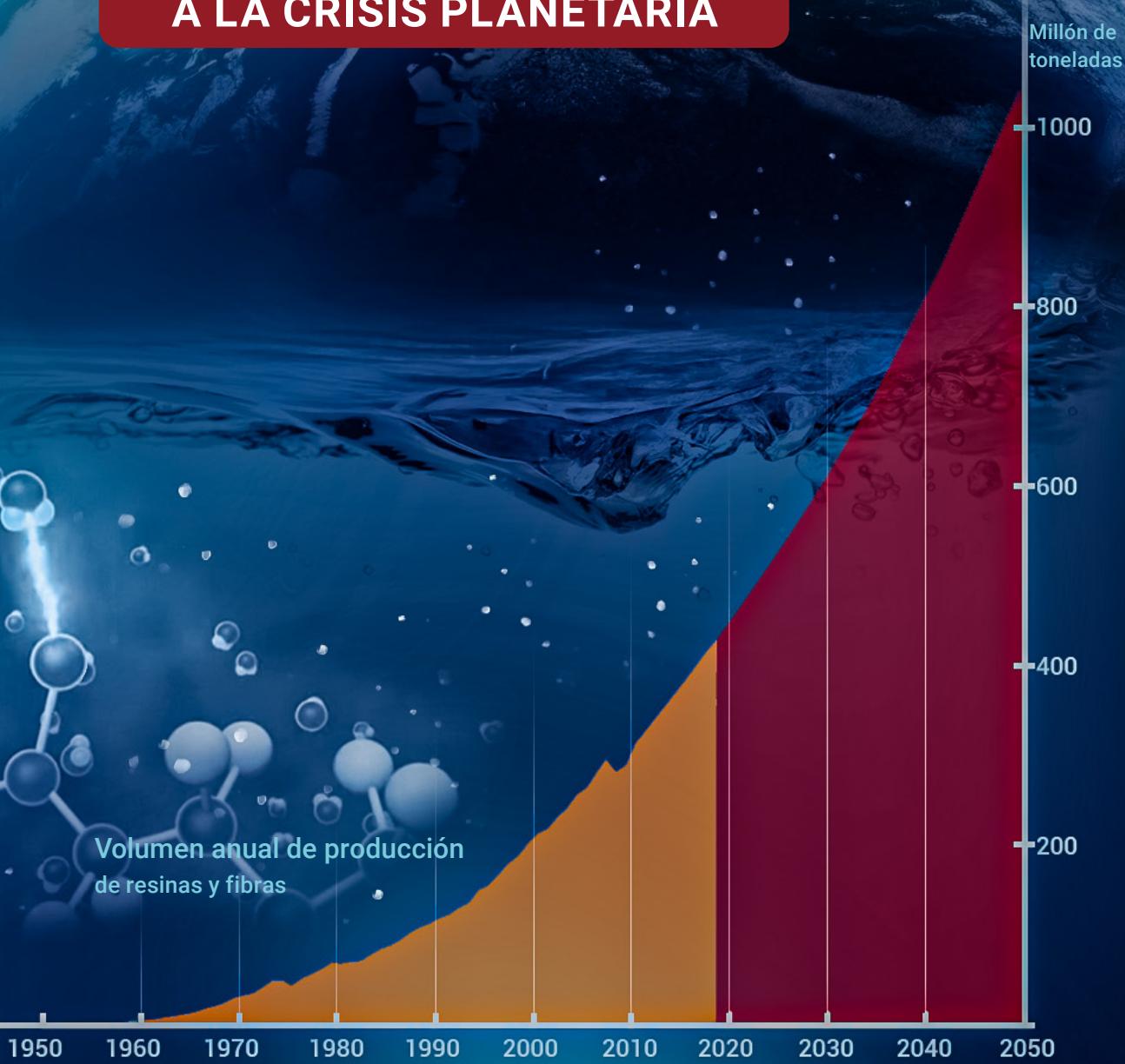


INFORME

# NANOPLÁSTICOS EN LA BIOSFERA

DEL IMPACTO MOLECULAR  
A LA CRISIS PLANETARIA



INFORME

# NANOPLÁSTICOS EN LA BIOSFERA

DEL IMPACTO MOLECULAR  
A LA CRISIS PLANETARIA

## AUTORES



Movimiento Internacional Social ALLATRA  
Comunidad Científica Interdisciplinar

## REVISIÓN INSTITUCIONAL Colaboración Académica



Universidad Católica Boliviana "San Pablo" - UCB  
Facultad de Ingeniería Ambiental e Investigación



Universidad Autónoma Juan Misael Saracho - UAJMS  
Departamento de Investigación, Ciencia y Tecnología

## COLABORADOR CIENTÍFICO



Proyecto Internacional Sociedad Creativa

# CONTENIDO

<b>Prólogo.....</b>	5
<b>Las consecuencias de la contaminación por plásticos: micro y nanoplásticos (MNP) como un nuevo factor de la crisis planetaria.....</b>	7
Evaluaciones cuantitativas y tendencias de la producción global de residuos plásticos .....	7
La gran mancha de basura del Pacífico.....	10
Procesos de formación de micro y nanopartículas de plástico.....	12
Difusión de los MNP en el medio ambiente.....	18
<b>Consecuencias ecológicas y climáticas de la contaminación por micro y nanoplásticos.....</b>	23
Como los micro y nanoplásticos dañan los ecosistemas a nivel molecular.....	23
<b>Impacto de los micro y nanoplásticos en el clima.....</b>	46
<b>Impacto de los micro y nanoplásticos en la salud humana.....</b>	71
Micro y nanoplásticos como nuevo factor de riesgo en el desarrollo de las epidemias del siglo XXI.....	71
Mecanismos moleculares de la toxicidad de los MNP: daños al ADN, a las mitocondrias y a las membranas celulares.....	72
Rol de los micro y nanoplásticos (MNP) en los mecanismos del envejecimiento premature y la oncogénesis.....	84
Desestabilización del sistema hormonal por efecto de los MNP.....	87
Carga electrostática de los nanoplásticos como factor clave de su alta toxicidad para el organismo humano.....	93
Impacto sistémico de los MNP en los órganos y en los sistemas funcionales del ser humano.....	100
Mecanismos de daño al aparato respiratorio por inhalación de MNP.....	101
Acción neurotóxica de los MNP: daños en el sistema nervioso central y periférico.....	102
Rol de los MNP en la patogenia de las enfermedades cardiovasculares.....	114
Alteración de las funciones gastrointestinales causada por los MNP.....	116
Efectos de los MNP sobre el sistema inmunitario.....	117
Acción cancerígena de los MNP: mecanismos de mutación y desarrollo de metástasis.....	120
Efectos de los MNP en el metabolismo del calcio y en la estructura ósea.....	121
Trastornos reproductivos asociados a la exposición a los MNP: infertilidad y disfunción eréctil.....	122
Penetración de los MNP a través de la barrera placentaria e impacto en el cuerpo en desarrollo.....	126
Efectos de la exposición a MNP y su relación con anomalías congénitas.....	130
Conclusiones y perspectivas: ¿es posible reducir el impacto de los MNP en la salud humana?.....	133
<b>Análisis de los enfoques actuales para la reducción de la contaminación por plástico.....</b>	134
Tecnologías para la eliminación de plásticos de gran tamaño en los ecosistemas acuáticos.....	134
Métodos actuales para la eliminación de micro y nanoplásticos.....	139
<b>Enfoques de la comunidad científica ALLATRA para combatir la epidemia de micro y nanoplásticos.....</b>	141
Tecnologías de Generadores de Agua Atmosférica (GAA) para la limpieza oceánica de MNP.....	141
Enfoque científico innovador para reducir la toxicidad de los micro y nanoplásticos.....	147
<b>El Factor X. Impacto de los micro y nanoplásticos en la dinámica del ciclo de desastres naturales.....</b>	150
<b>Conclusiones. Los nanoplásticos son un reto ineludible.....</b>	170
<b>Referencias.....</b>	172

## PRÓLOGO

Si la Tierra llevara un diario, el siglo pasado estaría escrito en negro con el título: «La era del plástico». Desde las partículas microscópicas que se infiltran en las células de los organismos vivos hasta las enormes islas de residuos que vagan por los océanos, el plástico está ya grabado en el registro geológico del planeta. ¿Pero a qué precio?

Cada año, el mundo genera más de 400 millones de toneladas de residuos plásticos, de los cuales se estima que 11 millones terminan en los océanos. Hasta la fecha, más de 200 millones de toneladas se han acumulado en los ambientes marinos. Las muestras de agua superficial revelan que la cantidad de plástico supera ahora al zooplancton en una proporción de seis a uno. Si las tendencias actuales continúan, para 2050 la masa de plástico en los océanos superará la de todos los peces. Aunque el plástico tarda cientos o incluso miles de años en descomponerse, se fragmenta bajo la acción de las olas, el agua salada y la radiación ultravioleta en diminutas partículas conocidas como micro y nanoplásticos. Estas partículas pueden recorrer miles de kilómetros a través de las corrientes de aire marino y las precipitaciones, cruzando fronteras, continentes y océanos. Se acumulan en los bosques, se encuentran en nuestra comida y en el agua potable. Los microplásticos se han detectado en los lugares más remotos de la Tierra, desde la Fosa de las Marianas hasta la cima del Everest.

Este informe presenta una evaluación analítica profunda del impacto de la contaminación por plásticos en el medio ambiente, la salud humana y la resiliencia de los sistemas críticos de la sociedad. Examina el comportamiento de los micro y nanoplásticos que transportan cargas estáticas y compuestos químicos tóxicos, y sus efectos en los ecosistemas. Se presta especial atención a su rol en la acidificación de los océanos, la desestabilización de las cadenas alimentarias y las amenazas a la biodiversidad. El informe propone una hipótesis que vincula los micro y nanoplásticos con los cambios en las propiedades del agua, lo que podría acelerar el calentamiento oceánico e intensificar los desastres naturales.

Uno de los problemas más urgentes y alarmantes tratados en el informe es el impacto de los micro y nanoplásticos (MNP) en la salud humana. Debido a su pequeño tamaño, las partículas de plástico pueden superar las barreras biológicas, provocando estrés oxidativo, daños en el ADN, reacciones inflamatorias y disfunciones celulares. Se presta especial atención a la posible correlación entre la exposición a los MNP y el aumento de enfermedades neurodegenerativas y neuropsiquiátricas. El informe muestra que la exposición a los MNP durante los períodos prenatal y postnatal puede afectar las funciones cognitivas y la salud mental de los niños, representando una grave amenaza para el futuro de la humanidad.

El aumento de patologías relacionadas con la exposición a los MNP ya está deteriorando significativamente la calidad de vida de la población, especialmente en las regiones con altos niveles de contaminación por plástico.

El informe identifica las áreas ya clasificadas como de alto riesgo, así como aquellas que, por ahora, siguen siendo relativamente seguras. El empeoramiento de la situación, junto con la falta de herramientas de protección eficaces, podría obligar a las personas a abandonar las zonas contaminadas en busca de condiciones de vida más seguras, lo que podría crear las bases para una migración masiva incontrolada, con el consiguiente aumento de la tensión social, sobrecarga de las infraestructuras urbanas y desestabilización económica.

Por lo tanto, el problema ambiental de la contaminación por plásticos se convertirá gradualmente en una cuestión macroeconómica y geopolítica. El informe enfatiza la necesidad de abordar el problema de los MNP, ofreciendo una nueva perspectiva sobre su propagación y sus consecuencias. La singularidad del trabajo radica en el enfoque interdisciplinario que combina datos sobre los aspectos físicos, químicos y biológicos de la contaminación por plásticos. Esto hace que el informe sea relevante para científicos de diversas disciplinas interesados en desarrollar soluciones sostenibles para un futuro seguro del planeta y la humanidad.



# LAS CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN POR PLÁSTICOS: MICRO Y NANOPLÁSTICOS (MNP) COMO UN NUEVO FACTOR DE LA CRISIS PLANETARIA

El plástico se ha convertido en una parte integral de la vida moderna. Empaques y utensilios, ropa y calzado, artículos de higiene y medicina, transporte y comunicaciones: la mayoría de los objetos que rodean al ser humano están hechos de plástico. Sin embargo, no solo existe en forma de objetos grandes, sino también como partículas microscópicas que se liberan de estos productos: micro y nanoplásticos. Los microplásticos son partículas de menos de 5 milímetros, a veces visibles a simple vista. Los nanoplásticos, en cambio, tienen tamaños menores a una millonésima de metro (un micrómetro) y la mayoría no puede observarse ni con un microscopio estándar.

Los materiales plásticos incluyen muchos tipos diferentes, pero todos están compuestos por polímeros, sustancias naturales o sintéticas formadas por grandes moléculas unidas entre sí. Los polímeros poseen propiedades químicas únicas que los hacen resistentes y duraderos en el medio ambiente. Precisamente debido a su resistencia, versatilidad y bajo costo, el plástico se ha convertido en el material principal para la producción en masa, incluidos los artículos de un solo uso<sup>1</sup>. Sin embargo, una mala gestión de los residuos ha convertido al plástico en el mayor contaminante del mundo en términos de masa.

## Evaluaciones cuantitativas y tendencias de la producción global de residuos plásticos

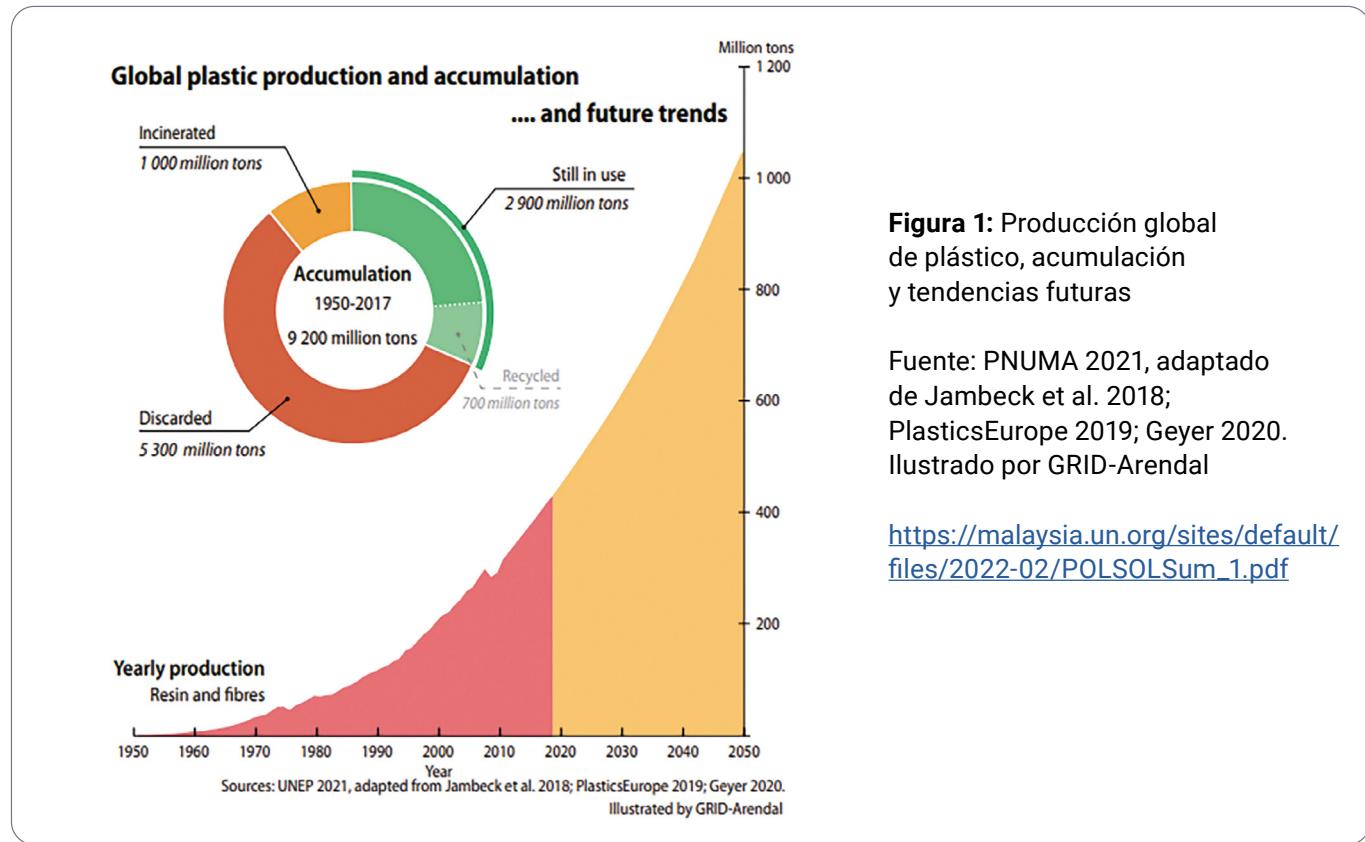
Desde la década de 1950, se han producido aproximadamente 9200 millones de toneladas de plástico en el mundo. De estas, 2900 millones de toneladas están actualmente en uso, incluidas 2700 millones de toneladas de plástico virgen y aproximadamente 200 millones de toneladas de material reciclado. Alrededor de 5300 millones de toneladas han terminado en vertederos, mientras que 1000 millones de toneladas han sido incineradas. Además, se estima que entre 1750 y 2500 millones de toneladas se consideran "mal gestionadas", con un alto riesgo de dispersión no controlada en el medio ambiente (Fig. 1). Hasta la fecha, se han incorporado alrededor de 640 millones de toneladas de aditivos químicos adicionales en los productos de plástico<sup>2</sup>.

Según los datos del PNUMA<sup>3</sup>, cada año se generan más de 400 millones de toneladas de residuos plásticos en todo el mundo.

<sup>1</sup>Karlsruhe Institute of Technology. Blind spots in the monitoring of plastic waste [https://www.kit.edu/kit/english/pi\\_2022\\_097\\_blind-spots-in-the-monitoring-of-plastic-waste.php](https://www.kit.edu/kit/english/pi_2022_097_blind-spots-in-the-monitoring-of-plastic-waste.php)

<sup>2</sup>Schmidt, C. et al. A multidisciplinary perspective on the role of plastic pollution in the triple planetary crisis. Environment International 193, 109059 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109059>

<sup>3</sup>United Nations Environment Programme (UNEP) Beat plastic pollution <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution> (accessed: 1 May 2025)



**Figura 1:** Producción global de plástico, acumulación y tendencias futuras

Fuente: PNUMA 2021, adaptado de Jambeck et al. 2018; PlasticsEurope 2019; Geyer 2020. Ilustrado por GRID-Arendal

[https://malaysia.un.org/sites/default/files/2022-02/POLSOLSum\\_1.pdf](https://malaysia.un.org/sites/default/files/2022-02/POLSOLSum_1.pdf)

Solo el 9 % de los residuos se reciclan, el 19 % se incinera, mientras que el resto permanece en el medio ambiente, incluidas las zonas de vertederos y los océanos<sup>4</sup> (Fig. 2).

Porcentaje de métodos de eliminación	En todo el mundo, 2023
Reciclados	9%
Incinerados	19%
Mal gestionados	22%
Enterrados	49%

**Figura 2:** Residuos plásticos anuales por método de eliminación, 2000–2023

Fuente: Our World in Data  
<https://ourworldindata.org/grapher/plastic-fate>

Cada año, alrededor de 11 millones de toneladas de plástico terminan en los océanos del mundo<sup>5</sup>, lo que equivale a más de un camión de basura lleno de plástico vertido al mar cada minuto.

Actualmente, ya se han acumulado en los océanos más de 200 millones de toneladas de residuos plásticos de gran tamaño y 35 540 toneladas de microplásticos<sup>6</sup>.

<sup>4</sup>How Much of the World's Plastic Waste Actually Gets Recycled? <https://www.visualcapitalist.com/how-much-plastic-gets-recycled>

<sup>5</sup>Jenna R. Jambeck et al., Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* 347, 768-771 (2015). <https://doi.org/10.1126/science.1260352>

<sup>6</sup>Eriksen, M. et al. Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. *PLoS ONE* 9, e111913 (2014). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>

La cantidad anual de residuos plásticos liberados al medio ambiente desde fuentes terrestres varía según el método de análisis utilizado.

Según un escenario de “negocios como siempre” (BAU) y en ausencia de medidas eficaces, los residuos plásticos que ingresan a los ecosistemas acuáticos podrían casi triplicarse: de unos 9–14 millones de toneladas por año en 2016 a 23–37 millones de toneladas por año para 2040.

Según otro método de análisis, la cantidad podría casi duplicarse: de 19–23 millones de toneladas por año en 2016 a unas 53 millones de toneladas por año para 2030<sup>7</sup>.

Según las investigaciones, si las tendencias actuales continúan, para 2050 podría haber hasta 12 000 millones de toneladas de plástico<sup>8</sup> en los océanos, una cantidad equivalente al peso total de toda la fauna marina, estimado en unos 10 000 millones de toneladas<sup>9</sup>.

Dependiendo del tipo, el plástico tarda entre 100 y 1000 años en degradarse (Fig. 3). En los océanos, el plástico se degrada mucho más lentamente, y en condiciones de frío y oscuridad como las de las profundidades marinas, la velocidad de degradación se reduce aún más<sup>10</sup>.



<sup>7</sup>United Nations Environment Programme (2021). From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution>

<sup>8</sup>Geyer, R., Jambeck, J. R. & Law, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* 3, e1700782 (2017). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

<sup>9</sup>Irigoién, X. et al. Large mesopelagic fishes biomass and trophic efficiency in the open ocean. *Nat Commun* 5, 3271 (2014). <https://doi.org/10.1038/ncomms4271>

<sup>10</sup>Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

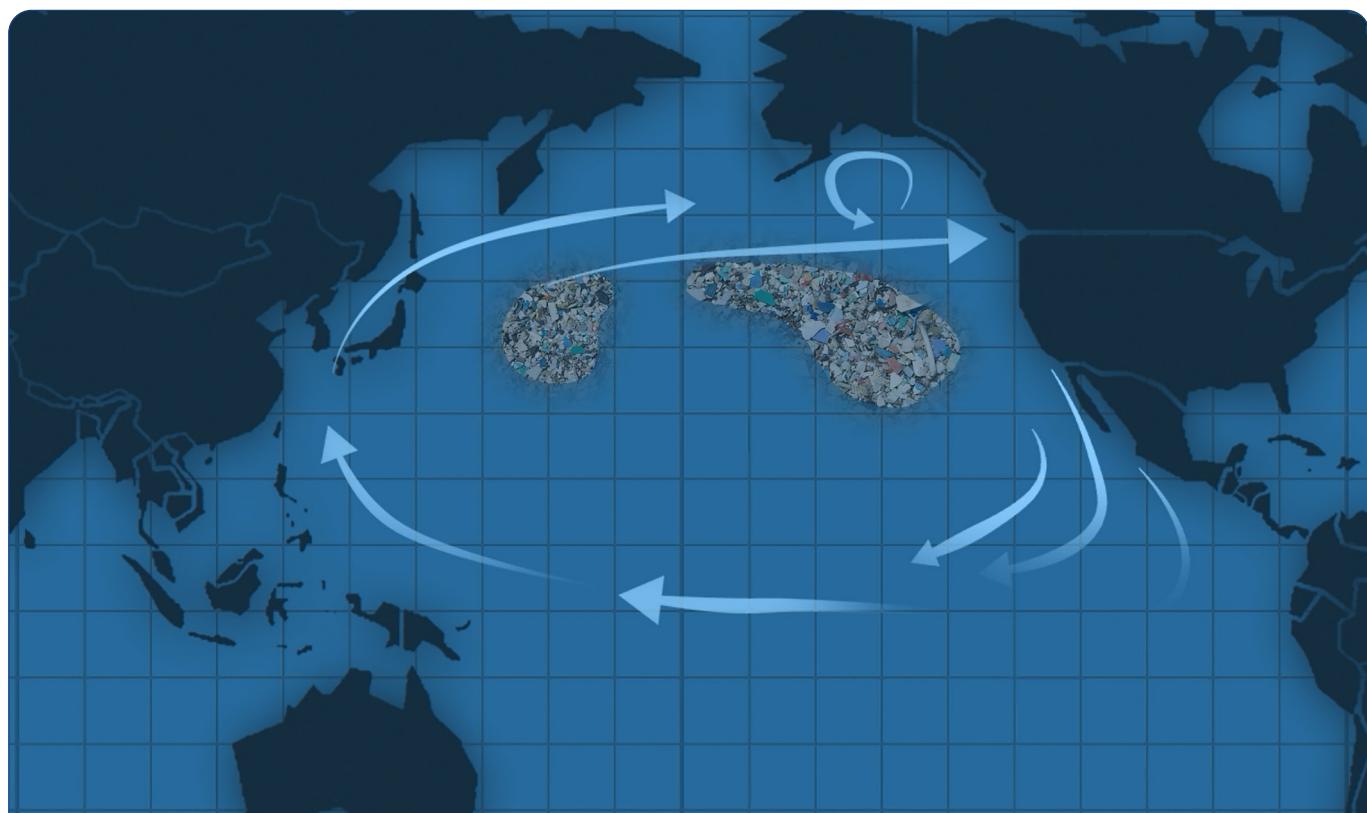
Con excepción de los materiales que han sido incinerados, todos los plásticos convencionales que han terminado en el medio ambiente aún no se han degradado, permaneciendo en forma de objetos enteros o fragmentos<sup>11</sup>. Estos residuos prácticamente no desaparecen, sino que continúan acumulándose.

Esta situación puede compararse con un contenedor de basura al que constantemente se le agregan desechos, pero que nunca se vacía. Plantearse qué ocurriría con ese contenedor tras un mes ofrece una idea clara de la magnitud del problema del acumulamiento de residuos plásticos a nivel global.

## La gran mancha de basura del Pacífico

Los residuos plásticos presentes en la columna de agua y en la superficie del océano son arrastrados por las corrientes oceánicas y transportados hacia las regiones centrales del océano, donde forman enormes acumulaciones, comúnmente conocidas como “islas de plástico”.

“La gran mancha de basura del Pacífico” representa la mayor concentración de plástico del planeta y sigue creciendo constantemente (Fig. 4). Esta acumulación se extiende sobre una vasta área entre América del Norte y Japón. Las observaciones indican que en 2018 su superficie se estimaba de aproximadamente 1,6 millones de kilómetros cuadrados<sup>12</sup>, aunque esta medida puede variar.



