complejidad metodológica y la diversificación de las variables ambientales analizadas a lo largo del tiempo. Los primeros estudios, desarrollados mayoritariamente en Europa, se centraron en la cartografía y cuantificación de residuos plásticos agrícolas mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), aportando herramientas fundamentales para la planificación territorial, la gestión de residuos y el impulso de estrategias de economía circular (Blanco *et al.*, 2018; Cillis *et al.*, 2022). Estos trabajos establecieron una base metodológica sólida para el análisis de la distribución espacial de los residuos y la identificación de zonas con mayor acumulación asociada a determinados cultivos y prácticas agrícolas. A partir de 2022, se observa un incremento significativo de la producción científica en Asia, particularmente en China y Turquía, acompañado de un cambio hacia enfoques experimentales y métodos automatizados orientados a la detección y cuantificación de microplásticos en suelos agrícolas. Estos estudios permiten analizar con mayor precisión la interacción entre los residuos plásticos y los sistemas de riego por goteo, evidenciando que los métodos visuales tradicionales tienden a subestimar las concentraciones reales, mientras que los procedimientos automatizados incrementan la exactitud de las estimaciones (Junhao *et al.*, 2022; Jia *et al.*, 2022). Asimismo, se identifica el desgaste de cintas de riego como una fuente constante y relevante de contaminación plástica en los sistemas agrícolas (Gündoğdu *et al.*, 2022). Entre 2023 y 2025, la investigación se orienta predominantemente hacia un enfoque integral del riesgo ambiental, incorporando el análisis de la movilidad de contaminantes físicos y químicos, la transferencia de metales y nutrientes, y los cambios en las propiedades del suelo asociados a la presencia de microplásticos (Zhou *et al.*, 2025; Sun *et al.*, 2023). Estos estudios destacan el impacto de los microplásticos sobre la biodisponibilidad de elementos como fósforo y arsénico, así como la necesidad de establecer umbrales de riesgo ambiental y herramientas de evaluación de la capacidad de carga del suelo para apoyar la toma de decisiones en la gestión agrícola. Finalmente, investigaciones recientes evidencian la capacidad de los plásticos agrícolas, particularmente el polietileno, para adsorber agroquímicos, lo que refuerza la importancia de implementar prácticas adecuadas de limpieza y manejo previo al reciclaje con el fin de evitar procesos de contaminación secundaria (Castro *et al.*, 2025). En conjunto, los resultados muestran que la problemática de la contaminación por microplásticos y nano plásticos en sistemas de riego

agrícola constituye un campo de investigación emergente, cuyo crecimiento puede observarse tanto en el aumento del número de publicaciones como en la sofisticación de los enfoques metodológicos y analíticos. Esta tendencia sugiere que, en los próximos años, la investigación continuará ampliándose hacia evaluaciones más integrales del riesgo ambiental, la sostenibilidad de los sistemas agrícolas y la cooperación científica internacional.

## Conclusiones

La contaminación por plásticos en los suelos agrícolas se ha consolidado como un campo de investigación emergente y multidisciplinario, en el que convergen las ingenierías, así como las ciencias agronómicas y ambientales. En la última década, China ha encabezado la producción científica y la colaboración internacional en este ámbito, destacando la Yunnan Agricultural University y la Università degli Studi di Bari Aldo Moro como instituciones clave en el desarrollo del conocimiento asociado a esta problemática. Si bien la contaminación plástica en agroecosistemas puede tener múltiples orígenes, la evidencia analizada en esta revisión indica que los residuos plásticos derivados del uso y degradación de insumos e infraestructura agrícola, particularmente cintas y tuberías empleadas en sistemas de riego por goteo, constituyen una fuente relevante y persistente de acumulación de plásticos en los suelos agrícolas. Estos materiales, al fragmentarse, dan lugar a microplásticos que interactúan con las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, alterando su estructura, la dinámica hídrica y la movilidad de contaminantes, además de actuar como vectores para el transporte de agroquímicos y otros compuestos potencialmente tóxicos.

La evidencia científica muestra una evolución en los enfoques metodológicos utilizados para estudiar esta problemática, pasando de estrategias de cartografía y cuantificación espacial de residuos plásticos a métodos experimentales y automatizados orientados a la detección, cuantificación y evaluación del riesgo ambiental asociado a microplásticos en suelos agrícolas. Este avance ha permitido documentar con mayor precisión los mecanismos de acumulación, migración vertical y persistencia de los plásticos en sistemas agrícolas intensivos, sin que ello implique la existencia de una metodología única o estandarizada para evidenciar la contaminación del suelo, dada la complejidad inherente de los procesos físicos, químicos y biológicos involucrados. Asimismo, diversos estudios recientes advierten que la presencia de microplásticos en suelos agrícolas puede influir en la biodisponibilidad de nutrientes y contaminantes, lo que plantea riesgos potenciales para la funcionalidad del suelo y, de manera indirecta, para la seguridad de los sistemas productivos. Aunque el análisis detallado de los efectos sobre la cadena alimentaria constituye un campo de investigación

específico, la literatura revisada señala la necesidad de considerar estos riesgos dentro de una perspectiva preventiva y de manejo integral. En conjunto, los resultados de esta revisión bibliométrica indican que, si no se implementan estrategias adecuadas de gestión, recuperación y reciclaje de residuos plásticos agrícolas, los beneficios asociados a la eficiencia hídrica del riego tecnificado pueden verse contrarrestados por la acumulación de plásticos de larga persistencia en el ambiente. Por ello, se destaca la importancia de fortalecer la transferencia tecnológica, la cooperación científica internacional y la incorporación de principios de sostenibilidad y economía circular en las políticas públicas relacionadas con la gestión de plásticos agrícolas. Finalmente, este estudio pone de manifiesto que el principal desafío para avanzar hacia una agricultura verdaderamente sostenible radica en la transición hacia sistemas de manejo que integren la reducción de residuos, el uso de materiales alternativos y la implementación de prácticas de gestión ambientalmente responsables, garantizando su viabilidad técnica y económica para los productores, así como la protección a largo plazo del suelo, el ambiente y la salud pública.

## Referencias

- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Blanco, I., Loisi, R. V., Sica, C., Schettini, E., & Vox, G. (2018). Agricultural plastic waste mapping using GIS. A case study in Italy. *Resources, Conservation, and Recycling*, 137, 229–242. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.06.008>
- Bollaín, C., & Agulló, D. V. (2019). Presencia de microplásticos en aguas y su potencial impacto en la salud pública. *Revista Española de Salud Pública*, 93, 1-10. Obtenido de <https://ojs.sanidad.gob.es/index.php/resp/article/view/1130>.
- Castro, G., Fernández-Fernández, V., Cobo-Golpe, M., Ramil, M., Blázquez-Blázquez, E., Cerrada, M. L., Bernabé, I., Martínez Urreaga, J., de la Orden, M. U., & Rodríguez, I. (2025). The fingerprint of pesticides in agricultural used polyethylene. *Waste Management* (New York, N.Y.), 200(114767), 114767. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114767>
- Callon, M., Courtial, J. P., & Laville, F. (1991). Co-word analysis as a tool for describing the network of interactions between basic and technological research: The case of polymer chemistry. *Scientometrics*, 22(1), 155–205. <https://doi.org/10.1007/bf02019280>
- Chen, X., Thorp, K. R., van Oel, P. R., Xu, Z., Zhou, B., & Li, Y. (2020). Environmental impact assessment of water-saving irrigation systems across 60 irrigation construction projects in northern China. *Journal of Cleaner Production*, 245(118883), 118883. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118883>
- Cillis, G., Statuto, D., Schettini, E., Vox, G., & Picuno, P. (2022). Implementing a GIS-based digital atlas of agricultural plastics to reduce their environmental footprint: Part

- II, an inductive approach. *Applied Sciences* (Basel, Switzerland), 12(15), 7545. <https://doi.org/10.3390/app12157545>
- Dell'Acqua, A. C., Convertino, F., & Schettini, E. (2025). Agricultural soil pollution by plastics: An overview of the main aspects. En L. Sartori, P. Tarolli, L. Guerrini, G. Zuecco, & A. Pezzuolo (Eds.), *Biosystems engineering: Promoting resilience to climate change – AIIA 2024 mid-term conference* (pp. 1008–1015). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-84212-2>
- Garfield, E. (1972). Citation analysis as a tool in journal evaluation. *Science* (New York, N.Y.), 178(4060), 471–479. <https://doi.org/10.1126/science.178.4060.471>
- Gündoğdu, R., Önder, D., Gündoğdu, S., & Gwinnett, C. (2022). Plastics derived from disposable greenhouse plastic films and irrigation pipes in agricultural soils: a case study from Turkey. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29(58), 87706–87716. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21911-6>
- Jia, W., Karapetrova, A., Zhang, M., Xu, L., Li, K., Huang, M., Wang, J., & Huang, Y. (2022). Automated identification and quantification of invisible microplastics in agricultural soils. *The Science of the Total Environment*, 844(156853), 156853. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156853>
- Junhao, C., Pengpeng, C., Xiaodong, G., Qifang, Z., Yunjie, F., Xiaobo, G., Xining, Z., & Yuannong, L. (2022). Effects of plastic film residue and emitter flow rate on soil water infiltration and redistribution under different initial moisture content and dry bulk density. *The Science of the Total Environment*, 807(Pt 2), 151381. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151381>
- Junhao, C., Xining, Z., Xiaodong, G., Li, Z., Qi, H., & Siddique, K. H. (2021). Extraction and identification methods of microplastics and nanoplastics in agricultural soil: A review. *Journal Of Environmental Management*, 294, 112997. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112997>
- Khalid, N., Aqeel, M., Noman, A., & Rizvi, Z. F. (2022). Impact of plastic mulching as a major source of microplastics in agroecosystems. *Journal Of Hazardous Materials*, 445, 130455. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130455>
- Koutsos, T. M., Menexes, G. C., & Dordas, C. A. (2019). An efficient framework for conducting systematic literature reviews in agricultural sciences. *The Science of the Total Environment*, 682, 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.354>
- Sartori, L., Tarolli, P., Guerrini, L., Zuecco, G., & Pezzuolo, A. (Eds.). (2025). *Biosystems engineering: Promoting resilience to climate change – AIIA 2024 mid-term conference. Lecture Notes in Civil Engineering*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-84212-2>
- Serna-Abascal, C., Pérez-López, A., Villaseñor-Perea, C. A., & Mancera-Rico, A. (2022). Plastics alternative materials used in agriculture: A systematic review and bibliometric analysis. *Journal of agricultural sciences*, 17(1), 122. <https://doi.org/10.4038/jas.v17i1.9615>
- Sun, H., Shi, Y., Zhao, P., Long, G., Li, C., Wang, J., Qiu, D., Lu, C., Ding, Y., Liu, L., & He, S. (2023). Effects of polyethylene and biodegradable microplastics on

- photosynthesis, antioxidant defense systems, and arsenic accumulation in maize (*Zea mays* L.) seedlings grown in arsenic-contaminated soils. *The Science of the Total Environment*, 868(161557), 161557. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161557>
- Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Velázquez-Chávez, L. de J., Ortiz-Sánchez, I. A., Chávez-Simental, J. A., Pámanes-Carrasco, G. A., Carrillo-Parra, A., & Pereda-Solís, M. E. (2022). Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola nacional e internacional. *Tip revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 25. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.482>
- Wen, Y., Liu, J., Zhang, J., Li, W., Ayantobo, O. O., & Wang, Z. (2023). Effects of macroplastics on soil hydrothermal environment, cotton yield, and fiber quality under mulched drip irrigation in the arid region of Northwest China. *Field Crops Research*, 302(109060), 109060. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109060>
- Yu, H., Zhang, W., Li, J., Yang, J., Yang, X., Hai, C., Wang, Y., & Yang, Y. (2025). Vertical distribution and multi-source pathways of microplastics in agricultural soils: A study of typical irrigation areas in the upper Yellow River basin. *Environmental Pollution* (Barking, Essex: 1987), 381(126479), 126479. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126479>
- Zhou, Y., Du, Y., Sheng, J., Liu, Y., Wan, C., Dong, H., Gu, J., Long, H., & Zhang, H. (2025). Assessment of microplastic ecological risk and environmental carrying capacity of agricultural soils based on integrated characterization: A case study. *The Science of the Total Environment*, 960(178375), 178375. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178375>





## El reciclaje en los estudiantes de secundaria y su contribución esencial al fortalecimiento de la sostenibilidad ambiental

Recycling among high school students and its essential contribution to strengthening environmental sustainability

**Oliviño Zegarra-Arteaga\***

Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú.