**Figura 4:** Esquema del proceso de formación de una acumulación de residuos en el Pacífico

<sup>11</sup>Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

<sup>12</sup>Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Sci Rep* 8, 4666 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>

Los estudios muestran que hasta el 80 %<sup>13</sup> de la masa de las manchas de residuos está compuesta por plástico<sup>14</sup>. La mancha contiene al menos 80 000 toneladas de desechos<sup>15</sup>, pero esta es solo la parte visible del problema. Hasta el 94 % del plástico que entra en el océano se deposita en el fondo marino<sup>16</sup>, donde se acumula permaneciendo oculto.

El volumen exacto de la gran mancha de basura del Pacífico sigue siendo desconocido, ya que el vórtice subtropical del Pacífico Norte es demasiado extenso para ser estudiado completamente con las tecnologías actuales.

## Dinámica de la acumulación de plástico en los océanos

Las mediciones instrumentales muestran un aumento exponencial del volumen de la gran mancha de basura del Pacífico. Entre 2015 y 2022, la masa media de residuos plásticos en esta zona se multiplicó por cinco<sup>17</sup>.

Particularmente preocupante es el hecho de que la cantidad de pequeños fragmentos de plástico se ha multiplicado por diez en el mismo período, lo que indica un proceso intensivo de fragmentación de objetos plásticos grandes.

La gran mancha de basura en realidad forma el séptimo “continente” de nuestro planeta. Sin embargo, es importante subrayar que no se trata de un fenómeno aislado. Actualmente, la comunidad científica ha identificado 5 grandes acumulaciones de residuos en los océanos del mundo<sup>18</sup>: dos en el océano Atlántico, dos en el Pacífico y una en el océano Índico<sup>19</sup> (Fig. 5).

<sup>13</sup>Derraik, J. G. B. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Marine Pollution Bulletin* 44, 842–852 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5)

<sup>14</sup>Morishige, C., Donohue, M. J., Flint, E., Swenson, C. & Woolaway, C. Factors affecting marine debris deposition at French Frigate Shoals, Northwestern Hawaiian Islands Marine National Monument, 1990–2006. *Marine Pollution Bulletin* 54, 1162–1169 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.04.014>

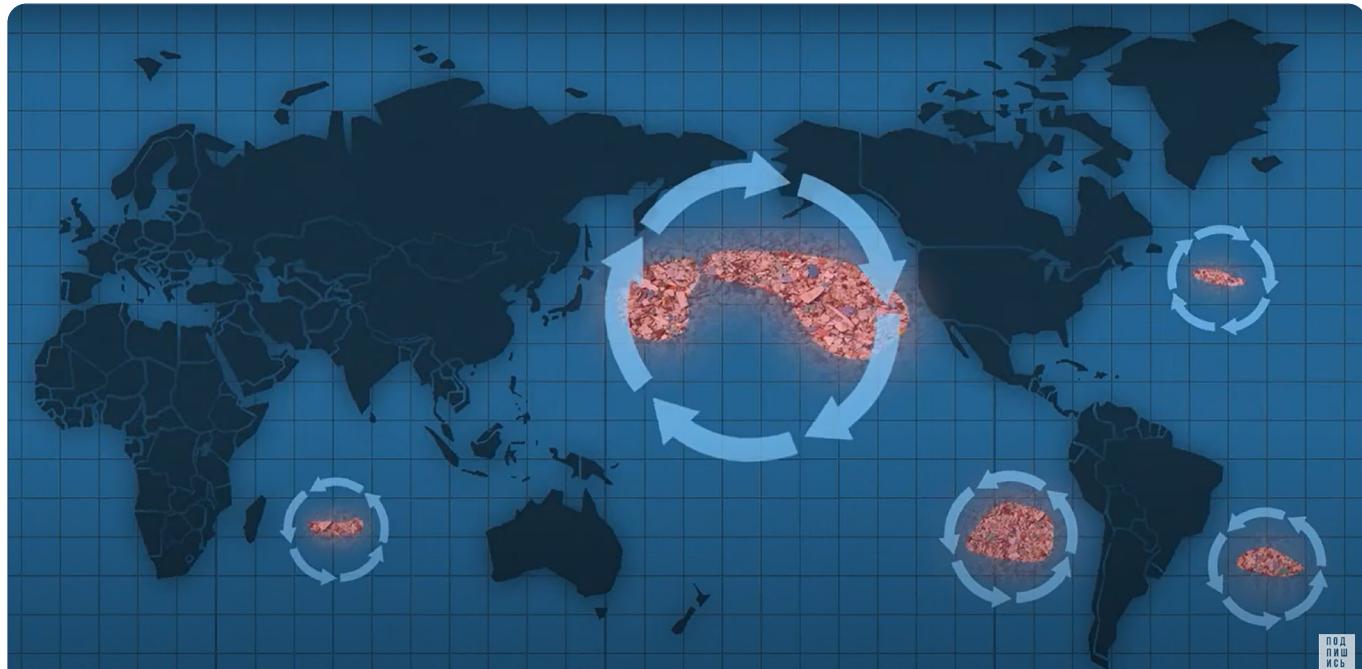
<sup>15</sup>Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Sci Rep* 8, 4666 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>

<sup>16</sup>Eunomia. Plastics in the Marine Environment. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment>

<sup>17</sup>Lebreton, L. et al. Seven years into the North Pacific garbage patch: legacy plastic fragments rising disproportionately faster than larger floating objects. *Environ. Res. Lett.* 19, 124054 (2024). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad78ed>

<sup>18</sup>Van Sebille, E., England, M. H. & Froyland, G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environ. Res. Lett.* 7, 044040 (2012). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044040>

<sup>19</sup>Garbage Patches. Marine Debris Program. NOAA <https://marinedebris.noaa.gov/discover-marine-debris/garbage-patches>



**Figura 5:** Representación esquemática de las cinco principales acumulaciones de residuos en los océanos del mundo: existen dos en el océano Atlántico, dos en el Pacífico y una en el océano Índico. En los océanos circulan millones de toneladas de plástico y otros residuos de origen humano. Las manchas de residuos están creciendo a un ritmo catastrófico.

## Procesos de formación de micro y nanopartículas de plástico

Los residuos plásticos son extremadamente resistentes a la biodegradación, pero bajo el efecto de las olas, el agua salada y la radiación solar, se fragmentan en partículas más pequeñas: micro y nanoplásticos<sup>20</sup>, a menudo invisibles al ojo humano.

Estas partículas conservan su estructura polimérica<sup>21</sup>, y el proceso de fragmentación continúa hasta el nivel nano (Fig. 6,7). Como resultado, al superar los mecanismos naturales de degradación, los residuos plásticos se convierten en componentes permanentes del ecosistema del planeta.

Además, los micro y nanoplásticos contienen sustancias químicas peligrosas añadidas durante el proceso de fabricación del plástico.

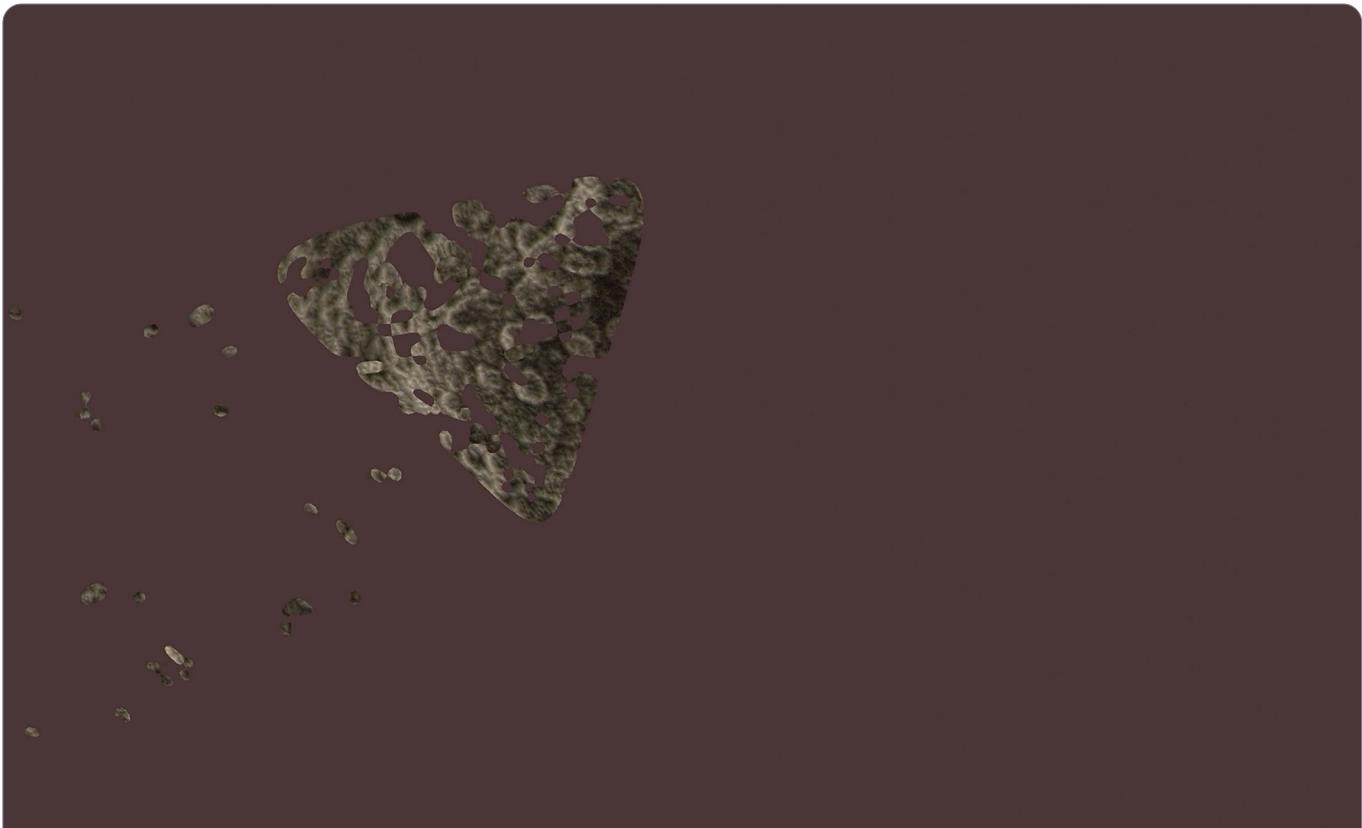
66

*“El plástico contiene aproximadamente 16 000 sustancias químicas. De ellas, más de 4200 son conocidas por ser persistentes en el medio ambiente, bioacumulables, transportables a largas distancias o potencialmente peligrosas”,* afirma la profesora Annika Jahnke, autora y química ambiental del Centro Helmholtz para la Investigación Ambiental (UFZ)<sup>22</sup>.

<sup>20</sup>Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. *Sustainability* 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

<sup>21</sup>Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

<sup>22</sup>Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ. Environmental Impacts of Plastics: Moving beyond the perspective on waste. [https://www.ufz.de/index.php?en=36336&webc\\_pm=44/2024](https://www.ufz.de/index.php?en=36336&webc_pm=44/2024)



**Figura 6:** Proceso de fragmentación de partículas plásticas hasta el nivel nanométrico con conservación de la estructura polimérica.

**(a)**

A transmission electron micrograph (TEM) showing a single, dark, irregularly shaped nanoplastic particle against a lighter, textured background. The particle has a complex, porous internal structure, characteristic of fragmented polyethylene. In the bottom left corner, the text "100nm" is written in red, accompanied by a horizontal red scale bar.

**Figura 7:** Microscopía electrónica de transmisión de nanoplasticos de polietileno, relevantes para el medio ambiente y degradados por radiación UV, provenientes de microplásticos envejecidos muestreados en el Océano Atlántico Norte.

Fuente: Gigault, J. et al. Current opinion: What is a nanoplastic? Environmental Pollution 235, 1030–1034 (2018).  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024>

## Difusión de micro y nanoplásticos en los océanos

La mayor concentración de plástico se observa en las zonas de acumulación de residuos. Estos vertederos oceánicos funcionan como verdaderas plantas industriales, donde se produce de forma continua la formación de micro y nanoplásticos.

Al igual que un virus que se propaga por el organismo a través del torrente sanguíneo, los microplásticos son transportados por las corrientes oceánicas a todos los océanos del mundo, lo que pone de manifiesto la dimensión planetaria del problema.

A pesar de las dificultades técnicas para detectar los microplásticos —lo que dificulta estimar con precisión la cantidad presente en los océanos—, los modelos teóricos permiten evaluar la magnitud del fenómeno.

Los microplásticos se han detectado en casi todas las muestras de agua oceánica, con concentraciones que en algunas regiones superan decenas de veces el promedio global.

Los giros oceánicos favorecen la difusión global de los microplásticos, alcanzando incluso regiones remotas como el Ártico. Estudios realizados en núcleos de hielo han mostrado que el nivel de contaminación por microplásticos en el Océano Ártico es 100 veces superior al registrado en las aguas al norte de Escocia o en el giro subtropical del Pacífico Norte<sup>23</sup>. Esto resalta la magnitud y el carácter transfronterizo del problema.

La mayoría de los estudios globales sobre la contaminación plástica se centran en la capa superficial del océano. Según estimaciones, en 2019 la capa superficial contenía entre 82 y 358 billones de partículas de plástico<sup>24</sup>.

Sin embargo, hay cada vez más pruebas de que en las profundidades oceánicas y en los sedimentos del fondo se están acumulando incontables billones de microplásticos<sup>25</sup>.

El plástico ligero tiende a flotar, mientras que el más denso o el colonizado por organismos marinos se hunde hasta el fondo<sup>26</sup>. Se estima que alrededor del 50 % del plástico proveniente de residuos urbanos tiene una densidad superior a la del agua marina, lo que favorece su rápida sedimentación. Una vez en el fondo, el plástico es transportado por corrientes profundas y se acumula en fosas y depresiones oceánicas.

Se han encontrado microplásticos incluso en el punto más profundo del océano: el lecho de la Fosa de las Marianas<sup>27</sup> (Fig. 8,9).

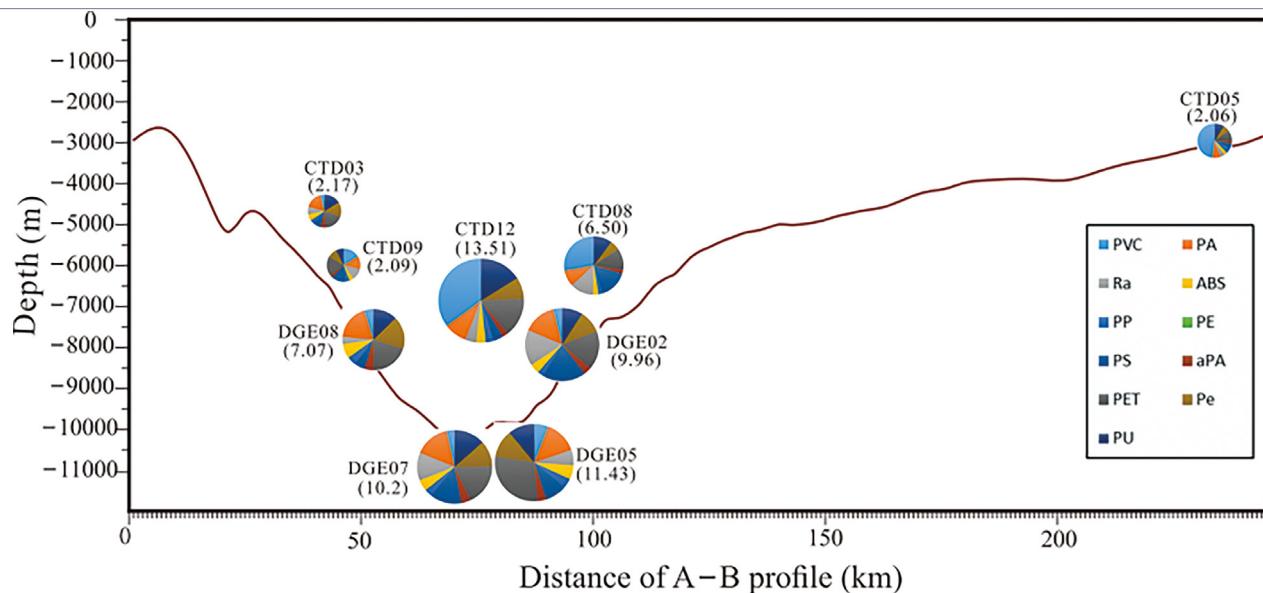
<sup>23</sup>Obbard, R. W. et al. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. *Earth's Future* 2, 315–320 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014EF000240>

<sup>24</sup>Eriksen, M. et al. A growing plastic smog, now estimated to be over 170 trillion plastic particles afloat in the world's oceans—Urgent solutions required. *PLoS ONE* 18, e0281596 (2023). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281596>

<sup>25</sup>Eunomia. Plastics in the Marine Environment. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment>

<sup>26</sup>Lusher, A. (2015). Microplastics in the Marine Environment: Distribution, Interactions and Effects. In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (eds) *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_10)

<sup>27</sup>Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

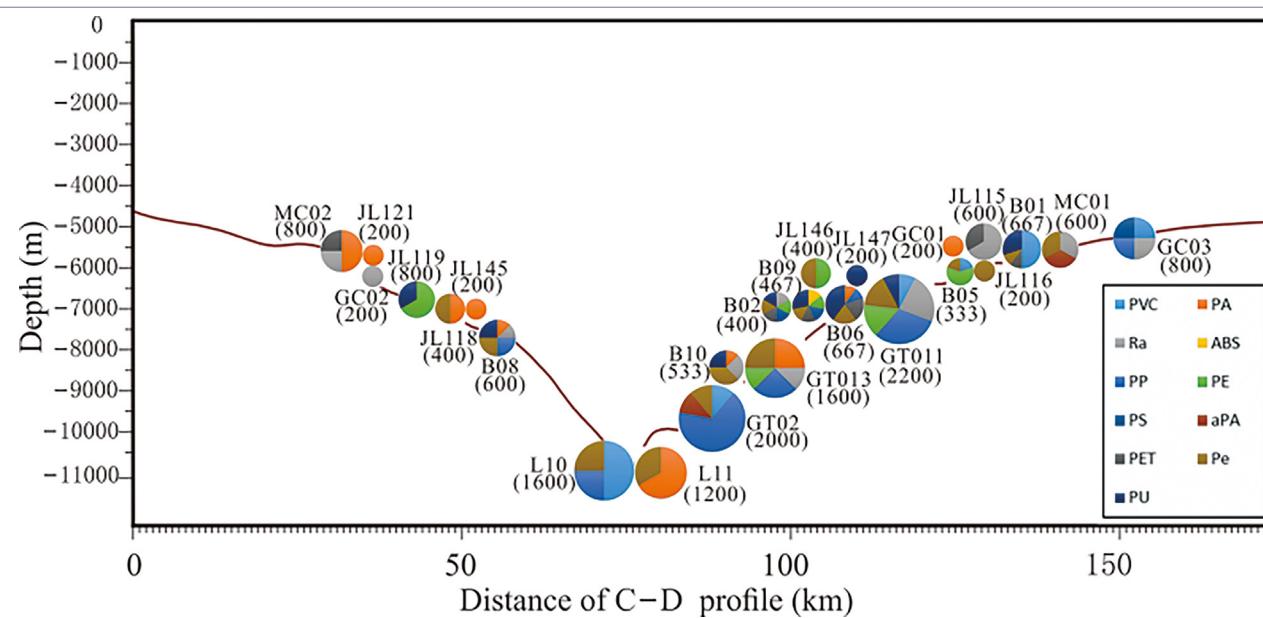


**Figura 8:** Perfil de la distribución y composición de los microplásticos en las muestras de agua de la Fosa de las Marianas. Los gráficos circulares representan la composición de los microplásticos, mientras que los números entre paréntesis indican su distribución en unidades de partículas por litro.

PVC (cloruro de polivinilo), PA (poliamida), Ra (viscosa), ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno), PP (polipropileno), PE (polietileno), PS (poliestireno), aPA (poliamida aromática), PET (polietilentereftalato), PES (poliéster), PU (poliuretano).

El eje X corresponde a la línea transversal que va desde el punto A ( $12^{\circ}$  N,  $142,5^{\circ}$  E) hasta el punto B ( $9,8^{\circ}$  N,  $141,43^{\circ}$  E).

Fuente: Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>



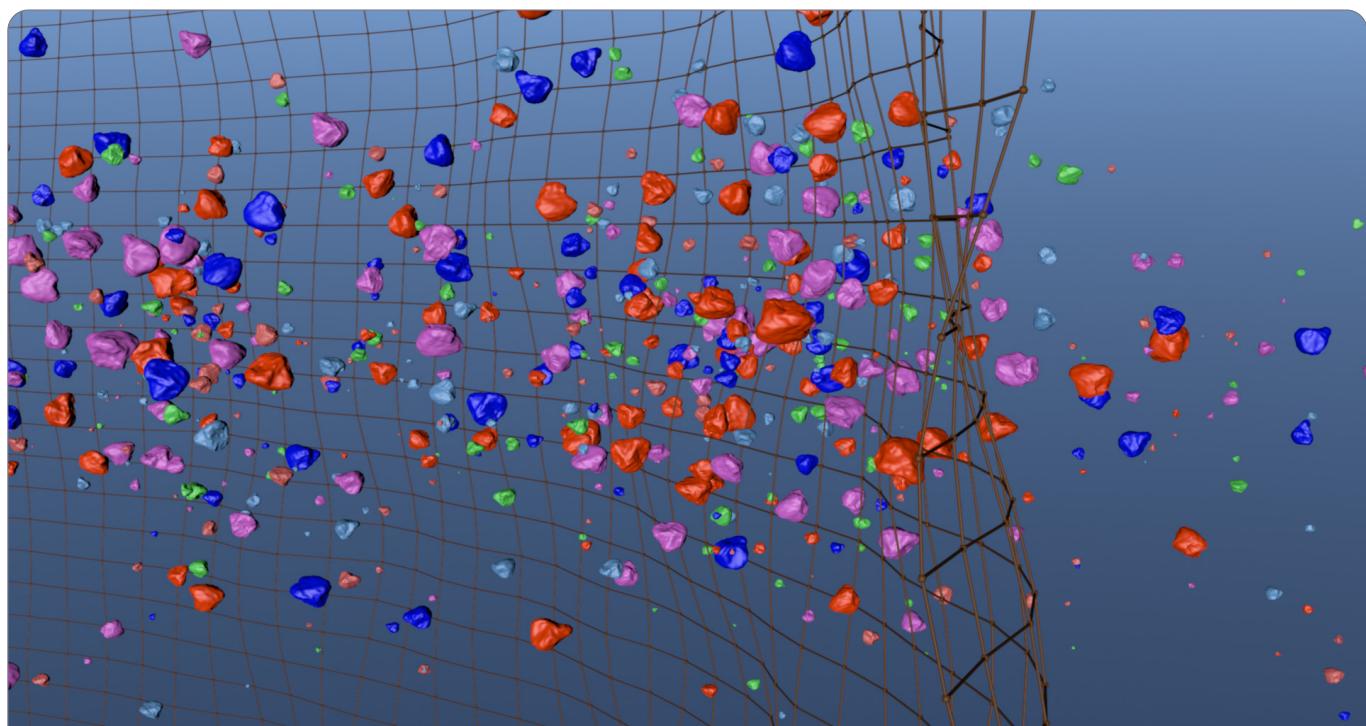
**Figura 9:** Perfil de la distribución y composición de microplásticos en las muestras de agua de la Fosa de las Marianas. Los gráficos circulares representan la composición de los microplásticos, mientras que los números entre paréntesis indican su distribución en unidades de partículas por litro.

PVC (cloruro de polivinilo), PA (poliamida), Ra (viscosa), ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno), PP (polipropileno), PE (polietileno), PS (poliestireno), aPA (poliamida aromática), PET (polietilentereftalato), PES (poliéster), PU (poliuretano).

El eje X corresponde a la línea transversal desde el punto C ( $12^{\circ}$  N,  $142,5^{\circ}$  E) hasta el punto B ( $9,8^{\circ}$  N,  $141,43^{\circ}$  E).

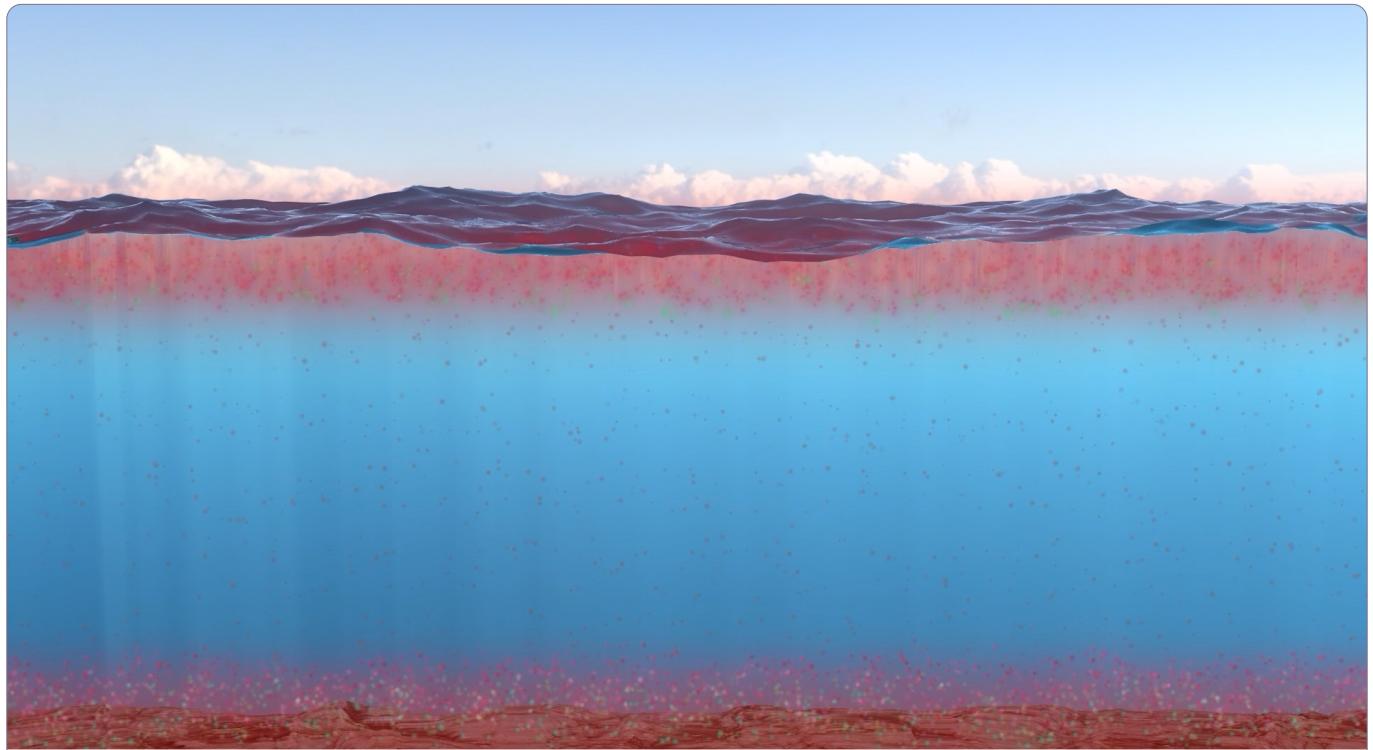
Fuente: Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

En realidad, el principal lugar de acumulación de microplásticos no es la superficie del océano, sino el fondo marino profundo. Progresivamente, todo el fondo oceánico se está cubriendo con una capa de plástico. Sin embargo, los datos sobre la contaminación por microplásticos en los océanos probablemente están subestimados, y la situación real podría ser mucho más grave. Como observa Melanie Bergmann, bióloga del Instituto Alfred Wegener en Alemania: ***"No todos tienen acceso a los instrumentos complejos y costosos necesarios para el muestreo"***. Según sus estimaciones, hasta el 90 % de las partículas de microplástico marinas podrían pasar desapercibidas con los métodos estándar de muestreo, ya que son demasiado pequeñas para ser detectadas<sup>28</sup> (Fig. 10).