0000-0002-0246-3135 | [olizear@gmail.com](mailto:olizear@gmail.com)

\*Autor para correspondencia

**Cita APA:** Zegarra-Arteaga, O. (2025). El reciclaje en los estudiantes de secundaria y su contribución esencial al fortalecimiento de la sostenibilidad ambiental. *Revista Arbitrada de Ciencias Ambientales*, 1(1), 76-95. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18487966>

## Resumen

El reciclaje constituye una práctica esencial para reducir la contaminación y promover la sostenibilidad ambiental. Este estudio tuvo como objetivo analizar las percepciones y prácticas de reciclaje en estudiantes de secundaria, considerando su relación con la conservación del medio ambiente. Se aplicó un enfoque mixto (cualitativo y cuantitativo) y un diseño cuasi experimental, con una muestra de 40 estudiantes, distribuidos en un grupo control (20) y un grupo experimental (20). Se utilizaron encuestas estructuradas, observaciones y talleres participativos. Los resultados mostraron que el grupo experimental incrementó significativamente sus hábitos de separación de residuos (de 40% a 70%) tras la intervención educativa. Desde el componente cualitativo, se evidenció mayor interés por la reutilización creativa de materiales y la formación de brigadas ecológicas. Se concluye que la educación ambiental basada en el reciclaje fortalece la conciencia ecológica y promueve una cultura escolar orientada al cuidado del planeta.

**Palabras clave:** Conciencia ecológica, conservación, educación ambiental, sostenibilidad, reciclaje.

## **Abstract**

Recycling is an essential practice to reduce pollution and promote environmental sustainability. This study aimed to analyze the perceptions and recycling practices of high school students, considering their relationship with environmental conservation. A mixed approach (qualitative and quantitative) and a quasi-experimental design were applied, with a sample of 40 students, divided into a control group (20) and an experimental group (20). Structured surveys, observations, and participatory workshops were used as data collection techniques. The results showed that the experimental group significantly improved their waste separation habits (from 40% to 70%) after the educational intervention. From the qualitative component, greater interest was observed in the creative reuse of materials and the formation of ecological brigades. It is concluded that environmental education based on recycling strengthens ecological awareness and promotes a school culture oriented toward the care of the planet.

**Keywords:** Ecological awareness, conservation, environmental education, sustainability, recycling.

## Introducción

El mundo contemporáneo afronta de manera creciente la problemática del manejo de residuos sólidos, cuya magnitud supera ya los dos mil millones de toneladas al año, con una parte significativa sin tratamiento adecuado. Este escenario representa un reto ambiental, social y educativo de primer orden, pues afecta directamente la calidad de vida de las comunidades y la salud de los ecosistemas. En este contexto, la escuela emerge como un espacio clave para la formación de ciudadanos conscientes y activos en la mitigación de esta problemática. En concreto, la especialidad de Ciencia y Tecnología abre la puerta a una intervención que, más allá del conocimiento, promueva actitudes y acciones sostenibles en estudiantes de secundaria.

El incremento de los residuos sólidos constituye uno de los problemas ambientales más relevantes en la actualidad, debido a su impacto directo en la contaminación del suelo, el agua y el aire. Diversos organismos internacionales, como la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), reconocen que la gestión inadecuada de residuos representa una amenaza significativa para la sostenibilidad ambiental y destacan la importancia de la educación en la formación de ciudadanos responsables (UNESCO, 2022).

Salazar (2021) evidencia que, en la vereda Arrayanal, las familias gestionan sus residuos principalmente mediante la quema y el almacenamiento, mientras que la reutilización se da en menor medida. Estos resultados ponen de manifiesto la urgencia de implementar estrategias orientadas a promover la sostenibilidad ambiental en la comunidad.

López (2022) sostiene que el reciclaje en el Perú constituye una acción clave para mitigar el cambio climático; no obstante, en los hogares peruanos el porcentaje de residuos reciclados es reducido. Por ello, el desarrollo de políticas eficaces de fomento del reciclaje demanda comprender los factores que influyen en la decisión de reciclar.

Tito et al. (2021) señalan que, en relación con la gestión pública y el cumplimiento de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, resulta necesario fortalecer la gestión pública con el fin de elevar el nivel de cumplimiento de la normativa vigente. Esto se debe a que únicamente el 9.4% del área administrativa y el 15.6% del área operativa consideran que la gestión es óptima.

En este contexto, el reciclaje se consolida como una estrategia fundamental para reducir la cantidad de desechos, optimizar el uso de los recursos y mitigar la degradación ambiental. Investigaciones recientes señalan que el reciclaje escolar no solo contribuye al cuidado del medio ambiente, sino que también fortalece competencias ciudadanas y valores

éticos en los estudiantes (Alcívar *et al.*, 2024). Asimismo, estudios desarrollados en América Latina evidencian que la incorporación de proyectos de reciclaje en la educación secundaria promueve cambios significativos en los hábitos de consumo y en la conciencia ecológica de los adolescentes (Chérrez *et al.*, 2025).

En el ámbito educativo, la formación de actitudes ambientales positivas se reconoce como una prioridad, ya que los estudiantes en etapa de secundaria se encuentran en un momento de desarrollo crítico para la adquisición de valores y conductas sostenibles (Sánchez *et al.*, 2025). Sin embargo, aunque existe un conocimiento generalizado sobre la importancia del reciclaje, la práctica cotidiana suele ser limitada y requiere del impulso de programas escolares que integren actividades teóricas y prácticas de forma sistemática.

Desde la perspectiva de la educación ambiental, resulta crucial que los procesos formativos aborden no solo el aprendizaje de contenidos, sino la transformación de hábitos y de cultura ecológica. Alcívar *et al.* (2024), afirman que las actividades de reciclaje implementadas como alternativa de educación ambiental contribuyen a la formación de ciudadanos responsables y al fortalecimiento de las competencias ciudadanas y valores éticos en los estudiantes. Esta afirmación subraya la necesidad de que las intervenciones educativas sobre reciclaje no se limiten a la teoría, sino que incorporen experiencias prácticas, participativas y contextualizadas. En efecto, el reciclaje se convierte en una herramienta pedagógica que moviliza el conocimiento científico, la conciencia ciudadana y la acción comunitaria.

La adolescencia constituye una etapa particularmente propicia para la consolidación de hábitos proambientales. Los estudiantes de secundaria están en proceso de construcción de identidad, de desarrollo de autonomía y de fortalecimiento de valores, lo que los convierte en agentes de cambio potenciales. No obstante, existe una brecha reconocida entre la conciencia ambiental y la adopción de prácticas concretas. En el caso latinoamericano, investigaciones recientes muestran que, aunque los estudiantes reconocen la importancia de la separación de residuos y del reciclaje, dichos comportamientos rara vez se traducen en rutinas consolidadas. Por ejemplo, Villalaz *et al.* (2025) demostraron que en Panamá el programa de cultura de las 3 R (Reducir, Reutilizar, Reciclar) tiene impacto, pero debe acompañarse de estrategias pedagógicas integradas para generar frutos sostenibles.

En ese sentido, las metodologías activas emergen como vías eficaces para promover el aprendizaje significativo y la transformación de prácticas escolares hacia la sostenibilidad. El trabajo de Ching-Ruíz (2024), por ejemplo, describe cómo el marketing ecológico aplicado al ámbito educativo mediante campañas de sensibilización, eco-etiquetado y proyectos comunitarios ha

logrado modificar no solo la percepción sobre el reciclaje, sino también el comportamiento hacia hábitos más responsables de consumo y participación ambiental. Esta línea de acción evidencia que incorporar dinámismos comunicativos, motivacionales y de colaboración es clave en la formación de una cultura ecológica.

Asimismo, desde la perspectiva metodológica, es importante adoptar diseños de investigación que permitan evaluar de forma rigurosa los efectos de las intervenciones. En contextos escolares donde la asignación aleatoria de grupos no siempre es viable, el diseño cuasi-experimental y el enfoque mixto ofrecen una opción válida. Estos permiten comparar grupos y medir cambios antes y después de la intervención, integrando tanto datos cuantitativos como cualitativos para una comprensión más amplia del impacto educativo. Como se ha señalado, la triangulación de instrumentos favorece la construcción de hallazgos más sólidos en educación ambiental.

Finalmente, la relevancia de una intervención educativa sobre reciclaje trasciende el aula: contribuye a la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular al ODS 12 (Producción y consumo responsables). A través de la instauración de prácticas escolares permanentes de reducción, reutilización y reciclaje, la institución educativa se convierte en un agente transformador de la comunidad. Este estudio, desarrollado en la institución educativa de Tocache, busca analizar las percepciones y prácticas de reciclaje de estudiantes de secundaria, así como identificar estrategias pedagógicas replicables que fortalezcan una cultura ambiental activa, responsable y sostenible.

El propósito central de esta investigación es examinar el efecto de una intervención educativa sobre reciclaje en el desarrollo de conciencia y comportamiento ambiental en estudiantes de secundaria, contribuyendo a la comprensión de las estrategias pedagógicas que potencian prácticas ecológicas en contextos escolares.

## **Materiales y métodos**

La investigación se desarrolló durante un período total de tres meses (agosto a octubre de 2024) y se organizó en tres etapas claramente definidas:

- Etapa diagnóstica (2 semanas): Aplicación del pretest mediante encuestas estructuradas a los grupos experimental y control, con el fin de identificar el nivel inicial de conocimientos, actitudes y prácticas relacionadas con el reciclaje.
- Etapa de intervención educativa (8 semanas): Implementación de talleres de reciclaje creativo, campañas de sensibilización ambiental y conformación de brigadas ecológicas, dirigidas exclusivamente al grupo experimental.

- Etapa de evaluación final (2 semanas): Aplicación del postest a ambos grupos y registro de observaciones finales para evaluar los cambios producidos tras la intervención.

### **1. Enfoque y Diseño de Investigación**

El enfoque mixto permite integrar datos cuantitativos y cualitativos para obtener una comprensión más amplia del fenómeno estudiado. Según Hernández Sampieri et al. (2014), este enfoque resulta especialmente pertinente en investigaciones educativas, ya que posibilita analizar tanto los cambios medibles como las percepciones y actitudes de los participantes. Asimismo, el diseño cuasi experimental es adecuado cuando no es posible la asignación aleatoria de los grupos, como ocurre frecuentemente en contextos escolares. Este diseño permitió comparar los cambios en los hábitos de reciclaje antes y después de la intervención educativa.

### **2. Poblacion y muestra**

La población estuvo conformada por estudiantes de quinto grado de nivel secundario y la muestra fue seleccionada mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional o por conveniencia; considerando criterios de accesibilidad, autorización institucional y disposición de los estudiantes para participar en la investigación, lo cual es coherente con el diseño cuasi experimental del estudio.

Se seleccionó una muestra total de 40 estudiantes, con edades comprendidas entre 16 años, divididos en dos grupos:

- Grupo Experimental (20 estudiantes)
- Grupo Control (20 estudiantes)

### **3. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos**

#### **3.1. Métodos y Técnicas Cuantitativas**

- **Instrumento:** Se aplicó una encuesta estructurada con 15 ítems de opción múltiple. El instrumento fue validado por juicio de expertos y aplicado de manera presencial.
- **Dimensiones evaluadas:** Conocimientos básicos sobre reciclaje, actitudes hacia la conservación del medio ambiente y prácticas de separación de residuos.
- **Análisis de Datos Cuantitativos:** Los datos se organizaron en una base de datos en Excel y se procesaron mediante estadística descriptiva, calculando frecuencias absolutas, porcentajes y gráficos comparativos.

### 3.2. Métodos y Técnicas Cualitativas

- **Técnicas:** Se empleó la observación participante durante actividades escolares relacionadas con la gestión de residuos, registrando conductas, actitudes y prácticas de los estudiantes.
- **Intervención/Actividades:** Se implementaron talleres de reciclaje creativo, campañas de sensibilización y la conformación de brigadas ecológicas.
- **Registro Cualitativo:** Se recopiló información a través de notas de campo y productos elaborados por los estudiantes.
- **Análisis de Datos Cualitativos:** El análisis cualitativo se realizó mediante la técnica de análisis de contenido temático. De acuerdo con Bardin (2002), este método permite organizar, categorizar e interpretar de manera sistemática la información cualitativa, facilitando la identificación de patrones, significados y tendencias presentes en los discursos y comportamientos observados, siguiendo un proceso de codificación abierta y categorización. Las evidencias obtenidas a partir de las observaciones participantes, notas de campo y productos elaborados por los estudiantes fueron organizadas en categorías emergentes relacionadas con percepciones, actitudes y prácticas ambientales. Posteriormente, los resultados cualitativos fueron contrastados con los datos cuantitativos mediante triangulación metodológica.

### 4. Procedimiento

- **Pretest:** Aplicación de las encuestas en el aula a ambos grupos, bajo la supervisión del investigador.
- **Intervención:** Implementación de las dinámicas pedagógicas de sensibilización sobre el reciclaje en el grupo experimental.
- **Posttest:** Aplicación de la encuesta final y registro de la participación y conductas observadas.
- **Integración de Resultados:** Los resultados de las encuestas y observaciones se integraron mediante triangulación metodológica, lo que garantizó la validez y confiabilidad del estudio.

## Resultados

### 1. Resultados cuantitativos

Los datos obtenidos a través de la encuesta reflejaron una mejora significativa en las prácticas de reciclaje del grupo experimental tras la intervención educativa, ver tabla 1.

- **Conocimiento vs. Práctica:** Inicialmente, el 85% de los estudiantes afirmó conocer el concepto de reciclaje, pero solo el 40% practicaba la separación de residuos en su vida cotidiana.
- **Mejora de hábitos:** Después de los talleres y campañas de sensibilización, el porcentaje de estudiantes que mejoró sus hábitos de reciclaje en la escuela se incrementó al 70%.
- **Disposición a la participación:** La disposición a participar en brigadas ecológicas se elevó del 35% al 65%.

**Tabla 1.** Resultados de la encuesta aplicada a estudiantes de secundaria.

| Aspecto evaluado                           | Antes de la intervención | Después de la intervención |
|--------------------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Conocimiento del concepto de reciclaje (%) | 85                       | 95                         |
| Práctica de separación de residuos (%)     | 40                       | 70                         |
| Disposición a participar en brigadas (%)   | 35                       | 65                         |

Nota. La tabla muestra los conocimientos por los estudiantes en el tema ambiental

Como se observa en la Tabla 1, los resultados de la encuesta aplicada a los estudiantes de secundaria muestran que, aunque ya existía un amplio conocimiento acerca del reciclaje hubo una mejora significativa en las prácticas de reciclaje del grupo experimental tras la intervención educativa, especialmente en la separación de residuos y la disposición a participar en brigadas ecológicas.

## 2. Resultados cualitativos

Las observaciones directas y los talleres participativos complementaron la información cuantitativa, resaltando los siguientes aspectos:

- **Interés inicial y conducta:** Inicialmente, la mayoría de los estudiantes mostraba interés teórico en el reciclaje, pero sin aplicar hábitos concretos.
- **Reutilización creativa:** Durante las dinámicas, se observó entusiasmo en la reutilización creativa de materiales, incluyendo la elaboración de macetas a partir de botellas plásticas, bolsones de bolsas plásticas usadas y cuadernos con papel reciclado, figura 2, 3, 4.
- **Acción comunitaria:** Surgieron brigadas ecológicas estudiantiles que propusieron actividades de sensibilización dirigidas a la comunidad escolar.
- **Proceso formativo:** Los hallazgos cualitativos resaltaron que el reciclaje debe entenderse como un proceso formativo que fortalece la responsabilidad social, y no solo como una práctica técnica.



**Figura 1.** Estudiantes elaborando bolsones reciclados en talleres participativos.



**Figura 2.** Estudiantes desfilando con materiales reciclados en talleres participativos.



**Figura 3.** Estudiantes presentando productos maceteros con materiales reciclados en talleres participativos.

### **Análisis inferencial**

El análisis inferencial se realizó mediante una prueba t de student para muestras independientes, con el objetivo de comparar los puntajes postest entre el grupo experimental (que recibió la intervención educativa) y el grupo de control.

#### **A. Conocimiento del concepto de reciclaje**

Para evaluar el conocimiento teórico adquirido sobre reciclaje (postest) se utilizó un instrumento dicotómico, donde 0 indicaba “No demuestra conocimiento” y 1 “Demuestra conocimiento”. Por lo tanto, las medias reflejan la proporción de estudiantes que evidenciaron dicho conocimiento.

**Tabla 2.** Estadísticos de grupo para la variable "Conocimiento del concepto de reciclaje" (Postest)

|                      | GRUPO | N  | Media | Desv. Estándar | Error estándar de la media |
|----------------------|-------|----|-------|----------------|----------------------------|
| CONOCIMIENTO POSTEST | 2     | 20 | 0.95  | 0.224          | 0.050                      |
| EXPERIMENTAL         | 1     | 20 | 1.00  | 0.000          | 0.000                      |

Nota: La media de 0.95 indica que el 95% del grupo demuestra conocimiento, mientras que una media de 1.00 indica el 100%.

Aunque el grupo control obtuvo una media ligeramente superior (1.00 frente a 0.95), esta diferencia no resultó estadísticamente significativa ( $p > 0.05$ ). Este hallazgo no constituye una incongruencia metodológica, sino que se explica por la presencia de un *efecto techo*: ambos grupos alcanzaron niveles cercanos al máximo posible en el instrumento de medición (contaban con un nivel de conocimiento teórico muy alto sobre el reciclaje al finalizar el

estudio), lo que limitó la capacidad de detectar diferencias atribuibles a la intervención en el ámbito del conocimiento teórico.

En consecuencia, el impacto de la intervención (talleres y campañas) se manifestó de manera más clara en variables prácticas y actitudinales, donde si se observaron diferencias estadísticamente significativas en el grupo experimental. Esto sugiere que, si bien el conocimiento previo ya era elevado en ambos grupos, la intervención logró influir positivamente en aspectos conductuales y motivacionales relacionados con la práctica del reciclaje.

**Tabla 3.** Pruebas de homogeneidad de varianzas (Levene) y diferencia de medias (*t de student*) para la variable "Conocimiento del concepto de reciclaje" (Postest)

|                                   |                                | Prueba de Levene |       | Prueba t |       |       |                                 |       |          |          |
|-----------------------------------|--------------------------------|------------------|-------|----------|-------|-------|---------------------------------|-------|----------|----------|
|                                   |                                | F                | p     | t        | gl    | p     | M <sub>1</sub> - M <sub>2</sub> | EE    | IC 95%   |          |
|                                   |                                |                  |       |          |       |       |                                 |       | Inferior | Superior |
| CONOCIMIENTO POSTEST EXPERIMENTAL | Se asumen varianzas iguales    | 4.457            | 0.041 | -1.0     | 38.00 | 0.324 | -0.050                          | 0.050 | -0.151   | 0.051    |
|                                   | No se asumen varianzas iguales |                  |       | -1.0     | 19.00 | 0.330 | -0.050                          | 0.050 | -0.155   | 0.055    |

p: valor de significancia (bilateral para la prueba t); M<sub>1</sub> - M<sub>2</sub>: diferencia de medias; EE: error estándar de la diferencia; IC 95%: intervalo de confianza al 95 %.

Los resultados presentados en la Tabla 3 indican que no se observaron diferencias estadísticamente significativas en el conocimiento teórico sobre el reciclaje entre el grupo experimental y el grupo control ( $t(19) = -1.000$ ,  $p = 0.330$ ). Este hallazgo se explica por la presencia de un efecto techo: en el postest, el 100 % de los estudiantes del grupo control y el 95 % del grupo experimental ya demostraban comprensión del concepto. Dado que ambos grupos partían de niveles elevados de conocimiento, el margen para detectar mejoras adicionales atribuibles a la intervención educativa resultó limitado.

En consecuencia, el impacto de la intervención no se manifestó en la dimensión teórica, sino en las variables actitudinales y conductuales, donde sí se observaron diferencias altamente significativas a favor del grupo experimental. Esto sugiere que, si bien el conocimiento estaba ampliamente consolidado antes de la intervención, esta fue efectiva para promover cambios en la disposición y en la acción concreta respecto al reciclaje.

### B. Práctica de separación de residuos

En contraste con el conocimiento teórico adquirido, la variable conductual se evaluó para determinar si la intervención logró traducir el aprendizaje en acción. La codificación también fue dicotómica (0 = No separa residuos; 1 = Si separa residuos).

**Tabla 4.** Estadísticos de grupo para la variable "Práctica de separación de residuos" (Postest)

|                                          | GRUPO | N  | Media | Desv. Estándar | Error estándar de la media |
|------------------------------------------|-------|----|-------|----------------|----------------------------|
| PRÁCTICA SEPARACIÓN POSTEST EXPERIMENTAL | 2     | 20 | 0.15  | 0.366          | 0.082                      |
|                                          | 1     | 20 | 0.50  | 0.513          | 0.115                      |

Nota: La media de 0.15 indica que el 15% del grupo practica la separación de residuos, mientras que una media de 0.50 indica el 50%.