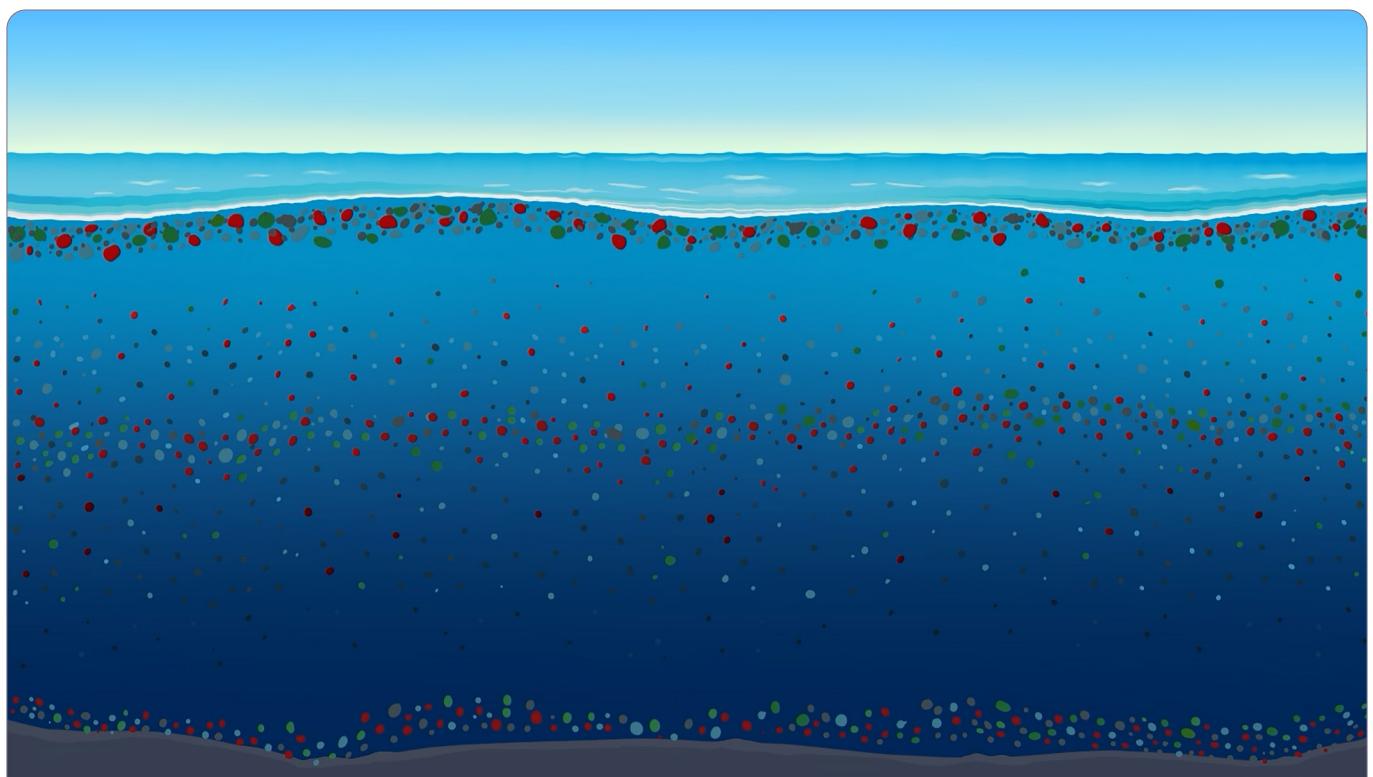


**Figura 10:** Representación esquemática de los métodos analíticos imperfectos para la detección de micro y nanoplasticos.

<sup>28</sup>Microplastics pose risk to ocean plankton, climate, other key Earth systems. Mongabay. <https://news.mongabay.com/2023/10/microplastics-pose-risk-to-ocean-plankton-climate-other-key-earth-systems>



**Figura 11:** Esquema de las capas superficiales y de fondo de la contaminación por micro y nanoplásticos.



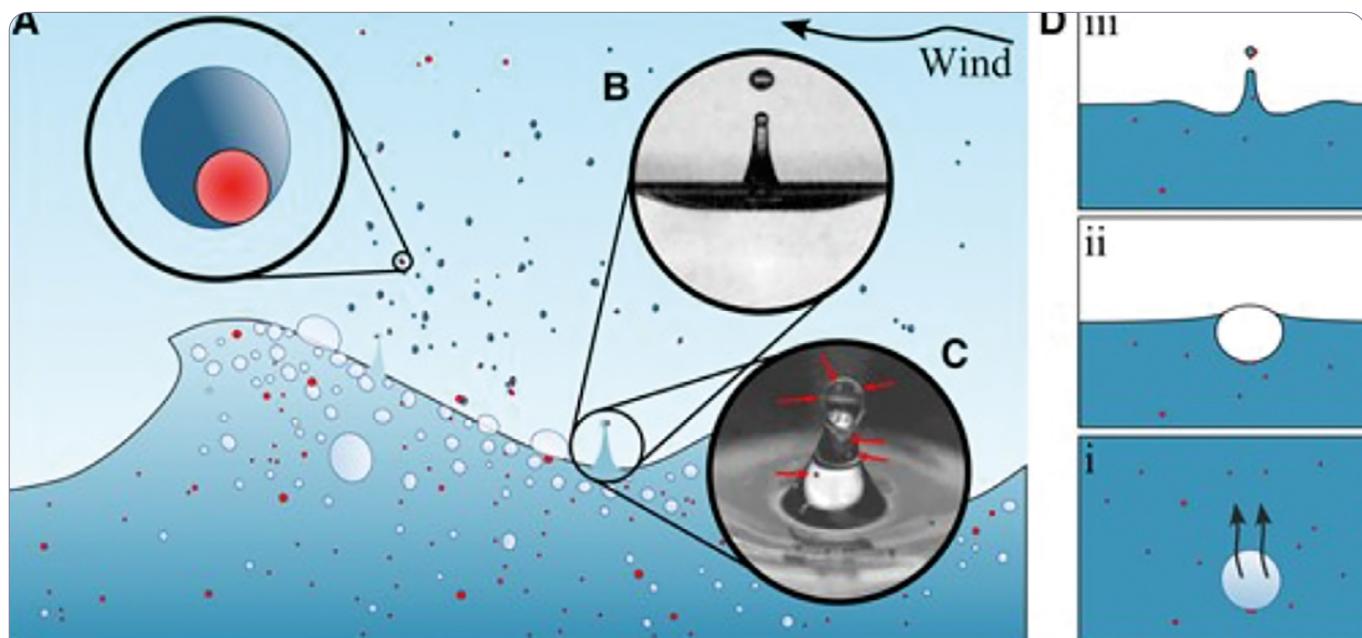
**Figura 12:** Representación esquemática de los métodos analíticos imperfectos para la detección de micro y nanopartículas plásticas.

Además de la contaminación de las capas superficiales y del fondo (Fig. 11), la concentración de micro y nanoplásticos aumenta significativamente en la zona del termoclino<sup>29</sup> (Fig. 12), la capa de agua donde se produce un brusco cambio de temperatura. El alto gradiente de densidad en esta capa hace que las partículas de micro y nanoplásticos queden atrapadas durante largos períodos de tiempo.

El océano puede imaginarse como una torta de capas, donde cada capa tiene una temperatura y densidad únicas, y los microplásticos tienden a acumularse en los límites de estas capas.

Además, los microplásticos también se difunden en los océanos a través de los organismos vivos, que los ingieren, digieren y excretan<sup>30</sup>.

## Difusión de los MNP en el medio ambiente



**Figura 13:** Ilustración de los procesos relacionados con la emisión de microplásticos desde el océano.

A) Los microplásticos (rojo/color más oscuro) presentes en el océano son transportados a la atmósfera a través de gotas de agua marina. B) Las burbujas que estallan generan pequeñas gotas o aerosoles, como las gotas de chorro. C) Los microplásticos presentes en el líquido pueden incorporarse a las gotas de chorro que se forman. Las flechas indican partículas de microplásticos de 100 µm. Las gotas generadas pueden ser transportadas por el viento, liberando material de microplásticos en la atmósfera. El líquido finalmente se evapora, dejando las partículas de microplásticos. D) Los procesos físicos asociados con la emisión de microplásticos a través del estallido de burbujas comienzan con la limpieza de las partículas mientras la burbuja asciende (D*i*). Una vez que alcanza la superficie (D*ii*), la burbuja adopta una forma de equilibrio que, al estallar, concentra las ondas capilares en la base, formando gotas de chorro (D*iii*) que transportan los microplásticos.

Fuente: Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic. PNAS Nexus, 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

<sup>29</sup>Tikhonova, D. A., Karetnikov, S. G., Ivanova, E. V. & Shalunova, E. P. The Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column of Lake Ladoga. *Water Resour* 51, 146–153 (2024). <https://doi.org/10.1134/S009780782370063X>

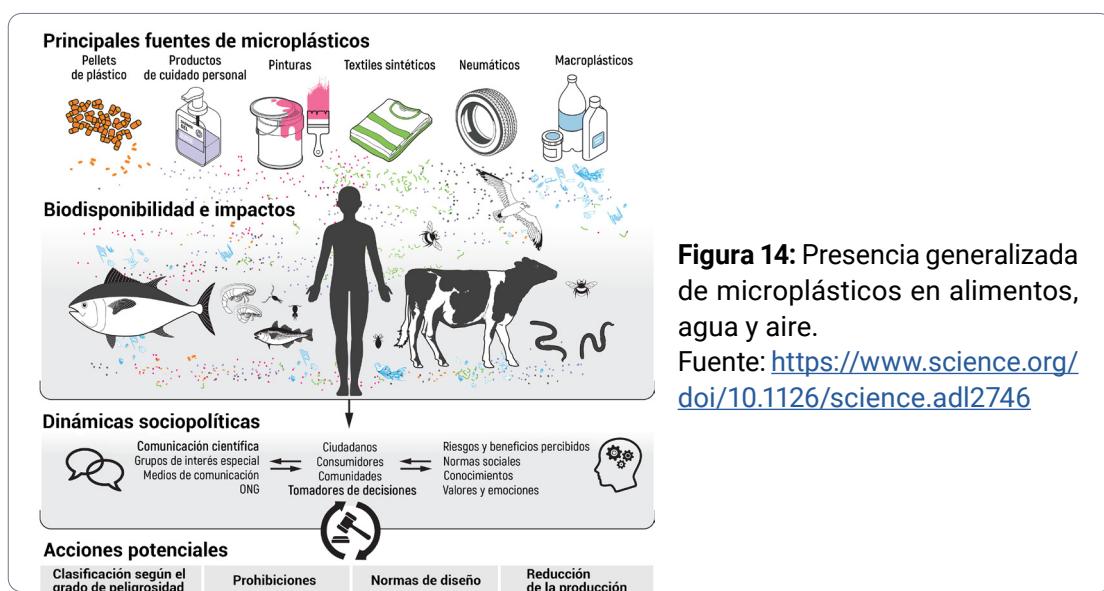
<sup>30</sup>Dawson, A. L. et al. Turning microplastics into nanoplastics through digestive fragmentation by Antarctic krill. *Nat Commun* 9, 1001 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03465-9>

Cuando el agua se evapora<sup>31</sup>, los microplásticos ascienden a la atmósfera desde la superficie del océano<sup>32</sup>. Además, la combinación de salpicaduras del mar, viento y olas genera burbujas de aire en el agua, que pueden contener microplásticos. Cuando estas burbujas estallan, las partículas son liberadas en la atmósfera (Fig. 13). Cada año, aproximadamente 136 000 toneladas de microplásticos<sup>33</sup> son transportadas solo a las costas por los vientos marinos. Hasta 25 millones de toneladas métricas de micro y nanoplasticos al año pueden viajar miles de kilómetros a través del aire marino, las salpicaduras, la nieve y la niebla, atravesando países, continentes y océanos.

66

*“El aire es un medio mucho más dinámico que el agua”, afirma la coautora, la Dra. Melanie Bergmann del AWI. “Como resultado, los micro y nanoplasticos pueden penetrar mucho más rápidamente en aquellas regiones de nuestro planeta que son más remotas y hasta ahora en gran parte intactas”. Una vez que llegan a estos lugares, las partículas pueden influir en el clima superficial y la salud de los ecosistemas locales<sup>34</sup>.*

Los microplásticos se han encontrado en todos los entornos: desde la superficie del mar hasta los sedimentos profundos, desde campos agrícolas hasta las cumbres montañosas más altas, además de en el hielo marino, lagos y ríos. Han sido detectados en más de 1300 especies acuáticas y terrestres, desde invertebrados en la base de la cadena alimentaria hasta grandes depredadores, con evidencias de efectos en todos los niveles de la organización biológica, desde el celular hasta el ecosistémico. Los microplásticos están ampliamente distribuidos en los alimentos que comemos, el agua que bebemos y el aire que respiramos (Fig. 14). Han sido encontrados en numerosos tejidos y órganos del cuerpo humano, y están surgiendo pruebas de su potencial impacto<sup>35</sup>.



**Figura 14:** Presencia generalizada de microplásticos en alimentos, agua y aire.

Fuente: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adl2746>

<sup>31</sup>Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic. PNAS Nexus 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

<sup>32</sup>Deike, L., Reichl, B. G. & Paulot, F. A Mechanistic Sea Spray Generation Function Based on the Sea State and the Physics of Bubble Bursting. AGU Advances 3, e2022AV000750 (2022). <https://doi.org/10.1029/2022AV000750>

<sup>33</sup>Allen, S. et al. Examination of the ocean as a source for atmospheric microplastics. PLoS ONE 15, e0232746 (2020). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232746>

<sup>34</sup>Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research. Micro- and nanoplastic from the atmosphere is polluting the ocean. <https://www.awi.de/en/about-us/service/press/single-view/mikro-und-nanoplastik-aus-der-atmosphaere-belastet-meere.html>

<sup>35</sup>Thompson, R. C. et al. Twenty years of microplastic pollution research—what have we learned? Science 386, eadl2746 (2024). <https://doi.org/10.1126/science.adl2746>

Como resultado, el desplazamiento hacia regiones remotas e incluso polares puede estar determinado por una combinación de transporte atmosférico y marino. Por lo tanto, es fundamental comprender la interacción entre la atmósfera y el océano para determinar qué tamaños de partículas se transportan y en qué cantidades.

Por ejemplo, un grupo reciente de investigadores descubrió gránulos de plástico con superficies hidrófilas (que atraen el agua) en las nubes sobre las cimas montañosas de Japón<sup>36</sup>. Al analizar las muestras, concluyeron que las nubes de baja altitud y más densas contienen una mayor cantidad de microplásticos. La presencia de polímeros como núcleos de condensación juega un papel clave en la rápida formación de nubes, influenciando potencialmente el clima global<sup>36</sup>.

Las partículas de plástico presentes en las nubes contribuyen a retener una mayor cantidad de agua, retrasando la precipitación. Cuando finalmente empieza a llover, la lluvia es más intensa, ya que en las nubes ha tenido tiempo de acumularse una mayor cantidad de agua. Además, los microplásticos expuestas a la luz ultravioleta y al agua filtrada por las nubes presentan una superficie más rugosa, lo que favorece la adhesión de plomo, mercurio y grupos que contienen oxígeno<sup>37</sup>.

La atmósfera transporta principalmente pequeñas partículas de microplásticos, lo que la convierte en una vía de transporte mucho más rápida que puede causar depósitos significativos en una amplia gama de ecosistemas. Los datos de las investigaciones indican que los bosques actúan como barreras contra los microplásticos transportados por el viento. Hojas, ramas y troncos retienen los microplásticos, que se depositan en sus superficies.

Esto hace que las micropartículas de plástico transportadas por el viento y las precipitaciones permanezcan en las plantas o se acumulen en el suelo. La escasa ventilación bajo una densa cubierta forestal favorece la acumulación persistente de estas partículas dentro de los bosques. Las hojas de la copa forestal funcionan como un reservorio a largo plazo para los microplásticos presentes en el aire<sup>38</sup>. Las investigaciones han mostrado que, entre el otoño de 2017 y el verano de 2019, en 11 parques naturales y reservas del oeste de los Estados Unidos, cayeron con las precipitaciones más de 1000 toneladas de partículas de plástico, una cantidad suficiente para producir 120 millones de botellas de plástico<sup>39</sup>. Una situación similar se ha observado en otras partes del mundo. Por ejemplo, los bosques de *Quercus serrata* en Japón, que cubren un área de aproximadamente 32,500 km<sup>2</sup>, capturan cada año alrededor de 420 billones de partículas de microplástico transportadas por el aire en sus copas<sup>40</sup>.

<sup>36</sup>Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

<sup>37</sup>Busse, H. L., Ariyasena, D. D., Orris, J. & Freedman, M. A. Pristine and Aged Microplastics Can Nucleate Ice through Immersion Freezing. *ACS EST Air* 1, 1579–1588 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsestaair.4c00146>

<sup>38</sup>Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y. et al. Alkaline extraction yields a higher number of microplastics in forest canopy leaves: implication for microplastic storage. *Environ Chem Lett* 22, 1599–1606 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01725-3>

<sup>39</sup>Brahney, J., Hallerud, M., Heim, E., Hahnberger, M. & Sukumaran, S. Plastic rain in protected areas of the United States. *Science* 368, 1257–1260 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aaz5819>

<sup>40</sup>Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y. & Miyazaki, A. Alkaline extraction yields a higher number of microplastics in forest canopy leaves: implication for microplastic storage. *Environ Chem Lett* 22, 1599–1606 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01725-3>

A diferencia de lo que ocurre en los bosques, en las ciudades — gracias a la buena ventilación y a la presencia de partículas en suspensión más pesadas, procedentes de los gases de escape de los automóviles y de las emisiones industriales — una parte de los micro y nanoplásticos se deposita. Hoy en día, el aire en los bosques es más rico en nanoplásticos que el de las metrópolis.

¡El mundo ha cambiado! Y ahora, cuando las personas se bañan en el océano, toman el sol en la playa, corren a lo largo de la costa o en el parque, o pasean por los bosques para mejorar su salud, en realidad están exponiendo su cuerpo a una dosis adicional de microplásticos.

Microplásticos provenientes de África y América del Norte han sido encontrados incluso en lugares remotos y aparentemente prístinos, como los Pirineos franceses. Esto demuestra la difusión global de los microplásticos, que pueden ser transportados por los vientos y las precipitaciones a lo largo de miles de kilómetros.

Los micro y nanoplásticos llegan a los cuerpos de agua urbanos a través de los desagües pluviales, las emisiones industriales y el agua de lluvia, que captura las partículas presentes en la atmósfera. Por ejemplo, un solo lavado de tejidos sintéticos en las aguas residuales puede liberar hasta 1,5 millones de partículas de microplástico<sup>41</sup>. Una vez en las aguas residuales, estas partículas son transportadas a los ríos y océanos, donde son ingeridas por peces y otros organismos acuáticos. Al analizar los desechos encontrados en los ríos y los paisajes circundantes, los investigadores estimaron que solo 10 sistemas fluviales son responsables del 88–95 % del plástico que llega al océano desde los ríos<sup>42</sup>.

En otro estudio, los científicos revisaron las suposiciones comunes sobre el transporte de plásticos en los ríos y concluyeron que la cantidad real de desechos plásticos en los cursos de agua podría ser hasta un 90 % superior a las estimaciones anteriores<sup>43</sup>.

El plástico también está presente en la mayoría de los grandes lagos del mundo. La densidad de desechos plásticos en los lagos puede incluso superar la de las mayores islas de plástico en los océanos, y los lagos ubicados en áreas prístinas contienen una cantidad significativa de desechos. Esta realidad fue confirmada por un amplio estudio internacional liderado por Barbara Leoni y Veronica Nava de la Universidad de Milano-Bicocca<sup>44</sup>.

Según el informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) de 2021, se han encontrado microplásticos en todos los cuerpos de agua dulce analizados, incluidos ríos, lagos y embalses<sup>45</sup>. Por ejemplo, los investigadores descubrieron que casi 10 000 toneladas métricas —equivalentes a 22 millones de libras— de desechos plásticos ingresan cada año a los Grandes Lagos desde Estados Unidos y Canadá<sup>46</sup>.

<sup>41</sup>De Falco, F., Di Pace, E., Cocca, M. & Avella, M. The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. *Sci Rep* 9, 6633 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43023-x>

<sup>42</sup>Schmidt, C., Krauth, T. & Wagner, S. Export of Plastic Debris by Rivers into the Sea. *Environ. Sci. Technol.* 51, 12246–12253 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02368>

<sup>43</sup>Valero, D., Belya, B. S., Moreno-Rodenas, A., Kramer, M. & Franca, M. J. The key role of surface tension in the transport and quantification of plastic pollution in rivers. *Water Research* 226, 119078 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119078>

<sup>44</sup>Nava, V., Chandra, S., Aherne, J. et al. Plastic debris in lakes and reservoirs. *Nature* 619, 317–322 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06168-4>

<sup>45</sup>United Nations Environment Programme. Monitoring Plastics in Rivers and Lakes: Guidelines for the Harmonization of Methodologies. (2020) <https://www.unep.org/resources/report/monitoring-plastics-rivers-and-lakes-guidelines-harmonization-methodologies>

<sup>46</sup>Hoffman, M. J. & Hittinger, E. Inventory and transport of plastic debris in the Laurentian Great Lakes. *Marine Pollution Bulletin* 115, 273–281 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.061>

Al final, los microplásticos regresan al ser humano en forma de pescado o mariscos.

Científicos italianos descubrieron que incluso frutas y verduras contienen millones de partículas de microplástico. Se detectó una mayor concentración de estas partículas en manzanas, peras, zanahorias, papas, lechuga y brócoli. En las frutas, la concentración fue de 2 a 3 veces superior a la de las verduras: desde 52 000 partículas por gramo en la lechuga hasta 223 000 en las manzanas<sup>47</sup>.

Según un estudio, el 81 % de las 159 muestras de agua potable recolectadas en todo el mundo contienen microplásticos<sup>48</sup>. Otros estudios confirman estos datos, detectando partículas de microplástico incluso en el agua mineral. Curiosamente, la cantidad de partículas era similar tanto en botellas de vidrio como en las de PET (tereftalato de polietileno), alcanzando hasta 6292 partículas por litro<sup>49, 50, 51</sup>.

Científicos de la Universidad de Newcastle, Australia, realizaron una investigación<sup>52</sup> para estimar cuánto plástico ingiere en promedio una persona moderna. Los resultados mostraron que una persona consume aproximadamente 250 gramos de plástico al año, el equivalente a 50 bolsas de plástico<sup>53</sup>.

---

<sup>47</sup>Oliveri Conti, G. et al. Micro- and nano-plastics in edible fruit and vegetables. The first diet risks assessment for the general population. *Environmental Research* 187, 109677 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109677>

<sup>48</sup>Kosuth, M., Mason, S. A. & Wattenberg, E. V. Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. *PLoS ONE* 13, e0194970 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194970>

<sup>49</sup>Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U. & Fürst, P. Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research* 129, 154–162 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.011>

<sup>50</sup>Oßmann, B. E. et al. Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. *Water Research* 141, 307–316 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027>

<sup>51</sup>Winiarska, E., Jutel, M. & Zemelka-Wiacek, M. The potential impact of nano- and microplastics on human health: Understanding human health risks. *Environmental Research* 251, 118535 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118535>

<sup>52</sup>University of Newcastle. Plastic ingestion by people could be equating to a credit card a week.

<https://www.newcastle.edu.au/newsroom/featured/plastic-ingestion-by-people-could-be-equating-to-a-credit-card-a-week>

<sup>53</sup>Senathirajah, K. et al. Estimation of the mass of microplastics ingested – A pivotal first step towards human health risk assessment. *Journal of Hazardous Materials* 404, 124004 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124004>

# CONSECUENCIAS ECOLÓGICAS Y CLIMÁTICAS DE LA CONTAMINACIÓN POR MICRO Y NANOPLÁSTICOS

## Como los micro y nanoplásticos dañan los ecosistemas a nivel molecular

Los desechos plásticos están presentes en todas partes: desde los océanos y ríos hasta el suelo, el aire e incluso los glaciares<sup>54</sup>.

Observaciones a largo plazo confirman que el plástico, a diferencia de las sustancias vegetales y animales, no experimenta un proceso activo de degradación natural<sup>55</sup>. Persiste en el medio ambiente sin participar en los ciclos naturales de biodegradación. Creado para resistir la descomposición, el plástico se ha convertido en un elemento permanente del ecosistema global. Esta resistencia, inicialmente considerada un éxito tecnológico, ahora está causando graves desequilibrios ecológicos.

En la producción de plásticos se utilizan más de 13 000 sustancias químicas. De estas, más de 3200, incluidos monómeros, aditivos y agentes auxiliares para el procesamiento, son potencialmente peligrosas debido a sus propiedades tóxicas<sup>56</sup>.