Como se observa en la Tabla 4, el grupo experimental presenta una media superior en la práctica de separación de residuos en comparación con el grupo control, lo que sugiere un efecto positivo de la intervención educativa.

- **Impacto conductual demostrado:** La intervención educativa logró un rendimiento significativamente superior en la práctica de separación de residuos en el grupo experimental en comparación con el grupo control.
- **Énfasis en la práctica:** Este resultado descriptivo respalda la conclusión del estudio de que la educación ambiental, cuando se articula con actividades prácticas y participativas, contribuye a transformar conocimientos en hábitos sostenibles.
- **Sustento al diseño cuasi experimental:** Los datos descriptivos de esta tabla, junto con la prueba *t* que resultó altamente significativa ( $p = 0.018$ ), validan que la intervención fue eficaz para modificar el comportamiento, que era el principal objetivo del diseño cuasi experimental.

**Tabla 5.** Pruebas de homogeneidad de varianzas (Levene) y diferencia de medias (*t* de student) para la variable "Práctica de separación de residuos" (Postest)

|                                          |                                | Prueba de Levene |       |        |       | Prueba t |                                 |       |          |          |
|------------------------------------------|--------------------------------|------------------|-------|--------|-------|----------|---------------------------------|-------|----------|----------|
|                                          |                                | F                | p     | t      | gl    | p        | M <sub>1</sub> - M <sub>2</sub> | EE    | IC 95%   |          |
|                                          |                                |                  |       |        |       |          |                                 |       | Inferior | Superior |
| PRÁCTICA SEPARACIÓN POSTEST EXPERIMENTAL | Se asumen varianzas iguales    | 18.255           | 0.000 | -2.483 | 38.00 | 0.018    | -0.35                           | 0.141 | -0.635   | -0.065   |
|                                          | No se asumen varianzas iguales |                  |       | -2.483 | 34.38 | 0.018    | -0.35                           | 0.141 | -0.636   | -0.064   |

*p*: valor de significancia (bilateral para la prueba *t*);  $M_1 - M_2$ : diferencia de medias; EE: error estándar de la diferencia; IC 95%: intervalo de confianza al 95 %.

Los resultados de la Tabla 5 indican la existencia de una diferencia estadísticamente significativa en la práctica de separación de residuos entre el grupo experimental y el grupo control ( $p < 0.05$ ), evidenciando la eficacia de la intervención aplicada.

El análisis estadístico con la prueba *t* confirma la eficacia de la intervención educativa en el componente conductual.

- **Impacto de la intervención:** Existe una diferencia estadísticamente significativa en la Práctica de Separación de Residuos entre el Grupo Experimental y el Grupo Control ( $t(34.380) = -2.483, p = 0.018$ ).
- **Validación del objetivo:** Este resultado valida el objetivo central del estudio: la intervención con talleres y actividades prácticas logró transformar el conocimiento en hábitos concretos, siendo el Grupo Experimental el que demostró una mejora notablemente mayor en la separación de residuos (del 40% al 70%) en comparación con el Grupo Control.
- **Aporte al campo:** Este hallazgo es fundamental, ya que demuestra que la educación ambiental, cuando se aplica de manera práctica, es una herramienta pedagógica efectiva para fomentar una cultura escolar orientada a la sostenibilidad.

**C. Disposición para participar en brigadas**

Finalmente, se evaluó una dimensión actitudinal clave: la disposición para el compromiso colectivo. Esta también fue codificada de manera dicotómica (0 = No dispuesto; 1 = Dispuesto)

**Tabla 6.** Estadísticos de grupo para la variable "Disposición a participar en brigadas" (Postest).

|                                              | GRUPO | N  | Media | Desv. Estándar | Error estándar de la media |
|----------------------------------------------|-------|----|-------|----------------|----------------------------|
| DISPOSICION DE BRIGADAS POSTEST EXPERIMENTAL | 2     | 20 | 0.00  | 0.000          | 0.000                      |
|                                              | 1     | 20 | 0.50  | 0.513          | 0.115                      |

Nota: La media de 0.00 indica que el 0% del grupo tiene una disposición favorable a la participación, mientras que una media de 0.50 indica el 50%.

Como se aprecia en la Tabla 6, el grupo experimental muestra una mayor disposición a participar en brigadas ecológicas en comparación con el grupo control, reflejando un fortalecimiento de la conciencia ambiental.

Este análisis descriptivo es altamente significativo para validar el objetivo del estudio:

- **Fortalecimiento de la conciencia ciudadana:** La intervención no solo afectó el hábito individual (práctica de separación), sino que generó una intención de acción colectiva. El aumento de la disposición a participar demuestra que la educación ambiental puede transformar la conciencia en una voluntad activa de compromiso social.
- **Coincidencia:** Este resultado se relaciona directamente con el componente cualitativo del estudio, donde se evidenció la formación de brigadas ecológicas. Esto coincide con Chérrez et al. (2025), quienes

- identificaron que la formación de brigadas estudiantiles constituye un motor de cambio comunitario.
- **Validación del diseño:** La diferencia de medias, junto con el resultado altamente significativo de la Prueba *t* (que arrojó  $p = 0.000$  en la prueba completa), valida que la intervención fue extremadamente eficaz para movilizar la conciencia ciudadana y fomentar una cultura escolar orientada al cuidado del planeta.

**Tabla 7.** Diferencia de medias (*t de student*) para la variable "Disposición a participar en brigadas" (Postest).

|                                              |                                | Prueba de Levene |       | Prueba t |       |       |                                 |          |               |
|----------------------------------------------|--------------------------------|------------------|-------|----------|-------|-------|---------------------------------|----------|---------------|
|                                              |                                | F                | p     | t        | gl    | p     | M <sub>1</sub> - M <sub>2</sub> | EE       | IC 95%        |
|                                              |                                |                  |       |          |       |       |                                 |          |               |
|                                              |                                |                  |       |          |       |       |                                 | Inferior | Superior      |
| DISPOSICION DE BRIGADAS POSTEST EXPERIMENTAL | Se asumen varianzas iguales    | 22.50            | 0.000 | -4.359   | 38.00 | 0.000 | -0.500                          | 0.115    | -0.732 -0.268 |
|                                              | No se asumen varianzas iguales |                  |       | -4.359   | 19.00 | 0.000 | -0.500                          | 0.115    | -0.740 -0.260 |

*p*: valor de significancia (bilateral para la prueba *t*);  $M_1 - M_2$ : diferencia de medias; EE: error estándar de la diferencia; IC 95%: intervalo de confianza al 95 %.

La diferencia altamente significativa ( $p < 0.001$ ) observada en la Tabla 7 confirma que la intervención logró incrementar sustancialmente la disposición a participar en brigadas ecológicas, demostrando su efectividad para movilizar la conciencia ciudadana hacia la acción comunitaria.

- **Impacto altamente significativo:** Se encontró una diferencia altamente significativa en la disposición a participar en brigadas ecológicas entre el grupo experimental y el grupo de control ( $t(19) = -4.359$ ,  $p = 0.000$ ).
- **Validación de la actitud:** Este resultado, junto con el análisis de la práctica, confirma que la estrategia educativa logró fortalecer la conciencia ecológica y generó la intención de acción colectiva.
- **Alineación con el objetivo:** La fuerte disposición del Grupo Experimental (50% de disposición vs. 0% del Control) se alinea con los hallazgos cualitativos que evidenciaron la formación de brigadas ecológicas estudiantiles, lo que constituye un motor de cambio comunitario según Chérrez et al. (2025).

### Discusión

Los resultados del presente estudio evidencian que una intervención educativa basada en actividades prácticas de reciclaje tiene un impacto significativo en la transformación de las prácticas y actitudes ambientales de los estudiantes de secundaria. Si bien el nivel de conocimiento teórico sobre

el reciclaje fue alto en ambos grupos desde el inicio del estudio, los cambios más relevantes se manifestaron en el plano conductual y actitudinal, lo que confirma que la educación ambiental resulta más efectiva cuando se orienta a la acción y no únicamente a la transmisión de contenidos.

En relación con el conocimiento del concepto de reciclaje, los hallazgos muestran que tanto el grupo experimental como el grupo control alcanzaron niveles elevados al finalizar la intervención. Este resultado sugiere que los estudiantes ya contaban con una base conceptual sólida, probablemente producto del currículo escolar y de la exposición previa a contenidos ambientales. En este sentido, la ausencia de diferencias relevantes entre los grupos no representa una limitación del estudio, sino que refuerza la idea de que el desafío actual de la educación ambiental no radica en informar, sino en lograr que el conocimiento se traduzca en comportamientos sostenibles. Esta interpretación coincide con lo señalado por Altassan (2023), quien sostiene que la sostenibilidad educativa requiere pasar del saber al hacer.

Por el contrario, en la práctica de separación de residuos, el grupo experimental evidenció una mejora sustancial tras la intervención educativa. Este hallazgo confirma que las estrategias pedagógicas basadas en talleres, campañas y experiencias participativas facilitan la adopción de hábitos sostenibles en los estudiantes. La separación de residuos dejó de ser un concepto abstracto para convertirse en una práctica cotidiana dentro del entorno escolar. Resultados similares han sido reportados por Alcívar et al. (2024) y Fidyariska y Lasmi (2025), quienes destacan que las actividades prácticas fortalecen la cultura ecológica y favorecen la internalización de comportamientos responsables.

Asimismo, la disposición a participar en brigadas ecológicas mostró un incremento notable en el grupo experimental, lo que evidencia que la intervención no solo impactó en el comportamiento individual, sino también en la conciencia colectiva y la responsabilidad social de los estudiantes. La formación de brigadas ecológicas refleja un nivel superior de compromiso ambiental, ya que implica organización, trabajo colaborativo y proyección comunitaria. Este resultado se encuentra en consonancia con Chérrez et al. (2025), quienes señalan que las brigadas estudiantiles constituyen un motor de cambio en la comunidad educativa y fortalecen el liderazgo ambiental juvenil.

La integración de los resultados cuantitativos y cualitativos permite afirmar que el reciclaje, abordado desde una perspectiva pedagógica activa, se consolida como una herramienta formativa integral. Las observaciones realizadas durante los talleres mostraron entusiasmo, creatividad y participación constante de los estudiantes, lo que refuerza la interpretación de que el aprendizaje experiencial favorece la apropiación de valores ambientales

y la transformación de actitudes. De este modo, los hallazgos confirman que la educación ambiental debe concebirse como un proceso formativo continuo que articule conocimiento, acción y compromiso social.

En conjunto, los resultados del estudio aportan evidencia empírica que respalda la eficacia de las intervenciones educativas orientadas al reciclaje en el fortalecimiento de la sostenibilidad ambiental en contextos escolares. Más allá de los indicadores estadísticos, el principal aporte radica en demostrar que los estudiantes pueden convertirse en agentes activos de cambio cuando se les brinda oportunidades para participar de manera significativa en acciones ambientales concretas.