## Los microplásticos en el suelo favorecen su degradación

Las investigaciones demuestran que la contaminación por microplásticos en los ecosistemas terrestres, particularmente en suelos agrícolas, puede superar el nivel de contaminación de los ambientes acuáticos de 4 a 23 veces<sup>57</sup>, indicando una acumulación significativa de plástico en el suelo. El plástico se acumula en el terreno a través de varios caminos: plantas de tratamiento de aguas residuales, acolchado agrícola, depósitos atmosféricos y productos de uso cotidiano. El uso generalizado de artículos plásticos de un solo uso está estrechamente ligado a la contaminación severa del suelo por microplásticos (MP) y nanoplásticos (NP). Factores naturales y antropogénicos favorecen<sup>58</sup> la penetración de las partículas de microplástico en el suelo, alterando procesos ecológicos fundamentales<sup>59</sup>.

Las observaciones confirman el impacto dañino de los microplásticos en los ecosistemas, afectando la estructura y las funciones de los microorganismos, las plantas y el suelo (Fig. 15).

<sup>54</sup>Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L. & Zeng, E. Y. A Global Perspective on Microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 125, e2018JC014719 (2020). <https://doi.org/10.1029/2018JC014719>

<sup>55</sup>Huang, S. et al. Plastic Waste Management Strategies and Their Environmental Aspects: A Scientometric Analysis and Comprehensive Review. *IJERPH* 19, 4556 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijerph19084556>

<sup>56</sup>United Nations Environment Programme. Chemicals in Plastics - A Technical Report (2023).

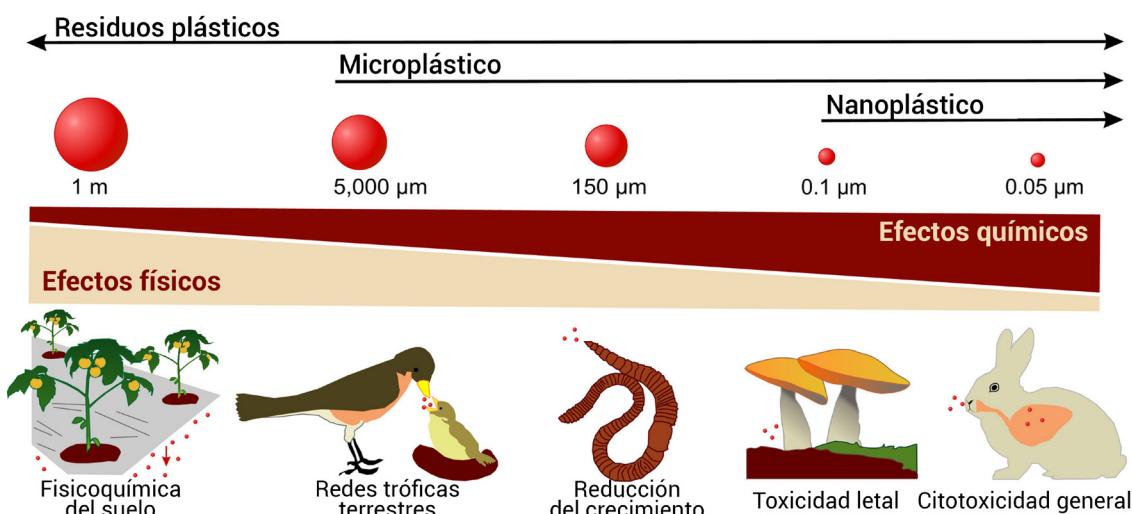
<https://www.unep.org/resources/report/chemicals-plastics-technical-report> (Acceso: 1 de mayo 2025)

<sup>57</sup>Yu, H., Zhang, Y., Tan, W. & Zhang, Z. Microplastics as an Emerging Environmental Pollutant in Agricultural Soils: Effects on Ecosystems and Human Health. *Front. Environ. Sci.* 10, 855292 (2022). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.855292>

<sup>58</sup>Rillig, M. C., Ingraffia, R. & De Souza Machado, A. A. Microplastic Incorporation into Soil in Agroecosystems. *Front. Plant Sci.* 8, 1805 (2017).

<https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805>

<sup>59</sup>Shafea, L. et al. Microplastics in agroecosystems: A review of effects on soil biota and key soil functions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 186, 5–22 (2023). <https://doi.org/10.1002/jpln.202200136>

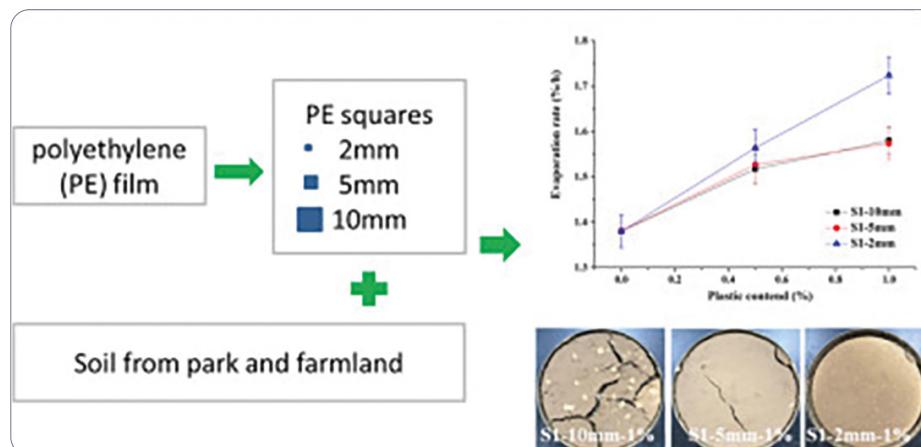


**Figura 15:** Los microplásticos como desencadenantes de efectos físicos y químicos combinados.

La biogeoquímica del suelo se ve influenciada por la presencia de microplásticos, asociada a prácticas como el acolchado agrícola, el consumo por parte de aves terrestres y continentales, la reducción del crecimiento de lombrices, la toxicidad letal para hongos, la inflamación pulmonar en mamíferos y la citotoxicidad generalizada de los nanoplasticos.

Fuente: De Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S. & Rillig, M. C. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology* 24, 1405–1416 (2018). <https://doi.org/10.1111/gcb.14020>

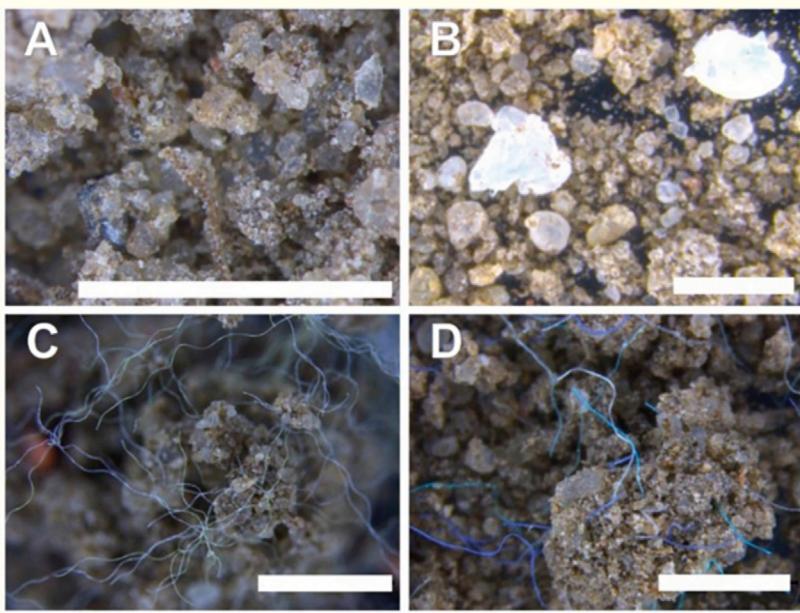
Los resultados de un estudio realizado por la Academia China de Ciencias mostraron que la presencia de una capa de plástico de diferentes tamaños en el suelo aumenta significativamente la velocidad de evaporación del agua. El efecto es particularmente notable con la adición de partículas de 2 mm. Los fragmentos de plástico de mayor tamaño (5–10 mm) causan fisuras en el terreno, comprometiendo su integridad estructural. Estos datos indican que la contaminación por plástico altera el ciclo hídrico en el suelo, con el riesgo de agravar la escasez de agua en el terreno e influir en el transporte vertical de contaminantes<sup>60</sup> (Fig. 16, 17).



**Figura 16:** Compromiso de la integridad estructural del suelo debido a los microplásticos.

Fuente: Wan, Y., Wu, C., Xue, Q. & Hui, X. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Science of The Total Environment* 654, 576–582 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123>

<sup>60</sup>Wan, Y., Wu, C., Xue, Q. & Hui, X. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Science of The Total Environment* 654, 576–582 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123>

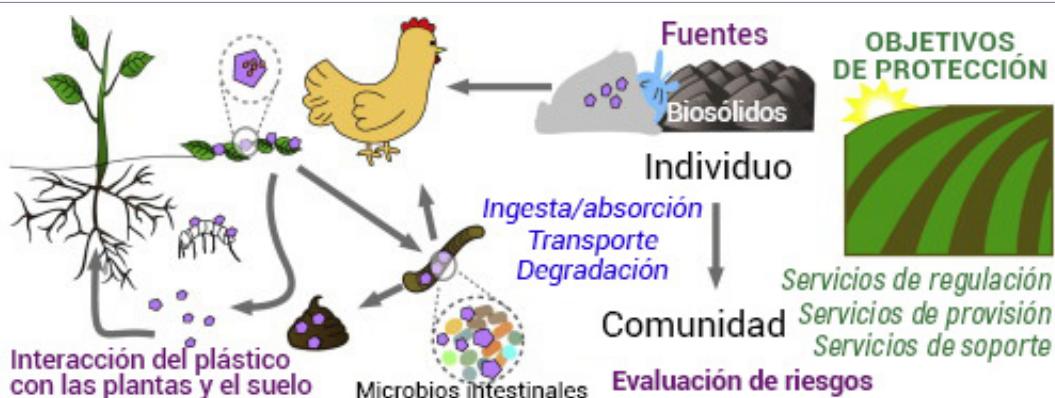


**Figura 17:** Integración de las partículas de microplásticos en el ambiente biofísico del suelo.

La estructura del suelo de control (A) no mostraba diferencias visuales significativas bajo el estereomicroscopio en comparación con el suelo contaminado con esferas de poliamida (SI S1D). Los fragmentos de polietileno (B), las fibras de poliéster (C) y las de poliacrílico (D) causaron, en cambio, modificaciones visualmente distinguibles en la estructura del suelo. La línea blanca en cada panel representa una longitud de 1 mm.

Fuente: De Souza Machado, A. A. et al. Impacts of Microplastics on the Soil Biophysical Environment. Environmental, Environmental Science & Technology, 52, 9656–9665 (2018). <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>

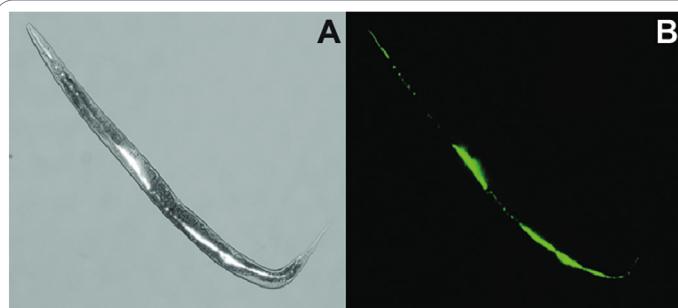
Las investigaciones también confirman el impacto negativo del plástico en la biota del suelo, una comunidad diversa que incluye microorganismos (como bacterias y hongos) y fauna (animales microscópicos y macroscópicos). Estos organismos interactúan entre sí, con las raíces de las plantas y con el entorno circundante, formando cadenas alimenticias del suelo (Fig. 18), esenciales para el ciclo de nutrientes y la salud de las plantas.



**Figura 18:** Representación esquemática del proceso de formación de las cadenas alimenticias del suelo. Fuente: Ng, E.-L. et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. Science of The Total Environment 627, 1377–1388 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>

Diversas especies de la biota terrestre funcionan como bioindicadores de la contaminación por microplásticos. El análisis de todas las muestras detectó la presencia de partículas de microplástico y de elementos potencialmente tóxicos (Sb, As, Fe, Al, Se, Zn) en concentraciones variables, indicando<sup>61</sup> una posible toxicidad asociada a los microplásticos<sup>62</sup>.

Los estudios han demostrado que los gránulos de poliestireno pueden ser absorbidos por el organismo del suelo, el nematodo *Caenorhabditis elegans* (Fig. 19); esto implica también la posibilidad de que estos materiales se acumulen en la cadena alimenticia del suelo<sup>63</sup>.



**Figura 19:** Imágenes en campo claro (A) y en fluorescencia (B) de un ejemplar adulto del gusano *Caenorhabditis elegans* que ha acumulado microesferas fluorescentes amarillo-verdes de 0,5  $\mu\text{m}$  durante 15 minutos a 20 °C. Las fotografías fueron tomadas con un aumento de  $\times 100$ .  
Fuente: <https://journals.biologists.com/jeb/article/215/7/1178/11278/Active-up-take-of-artificial-particles-in-the>

La biota del suelo no es simplemente el "motor biológico de la Tierra", sino un sistema multifuncional del que dependen todos los ecosistemas terrestres. Su papel en el mantenimiento de la vida en el planeta es comparable al de los océanos y la atmósfera, como demuestran los estudios de pedólogos, ecólogos y climatólogos. Por esta razón, cualquier alteración causada por la toxicidad puede comprometer numerosos procesos críticos del suelo e influir en la red alimentaria, provocando un desequilibrio ecológico<sup>64</sup>.

Los datos indican que los microplásticos tienen la capacidad de adsorberse rápidamente en la superficie del suelo debido a su pequeño tamaño, su amplia área superficial específica, su alta hidrofobicidad y su resistencia a la biodegradación<sup>65</sup>. Esto facilita su absorción por parte de los organismos y su acumulación en sus cuerpos, representando una amenaza potencial para la salud humana. Este proceso no se limita a la capa del suelo, sino que se extiende también a las plantas, donde continúa ejerciendo sus efectos nocivos.

## Las partículas de plástico se acumulan en las plantas

Los contaminantes de origen antropogénico pueden tener un impacto significativo en los ecosistemas, especialmente cuando son absorbidos por las plantas.

<sup>61</sup>Ng, E.-L. et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. *Science of The Total Environment* 627, 1377–1388 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>

<sup>62</sup>Al Malki, J. S., Hussien, N. A., Tantawy, E. M., Khattab, Y. & Mohammadein, A. Terrestrial Biota as Bioindicators for Microplastics and Potentially Toxic Elements. *Coatings* 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11011152>

<sup>63</sup>Kiyama, Y., Miyahara, K. & Ohshima, Y. Active uptake of artificial particles in the nematode *Caenorhabditis elegans*. *Journal of Experimental Biology* 215, 1178–1183 (2012). <https://doi.org/10.1242/jeb.067199>

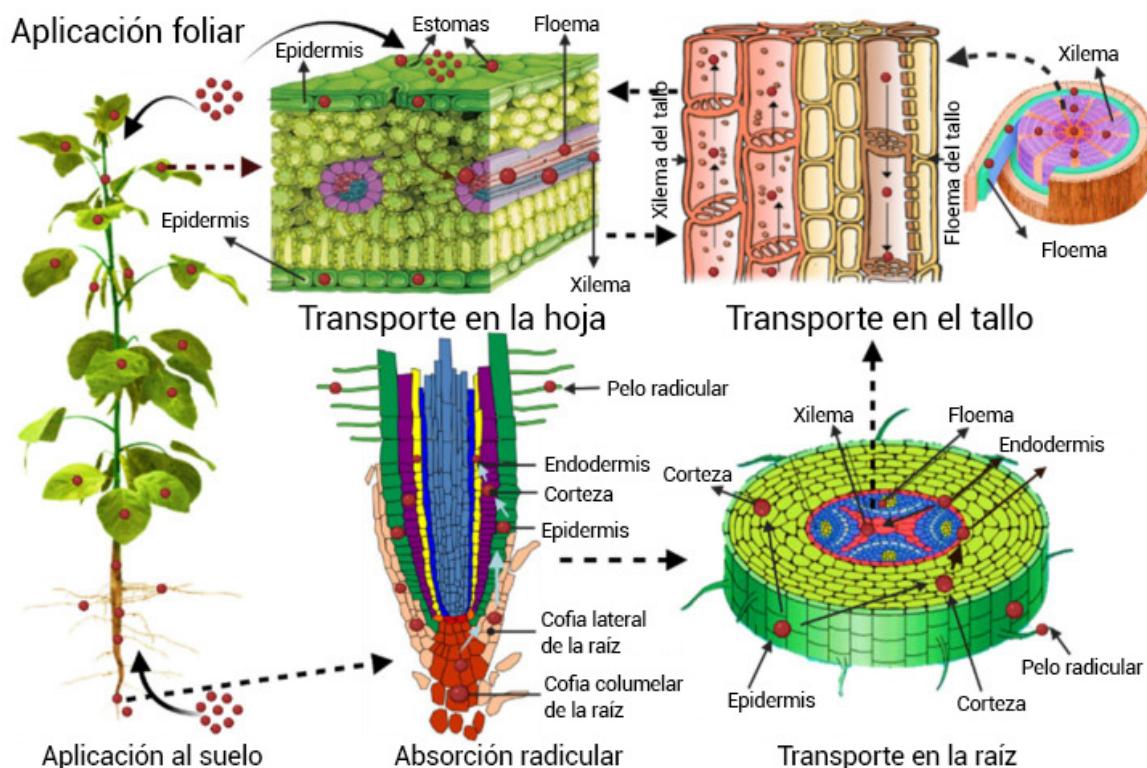
<sup>64</sup>Al Malki, J. S., Hussien, N. A., Tantawy, E. M., Khattab, Y. & Mohammadein, A. Terrestrial Biota as Bioindicators for Microplastics and Potentially Toxic Elements. *Coatings* 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11011152>

<sup>65</sup>Sajjad, M. et al. Microplastics in the soil environment: A critical review. *Environmental Technology & Innovation* 27, 102408 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102408>

Se ha confirmado que los microplásticos pueden ser absorbidos y trasladados a diferentes órganos vegetales. Los datos de investigación indican que los microplásticos se acumulan en los sistemas vegetales a través de diversos caminos, ejerciendo efectos negativos en las plantas, los cultivos agrícolas y los alimentos.

Los nanoplásticos, debido a su tamaño extremadamente reducido, son capaces de penetrar directamente en los tejidos vegetales<sup>66</sup>. Las plantas absorben nanoplásticos del medio nutritivo, tras lo cual son transportados a las partes aéreas a través del xilema, el sistema vascular responsable del transporte de agua y nutrientes desde las raíces hasta los tallos y las hojas.

Los microplásticos que se depositan en las hojas pueden penetrar a través de los estomas y desplazarse hacia las raíces a lo largo de los haces vasculares. Tanto los micro como los nanoplásticos ejercen una acción tóxica sobre los procesos fisiológicos y la actividad enzimática de los cultivos agrícolas<sup>67</sup> (Fig. 20).



**Figura 20:** Mecanismos de absorción de micro y nanoplásticos en las plantas.

El mecanismo de absorción del plástico por parte de las plantas debido a su presencia en el suelo a través de la absorción por las raíces; y los caminos de transporte desde la raíz al tallo y desde el tallo hasta las hojas y los frutos. La aplicación foliar muestra la entrada del plástico a través de los estomas foliares y el posterior transporte hacia otras partes de la planta. La flecha continua indica la disponibilidad de plástico para la planta, mientras que la flecha discontinua representa el transporte interno.

Fuente: Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano1112935>

<sup>66</sup>Hasan, M. M. et al. Impact of microplastics on terrestrial ecosystems: A plant-centric perspective. *Environmental Pollution and Management* 1, 223–234 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.epm.2024.11.002>

<sup>67</sup>Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano1112935>

El sistema de transporte del agua en las plantas es capaz de transferir rápidamente las nanopartículas hacia los tallos, las hojas y, potencialmente, también hacia los frutos. Según los datos obtenidos en plantas de tabaco (*Nicotiana tabacum*), las partículas de nanoplásticos con un tamaño de 100 nanómetros no pueden penetrar en las células vegetales, mientras que aquellas con un tamaño entre 20 y 40 nanómetros se absorben con éxito<sup>68</sup>.

Además, algunas partículas de plástico poseen una carga eléctrica, lo que puede reforzar su adsorción en las raíces de las plantas mediante atracción electrostática, influenciando la inmovilización de nutrientes o los procesos de fotosíntesis<sup>69</sup>. Los microplásticos con carga negativa tienen mayores probabilidades de penetrar en la corteza radical<sup>70</sup>.

En los agroecosistemas fuertemente contaminados por las partículas de plástico, se observa una desaceleración en el crecimiento y el desarrollo de las plantas<sup>71</sup>, además de efectos transitorios sobre la velocidad de germinación y el crecimiento radical<sup>72</sup>.

Las investigaciones confirman la presencia de microplásticos en la miel disponible en el mercado, tanto de producción industrial como local. Análisis posteriores han revelado una difusión significativa de microplásticos en las inflorescencias de diversas especies vegetales<sup>73, 74</sup>.

En los últimos años, el estado de las poblaciones de abejas en todo el mundo ha empeorado drásticamente. Las investigaciones muestran que una de las causas subestimadas podría ser la contaminación ambiental por microplásticos y nanoplásticos. Los estudios han demostrado que las abejas “recogen” microplásticos del aire, del agua, de las plantas y del suelo, y luego los llevan a la colmena. Las abejas recolectan néctar y polen de las plantas, así como agua de fuentes naturales – y todos estos ambientes, ya hoy en día, contienen microplásticos. Los pelos presentes en el cuerpo de las abejas actúan como “trampas” para las partículas. Las partículas plásticas también se acumulan en las patas, en particular en los pliegues y entre los segmentos, ya que entran en contacto con las superficies de las plantas, del suelo, del agua e incluso con la propia colmena.

66

*“La abeja melífera es un excelente indicador biológico de la contaminación ambiental porque está en todas partes, cubierta de pelos que capturan contaminantes y partículas presentes en el aire, es sensible a los contaminantes, tiene gran movilidad y un amplio rango de vuelo, entre otras características”<sup>75</sup>.*

<sup>68</sup>Bandmann, V., Müller, J. D., Köhler, T. & Homann, U. Uptake of fluorescent nano beads into BY2-cells involves clathrin-dependent and clathrin-independent endocytosis. *FEBS Letters* 586, 3626–3632 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2012.08.008>

<sup>69</sup>Lian, J. et al. Do polystyrene nanoplastics affect the toxicity of cadmium to wheat (*Triticum aestivum L.*)? *Environmental Pollution* 263, 114498 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114498>

<sup>70</sup>Li, W. et al. Uptake and effect of carboxyl-modified polystyrene microplastics on cotton plants. *Journal of Hazardous Materials* 466, 133581 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133581>

<sup>71</sup>Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano1112935>

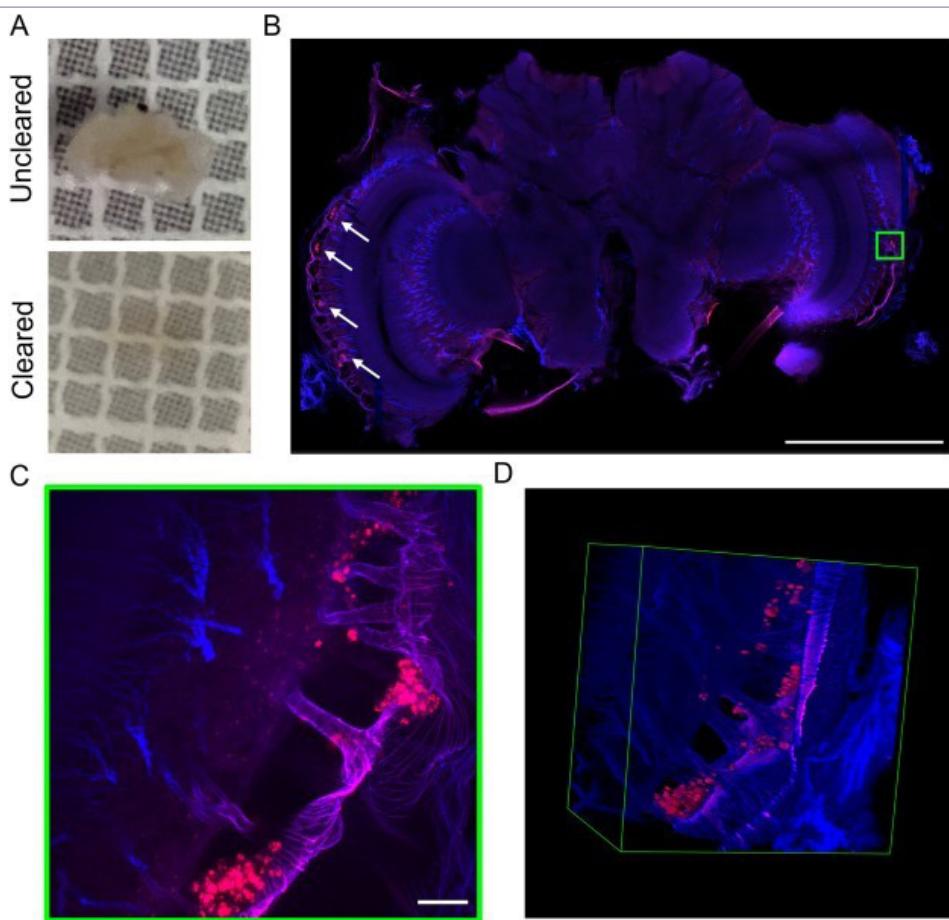
<sup>72</sup>Bosker, T., Bouwman, L. J., Brun, N. R., Behrens, P. & Vijver, M. G. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. *Chemosphere* 226, 774–781 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>

<sup>73</sup>Liebezeit, G. & and Liebezeit, E. Non-pollen particulates in honey and sugar. *Food Additives & Contaminants: Part A* 30, 2136–2140, 2013 <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.843025>

<sup>74</sup>Basaran, B. et al. Microplastics in honey from Türkiye: Occurrence, characteristic, human exposure, and risk assessment. *Journal of Food Composition and Analysis* 135, 106646 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106646>

<sup>75</sup>Alma, A. M., de Groot, G. S. & Buteler, M. Microplastics incorporated by honeybees from food are transferred to honey, wax and larvae. *Environmental Pollution* 320, 121078 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121078>

Los micro y nanoplásticos también ingresan al organismo de la abeja a través de la cutícula (la cubierta externa del cuerpo). Una vez penetran en el cuerpo, en tan solo 3 días alcanzan el cerebro, causando trastornos de la memoria, la orientación y las funciones cognitivas – fundamentales para la búsqueda de alimento y la navegación<sup>76</sup>. El impacto de los microplásticos en el cerebro también implica una capacidad reducida para recuperar la memoria. Esto es crítico, porque las abejas se orientan en el espacio basándose en puntos de referencia familiares. Los nanoplásticos en el cerebro además provocan la pérdida de la capacidad para recordar dónde se encuentran las fuentes de néctar, una respuesta empeorada a los olores de las flores y dificultad para encontrar el camino de regreso a la colmena. Estos trastornos cognitivos reducen directamente la eficacia de la polinización y pueden desestabilizar toda la colonia<sup>76</sup>.



**Figura 21:** Detección de una cantidad significativa de microplásticos en el cerebro de la abeja melífera.

A) Fotografías del cerebro disecado antes y después de la clarificación mediante el método iDISCO.

B) Plano óptico único (profundidad ~200 µm) de una reconstrucción 3D del cerebro completo obtenida con microscopía de fluorescencia de dos fotones (TPFM), objetivo 10×; resolución –  $0,51 \times 0,51 \times 2 \mu\text{m}^3$ . Color azul: autofluorescencia del tejido; color rojo: microplásticos con fluorescencia roja (indicado con flechas blancas). Barra de escala: 1000 µm.

C) Ampliación de alta resolución del área resaltada en verde en la imagen B, obtenida con objetivo 63×. La imagen es una proyección de máxima intensidad de una serie de pilas con profundidad de 150 µm y resolución de  $0,17 \times 0,17 \times 1 \mu\text{m}^3$ . Barra de escala: 20 µm.

D) Visualización 3D de la serie de pilas mostrada en C. Dimensiones:  $170 \times 170 \times 150 \mu\text{m}^3$ .

Fuente: Pasquini, E. et al. Microplastics reach the brain and interfere with honey bee cognition. Science of The Total Environment 912, 169362 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>

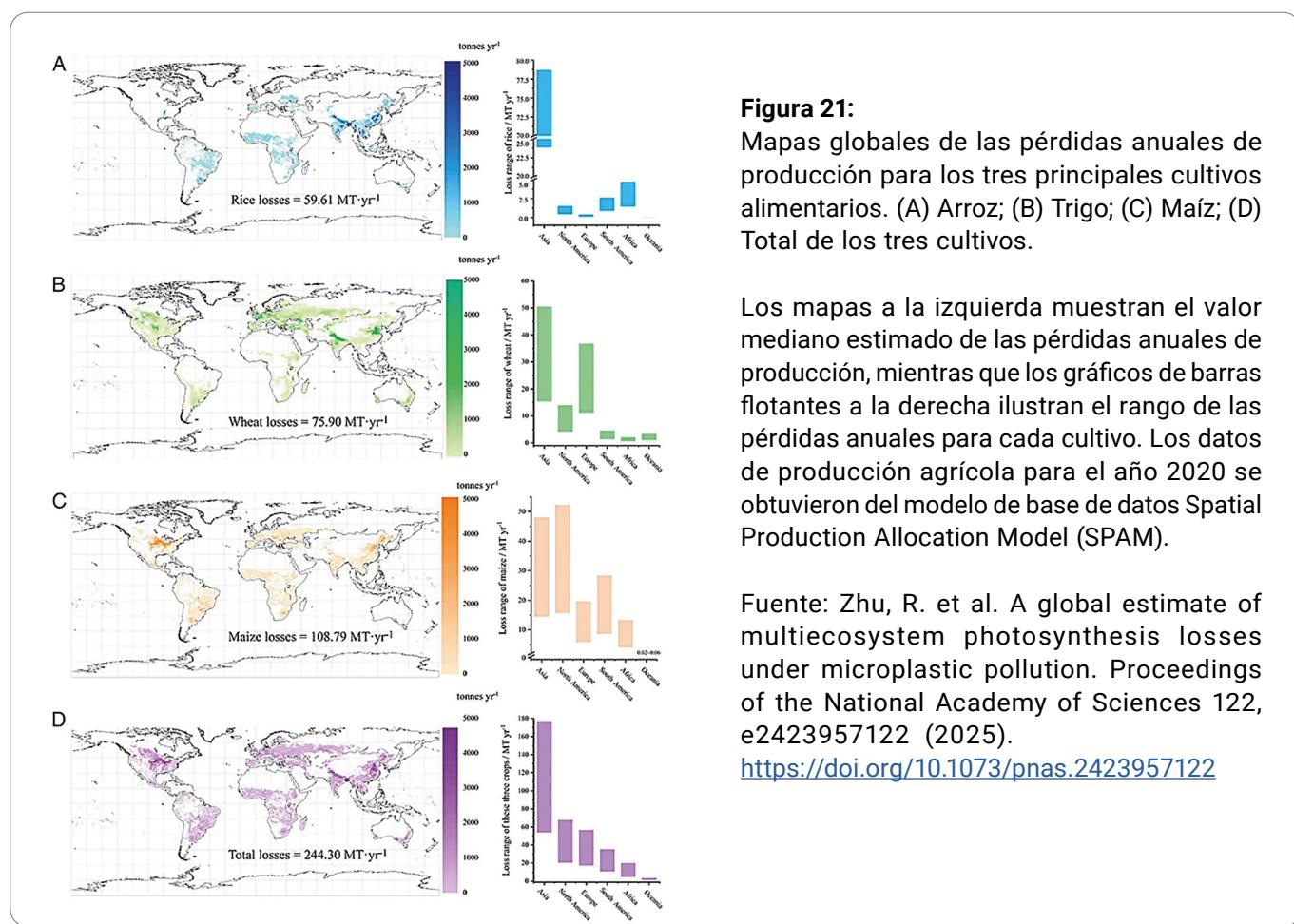
<sup>76</sup>Pasquini, E. et al. Microplastics reach the brain and interfere with honey bee cognition. Science of The Total Environment 912, 169362 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>

Una vez que los nanoplásticos penetran en el organismo de la abeja, también provocan daños en el intestino, un debilitamiento del sistema inmunológico y una mayor vulnerabilidad a los virus, lo que puede llevar a la muerte de las abejas incluso en ausencia de toxicidad aguda del plástico<sup>75,77</sup>. Además, las partículas de plástico se acumulan no solo en las abejas, sino también en la miel, la cera y las larvas, creando así un ciclo cerrado de contaminación por plástico dentro de la colmena<sup>75</sup>.

**Esto puede tener consecuencias graves no solo para las propias abejas, sino también para la seguridad alimentaria. Las abejas son polinizadoras fundamentales y su debilitamiento afecta directamente el rendimiento de los cultivos agrícolas.**

Los daños cerebrales, la pérdida de peso corporal y el debilitamiento del sistema inmunológico reducen la actividad de polinización, lo que — como advierten los científicos — podría agravar la crisis de la producción alimentaria global<sup>77</sup>. Las abejas actúan como bioindicadores activos de la contaminación ambiental y ya se han encontrado microplásticos en cantidades significativas en la miel, independientemente del país de producción<sup>78</sup>.

Además la exposición a los MP reduce el contenido total de clorofila entre un 5,63 % y un 17,42 %, lo que provoca una pérdida en la producción global de arroz, trigo y maíz que varía entre el 4,11 % y el 13,52 % del volumen anual total, con graves repercusiones sobre la seguridad alimentaria<sup>79</sup> (Fig. 22).



**Figura 21:**  
Mapas globales de las pérdidas anuales de producción para los tres principales cultivos alimentarios. (A) Arroz; (B) Trigo; (C) Maíz; (D) Total de los tres cultivos.

Los mapas a la izquierda muestran el valor mediano estimado de las pérdidas anuales de producción, mientras que los gráficos de barras flotantes a la derecha ilustran el rango de las pérdidas anuales para cada cultivo. Los datos de producción agrícola para el año 2020 se obtuvieron del modelo de base de datos Spatial Production Allocation Model (SPAM).

Fuente: Zhu, R. et al. A global estimate of multiecosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2423957122 (2025).

<https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>

<sup>75</sup>Sheng, D., Jing, S., He, X., Klein, A.-M., Köhler, H.-R. & Wanger, T. C. Plastic pollution in agricultural landscapes: an overlooked threat to pollination, biocontrol and food security. *Nature Communications* 15, 8413 (2024).

<sup>77</sup>Al Naggar, Y. A., Sayes, C. M., Collom, J. C., Ayorinde, T., Qi, S., El-Seedi, H. R., Paxton, R. J. & Wang, K. Chronic exposure to polystyrene microplastic fragments has no effect on honey bee survival, but reduces feeding rate and body weight. *Toxics* 11, 100 (2023)

<sup>79</sup>Zhu, R. et al. A global estimate of multiecosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>

## Los bosques: depósitos globales de microplásticos

El análisis reveló la presencia de nanoplásticos en las raíces, tallos, hojas y agujas en todas las concentraciones y rangos de tiempo estudiados. Las concentraciones de nanoplásticos en las raíces superaban las de las partes aéreas en al menos 10 veces.

La contaminación por plásticos afecta negativamente al funcionamiento tanto de las coníferas perennes como de las especies caducifolias, al inducir estrés oxidativo y reducir la eficiencia fotosintética, lo que puede llevar a una inhibición del crecimiento o incluso a la muerte de la planta. Los estudios demuestran que las alteraciones en las fases de la fotosíntesis provocan la acumulación de energía luminosa en exceso que, al no convertirse en energía química, causa estrés foto-oxidativo y daño en los tejidos vegetales. Para protegerse, las plantas activan mecanismos de fotoprotección en los que los carotenoides disipan la energía excesiva en forma de calor<sup>80</sup>.

Al interferir con la fotosíntesis, inducir estrés oxidativo y reducir la actividad fisiológica de las plantas, la contaminación por plástico aumenta la vulnerabilidad de los ecosistemas frente al cambio climático. Estos datos subrayan la magnitud del impacto de la contaminación por plástico sobre las comunidades vegetales, planteando interrogantes sobre su efecto en los animales terrestres que dependen de dichos ecosistemas.

## Como los nanoplásticos destruyen la fauna

Numerosos estudios confirman que la acumulación de micro y nanoplásticos en el ambiente, incluidos aquellos absorbidos por las plantas, afecta negativamente al sector ganadero<sup>81</sup>, comprometiendo las cadenas alimentarias y la salud de los animales. Observaciones realizadas en una empresa láctea en Italia revelaron que todas las muestras de heno de pasto contenían microplásticos<sup>82</sup>. En India, una investigación identificó la presencia de polietilen tereftalato (PET) en el 100 % de las muestras de raciones alimentarias destinadas a vacas lecheras, con concentraciones entre 89 y 326 g/kg<sup>83</sup>.

<sup>80</sup>Murazzi, M. E., Pradel, A., Schefer, R. B., Gessler, A. & Mitrano, D. M. Uptake and physiological impacts of nanoplastics in trees with divergent water use strategies. Environ. Sci.: Nano 11, 3574–3584 (2024). <https://doi.org/10.1039/D4EN00286E>

<sup>81</sup>Borreani, G. & Tabacco, E. 9 - Plastics in Animal Production. in A Guide to the Manufacture, Performance, and Potential of Plastics in Agriculture (ed. Orzolek, M. D.) 145–185 (Elsevier, 2017). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102170-5.00009-9>

<sup>82</sup>Glorio Patrucco, S., Rivoira, L., Bruzzoniti, M. C., Barbera, S. & Tassone, S. Development and application of a novel extraction protocol for the monitoring of microplastic contamination in widely consumed ruminant feeds. Science of The Total Environment 947, 174493 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174493>

<sup>83</sup>Maganti, S. S. & Akkina, R. C. Detection and characterisation of microplastics in animal feed. ojafr 13, 348–356 (2023). <https://doi.org/10.51227/ojafr.2023.50>

Numerosos estudios confirman que la acumulación de micro y nanoplásticos en el ambiente, incluidos aquellos absorbidos por las plantas, afecta negativamente al sector ganadero<sup>81</sup>, comprometiendo las cadenas alimentarias y la salud de los animales. Observaciones realizadas en una empresa láctea en Italia revelaron que todas las muestras de heno de pasto contenían microplásticos<sup>82</sup>. En India, una investigación identificó la presencia de polietilen tereftalato (PET) en el 100 % de las muestras de raciones alimentarias destinadas a vacas lecheras, con concentraciones entre 89 y 326 g/kg<sup>83</sup>.

Análisis posteriores confirmaron la presencia de microplásticos en el líquido folicular del ganado<sup>84</sup>, en la leche<sup>85</sup>, en las heces de ovejas<sup>86</sup>, en la carne de res y en la sangre<sup>87</sup>, indicando un impacto significativo en los animales rumiantes. Según los datos disponibles, entre el 50 % y el 60 % de los cuerpos extraños removidos durante el proceso de sacrificio del ganado<sup>88</sup>, incluidos pequeños rumiantes como cabras y ovejas, estaban compuestos por materiales plásticos. Además, se han detectado microplásticos en los tejidos internos de perros y gatos<sup>89</sup> domésticos en ambientes urbanos, en el intestino de patos<sup>90</sup> criados en casa y en los pulmones de cerdos<sup>91</sup>.

Los datos de los estudios confirman que los microplásticos causan daños a los animales no solo por su presencia física, sino también por los aditivos utilizados en su producción y por los contaminantes ambientales que absorben, causando daños de diversa gravedad<sup>92</sup>. Las observaciones muestran que los microplásticos inducen efectos tóxicos en los animales, incluidos estrés oxidativo, daños intestinales, inmunotoxicidad, así como toxicidad reproductiva y neurotoxicidad<sup>93</sup> (Fig. 23).

Además, los microplásticos actúan como vectores para contaminantes como metales pesados, antibióticos, compuestos orgánicos persistentes y pesticidas, aumentando los riesgos potenciales para los ecosistemas, la salud animal y la humana<sup>94</sup>.

<sup>84</sup>Grechi, N. et al. Microplastics are present in women's and cows' follicular fluid and polystyrene microplastics compromise bovine oocyte function in vitro. *eLife* 12, (2023). <https://doi.org/10.7554/elife.86791.1>

<sup>85</sup>Da Costa Filho, P. A. et al. Detection and characterization of small-sized microplastics ( $\geq 5 \mu\text{m}$ ) in milk products. *Sci Rep* 11, 24046 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03458-7>

<sup>86</sup>Beriot, N., Peek, J., Zornoza, R., Geissen, V. & Huerta Lwanga, E. Low density-microplastics detected in sheep faeces and soil: A case study from the intensive vegetable farming in Southeast Spain. *Science of The Total Environment* 755, 142653 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142653>

<sup>87</sup>van der Veen, I., van Mourik, L.M., van Velzen, M.J.M., Groenewoud, Q.R., & Leslie, H.A. Plastic particles in livestock feed, milk, meat and blood: A pilot study. Report EH22-01, 29 April 2022. <https://vakbladvoedingsindustrie.nl/storage/app/media/Rapporten/rapporten%202022/07-juli/VOE-2022-JUL-PLASTICSOUP.pdf>

<sup>88</sup>Galyon, H. et al. Long-term in situ ruminal degradation of biodegradable polymers in Holstein dairy cattle. *JDS Communications* 4, 70–74 (2023). <https://doi.org/10.3168/jdsc.2022-0319>

<sup>89</sup>Prata, J. C. et al. Microplastics in Internal Tissues of Companion Animals from Urban Environments. *Animals* 12, 1979 (2022). <https://doi.org/10.3390/ani12151979>

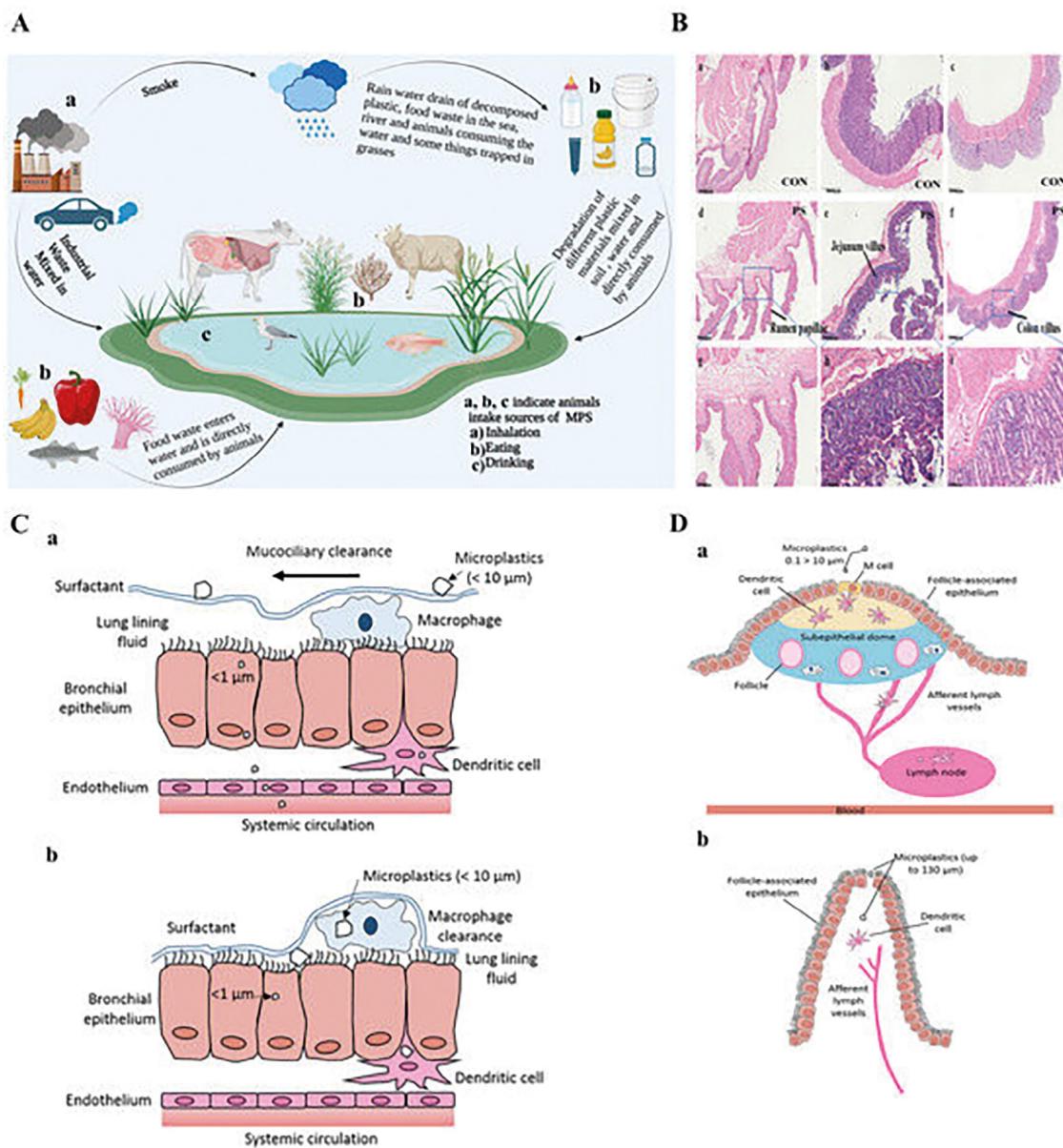
<sup>90</sup>Susanti, R., Yuniaستuti, A. & Fibriana, F. The Evidence of Microplastic Contamination in Central Javanese Local Ducks from Intensive Animal Husbandry. *Water Air Soil Pollut* 232, 178 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05142-y>

<sup>91</sup>Li, H. et al. Detection of microplastics in domestic and fetal pigs' lung tissue in natural environment: A preliminary study. *Environmental Research* 216, 114623 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114623>

<sup>92</sup>Brennecke, D., Duarte, B., Paiva, F., Caçador, I. & Canning-Clode, J. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 178, 189–195 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.003>

<sup>93</sup>Su, M. et al. Toxicity Mechanisms of Microplastic and Its Effects on Ruminant Production: A Review. *Biomolecules* 15, 462 (2025). <https://doi.org/10.3390/biom15040462>

<sup>94</sup>Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V. & Uricchio, V. F. A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. *IJERPH* 17, 1212 (2020). <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>



**Figura 23:** Diagrama esquemático de las rutas de ingestión de microplásticos (MP) por parte de los animales y los efectos de los MP en el tracto gastrointestinal.

(A) Vías de ingestión de microplásticos (MP) por parte de los animales. (B) Tracto gastrointestinal antes y después de la exposición: imágenes H&E del rumen (a), intestino delgado (b) e intestino grueso (c) en el grupo de control (CON); (d) imagen H&E del rumen del grupo S-PS; (e) imagen H&E del intestino delgado del grupo L-PS; (f) imagen H&E del intestino grueso del grupo L-PS; (g-i) representan aumentos locales de las imágenes (d-f) respectivamente.

(C) Mecanismos potenciales de absorción y eliminación de los MP ( $0,1 > 10 \mu\text{m}$ ) en los pulmones: (a) Baja probabilidad de que los fluidos pulmonares (detergentes y moco) empujen los MP hacia las vías respiratorias superiores (pulmones centrales), donde la membrana es más gruesa. Las partículas  $> 1 \mu\text{m}$  son eliminadas por la mucosa ciliar; las partículas  $< 1 \mu\text{m}$  pueden ser ingeridas a través del epitelio. (b) Si el diámetro aerodinámico de los MP permite el depósito profundo en los pulmones, estas pueden atravesar el fluido alveolar e interactuar con el epitelio mediante difusión o absorción activa por parte de las células.

(D) Vías previstas de absorción de los MP desde el tracto gastrointestinal: (a) Absorción de los MP desde el lumen intestinal a través de las células M en los nódulos linfáticos del plexo de Peyer por endocitosis ( $0,1 > 10 \mu\text{m}$ ). Las células M transportan las partículas hacia el tejido linfoide de la mucosa. (b) Absorción paracelular desde el lumen intestinal. Las partículas no degradables, como los MP, pueden penetrar mecánicamente en los tejidos subyacentes a través de las uniones intercelulares. Las células dendríticas pueden fagocitar estas partículas, transportándolas hacia los vasos linfáticos y las venas, desde donde pueden difundirse a tejidos secundarios, incluidos el hígado, los músculos y el cerebro.

Fuente: Su, M. et al. Toxicity Mechanisms of Microplastic and Its Effects on Ruminant Production: A Review. Biomolecules 15, 462 (2025). <https://doi.org/10.3390/biom15040462>

Las observaciones indican que los animales salvajes a menudo confunden los desechos plásticos con comida, lo que provoca la acumulación de plástico en el tracto intestinal. En Zimbabwe<sup>95</sup> y en Sri Lanka<sup>96</sup>, algunos elefantes que se alimentaban en vertederos a cielo abierto murieron debido al plástico no digerible. En el parque de Nara, en Japón, ciervos salvajes fallecieron por complicaciones relacionadas con la ingestión de desechos plásticos dejados por los turistas<sup>97</sup>. Un estudio realizado en más de 30 000 camellos cerca de Dubái, en los Emiratos Árabes Unidos, encontró que aproximadamente el 1 % de los animales probablemente murió debido a la acumulación de plástico en el tracto digestivo<sup>98</sup>.

Los investigadores introdujeron el término "polibesoario" para describir una masa densa de materiales no digeribles, como plástico, cuerdas, desechos y depósitos salinos, que se forma como un conglomerado similar a un cálculo en el estómago o el intestino, especialmente en los rumiantes. El término combina "poli" (material sintético) y "besoario" (formación sólida similar a una piedra). Las observaciones confirman que los polibesoarios pueden causar obstrucción gastrointestinal, sepsis debido a la proliferación bacteriana, deshidratación y desnutrición (Fig. 24).



**Figura 24:** Polibesoarios encontrados dentro de camellos muertos en el desierto cerca de Dubái. El más grande analizado en el estudio pesaba casi 64 kilogramos (141 libras).

Fuente: Eriksen, M., Lusher, A., Nixon, M. & Wernery, U. The plight of camels eating plastic waste. Journal of Arid Environments 185, 104374 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374>

<sup>95</sup>Breton, J. L. Visitation patterns of African elephants (*Loxodonta africana*) to a rubbish dumpsite in Victoria Falls, Zimbabwe. *Pachyderm* 60, 45–54 (2019). <https://doi.org/10.69649/pachyderm.v60i.30>

<sup>96</sup>Animal Survival International. Sri Lankan Elephants Die After Eating Plastic From Rubbish Dumps. (2020) <https://animalsurvival.org/habitat-loss/sri-lankan-elephants-die-after-eating-plastic-from-rubbish-dumps>

<sup>97</sup>Agence France-Presse. Japan's famous Nara deer dying from eating plastic bags. The Guardian. <https://www.theguardian.com/world/2019/jul/10/japans-famous-nara-deer-dying-from-eating-plastic-bags>

<sup>98</sup>Eriksen, M., Lusher, A., Nixon, M. & Wernery, U. The plight of camels eating plastic waste. Journal of Arid Environments 185, 104374 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374>

## Transferencia de micro y nanoplásticos a través de las cadenas alimentarias desde el plancton hasta los seres humanos

La acumulación de plástico en los océanos tiene un impacto significativamente negativo en los ecosistemas marinos. Las observaciones científicas de las últimas cuatro décadas han detectado la presencia de microplásticos en casi todos los hábitats marinos del mundo<sup>99</sup>. Los estudios confirman que los desechos plásticos amenazan la biodiversidad marina, afectando al menos a 690 especies, incluidos cetáceos, pinnípedos, aves marinas, tortugas, peces y crustáceos<sup>100</sup>. La ingestión de plástico expone a los animales a toxinas adicionales: las sustancias químicas contenidas en el plástico se liberan en el organismo después de la ingestión, transfiriéndose a lo largo de las cadenas alimentarias desde la presa hasta el depredador.

Las consecuencias de la ingestión o el atrapamiento varían desde efectos letales hasta subletales, provocando trastornos en la alimentación, problemas digestivos, desnutrición, enfermedades, reducción de la fertilidad, crecimiento lento y disminución de la esperanza de vida<sup>101</sup>.

Gracias a su pequeño tamaño, los microplásticos son asimilados por el plancton, un elemento clave en las cadenas alimentarias marinas. El plancton es consumido por numerosas especies marinas, y aunque algunas no se alimentan directamente de él, ingieren organismos que ya lo han asimilado, favoreciendo así la integración de los microplásticos en las cadenas alimentarias. (Figuras 25, 26)

En 1999, el análisis de muestras de aguas superficiales en el vórtice central del Pacífico Norte reveló que la masa de plástico superaba en seis veces la del zooplancton<sup>102</sup>, principal fuente de alimento del ecosistema, destacando el predominio del plástico sobre los organismos vivos en el océano.