En síntesis, el estudio confirma que el reciclaje, abordado como estrategia pedagógica activa, constituye una vía efectiva para fortalecer la sostenibilidad ambiental en estudiantes de secundaria. Retomando el problema planteado en la introducción, referido a la brecha existente entre el conocimiento ambiental y la adopción de prácticas sostenibles, los hallazgos evidencian que dicha brecha puede reducirse mediante intervenciones educativas orientadas a la acción, la participación y el compromiso colectivo. El principal aporte de esta investigación radica en demostrar que la educación ambiental trasciende la transmisión de contenidos y se consolida como un proceso formativo capaz de generar cambios reales en los hábitos y actitudes de los estudiantes, posicionando a la escuela como un agente clave en la construcción de una cultura ambiental responsable y alineada con los objetivos de desarrollo sostenible.

## **Limitaciones del Estudio**

La interpretación de los hallazgos debe considerar las siguientes limitaciones metodológicas:

1. **Muestra y Diseño:** El estudio empleó un diseño cuasi-experimental con una muestra no probabilística de 40 estudiantes, lo que limita la generalización estadística de los resultados. La ausencia de asignación aleatoria impide descartar completamente la influencia de variables extrañas (e.g., entorno familiar, motivación individual o experiencias previas).
2. **Instrumentos de Medición:** La recolección de datos cuantitativos se basó en autorreportes, que pueden estar sujetos a sesgos de deseabilidad social, donde los participantes podrían inclinarse a dar respuestas percibidas como socialmente aprobadas en lugar de reflejar su comportamiento real.
3. **Componente Cualitativo:** En las observaciones, la presencia del investigador pudo generar un efecto Hawthorne, alterando temporalmente la conducta de los estudiantes. Asimismo, aunque se empleó categorización y triangulación, el análisis de datos cualitativos conlleva un grado inherente de subjetividad interpretativa.

4. Temporalidad: La intervención tuvo una duración limitada (tres meses), por lo que no es posible evaluar la sostenibilidad a largo plazo de los cambios observados en las prácticas y actitudes ambientales. Futuras investigaciones podrían implementar diseños longitudinales para examinar la permanencia de estos hábitos.

## **Alcance y Generalización de los Hallazgos**

Los hallazgos poseen un alcance analítico y contextual, válidos para instituciones de educación secundaria con características similares a las del estudio: contextos públicos, población adolescente y programas de educación ambiental que utilicen estrategias pedagógicas participativas.

Si bien la naturaleza del diseño y el muestreo no sustentan una generalización estadística amplia, los resultados ofrecen evidencia transferible y un marco de referencia para el diseño e implementación de intervenciones análogas en contextos educativos comparables, particularmente en la región de San Martín, Perú. Este estudio contribuye, por tanto, a la base de conocimiento práctico para fortalecer la cultura de la sostenibilidad en el ámbito escolar local y regional.

## **Conclusiones**

Este estudio demostró que la educación ambiental basada en el reciclaje constituye una herramienta pedagógica eficaz para fortalecer la sostenibilidad ambiental en estudiantes de secundaria. La intervención educativa permitió que los estudiantes no solo consoliden conocimientos teóricos, sino que, principalmente, desarrollen prácticas concretas de separación de residuos y una mayor disposición a participar en acciones colectivas orientadas al cuidado del medio ambiente.

Asimismo, el estudio evidenció que las estrategias pedagógicas centradas en actividades prácticas, talleres participativos y la conformación de brigadas ecológicas favorecen la transformación de la conciencia ambiental en hábitos sostenibles y compromiso social. En este sentido, el reciclaje se consolidó como un recurso didáctico que articula el aprendizaje significativo con la responsabilidad ciudadana dentro del contexto escolar.

Finalmente, los hallazgos confirman que la escuela cumple un rol fundamental como agente de cambio en la promoción de una cultura ambiental responsable. Este estudio aporta evidencia empírica relevante para el diseño e implementación de programas de educación ambiental en instituciones de nivel secundario, al demostrar que las intervenciones educativas orientadas a la acción generan impactos positivos y replicables en la formación de ciudadanos comprometidos con la sostenibilidad.

## Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos, se recomienda que las instituciones educativas de nivel secundario incorporen programas permanentes de educación ambiental enfocados en el reciclaje, integrando talleres prácticos, campañas de sensibilización y la conformación de brigadas ecológicas estudiantiles. Asimismo, se sugiere que los docentes articulen estas actividades con áreas curriculares como Ciencia y Tecnología y Educación para la Ciudadanía, a fin de reforzar el aprendizaje significativo y la formación de hábitos sostenibles.

Se recomienda a las autoridades educativas promover alianzas con municipalidades y organizaciones ambientales locales para facilitar la gestión adecuada de residuos y garantizar la continuidad de las acciones de reciclaje en la comunidad escolar. De igual manera, futuras investigaciones deberían ampliar el tamaño de la muestra, considerar diseños longitudinales y evaluar el impacto del reciclaje en la reducción efectiva de residuos a mediano y largo plazo, con el propósito de fortalecer la evidencia empírica sobre la sostenibilidad de las intervenciones educativas.

## Agradecimientos

Los autores agradecemos a la institución educativa por brindarnos esas facilidades de poder aplicar el instrumento a los estudiantes de quinto de secundaria.

## Referencias

- Alcívar, E. D., Alcívar, I. M., García, J. L., Espinel, M. C., & Alcívar, T. L. (2024). Actividades de reciclaje como alternativa de educación ambiental con estudiantes de Educación Básica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(5), 13442-13460. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v8i5.14805](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.14805)
- Altassan, A. (2023). Integración sostenible de la energía solar, el cambio de comportamiento y las prácticas de reciclaje en instituciones educativas: Un marco holístico para la conservación ambiental y la educación de calidad. *Sostenibilidad*. <https://doi.org/10.3390/su152015157>.
- Altikolatsi, E., Karasmanaki, E., Parissi, A. y Tsantopoulos, G. (2021). Exploración de los factores que afectan el comportamiento de reciclaje del alumnado de primaria. *World*. <https://doi.org/10.3390/world2030021>
- Ballesteros, MI, López-Fernández, C., Paños, E., & Ruiz-Gallardo, JR (2025). Empoderar a las comunidades: la influencia transformadora de la Agenda Escolar 21. *The Journal of Environmental Education*, 56 (1), 1-20. <https://doi.org/10.1080/00958964.2024.2437486>
- Bardin, L. (2002). *Análisis de contenido*. Ediciones Akal. [https://www.akal.com/libro/analisis-de-contenido\\_32579/](https://www.akal.com/libro/analisis-de-contenido_32579/)
- Chérrez Toaza, D. A., Díaz Díaz, D. P., Benítez Sanchez, A. M., & Urbina Gálvez, O. M. (2025). Impacto de la Educación Ambiental en la Conciencia y el

- Comportamiento Ecológico en Estudiantes de Secundaria. *ASCE*, 4(2), 201–217. <https://doi.org/10.70577/ASCE/201.217/2025>
- Ching-Ruíz, Y. E. (2024). Marketing ecológico en la educación del reciclaje: Estrategias para fomentar la cultura de la sostenibilidad. *REA: Revista Científica Especializada En Educación Y Ambiente*, 3(2), 61–77. <https://doi.org/10.48204/rea.v3n2.6370>
- Falasifah, N., Ibrahim, A. y Dabitha, A. (2024). Inspirando a través de la creatividad: Decoración de barandillas de hierro en Phatna Witya con plástico usado como ejemplo de reciclaje para estudiantes. *Revista Internacional de Estudios Sociales Islámicos*. <https://doi.org/10.62039/ijiss.v2i2.48>
- Fidyariska, P., P., K. y Lasmi, N. (2025). Integración de valores de sostenibilidad mediante un taller sobre el uso de materiales ecológicos en SDN 6 Padangsembian Klod como solución para la gestión de residuos. *Penamas: Revista de Servicio Comunitario*. <https://doi.org/10.53088/penamas.v5i1.1610>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill. [https://uniclanet.unicla.edu.mx/assets/contenidos/254857\\_DOC\\_2023-03-01\\_18:46:18.pdf](https://uniclanet.unicla.edu.mx/assets/contenidos/254857_DOC_2023-03-01_18:46:18.pdf)
- López, K., Armas, P., & Sánchez, M. (2022). El Reciclaje en el Perú Urbano. *Hábitos y Percepciones*. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4043206>
- Mariñas, E., Manaois, R., Jose, A. y Mandin, M. (2022). Visión en acción: El impacto de las prácticas sostenibles de la escuela filipina de Doha en el avance de los estudiantes hacia el ambientalismo juvenil. *Revista Internacional de Publicaciones de Investigación*. <https://doi.org/10.47119/ijrp100951220222891>
- Salazar, N. (2021). *Propuesta de educación ambiental comunitaria para la gestión de residuos sólidos rurales en Rivera, Huila, Colombia* [Universidad Militar Nueva Granada]. <https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/cc59b198-d472-4672-a6ea-8483b0199a05/content>
- Sánchez, S., Zúñiga Hinestroza, M. C., & García-Noguera, L. (2025). Estrategias Pedagógicas para la Reducción, Reutilización y Reciclaje de los Residuos Sólidos Inorgánicos: Una Revisión de la Literatura desde la Educación Ambiental. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(6), 7155-7179. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v8i6.15413](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i6.15413)
- Šorytė, D., & Pakalniškienė, V. . (2021). Environmental attitudes and recycling behaviour in primary school age: The role of school and parents. *Psichologija*, 63, 101-117. <https://doi.org/10.15388/Psichol.2021.30>
- Tito, M., Huamán, M., y Mamani, O. (2021). Factores asociados al cumplimiento de la normatividad de gestión de residuos municipales de Juliaca, Perú. *Apuntes Universitarios*, 11(4), 203-215. <https://doi.org/10.17162/au.v11i4.767>
- UNESCO. (2022). *Educación para el desarrollo sostenible: Una hoja de ruta*. UNESCO. <https://doi.org/10.54675/YFRE1448>
- Villalaz, V., Calderón R., R. A., Ruíz, N., & Camarena Q., F. H. (2025). Cultura de las 3R y Gestión de Residuos: Estrategia para mejorar el distrito de Chitré, Herrera, Panamá. *Revista Semilla Del Este*, 5(2), 44–65. <https://doi.org/10.48204/semillaeste.v5n2.7086>
- Yuningsih, S. y Jaizul, A. (2025). Aumento de la creatividad y la conciencia ambiental de los estudiantes mediante la capacitación en manualidades de reciclaje en la Escuela Primaria de la Aldea de Tanjungjaya. *Revista Internacional de Investigación en Servicios Comunitarios*. <https://doi.org/10.46336/ijrcs.v6i2.941>





## **Implementación de herramientas de IA (NotebookLM) para la capacitación técnica en normatividad relacionada con los residuos peligrosos**

Implementation of AI tools (NotebookLM) for technical training on regulations related to hazardous waste

**José Ramón Laines-Canepa**

División Académica de Ciencias Biológicas

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México

0000-0002-6770-5596 | [jose.laines@ujat.mx](mailto:jose.laines@ujat.mx)

**Luis Fernando Botero-Mendoza\***

Comunidad Internacional de Profesores Cerebrote

Colombia

0009-0005-5092-2171 | [cerebrotevirtual@gmail.com](mailto:cerebrotevirtual@gmail.com)

\*Autor para correspondencia

**Cita APA:** Laines-Canepa, J. R. y Botero-Mendoza, L. F. (2025). Implementación de herramientas de IA (NotebookLM) para la capacitación técnica en normatividad relacionada con los residuos peligrosos. *Revista Arbitrada de Ciencias Ambientales*, 1(1), 97-113. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18685034>

## Resumen

El manejo sostenible de los residuos peligrosos constituye desafíos críticos para la ingeniería ambiental. La complejidad técnica de regulaciones inmersas en la NOM-052-SEMARNAT-2005, piedra angular para definir la peligrosidad de un residuo, como las NOM-004-SEMARNAT-2002, NOM-133-SEMARNAT-2015, NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, NOM-141-SEMARNAT-2003 y NOM-055-SEMARNAT-2003, generan barreras de aprendizaje significativas. Este estudio investiga la eficacia de una estrategia pedagógica mediada por Inteligencia Artificial Generativa para transformar textos normativos en formatos de audio (podcasts), facilitando su asimilación. Bajo un diseño cuasiexperimental en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, se comparó el desempeño de un grupo experimental (n=22) frente a una línea base histórica controlada (n=60). Los resultados indican una mejora estadísticamente significativa ( $\chi^2= 11.2$ ,  $p < 0.001$ ), reduciendo la tasa de reprobación del 60% al 18.2%. Se concluye que la tecnología de generación de audio mediante IA reduce la carga cognitiva extrínseca, permitiendo una apropiación más profunda de la normativa técnica.