Los cálculos basados en datos observacionales muestran que la concentración de microplásticos aumenta con el tamaño del pez. Los datos indican que el animal más grande, la ballena, ingiere diariamente hasta 43,6 kg de plástico, y el 98,5 % de esa cantidad proviene de su alimento, no directamente del agua, ya que el microplástico ya está presente en sus presas<sup>103</sup>.

<sup>99</sup>Ivar Do Sul, J. A. & Costa, M. F. The present and future of microplastic pollution in the marine environment. *Environmental Pollution* 185, 352–364 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.036>

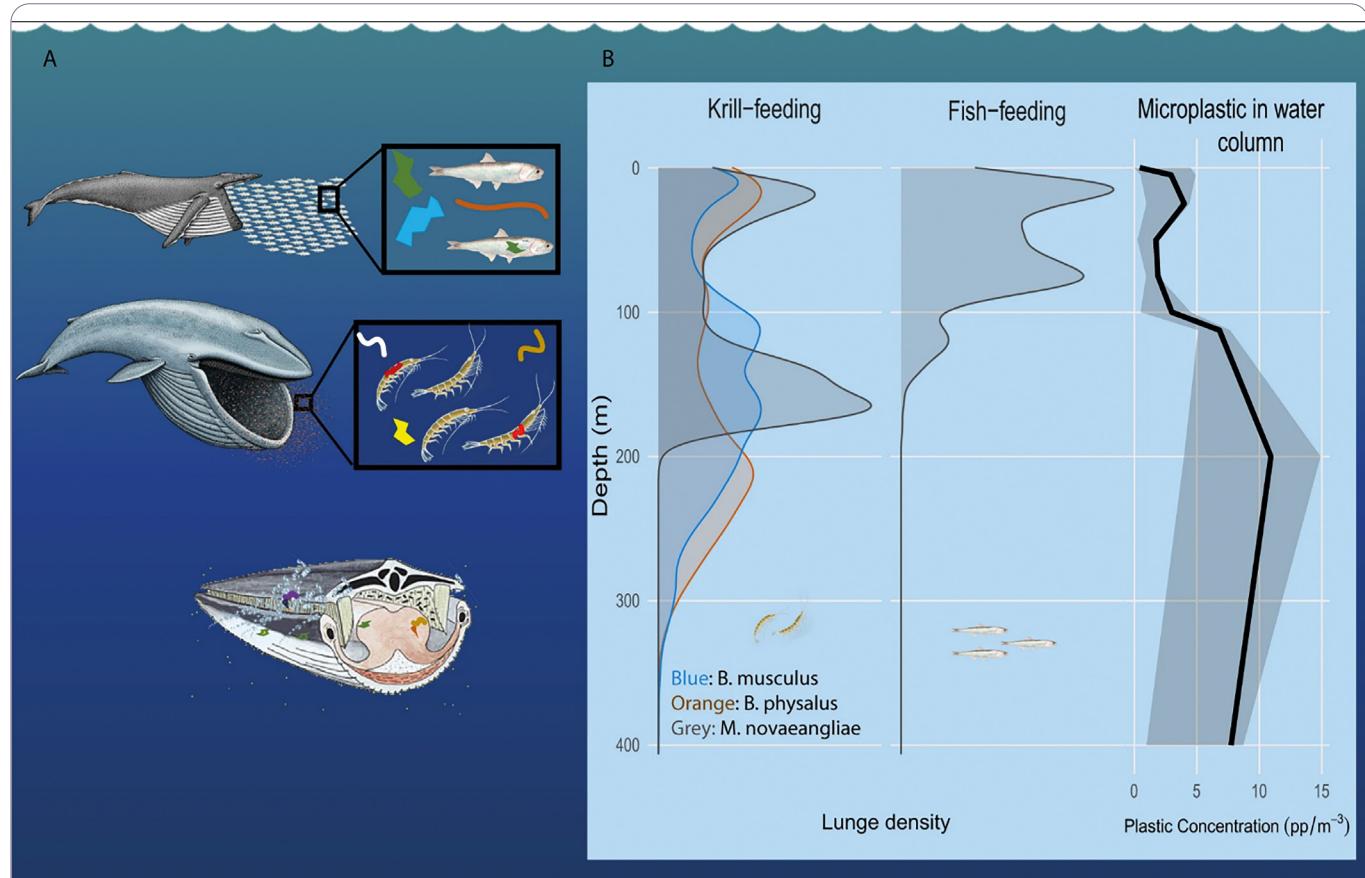
<sup>100</sup>O'Hanlon, N. J., James, N. A., Masden, E. A. & Bond, A. L. Seabirds and marine plastic debris in the northeastern Atlantic: A synthesis and recommendations for monitoring and research. *Environmental Pollution* 231, 1291–1301 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.101>

<sup>101</sup>Ocean Blue Project. Plastic Pollution in the Ocean: How Many Animals Die from Pollution? (2021)

<https://oceanblueproject.org/wp-content/uploads/2023/02/how-many-animals-die-from-plastic-pollution-ocean-blue-report.pdf>

<sup>102</sup>Moore, C. J., Moore, S. L., Leecaster, M. K. & Weisberg, S. B. A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre. *Marine Pollution Bulletin* 42, 1297–1300 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00114-X)

<sup>103</sup>Kahane-Rappaport, S. R. et al. Field measurements reveal exposure risk to microplastic ingestion by filter-feeding megafauna. *Nat Commun* 13, 6327 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33334-5>



**Figura 25:**

a — La cantidad de plástico ingerido diariamente por las ballenas, modelada como la suma de (i) el plástico filtrado del agua cada día y (ii) el plástico ingerido a través de las presas diarias. Se crearon tres escenarios (bajo, medio y alto) para representar el rango de riesgos potenciales de exposición al plástico ingerido, considerando la falta de datos exhaustivos para algunas variables.

b — Profundidad del depósito de plástico en la Bahía de Monterey, correspondiente al perfil de profundidad de la concentración de plástico en la misma área. Las ballenas y sus presas fueron ilustradas por Alex Boersma, mientras que el diagrama en sección del filtrado fue ilustrado por Scott Landry del Center for Coastal Studies. Los datos originales se proporcionan en el archivo de fuentes.

Fuente: Kahane-Rapport, S. R. et al. Field measurements reveal exposure risk to microplastic ingestion by filter-feeding megafauna. Nat Commun 13, 6327 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33334-5>



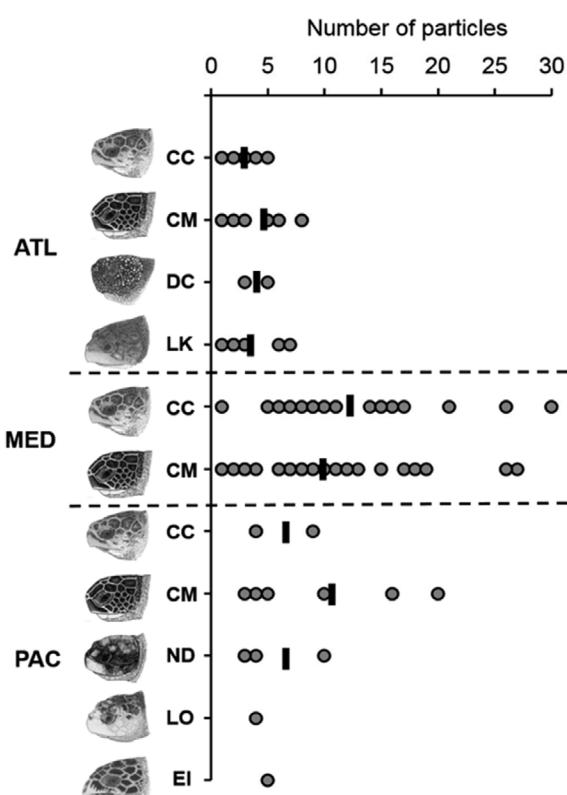
**Figura 26:** Representación esquemática de la penetración del plástico en las cadenas alimentarias.

## Los plásticos matan a los organismos marinos

Cada año, aproximadamente 1 millón de aves marinas y 100 000 mamíferos marinos mueren debido a la contaminación por plástico<sup>104</sup>.

Las observaciones confirman el vínculo entre los desechos ingeridos y la mortalidad de las aves marinas. Un estudio sobre 1733 ejemplares de 51 especies encontró que 557 aves (32,1 %) contenían desechos marinos – de 1 a 40 objetos, con un peso máximo de 3340 mg y un volumen de 3621 mm<sup>3</sup><sup>105</sup>.

Algunos datos indican que ciertos plásticos emiten dimetilsulfuro, una sustancia química que imita la señal olfativa utilizada por las aves marinas para identificar su alimento<sup>106</sup>. Nuevas investigaciones también demuestran que la ingestión de plástico provoca lesiones en los riñones, el hígado y el estómago de los polluelos, así como daños cerebrales similares a los del Alzheimer. Esto resalta el impacto destructivo de la contaminación por plástico sobre la fauna marina<sup>107</sup>. En cada ejemplar de las siete especies de tortugas de los tres océanos se han encontrado partículas sintéticas<sup>108</sup> (Fig. 27).



**Figura 27:** Ingestión de micropartículas sintéticas por todas las especies de tortugas marinas de tres cuencos oceánicos. Número total de partículas identificadas en cada submuestra de 100 ml para cada especie en cada cuenca oceánica. Línea negra = número medio de partículas. Cabe señalar que para cada animal se analizaron 100 ml independientemente del tamaño corporal, por lo que el número de partículas por animal no debe interpretarse de manera demasiado generalizada. ATL = Atlántico (Carolina del Norte, EE. UU.): tortuga carey (*Caretta caretta*, n = 8), tortuga verde (*Chelonia mydas*, n = 10), laúd (*Dermochelys coriacea*, n = 2), tortuga de Kemp (*Lepidochelys kempii*, n = 10). MED = Mediterráneo (Chipre del Norte): tortuga carey (n = 22), tortuga verde (n = 34). PAC = Pacífico (Queensland, Australia): tortuga carey (n = 3), tortuga verde (n = 7), tortuga de espalda plana (*Natator depressus*, n = 4), tortuga boba (*Eretmochelys imbricata*, n = 1), tortuga oliva de Ridley (*Lepidochelys olivacea*, n = 1). Las ilustraciones de los cráneos de las tortugas marinas se utilizan con el permiso de WIDECAST; dibujos originales de Tom McFarland.

Fuente: Duncan, E. M. et al. Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. Global Change Biology 25, 744–752 (2019). <https://doi.org/10.1111/gcb.14519>

<sup>104</sup>WWF-Australia. How many birds die from plastic pollution? <https://wwf.org.au/blogs/how-many-birds-die-from-plastic-pollution>.

<sup>105</sup>Roman, L., Hardesty, B. D., Hindell, M. A. & Wilcox, C. A quantitative analysis linking seabird mortality and marine debris ingestion. Sci Rep 9, 3202 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36585-9>

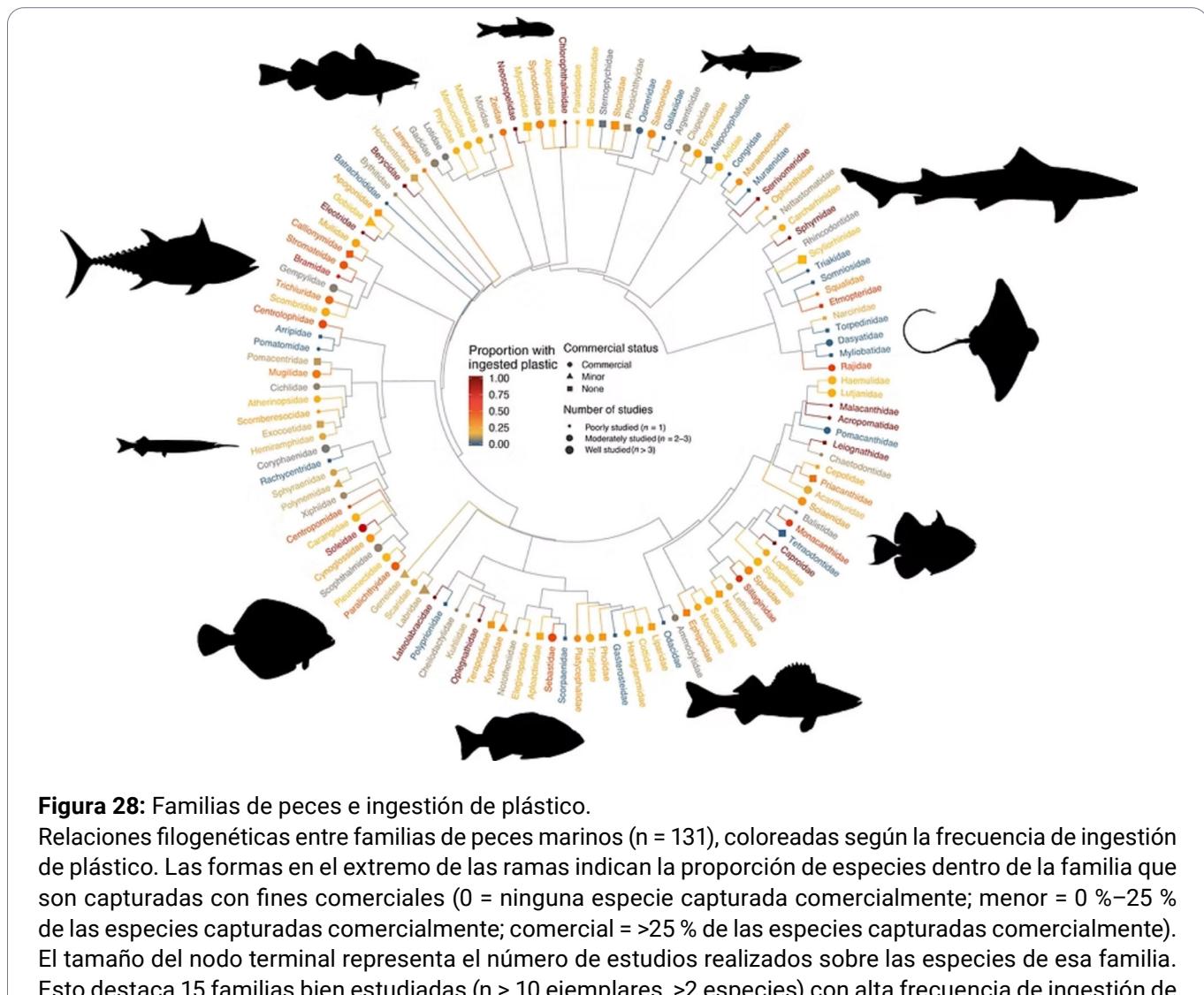
<sup>106</sup>Savoca, M. S., Wohlfeil, M. E., Ebeler, S. E. & Nevitt, G. A. Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds. Sci. Adv. 2, e1600395 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600395>

<sup>107</sup>De Jersey, A. M. et al. Seabirds in crisis: Plastic ingestion induces proteomic signatures of multiorgan failure and neurodegeneration. Sci. Adv. 11, eads0834 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.ads0834>

<sup>108</sup>Duncan, E. M. et al. Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. Global Change Biology 25, 744–752 (2019). <https://doi.org/10.1111/gcb.14519>

Los estudios realizados en 171 774 ejemplares de 555 especies de peces marinos muestran que 386 especies, incluidas 210 de importancia comercial, ingieren desechos plásticos<sup>109</sup>. Según la investigación, la frecuencia de ingestión de microplásticos en los peces marinos es del 26 %, habiéndose duplicado en la última década (Fig. 28). El análisis reveló una correlación positiva entre la abundancia de plásticos en las aguas superficiales (Fig. 29) y su consumo por parte de los organismos marinos (Fig. 30).

Los estudios de laboratorio demuestran que los compuestos plásticos, una vez penetrados en los tejidos de los peces, reducen su actividad, comprometen la funcionalidad hepática, dañan el cerebro, ralentizan el crecimiento y empeoran las capacidades reproductivas<sup>109, 110, 111</sup>.



**Figura 28:** Familias de peces e ingestión de plástico.

Relaciones filogenéticas entre familias de peces marinos ( $n = 131$ ), coloreadas según la frecuencia de ingestión de plástico. Las formas en el extremo de las ramas indican la proporción de especies dentro de la familia que son capturadas con fines comerciales (0 = ninguna especie capturada comercialmente; menor = 0 %-25 % de las especies capturadas comercialmente; comercial = >25 % de las especies capturadas comercialmente). El tamaño del nodo terminal representa el número de estudios realizados sobre las especies de esa familia. Esto destaca 15 familias bien estudiadas ( $n > 10$  ejemplares, >2 especies) con alta frecuencia de ingestión de plástico ( $FO$  plástico > 0,25); 67 de estas familias con casos documentados de ingestión de plástico también son de interés comercial.

Fuente: Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. Global Change Biology 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

<sup>109</sup>Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. Global Change Biology 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

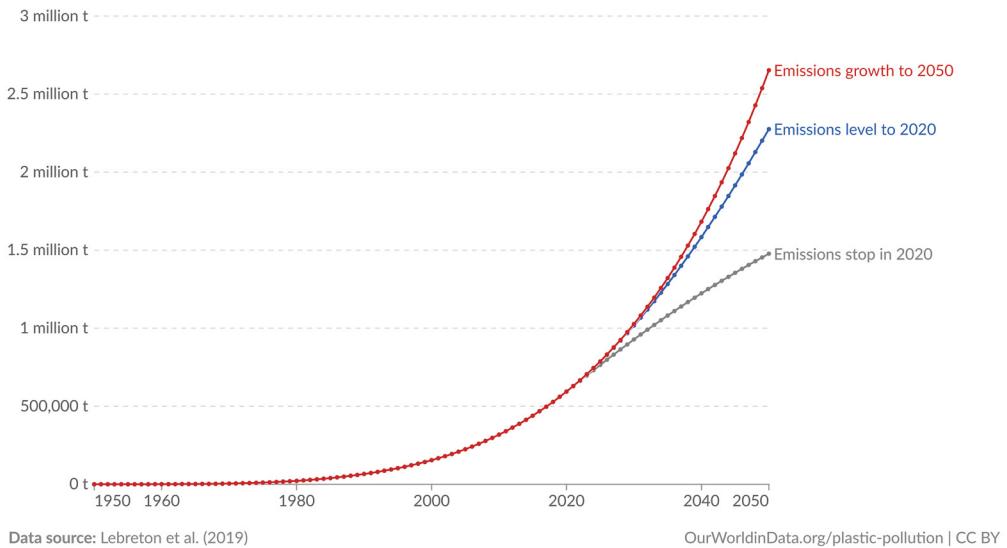
<sup>110</sup>Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward. Egyptian Journal of Aquatic Research 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

<sup>111</sup>Avio, C. G., Gorbi, S. & Regoli, F. Experimental development of a new protocol for extraction and characterization of microplastics in fish tissues: First observations in commercial species from Adriatic Sea. Marine Environmental Research 111, 18–26 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.06.014>

## Microplastics in the surface ocean, 1950 to 2050

Our World in Data

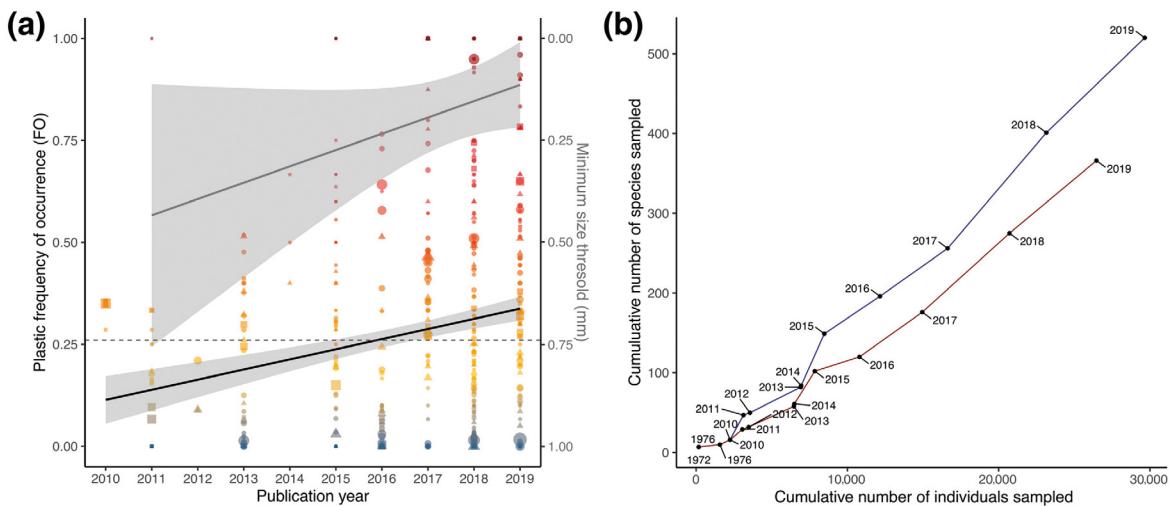
Microplastics are buoyant plastic materials smaller than 0.5 centimeters in diameter. Future global accumulation in the surface ocean is shown under three plastic emissions scenarios: (1) emissions to the oceans stop in 2020; (2) stagnate at 2020 rates; or (3) continue to grow until 2050 in line with historical plastic production rates.



**Figura 29:** Gráfico del crecimiento de la cantidad de microplástico en la superficie del océano con una proyección hasta el 2050.

Fuente: Our World in Data – <https://ourworldindata.org/grapher/microplastics-in-ocean> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Fuente de datos: Lebreton, L., Egger, M. & Slat, B. A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean. *Scientific Reports* 9, 12922 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49413-5>



**Figura 30:** Tendencias temporales del consumo de plástico por parte de los peces. (a) La línea gris en la parte superior indica una tendencia, a partir de 2011, hacia la detección de partículas cada vez más pequeñas. La línea negra en la parte inferior muestra un aumento en la frecuencia de ocurrencia del plástico (FO) entre todas las especies de peces desde 2010 hasta 2019. Durante este período, la frecuencia del consumo de plástico aumentó significativamente, con una tasa anual del 2,4 %. La línea punteada horizontal representa una FO de 0,26, es decir, la frecuencia media global del consumo de plástico por parte de los peces. (b) Curva de acumulación de especies, donde la línea azul indica el número acumulativo de especies estudiadas a lo largo del tiempo, incluyendo tanto las que ingieren plástico como las que no, mientras que la línea roja representa solo las especies con presencia de plástico ingerido. La ausencia de un asintótico en la línea roja indica una alta probabilidad de que en los próximos años emergan nuevas especies que ingieren plástico.

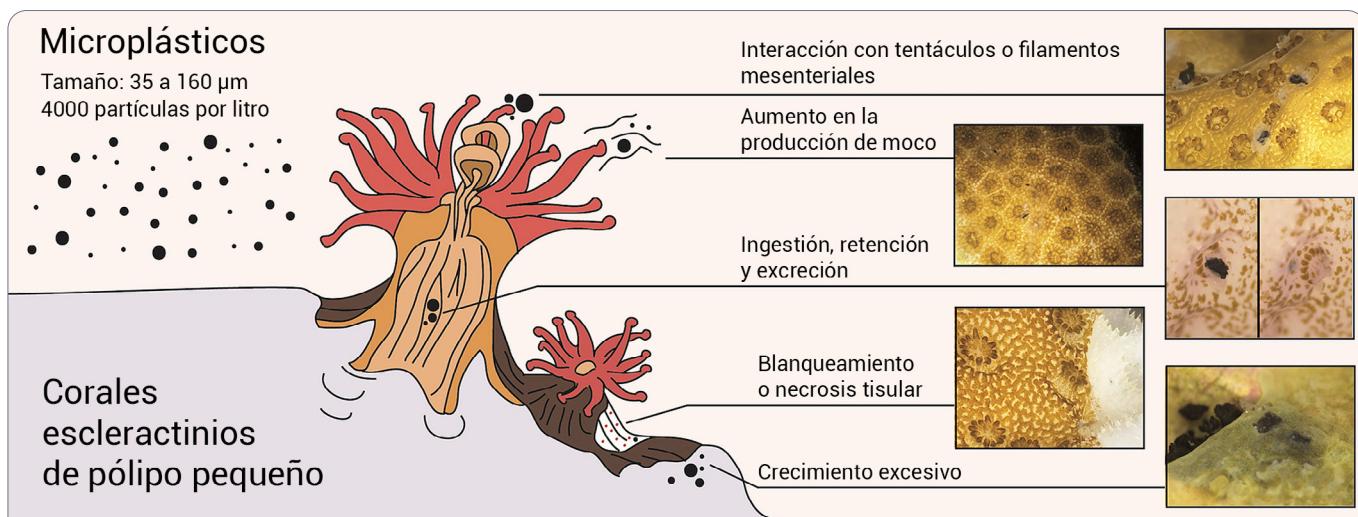
Fuente: Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. *Global Change Biology* 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

## Corales bajo peligro: una microamenaza de escala global

La contaminación por plásticos representa una amenaza creciente para los arrecifes de coral, penetrando en sus cadenas alimentarias y agravando la propagación de enfermedades y la destrucción de las estructuras comunitarias de los arrecifes. Los análisis han detectado residuos antropogénicos en 77 de los 84 arrecifes examinados, incluidos atolones aislados del Pacífico central<sup>112</sup>. En cinco de las seis especies estudiadas se han observado efectos negativos sobre la salud<sup>113</sup>, como el blanqueamiento y la necrosis de los tejidos<sup>114</sup> (Fig. 31).

Los fragmentos de plástico más grandes favorecen la transmisión de enfermedades y los daños físicos, aumentando la vulnerabilidad de los corales a los patógenos<sup>115</sup>. Estos efectos también afectan al microbioma esquelético, que desempeña un papel clave en el mantenimiento de la salud de las colonias de coral<sup>116</sup> (Fig. 32). Las investigaciones también revelan que los biofilms presentes en los microplásticos, conocidos como "plastisferas"<sup>114</sup>, pueden provocar disbiosis del microbioma de los corales<sup>117</sup>.

El contacto con el plástico aumenta el riesgo de enfermedades en los corales del 4 % al 89 % (Fig. 33). La muerte de los arrecifes de coral tiene graves consecuencias para la biodiversidad marina, ya que constituyen el hábitat de un cuarto de todas las especies oceánicas<sup>115</sup>.



**Figura 31:** Impacto del plástico en el estado de los arrecifes de coral.

Los corales pueden reaccionar a las partículas de plástico a través de varios mecanismos de defensa, como la acción de los cilios, la producción de moco o la expansión de los tejidos, reteniendo las partículas mediante crecimiento o expulsando aquellas ingeridas por error.

Fuente: Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Responses of reef building corals to microplastic exposure. *Environmental Pollution* 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>

<sup>112</sup>Pinheiro, H. T. et al. Plastic pollution on the world's coral reefs. *Nature* 619, 311–316 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06113-5>

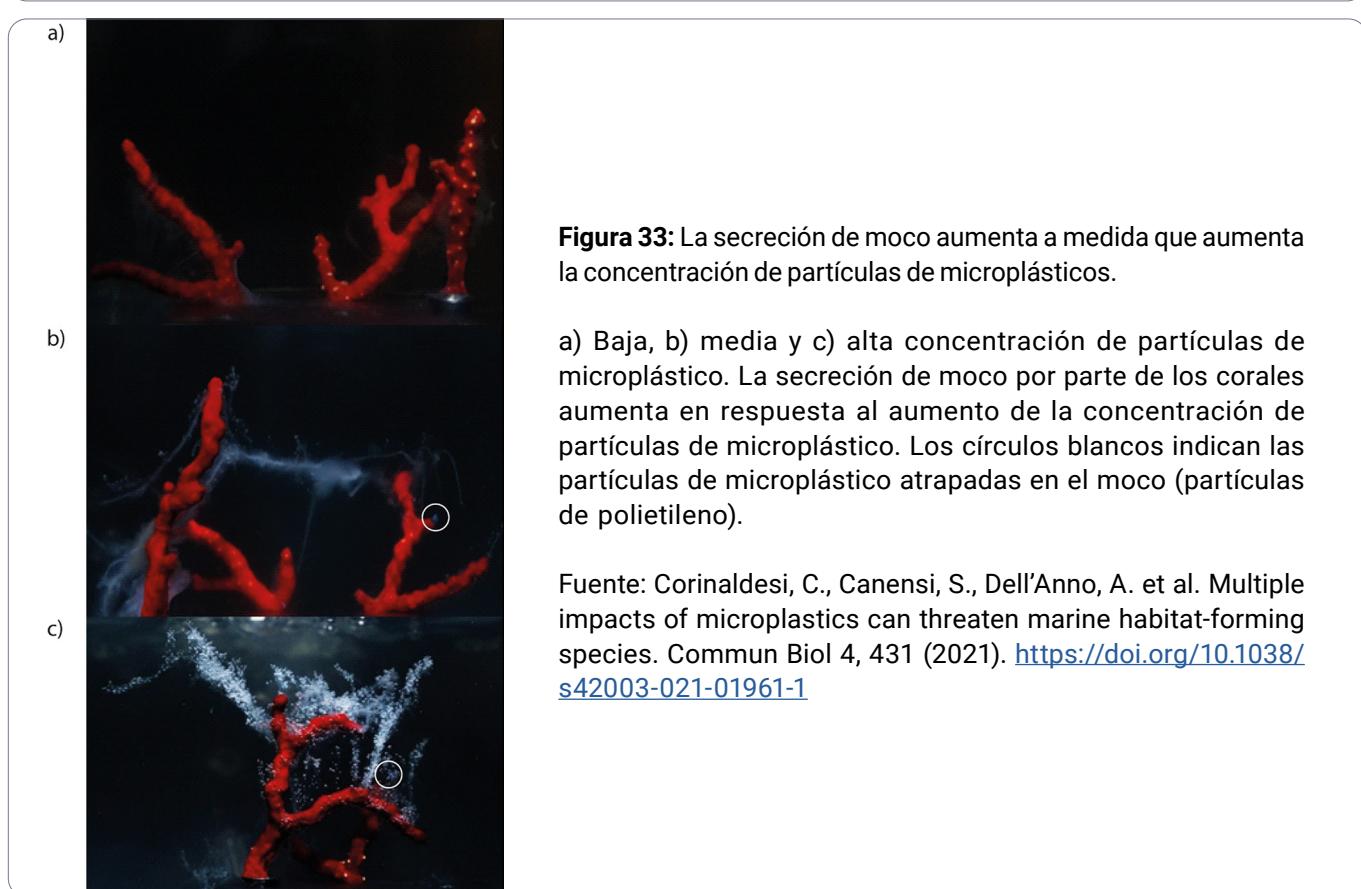
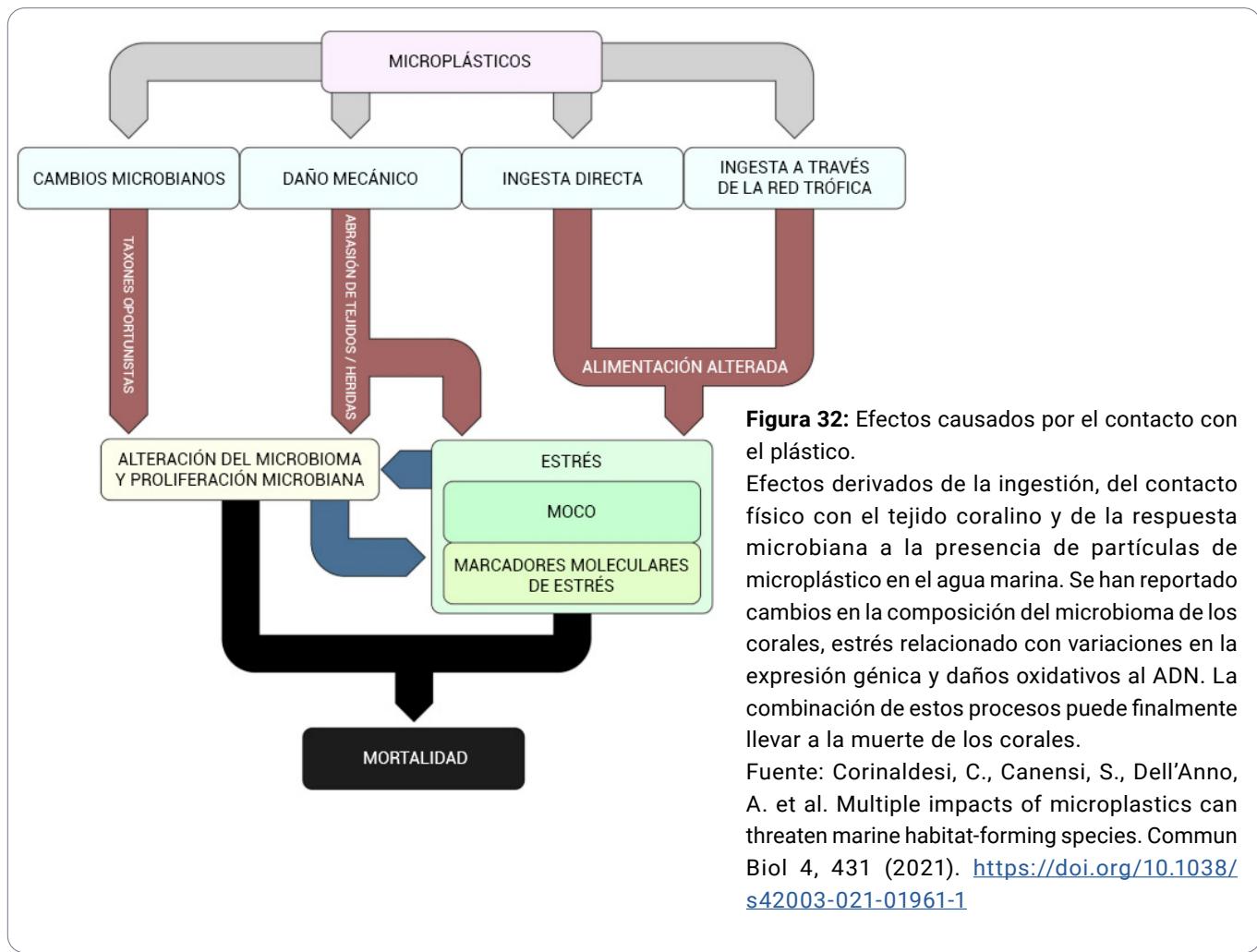
<sup>113</sup>Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Responses of reef building corals to microplastic exposure. *Environmental Pollution* 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>

<sup>114</sup>Pantos, O. Microplastics: impacts on corals and other reef organisms. *Emerging Topics in Life Sciences* 6, 81–93 (2022). <https://doi.org/10.1042/ETLS20210236>

<sup>115</sup>Lamb, J. B. et al. Plastic waste associated with disease on coral reefs. *Science* 359, 460–462 (2018). <https://doi.org/10.1126/science.aar3320>

<sup>116</sup>Corinaldesi, C., Canensi, S., Dell'Anno, A. et al. Multiple impacts of microplastics can threaten marine habitat-forming species. *Commun Biol* 4, 431 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01961-1>

<sup>117</sup>Lear, G., Kingsbury, J.M., Franchini, S. et al. Plastics and the microbiome: impacts and solutions. *Environmental Microbiome* 16, 2 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40793-020-00371-w>



## Impacto de los micro y nanoplásticos en el equilibrio de oxígeno de los ecosistemas

Las observaciones demuestran que el plástico en el ambiente se degrada principalmente bajo la influencia de la radiación solar. Este proceso altera su composición química y estructura. Los estudios confirman que las reacciones inducidas por la luz solar intensifican la liberación de compuestos orgánicos disueltos, lo que influye en la biogeoquímica del agua marina y estimula el crecimiento de bacterias heterótrofas<sup>118</sup> (Fig. 34).



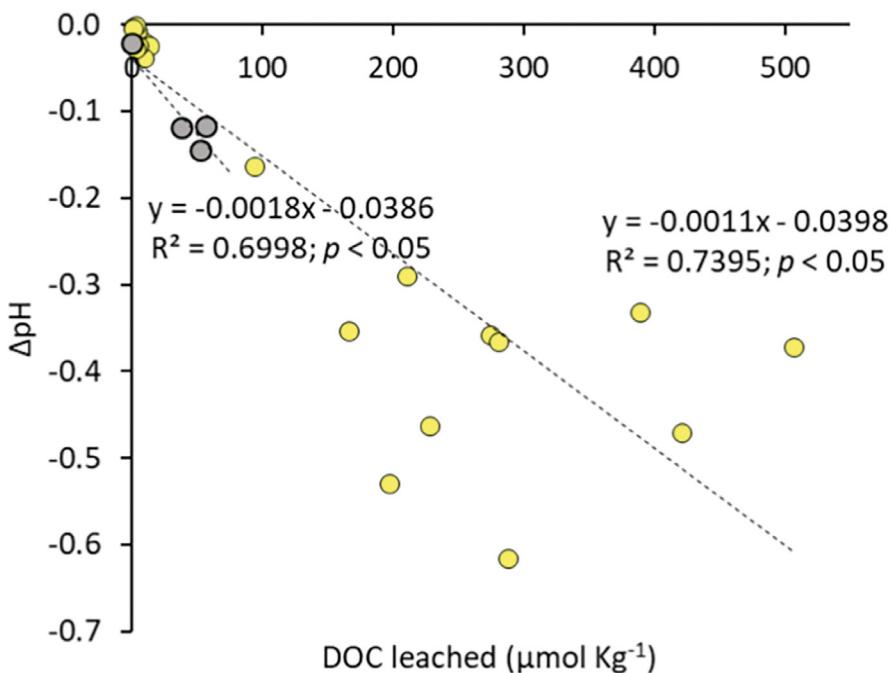
**Figura 34:** Amenazas que representan los microplásticos marinos.

Fuente: Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. Sustainability 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

Las investigaciones a largo plazo demuestran que los compuestos químicos liberados por el plástico en el agua marina durante su degradación provienen tanto del material en sí como de los aditivos utilizados para conferir color o resistencia al polímero. Algunos de estos compuestos son ácidos orgánicos, lo que explica su papel en la disminución del pH. En consecuencia, la plástica intensifica la acidificación de los océanos (Fig. 35), lo que a su vez puede comprometer de manera significativa el funcionamiento de los sistemas naturales de la Tierra<sup>119</sup>.

<sup>118</sup>Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. Sustainability 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

<sup>119</sup>Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

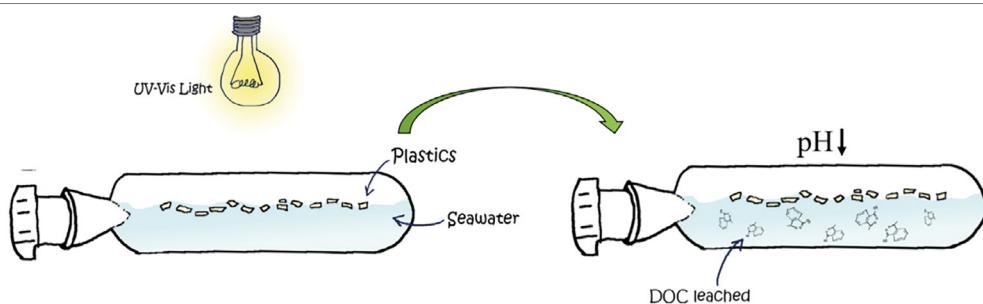


**Figura 35:** Las relaciones entre la variación del pH y el DOC (carbono orgánico disuelto) lixiviado del plástico se trazan para cada muestra repetida de todos los experimentos. También se incluyen los controles sin plástico para cada experimento. Los puntos amarillos corresponden a los tratamientos irradiados, mientras que los puntos grises corresponden a los tratamientos en oscuridad.

Fuente: Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

66

"Gracias a este estudio, hemos logrado demostrar que en las áreas oceánicas fuertemente contaminadas por plásticos, su degradación puede llevar a una disminución del pH de hasta 0,5 unidades, un valor comparable a la reducción prevista en los peores escenarios de emisiones antropogénicas para finales del siglo XXI", observa Cristina Romera-Castillo, investigadora del ICM-CSIC y primera autora del estudio, publicado en la revista Science of the Total Environment<sup>120</sup> (Fig. 36).



**Figura 36:** La liberación de compuestos del plástico puede causar una disminución del pH del agua marina de hasta 0,5 unidades.

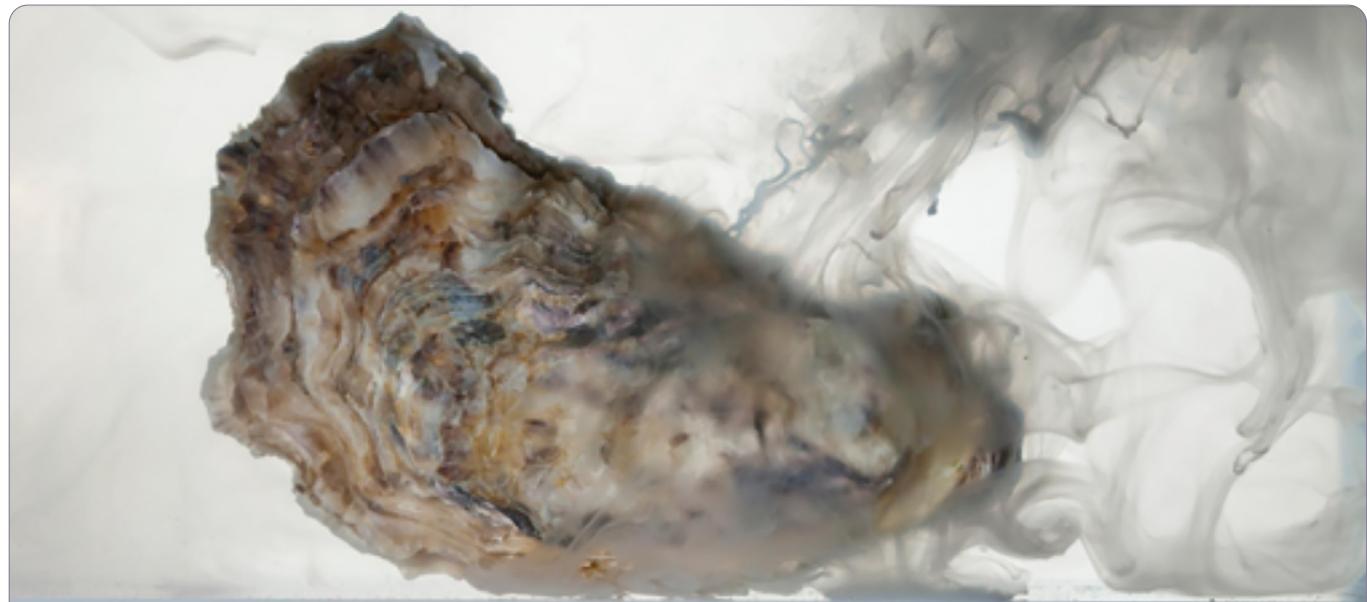
Fuente: Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

<sup>120</sup>Institute of Marine Sciences (ICM-CSIC). Plastic degradation in the ocean contributes to its acidification. <https://www.icm.csic.es/en/news/plastic-degradation-ocean-contributes-its-acidification> (Acceso: 1 de mayo 2025).

La acidificación de los océanos representa una alteración de las condiciones del entorno marino, una presión ecológica creciente y persistente<sup>121</sup>. Las consecuencias para los ecosistemas se manifiestan a lo largo de escalas temporales de décadas, siglos y más allá. Las observaciones confirman una reducción de la biodiversidad en los sistemas costeros debido a la disminución del pH<sup>122, 123</sup>. Esto disminuye la resiliencia de los ecosistemas y compromete sus funciones, incluyendo el hábitat, el ciclo de nutrientes y el almacenamiento de carbono<sup>123</sup>.

Los estudios demuestran que, en condiciones de acidificación oceánica, las mejillones (*Mytilus edulis*) crecen más lentamente y tienen una menor supervivencia (Fig. 37). Esto conlleva una disminución de su población, reduciendo su capacidad para filtrar el agua y mantener la calidad del ambiente costero<sup>124</sup>.

Los valores actuales de pH en la superficie oceánica son sin precedentes al menos en los últimos 26 000 años<sup>125</sup>. Este proceso tiene un impacto significativo en los arrecifes de coral, en los ecosistemas de aguas profundas y en aquellos de latitudes altas, que dependen de especies únicas. Estas especies desempeñan un papel insustituible, y su desaparición compromete funciones clave de los ecosistemas, ya que no existen análogos capaces de reemplazarlas<sup>126</sup>.



**Figura 37:** La ostra del Pacífico libera esperma turbia en el criadero de ostras Whiskey Creek, en Oregón. En algunas aguas costeras, la acidificación ya ha alcanzado niveles graves; aquí ha reducido la producción a la mitad, ralentizando el crecimiento de las larvas de ostra.

<https://www.nationalgeographic.com/magazine/article/ocean-acidification>

Las ostras y mejillones disminuyen significativamente en número a lo largo de los gradientes de saturación carbonática decreciente. La acidificación de los océanos puede llevar a una disminución de la población de ostras y de los servicios ecosistémicos que proporcionan en la naturaleza; además, puede comprometer su calidad como producto alimentario.

<sup>121</sup>Scott C. Doney, D. Shallin Busch, Sarah R. Cooley and Kristy J. Kroeker. The Impacts of Ocean Acidification on Marine Ecosystems and Reliant Human Communities. Annual Review of Environment and Resources 45, 83–112 (2020). <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083019>

<sup>122</sup>Hall-Spencer, J. M. & Harvey, B. P. Ocean acidification impacts on coastal ecosystem services due to habitat degradation. Emerging Topics in Life Sciences 3, 197–206 (2019). <https://doi.org/10.1042/ETLS20180117>

<sup>123</sup>James P. Barry, Stephen Widdicombe, and Jason M. Hall-Spencer. Effects of ocean acidification on marine biodiversity and ecosystem function. Ocean acidification, edited by Jean-Pierre Gattuso, Lina Hansson. Oxford, Oxford University Press, 2011. <https://books.google.com.ua/books?id=8yjNFxkALjJC&pg=PA192>

<sup>124</sup>Broszeit, S., Hattam, C. & Beaumont, N. Bioremediation of waste under ocean acidification: Reviewing the role of *Mytilus edulis*. Marine Pollution Bulletin 103, 5–14 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.040>

<sup>125</sup>The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1> (Acceso: 1 de mayo 2025).

<sup>126</sup>James P. Barry, Stephen Widdicombe, and Jason M. Hall-Spencer. Effects of ocean acidification on marine biodiversity and ecosystem function. Ocean acidification, edited by Jean-Pierre Gattuso, Lina Hansson. Oxford, Oxford University Press, 2011. <https://books.google.com.ua/books?id=8yjNFxkALjJC&pg=PA192>

Los estudios confirman un impacto negativo significativo de los microplásticos sobre los parámetros biológicos de las microalgas<sup>127</sup>, incluyendo el crecimiento, el contenido de clorofila, la actividad fotosintética y el nivel de especies reactivas de oxígeno<sup>128 129</sup>.

Según la investigación, la exposición a los microplásticos lleva a una reducción global de la fotosíntesis entre el 7,05 % y el 12,12 % en algas marinas y de agua dulce<sup>130</sup>. La fotosíntesis, como se sabe, es el principal proceso terrestre que produce oxígeno molecular ( $O_2$ ) liberado en la atmósfera.

Además, los microplásticos en los sedimentos marinos alteran las comunidades microbianas e interfieren con el ciclo del nitrógeno, agravando potencialmente problemas de origen antropogénico, como las floraciones algales tóxicas. Los cambios en las comunidades planctónicas en la superficie oceánica pueden empeorar la deoxigenación, privando a los organismos marinos del oxígeno vital<sup>131</sup>.

Los datos indican que, entre 1960 y 2010, el océano ha perdido el 2 % del oxígeno disuelto debido al aumento de la temperatura del agua y al acumulamiento de contaminantes, incluidos los vertidos industriales, domésticos y agrícolas<sup>132</sup>. La reducción de oxígeno lleva a la formación de zonas muertas, áreas oceánicas donde la flora y fauna marina han desaparecido prácticamente. Las observaciones muestran que en los años 60 existían 45 zonas muertas en los océanos del mundo, mientras que en 2011 su número había aumentado a unas 700<sup>133</sup>. Según los datos publicados en el sitio de la PNUD, el número de zonas muertas se duplica cada diez años desde 1960. Con base en esta tendencia, se puede afirmar con un alto grado de certeza que para 2025 el número podría alcanzar las 1500 unidades<sup>134</sup>.

La contaminación por plásticos afecta numerosos procesos dentro del sistema terrestre. Según las investigaciones, puede agravar problemas ambientales agudos como la pérdida de biodiversidad y el cambio climático<sup>135</sup>.