**Palabras clave:** Enseñanza técnica, residuos peligrosos, inteligencia artificial, NotebookLM.

## Abstract

The sustainable management of soil resources and the proper disposal of biosolids are critical challenges for environmental engineering. The technical complexity of regulations such as NOM-004-SEMARNAT-2002 and NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 creates significant learning barriers. This study investigates the effectiveness of a pedagogical strategy mediated by Generative Artificial Intelligence (GAI) to transform regulatory texts into audio formats (podcasts), facilitating their assimilation. Under a quasi-experimental design at the Juárez Autónoma University of Tabasco, the performance of an experimental group (n=22) was compared to a controlled historical baseline (n=60). The results indicate a statistically significant improvement ( $\chi^2= 11.2$ ,  $p < 0.001$ ), reducing the failure rate from 60% to 18.2%. It is concluded that AI-based audio generation technology reduces extrinsic cognitive load, allowing for a deeper understanding of technical regulations.

**Key Words:** Technical education, hazardous waste, artificial intelligence, NotebookLM.

## Introducción

La formación de capital humano capaz de gestionar los impactos ambientales de las actividades productivas es vital para la sostenibilidad ambiental, agrícola e industrial en México. En particular, la gestión de suelos y residuos orgánicos representa uno de los ejes más sensibles para la protección ambiental. La degradación de suelos por hidrocarburos y el manejo inadecuado de lodos provenientes de plantas de tratamiento conllevan riesgos severos para la seguridad alimentaria y la salud pública.

En este contexto, el marco normativo mexicano establece límites técnicos y procedimientos obligatorios a través de instrumentos como la NOM-004-SEMARNAT-2002- Lodos y biosólidos.-especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2003), NOM-133-SEMARNAT-2015 - Bifenilos Policlorados (BPCs), especificaciones de manejo. Control de compuestos tóxicos persistentes de uso industrial (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2016), NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012- Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2013), NOM-141-SEMARNAT-2003 - Procedimiento para caracterizar jales. Regula residuos mineros que pueden contener metales pesados (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2004), y NOM-055-SEMARNAT-2003 - Requisitos para sitios de confinamiento controlado de residuos peligrosos. Establece criterios de diseño para minimizar impacto ambiental (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2004).

Sin embargo, la enseñanza de este marco legal enfrenta barreras pedagógicas significativas. Los estudiantes de Ingeniería Ambiental suelen manifestar dificultades para interpretar y aplicar documentos regulatorios extensos, caracterizados por una alta densidad de datos numéricos y lenguaje jurídico. Esta complejidad impone lo que la teoría educativa define como una alta "carga cognitiva intrínseca" (Sweller, 2011), dificultando la comprensión profunda y la transferencia del conocimiento a situaciones reales. En la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), esta dificultad se ha traducido históricamente en tasas de reprobación cercanas al 60% en asignaturas de Legislación Ambiental, Generación y Prevención de Residuos y Manejo Integral de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial evidenciando una desconexión entre la memorización teórica y la práctica profesional requerida.

Para abordar esta problemática, la presente investigación propone un cambio de paradigma instruccional mediante la incorporación de Inteligencia

Artificial Generativa (GenAI). Recientemente, la literatura ha destacado el potencial de la GenAI para transformar materiales estáticos en recursos dinámicos y personalizados (Kong *et al.*, 2025). Específicamente, este estudio utiliza la herramienta NotebookLM de Google, la cual se fundamenta en Modelos de Lenguaje de Gran Escala (LLMs) integrados con tecnología de Generación Aumentada por Recuperación (RAG, por sus siglas en inglés).

Desde una perspectiva técnica, la arquitectura RAG permite al modelo "leer" y procesar documentos fuente específicos (en este caso, los PDFs de las Normas Oficiales) para generar síntesis y explicaciones fiables, minimizando las "alucinaciones" o errores comunes en modelos generativos abiertos al limitar el contexto de respuesta a la información proporcionada (Lewis *et al.*, 2020). Esta capacidad de procesamiento permite no solo resumir textos eficientemente (Hutapea *et al.*, 2025), sino transformar la modalidad de la información de texto a audio.

La estrategia pedagógica se centra en la conversión de la normativa técnica a formatos de audio conversacional (podcasts generados por IA). Estudios recientes, como el de Jafarian y Kramer (2025), sugieren que el aprendizaje asistido por audio mediante IA puede mejorar el rendimiento académico al reducir la carga cognitiva extrínseca y aumentar la motivación del estudiante a través de la accesibilidad y la flexibilidad del formato. Al diversificar los canales de entrada de información y situar el aprendizaje en contextos auditivos tipo diálogo, se libera capacidad de procesamiento visual para el análisis de tablas y datos técnicos complejos.

El objetivo de esta investigación fue evaluar la eficacia de esta estrategia didáctica mediada por NotebookLM. Se plantea la hipótesis de que el acceso a la información técnica mediante canales auditivos generados por IA, reforzado con evaluaciones basadas en la resolución de problemas reales, mejora significativamente la retención del conocimiento y la competencia técnica de los estudiantes en comparación con los métodos tradicionales de lectura y cátedra. La aportación principal de este trabajo radica en la validación empírica de herramientas de GenAI (específicamente RAG y audio-generación) aplicadas a la educación superior en ciencias ambientales, un campo donde la precisión técnica es un no-negociable

## **Materiales y métodos**

### ***Diseño de investigación y participantes***

El presente estudio adoptó un diseño cuasiexperimental con grupos no concurrentes para evaluar la eficacia de herramientas de inteligencia artificial en el aprendizaje de la normatividad sobre residuos peligrosos dentro del marco de la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005.

Este diseño fue seleccionado debido a la naturaleza del entorno educativo, donde la aleatorización completa de los estudiantes no es factible sin interrumpir la estructura curricular establecida en los tiempos dispuestos. La población de estudio consistió en estudiantes del Programa Educativo de Licenciatura en Ingeniería Ambiental de la División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), específicamente cursando la asignatura de "Generación y prevención de residuos". Esta asignatura fue seleccionada por ser el punto curricular donde convergen las normativas para el estudio de Residuos Peligrosos dentro de la NORMA Oficial Mexicana NOM-052-, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos (SEMARNAT-2005), presentando históricamente altos índices de dificultad conceptual.

La muestra total (N=82) se distribuyó en dos grupos no concurrentes para evitar la contaminación cruzada de la intervención pedagógica:

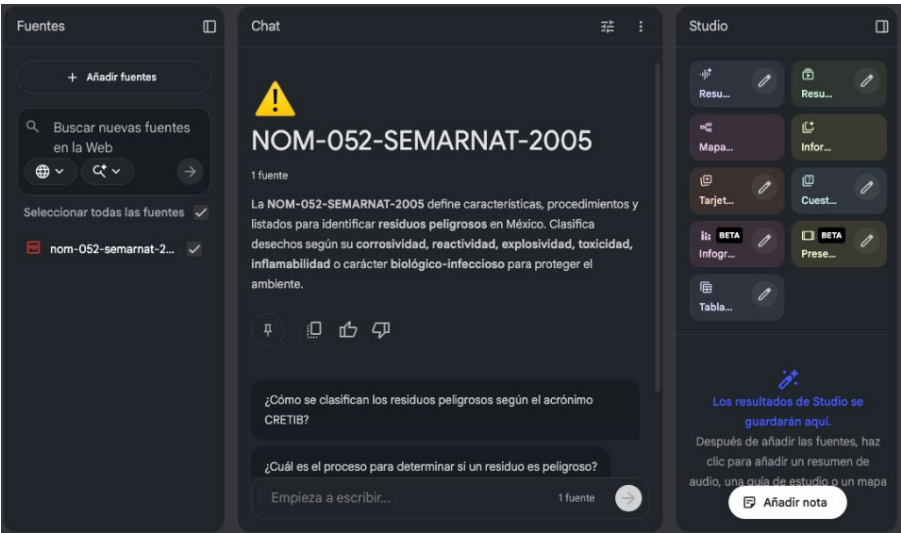
1. **Grupo experimental (n=22):** estudiantes inscritos en el ciclo escolar 2024, expuestos a la metodología de aprendizaje asistido por IA (podcasts y evaluación situada).
2. **Grupo control histórico (n=60):** datos académicos recopilados de las actas oficiales de los tres ciclos escolares inmediatamente anteriores (2021, 2022, 2023), donde la enseñanza se impartió bajo el método tradicional (clase magistral expositiva y lectura de textos). El uso de controles históricos permite establecer una línea base de rendimiento en contextos donde no es viable implementar grupos control concurrentes, constituyendo una estrategia válida dentro de los diseños cuasiexperimentales aplicados a evaluaciones educativas e innovaciones curriculares (Campbell y Stanley, 1963; Cook y Campbell, 1986; Walser, 2014). Este enfoque facilita la comparación con cohortes previas mediante datos archivados bajo condiciones institucionales relativamente estables.

### **Configuración tecnológica (NotebookLM e IA Generativa)**

#### **NotebookLM e IA generativa**

Como motor de procesamiento de información se utilizó NotebookLM (Google), una plataforma basada en arquitectura de Generación Aumentada por Recuperación (RAG), la cual permite anclar las respuestas del modelo exclusivamente a los documentos fuente proporcionados. Este enfoque reduce el riesgo de generación de información no sustentada y favorece la trazabilidad del contenido educativo generado (Lewis et al., 2020).

La Figura 1 muestra el entorno de interacción utilizado durante el estudio, donde se integró la NOM-052-SEMARNAT-2005 como fuente normativa principal mediante los módulos de fuentes, chat y estudio.



**Figura 1.** Entorno de interacción con inteligencia artificial mostrando la carga de fuentes normativas y la interfaz de consulta utilizada durante el estudio.

La configuración técnica se estructuró bajo un protocolo estandarizado compuesto por las siguientes etapas:

**I. Ingesta de datos:**

Se cargaron al sistema los archivos PDF completos de seis Normas Oficiales Mexicanas (Tabla 1), constituyendo un corpus cerrado de conocimiento. Cada norma fue incorporada en un cuaderno independiente dentro de la plataforma, con el objetivo de mantener separación temática y control de contexto durante la generación de respuestas.

**Tabla 1.** Relación de Normas Oficiales Mexicanas procesadas y transformadas a formato de audio mediante NotebookLM.

| Norma                      | Descripción y relevancia en el estudio                                                                                                                        |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NOM-052-SEMARNAT-2005      | Características, procedimiento de identificación, clasificación y listados de residuos peligrosos. Piedra angular para definir la peligrosidad de un residuo. |
| NOM-004-SEMARNAT-2002      | Lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos permisibles. Regula el manejo de lodos para evitar contaminación en su disposición final.              |
| NOM-133-SEMARNAT-2015      | Bifenilos Policlorados (BPCs), especificaciones de manejo. Control de compuestos tóxicos persistentes de uso industrial.                                      |
| NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 | Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos. Fundamental para procedimientos de muestreo y remediación en zonas petroleras.                        |

| Norma                 | Descripción y relevancia en el estudio                                                                                                     |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NOM-141-SEMARNAT-2003 | Procedimiento para caracterizar jales. Regula residuos mineros que pueden contener metales pesados.                                        |
| NOM-055-SEMARNAT-2003 | Requisitos para sitios de confinamiento controlado de residuos peligrosos. Establece criterios de diseño para minimizar impacto ambiental. |

Fuente: Elaboración propia

II. Ingeniería de prompts (Prompt engineering):

Para la generación de los “Audio Overviews”, el modelo fue instruido para simular un diálogo técnico entre dos expertos en gestión de residuos. El prompt se diseñó para priorizar aprendizajes profesionales contextualizados relevantes para la formación en Ingeniería Ambiental, enfatizando:

- a) la identificación de límites máximos permisibles,
- b) la explicación de procedimientos de muestreo y
- c) la discusión de errores comunes en la aplicación de la norma.

La Figura 2 muestra la interfaz de personalización del resumen de audio donde se definieron idioma, duración y estructura pedagógica del prompt.



**Figura 2.** Interfaz de configuración del prompt instruccional para la generación de contenido educativo mediante inteligencia artificial basado en la NOM-052-SEMARNAT-2005.

La configuración del modelo se estructuró mediante un prompt pedagógico alineado con los criterios del instrumento evaluativo descrito en los apartados 6.4.2 (estructura normativa) y 8.1 (criterios de evaluación del

desempeño académico), con el propósito de mantener coherencia entre la generación automatizada de contenido y los indicadores del estudio.

### **Prompt maestro para NotebookLM:**

**Instrucción de configuración de audio** (lo puede probar copiando y pegando en la pestaña de configuración de audio en NotebookLM):

"Genera un diálogo de audio (tipo Deep Dive) entre dos expertos en gestión de residuos: una anfitriona con perfil de consultora ambiental y un especialista técnico con amplia experiencia en cumplimiento normativo.

**Audiencia:** estudiantes de Licenciatura en Ingeniería Ambiental en México Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. El tono debe ser académico pero dinámico, técnico pero accesible, utilizando terminología propia de la profesión (ej. lixiviados, PECT, constituyentes, caracterización).

### **Estructura y puntos cruciales a cubrir basados en la NOM-052-SEMARNAT-2005:**

- 1. Fundamentos y relevancia (El 'Por qué'):** inicien discutiendo por qué esta norma es la piedra angular para un ingeniero ambiental en México. Expliquen que no solo es un listado, sino la base legal para prevenir la contaminación del suelo y agua.
- 2. Identificación y límites (Tabla 2):** Analicen la importancia de los Límites Máximos Permisibles (LMP) en el extracto PECT. Mencionen específicamente cómo sustancias como el Arsénico, Cadmio o Benceno definen la peligrosidad de un residuo.
- 3. El proceso de caracterización (muestreo y análisis):** expliquen el flujo de decisión (Figura 1) y el procedimiento de evaluación de la conformidad. Resalten que las muestras deben ser representativas y tomadas directamente del proceso o almacenamiento, subrayando la importancia de la cadena de custodia (Numeral 8.1).
- 4. Errores comunes y 'trampas' de la norma:** discutan fallos típicos en la práctica, como:
  - Confundir un residuo no listado con un residuo no peligroso (olvidar el análisis CRIT).
  - No considerar las 'Condiciones Particulares de Manejo' del Listado 5.
  - Errores en la interpretación del acrónimo CRETIB vs. CRIT.
- 5. Mensaje final:** concluyan con un consejo para los estudiantes sobre su responsabilidad ética y técnica al firmar manifestaciones basadas en conocimiento científico (Numeral 6.4.2).

**Restricción de estilo:** eviten un resumen plano. Creen una conversación donde se cuestionen entre sí, den ejemplos de giros

industriales (como la industria del petróleo o química) y mantengan la energía de un podcast de expertos que aman la ingeniería ambiental.”

### III. Control de sesgos y verificación:

Se implementó un esquema Human-in-the-Loop mediante el cual el docente titular auditó los audios generados para verificar la precisión normativa y la consistencia de los valores numéricos antes de su distribución. En caso de detectar inconsistencias, se realizaron ajustes iterativos del prompt y una nueva generación del contenido, fortaleciendo así la validez interna del proceso.

### IV. Resultado de la aplicación:

El audio resultante para este ejemplo corresponde a un archivo MP3 con una duración total de 13 min 34 s, disponible en el siguiente recurso digital: [https://drive.google.com/file/d/14F\\_kDUvjSIQBNmoxwTNwyAns-fWI4pOO/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/14F_kDUvjSIQBNmoxwTNwyAns-fWI4pOO/view?usp=sharing)

### *Instrumentos de evaluación*

Para medir el desempeño del grupo experimental, se sustituyeron los exámenes tradicionales por una rúbrica de evaluación práctica situada. Este instrumento fue diseñado en alineación con los atributos de egreso definidos por el Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería (CACE, el organismo oficial en México encargado de garantizar la calidad de los programas educativos de ingeniería.

La rúbrica evaluó cuatro competencias técnicas alineadas con las categorías reportadas en la Tabla 3:

- 1. Identificación de residuos (NOM-052):** capacidad para clasificar residuos conforme a características CRETIB y listados normativos.
- 2. Muestreo de suelos (NOM-138):** diseño adecuado de estrategias de muestreo y caracterización en sitios potencialmente contaminados.
- 3. Interpretación legal:** habilidad para citar artículos específicos de la normativa aplicable y sustentar decisiones técnicas.
- 4. Propuesta de remediación:** factibilidad técnica y coherencia en la formulación de soluciones para la gestión ambiental.

Para el grupo control, se recopilaron las calificaciones finales asentadas en las actas oficiales de la universidad, las cuales reflejaban el promedio de exámenes teóricos y tareas tradicionales.

### *Procedimiento experimental*

La intervención educativa se estructuró en tres fases secuenciales durante el semestre:

- 1) **Fase de producción (Semana 1-2):** curaduría de los documentos normativos y generación de los activos de audio mediante IA.
- 2) **Fase de implementación (Semana 3-14):** distribución semanal de los podcasts a través de plataformas móviles (LMS institucional/WhatsApp) bajo un modelo de Aula Invertida (Flipped Classroom). El tiempo de clase presencial se reasignó: de la lectura de normas a la discusión de dudas surgidas tras la escucha de los audios.
- 3) **Fase de evaluación (Semana 15-16):** aplicación de la evaluación basada en escenarios. Se presentaron casos complejos (ej. "Derrame de diésel en parcela agrícola cerca del río Grijalva") y los estudiantes entregaron informes técnicos justificativos, cuya calificación constituyó la nota final del curso.

**Análisis de datos**

Los datos cuantitativos fueron procesados utilizando el software estadístico R. Se realizó un análisis descriptivo (media, desviación estándar) para caracterizar el rendimiento. Para evaluar la hipótesis principal, se aplicó la prueba de Chi-cuadrada de Pearson ( $\chi^2$ ) para analizar la independencia entre la condición experimental y el estatus de aprobación, estableciendo un nivel de significancia de  $\alpha= 0.05$ .

**Resultados**

**Análisis del rendimiento académico**

El análisis comparativo entre la línea base histórica y el grupo intervenido revela un cambio significativo en las tasas de éxito académico. Históricamente, la asignatura presentaba una barrera de complejidad alta, con un promedio de aprobación de apenas el 40% durante los tres ciclos escolares previos.

Como se observa en la Tabla 2, la implementación de la estrategia basada en audios generados por IA revirtió esta tendencia. La tasa de aprobación en el grupo experimental se elevó al 81.8%, lo que representa un incremento de 41.8 puntos porcentuales respecto al grupo control histórico.

**Tabla 2.** Resultados de comparación de tasas de aprobación y reprobación: Grupo Control Histórico vs. Grupo Experimental.

| Grupo de estudio                                 | N<br>(Total) | Aprobados<br>n (%) | Reprobados<br>n (%) | Valor<br>P |
|--------------------------------------------------|--------------|--------------------|---------------------|------------|
| Control histórico<br>(Promedio 2021-2023)        | 60           | 24 (40.0%)         | 36 (60.0%)          | --         |
| Experimental<br>(Intervención con<br>NotebookLM) | 22           | 18 (81.8%)         | 4 (18.2%)           | <0.001     |

Fuente: Elaboración propia

La prueba de independencia  $\chi^2$  de Pearson indicó una asociación estadísticamente significativa ( $\chi^2 (1) = 11.2, p < 0.001$ ). Este resultado permite rechazar la hipótesis nula, confirmando que existe una dependencia estadísticamente significativa entre la estrategia pedagógica implementada (podcasts + evaluación situada) y la mejora en la tasa de aprobación de los estudiantes.

Estos hallazgos empíricos son consistentes con la premisa teórica propuesta por Lewis et al. (2020) respecto al uso de arquitecturas de Generación Aumentada por Recuperación (RAG), las cuales favorecen la generación de lenguaje más objetivo y anclado a fuentes verificables. En el contexto educativo analizado, esta característica se traduce en una asimilación más precisa y menos abrumadora de parámetros técnico-normativos complejos, lo que contribuye a explicar la mejora sustancial observada en el desempeño académico.

Es importante desglosar que, de los 4 estudiantes reprobados en el grupo experimental, el 50% (2 casos) correspondieron a deserción por motivos ajenos a la dificultad académica (abandono temprano), lo que sugiere que la reprobación efectiva vinculada a la falta de competencias fue marginal.

**Nivel de logro en competencias técnicas**

Más allá de la calificación sumativa, se evaluó el dominio de competencias específicas mediante la rúbrica práctica alineada a CACEI. La Tabla 3 detalla la distribución porcentual de los estudiantes del grupo experimental en tres niveles de desempeño: Bajo, Medio y Alto.

**Tabla 3.** Nivel de logro de competencias técnicas en el Grupo Experimental (n=22).

| Competencia técnica evaluada         | Nivel Bajo (%) | Nivel Medio (%) | Nivel Alto (%) | Descripción del logro esperado                                                         |
|--------------------------------------|----------------|-----------------|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Identificación de residuos (NOM-052) | 4.5%           | 13.6%           | 81.9%          | Capacidad para clasificar residuos según características CRETIB y listados normativos. |
| Muestreo de suelos (NOM-138)         | 9.0%           | 22.7%           | 68.3%          | Diseño correcto de patrones de muestreo (malla, zig-zag) en sitios contaminados.       |
| Interpretación legal                 | 13.6%          | 27.3%           | 59.1%          | Habilidad para citar artículos específicos para justificar decisiones técnicas.        |
| Propuesta de remediación             | 18.2%          | 31.8%           | 50.0%          | Viabilidad técnica en la propuesta de soluciones para limpieza de sitios.              |

Fuente: Elaboración propia

Los resultados evidencian que el mayor impacto de la herramienta NotebookLM se reflejó en la competencia de Identificación de Residuos (81.9% en Nivel Alto). Esto es consistente con la naturaleza de la normativa NOM-052, que exige la memorización y comprensión de las características CRETIB (Corrosivo, Reactivo, Explosivo, Tóxico, Inflamable y Biológico-Infeccioso). El formato de audio permitió a los estudiantes interiorizar estos conceptos técnicos mediante la repetición y la escucha activa, facilitando la clasificación correcta de residuos peligrosos.

Por otro lado, la competencia de Propuesta de Remediación mostró una distribución más variada (50% en Nivel Alto). Esto se atribuye a que dicha competencia requiere un nivel cognitivo superior de síntesis y creatividad para proponer soluciones viables, habilidades que van más allá de la comprensión normativa facilitada por los audios.

Este comportamiento diferencial es consistente con la literatura sobre aprendizaje asistido por IA, donde las tareas de reconocimiento y clasificación muestran mayor sensibilidad a herramientas basadas en recuperación de información que aquellas que implican diseño ingenieril y toma de decisiones complejas.

## Discusión

Los resultados de esta investigación demuestran que la transformación de normativas técnicas densas a formatos de audio conversacional (mediante NotebookLM) tiene un impacto directo en el rendimiento académico, reduciendo la tasa de reprobación del 60% al 18.2%. Este hallazgo se alinea con lo reportado recientemente por Jafarian y Kramer (2025), quienes demostraron en un ensayo controlado que el aprendizaje asistido por audio mediante IA mejora significativamente el compromiso de lectura y la motivación.

Sin embargo, nuestros resultados ofrecen un matiz importante a la literatura. Mientras Jafarian y Kramer observaron que el audio actuaba principalmente como un mediador motivacional, nuestros datos sugieren que, en el contexto de normativas legales (NOM-052, NOM-138), el formato de audio tiene un efecto directo en la retención de datos declarativos. El alto desempeño en la competencia de "Identificación de residuos" (81.9% en nivel alto) valida que la reducción de la carga cognitiva extrínseca —al eliminar la barrera de la lectura de textos legales áridos— permite una mejor memorización de listas y características técnicas (como el código CRETIB).

La percepción de los estudiantes sobre la utilidad de los resúmenes auditivos coincide con los hallazgos de Hutapea et al. (2025), quienes encontraron que el 83.3% de los estudiantes universitarios consideran que los resúmenes generados por IA son comprensibles y que el uso de estas

herramientas incrementa la eficiencia del tiempo de estudio en un 60%. En nuestro caso, la capacidad de NotebookLM para sintetizar seis normas extensas en diálogos focalizados permitió a los estudiantes del grupo experimental acceder a la "esencia" de la norma más rápidamente que el grupo control histórico, que dependía de la lectura lineal tradicional. Esto confirma que la IA generativa, cuando se utiliza bajo una arquitectura RAG supervisada, actúa como un andamiaje efectivo para la comprensión lectora académica.

Es crucial notar que el desempeño en la competencia de "Propuesta de remediación" fue menor (50% en nivel alto) comparado con la identificación de residuos. Este fenómeno puede explicarse a través del marco de Alfabetización en IA propuesto por Kong et al. (2025). Según Kong, el uso de IA para la resolución de problemas (nivel metacognitivo) requiere no solo acceso a la información, sino una "preparación psicológica" y un empoderamiento que va más allá del consumo pasivo de contenido.

Aunque los podcasts generados por IA facilitaron la adquisición de información teórica (el "qué" y el "por qué"), la aplicación de estos conocimientos para diseñar planes de remediación complejos (el "cómo") sigue requiriendo un andamiaje docente intensivo. La IA facilitó la entrada de información, pero la síntesis creativa necesaria para la remediación de suelos sigue siendo una habilidad que demanda práctica deliberada, sugiriendo que la herramienta es un complemento, no un sustituto, del desarrollo de pensamiento crítico en ingeniería.

## Limitaciones del estudio

Aunque el diseño cuasiexperimental con control histórico permitió validar la intervención en un entorno real, se reconoce la limitación del tamaño muestral ( $n=22$ ) frente al control ( $n=60$ ). Asimismo, al ser un estudio en una zona geográfica específica con problemáticas ambientales particulares (región petrolera), la generalización de los hallazgos a otros contextos debe hacerse con cautela.

## Conclusiones

La implementación de herramientas de Inteligencia Artificial Generativa, específicamente NotebookLM, en la enseñanza de normatividad ambiental representa una estrategia prometedora para la modernización de la educación en ingeniería. A partir de los hallazgos, se concluye que:

1. La conversión de textos normativos a audio mediante arquitecturas RAG contribuye a reducir la carga cognitiva asociada al lenguaje jurídico-técnico, evidenciándose una mejora estadísticamente

significativa ( $\chi^2 = 11.2$ ,  $p < 0.001$ ) en las tasas de aprobación del grupo experimental.

2. La herramienta mostró mayor impacto en competencias de identificación y clasificación normativa, mientras que el efecto fue moderado en tareas de diseño de remediación, lo que sugiere la necesidad de integrar estas tecnologías dentro de modelos pedagógicos híbridos donde el docente continúe guiando procesos de aplicación compleja.
3. El uso de herramientas de IA Generativa accesibles representa una alternativa viable frente a sistemas de tutoría inteligentes de alto costo, permitiendo actualizar contenidos educativos de manera ágil en campos sujetos a cambios normativos constantes.

Se recomienda a las instituciones de educación superior explorar la integración de estas herramientas no como un atajo académico, sino como un mecanismo de alfabetización técnica acelerada que permita a los futuros ingenieros dedicar más tiempo al análisis crítico y menos a la decodificación de textos normativos.

En el caso de la aplicación trabajada se tiene una ventaja adicional ya que la herramienta por su forma de trabajo no solo evita errores y reduce las alucinaciones, sino que permite la creación de un "tutor de dominio específico" a bajo costo, democratizando el acceso a expertise técnico que se gradúa en calidad según las fuentes con las que sea alimentado cada cuaderno.

Trabajando con todo lo expuesto con resultados se propone un modelo pedagógico escalable basado en arquitecturas RAG para abordar un desafío transversal en la educación técnica: la comprensión eficiente de marcos normativos complejos. La evidencia empírica obtenida sugiere que este enfoque puede contribuir a mejorar la asimilación de contenidos altamente especializados sin sustituir el rol crítico del docente en procesos de diseño y toma de decisiones ingenieriles.

## Referencias

Baidoo-Anu, D., & Ansah, L. O. (2023). Education in the Era of Generative Artificial Intelligence (AI): Understanding the Potential Benefits of ChatGPT in Promoting Teaching and Learning. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4337484>

Campbell, D. T., & Stanley, J. C. (1963). Experimental and quasi-experimental designs for research. Rand McNally.

Parra, C. M. C., & Valencia, A. R. (2021). Uso de podcast en la enseñanza de la lengua inglesa. *Revista Boletín Redipe*, 10(2), 144-157. <https://doi.org/10.36260/rbr.v10i2.1201>

Cook, T. D., & Campbell, D. T. (1986). Quasi-experimentation: Design & analysis issues for field settings. Houghton Mifflin.

Engzell, J., Norrman, C., Norberg, A., & Lundvall, C. (2025). Soundwaves of knowledge: using podcasts to facilitate learning in higher education. *Educational Media International*, 62(3), 361-379. <https://doi.org/10.1080/09523987.2025.2533120>

Hutapea, E., Hutabalian, R., & Hartati, R. (2024). Summarizing AI Application on Student Learning Efficiency in Understanding Academic Reading Materials. *IJEDR Indonesian Journal Of Education And Development Research*, 3(1), 737-745. <https://doi.org/10.57235/ijedr.v3i1.4878>

Jafarian, N. R., & Kramer, A. (2024). AI-assisted audio-learning improves academic achievement through motivation and reading engagement. *Computers And Education Artificial Intelligence*, 8, 100357. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100357>

Kong, S. C., Zhu, J., & Yang, Y. N. (2025). Developing and validating a scale of empowerment in using artificial intelligence for problem-solving for senior secondary and university students. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 8, Artículo 100359. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100359>

Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., Petroni, F., Karpukhin, V., Goyal, N., Küttler, H., Lewis, M., Yih, W., Rocktäschel, T., Riedel, S., & Kiela, D. (2020). Contextual Personal Intelligence: A New Paradigm for AI That Evolves With You. *arXiv (Cornell University)*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2005.11401>

Molina, H. L. V. (2022). Innovación educativa y espacios de construcción colectiva para apropiar y resignificar el conocimiento: Una exploración documental. *Revista Internacional de Pedagogía e Innovación Educativa*, 2(1), 7-22. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9077136.pdf>

Morales-Urrutia, D., Yépez-Villacis, R., & Mantilla-Falcón, L. M. (2026). Educational podcasts and student engagement in Ecuadorian higher education: an SEM-based evaluation of the technology acceptance model. *Frontiers In Education*, 10. <https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1744459>

Morgan, H. (2015). Focus on Technology: Creating and Using Podcasts Promotes Student Engagement and Learning. *Childhood Education*, 91(1), 71-73. <https://doi.org/10.1080/00094056.2015.1001680>

Romero, G., & López, H. (2021). Diseño y uso de podcasts en el proceso de enseñanza-aprendizaje. *En Blanco y Negro*, 11(1), 136-150. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/enblancoynegro/article/view/23197>

Sweller, J. (2011). Cognitive load theory. En J. P. Mestre & B. H. Ross (Eds.), *Psychology of learning and motivation* (Vol. 55, pp. 37-76). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387691-1.00002-8>

Trejo, C. J. A., & Marcano, N. (2013). Propuesta de innovación educativa mediante el uso de las TIC para la promoción de valores ambientales en la educación primaria venezolana. *Revista de Investigación*, 37(79), 33–48. [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1010-29142013000200003](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1010-29142013000200003)

Walser, T. M. (2014). Quasi-experiments in schools: The case for historical cohort control groups. *Practical Assessment, Research & Evaluation*, 19(6), 1–13. <https://openpublishing.library.umass.edu/pare/article/1359/galley/1310/view/>





Revista Arbitrada de  
Ciencias Ambientales

# CIENCIA Y SOSTENIBILIDAD ANTE LOS DESAFÍOS AMBIENTALES

Volumen 1 | Número 1



**PERUVIAN SCIENCE**  
CENTRO EDITORIAL

JULIO - DICIEMBRE  
2025