---

<sup>127</sup>Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward. Egyptian Journal of Aquatic Research 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

<sup>128</sup>Wu, Y. et al. Effect of microplastics exposure on the photosynthesis system of freshwater algae. Journal of Hazardous Materials 374, 219–227 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.039>

<sup>129</sup>Sarkar, P., Xavier, K. A. M., Shukla, S. P. & Rathi Bhuvaneswari, G. Nanoplastic exposure inhibits growth, photosynthetic pigment synthesis and oxidative enzymes in microalgae: A new threat to primary producers in aquatic environment. Journal of Hazardous Materials Advances 17, 100613 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100613>

<sup>130</sup>Zhu, R. et al. A global estimate of multiecosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. Proceedings of the National Academy of Sciences 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>

<sup>131</sup>Micoplastics pose risk to ocean plankton, climate, other key Earth systems. Mongabay. (2023) <https://news.mongabay.com/2023/10/micoplastics-pose-risk-to-ocean-plankton-climate-other-key-earth-systems> (Acceso: 1 de mayo 2025)

<sup>132</sup>Bhuiyan, M. M. U. et al. Oxygen declination in the coastal ocean over the twenty-first century: Driving forces, trends, and impacts. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering 9, 100621 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100621>

<sup>133</sup>The International Union for Conservation of Nature (IUCN). Ocean deoxygenation. <https://iucn.org/resources/issues-brief/ocean-deoxygenation> (Acceso: 1 de mayo 2025)

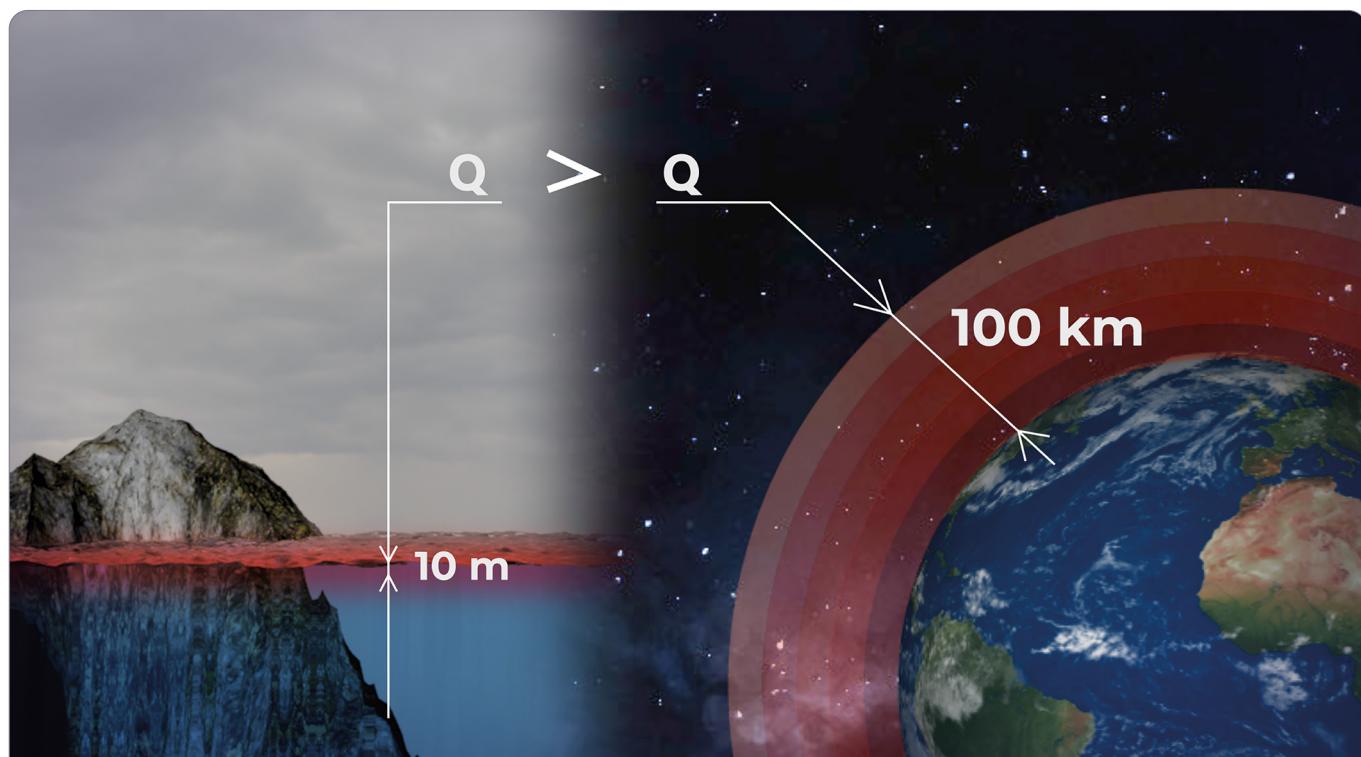
<sup>134</sup>United Nations Development Programme. Ocean hypoxia: Dead zones. <https://www.undp.org/publications/issue-brief-ocean-hypoxia-dead-zones> (Acceso: 1 de mayo 2025)

<sup>135</sup>Villarrubia-Gómez, P., Carney Almroth, B., Eriksen, M., Ryberg, M. & Cornell, S. E. Plastics pollution exacerbates the impacts of all planetary boundaries. One Earth 7, 2119–2138 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.10.017>

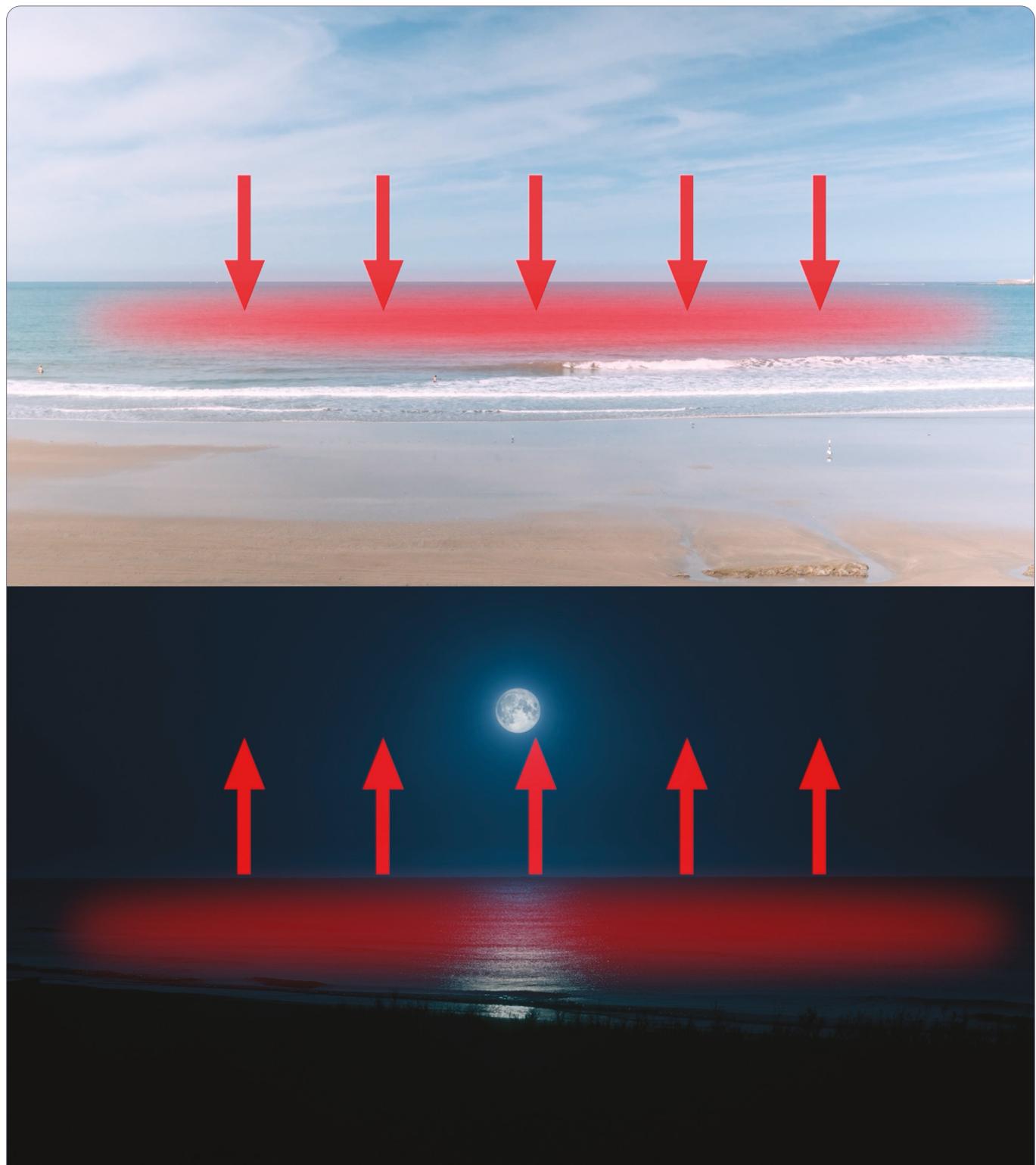
## IMPACTO DE LOS MICRO Y NANOPLÁSTICOS (MNP) EN EL CLIMA

### Funciones del océano

El océano desempeña un papel clave en el mantenimiento del equilibrio climático del planeta, funcionando como un "aire acondicionado" natural. Su capacidad única para acumular y liberar gradualmente el calor permite mitigar las variaciones de temperatura en la Tierra. Una capa de agua oceánica de apenas diez metros de grosor puede absorber más calor que toda la atmósfera terrestre (Fig. 38). Esto reduce las fluctuaciones térmicas tanto entre el día y la noche (Fig. 39), como entre las estaciones: verano e invierno.



**Figura 38:** Capacidad térmica comparativa del océano y la atmósfera: a pesar de que la masa del aire es menor, el océano es capaz de acumular y retener decenas de veces más calor, desempeñando un papel clave en la regulación del clima terrestre.



**Figura 39:** Representación esquemática del intercambio térmico diario: el océano absorbe calor durante el día y lo libera durante la noche, moderando las fluctuaciones de la temperatura del aire.

Las corrientes oceánicas transportan el agua caliente desde los trópicos hacia las regiones más frías, como las latitudes del norte, lo que ayuda a mitigar el clima en las zonas costeras. Por el contrario, las corrientes frías llevan el agua enfriada hacia el ecuador. De esta manera, el océano regula el clima del planeta.

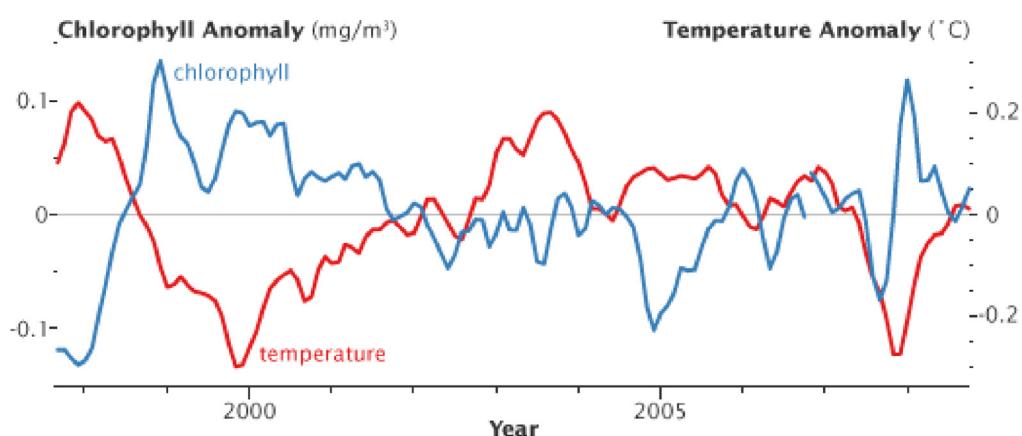
El océano tiene una influencia significativa sobre los procesos atmosféricos, desempeñando un papel clave en la formación de nubes y precipitaciones. Cada día, una gran cantidad de agua se evapora de su superficie, se condensa en nubes y regresa a la Tierra en forma de lluvia o nieve. Este proceso es fundamental para el suministro de agua dulce en ríos, lagos y en el suelo.

Las algas microscópicas en el océano, como el fitoplancton (Fig. 40), producen más del 50 % del oxígeno<sup>136</sup>. Muchos modelos de química y biología oceánica predicen que, con el calentamiento de la superficie oceánica en respuesta al aumento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, la productividad del fitoplancton disminuirá<sup>137, 138</sup> (Fig. 41).



**Figura 40:** El fitoplancton es extremadamente diverso, variando desde bacterias fotosintéticas (cianobacterias) hasta diatomeas similares a plantas, pasando por coccolitoforos con caparazón protector (las imágenes no están a escala). (Collage adaptado de ilustraciones y microfotografías de Sally Bensusen, NASA EOS Project Science Office)

Fuente: NASA. What are Phytoplankton? <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton>



**Figura 41:** Aproximadamente el 70 % del océano está permanentemente estratificado, con capas que se mezclan poco. En el período comprendido entre finales de 1997 y mediados de 2008, los satélites observaron que las temperaturas superiores a la media (línea roja) conducían a concentraciones de clorofila inferiores a la media (línea azul) en estas áreas. (Gráfico adaptado de Behrenfeld et al. 2009, visualización de Robert Simmon)

<https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton>

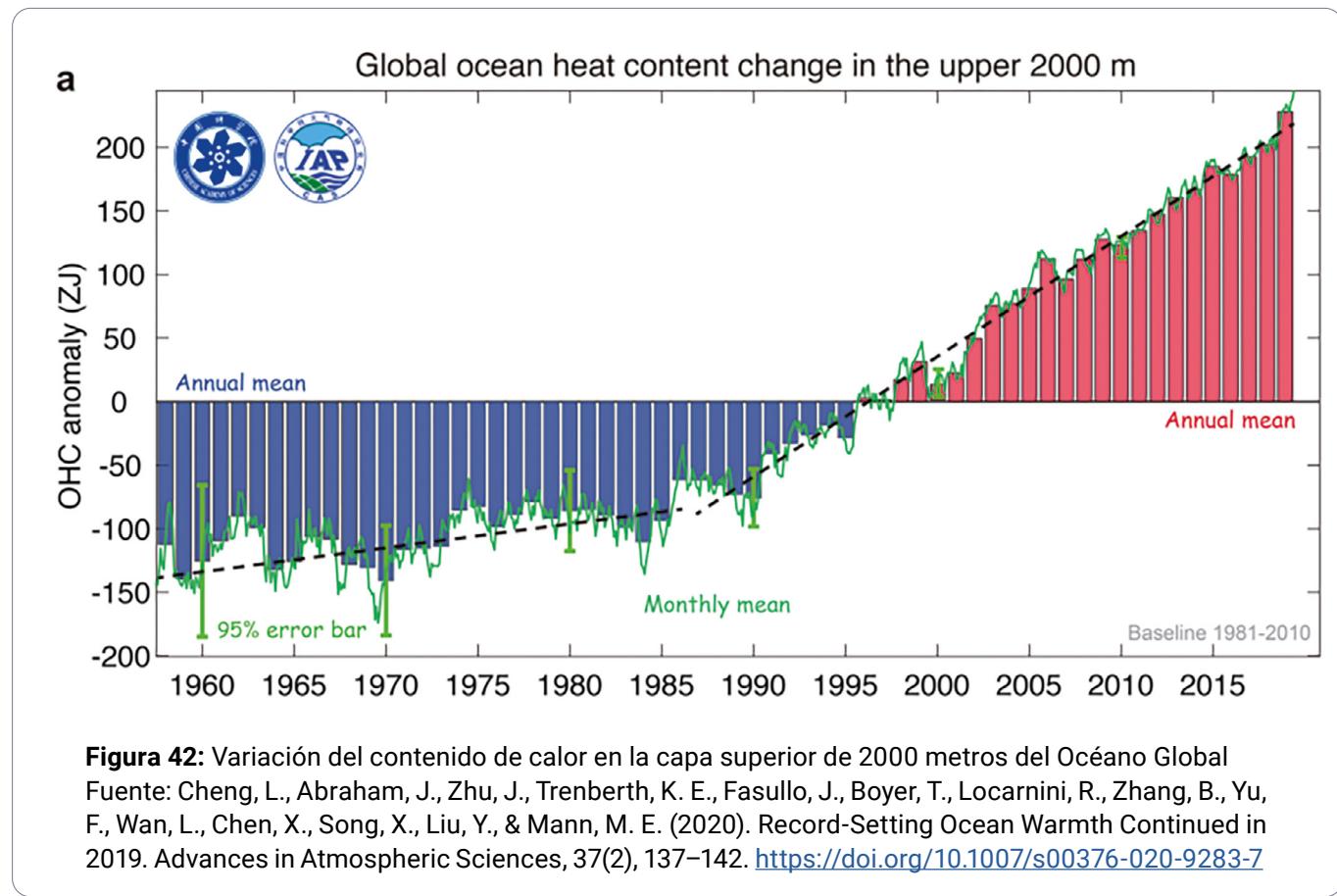
<sup>136</sup>NOAA. How much oxygen comes from the ocean? <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ocean-oxygen.html> (Acceso: 1 de mayo 2025)

<sup>137</sup>Boyce, D. G., Lewis, M. R. & Worm, B. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature* 466, 591–596 (2010). <https://doi.org/10.1038/nature09268>

<sup>138</sup>Bopp, L. et al. Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models. *Biogeosciences* 10, 6225–6245 (2013). <https://doi.org/10.5194/bg-10-6225-2013>

## Variación del régimen térmico del océano

Según el Informe sobre el Estado del Océano Mundial de 2024, la situación es alarmante: se observa un calentamiento oceánico sin precedentes. Las investigaciones muestran que, entre 1960 y 1986, se registró un aumento constante de la temperatura de los océanos. Sin embargo, en las últimas décadas, este proceso se ha acelerado dos veces más<sup>139</sup> (Fig. 42).



**Figura 42:** Variación del contenido de calor en la capa superior de 2000 metros del Océano Global  
Fuente: Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J., Trenberth, K. E., Fasullo, J., Boyer, T., Locarnini, R., Zhang, B., Yu, F., Wan, L., Chen, X., Song, X., Liu, Y., & Mann, M. E. (2020). Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37(2), 137–142. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

El 2023 fue el año más cálido jamás registrado, superando el récord anterior establecido en 2016. También se registró un récord absoluto de la temperatura de la superficie oceánica<sup>140</sup>. Esta tendencia continuó: el 2024 superó los récords de 2023 (Fig. 43) y se convirtió en el año más cálido de todo el período de observación<sup>141</sup>. Durante este período, la temperatura de la superficie oceánica se mantuvo excepcionalmente alta durante 15 meses consecutivos, subrayando la persistencia del calentamiento observado.

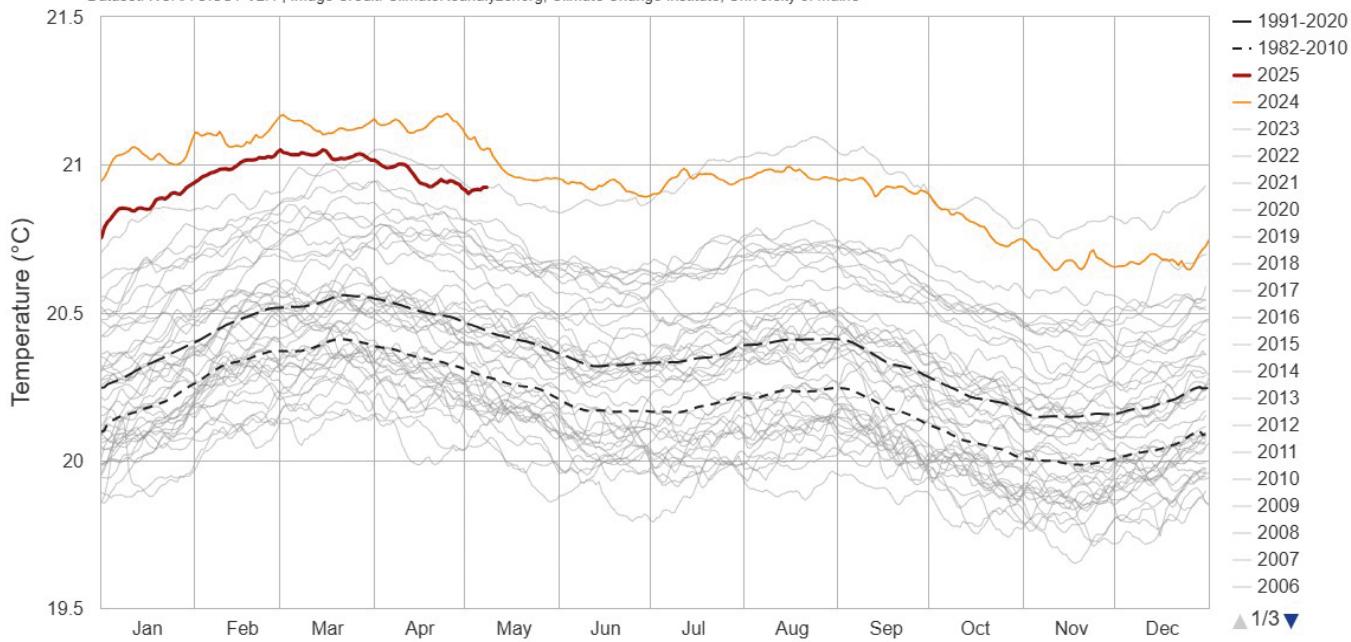
<sup>139</sup>Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J. et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Adv. Atmos. Sci.* 37, 137–142 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

<sup>140</sup>NOAA. Earth had its warmest year on record; Upper-ocean heat content was record high while Antarctic sea ice was record low. <https://www.ncei.noaa.gov/news/global-climate-202312> (Acceso: 1 de mayo 2025)

<sup>141</sup>World Meteorological Organization (WMO) confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level.

### Daily Sea Surface Temperature, World (60°S–60°N, 0–360°E)

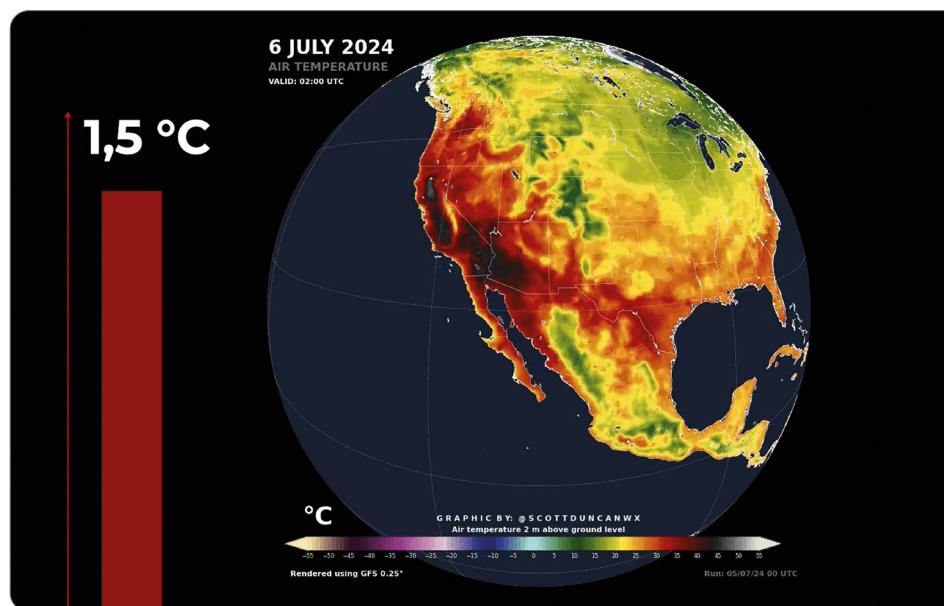
Dataset: NOAA OISST V2.1 | Image Credit: ClimateReanalyzer.org, Climate Change Institute, University of Maine



**Figura 43:** Temperaturas diarias de la superficie del mar: representación gráfica de las variaciones de la temperatura del nivel superficial del océano, que refleja las oscilaciones estacionales a lo largo de los años. Fuente: NOAA OISST V2.11

Crediti immagine: Climate [Reanalyzer.org](https://ClimateReanalyzer.org), Climate Change Institute, University of Maine  
[Climate Reanalyzer - Daily Sea Surface Temperature](https://ClimateReanalyzer.org/datasets/daily-sea-surface-temperature/)

Por primera vez en la historia, la temperatura media anual ha superado en 1,5 °C el nivel del período preindustrial<sup>142</sup> (Fig. 44). Según los expertos, este valor representa un umbral crítico, más allá del cual la humanidad enfrentará trastornos climáticos a gran escala<sup>143</sup>.



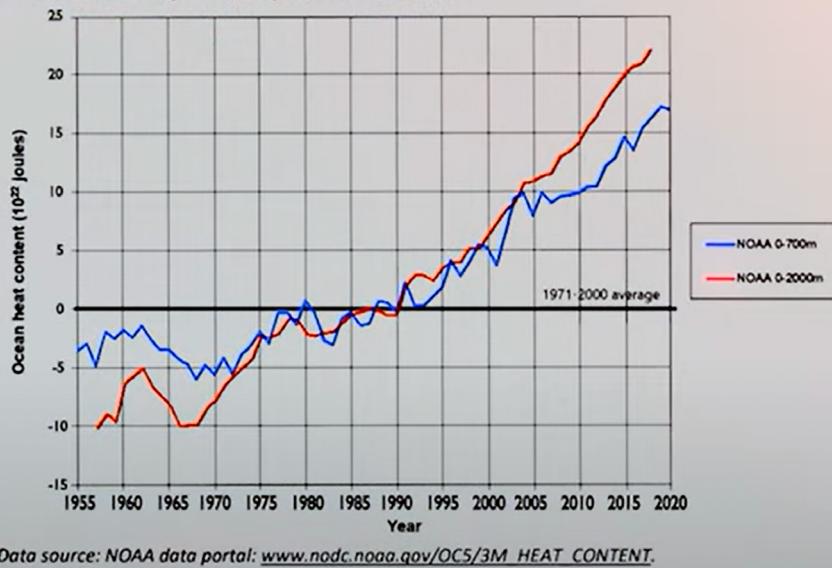
**Figura 44:**  
Representación esquemática del umbral climático: en 2024, la temperatura media global anual superó por primera vez el umbral de 1,5 °C en comparación con los niveles preindustriales.

<sup>142</sup>World Meteorological Organization (WMO). State of the Global Climate 2024. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024> (Acceso: 1 de mayo 2025)

<sup>143</sup>IPCC. Global Warming of 1.5°C. (Cambridge University Press, 2022). <https://doi.org/10.1017/9781009157940> (Acceso: 1 de mayo 2025)

Se esperaba que dicho aumento de la temperatura ocurriera a mediados del siglo XXI<sup>144</sup>; sin embargo, este umbral ya ha sido superado. Según las estimaciones de las Naciones Unidas, si las tendencias actuales continúan, la temperatura global podría aumentar en casi 3 °C para finales de este siglo<sup>144</sup>.

**Figure TD-5. Ocean Heat Content in the Top 700 Meters and the Top 2,000 Meters in the NOAA Data Sets, 1955–2020, with Standard Errors**



**Figura 45:** Contenido de calor del océano en los primeros 700 metros y en los primeros 2000 metros Conjunto de datos NOAA, 1955-2020, estándar.

Fuente: Portal de datos NOAA [www.nodc.noaa.gov/OC5/3M\\_HEAT\\_CONTENT](http://www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT).

#### Figura 46:

Este diagrama muestra las variaciones del contenido térmico en los primeros 700 metros del océano mundial desde 1955 hasta 2023. El calor contenido en el océano se mide en julios, una unidad de energía, y se compara con el promedio del período 1971-2000, que se establece en cero como referencia. La elección de un período de referencia diferente no cambiará la forma de los datos a lo largo del tiempo. Las líneas han sido calculadas de manera independiente utilizando diferentes métodos por parte de organizaciones gubernamentales de cuatro países: la Administración Nacional Oceánica

y Atmosférica (NOAA) de los Estados Unidos, la Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth (CSIRO) de Australia, el Instituto de Física Atmosférica de China (IAP) y el Instituto de Investigación Meteorológica de la Agencia Meteorológica de Japón (MRI/JMA).



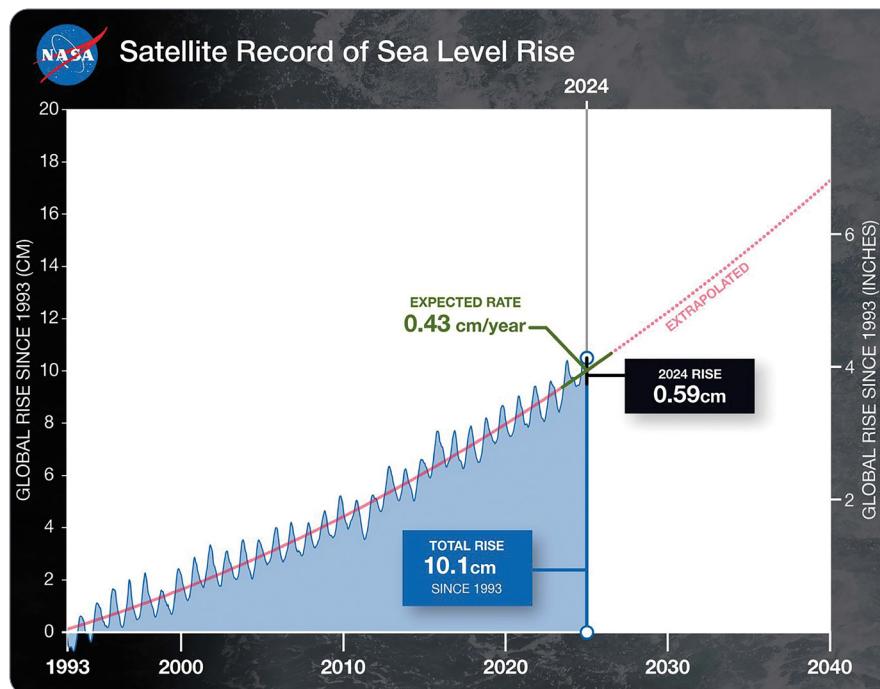
Fuente: CSIRO, 2024; IAP, 2024; MRI/JMA, 2024; NOAA, 2024.

<sup>144</sup>The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

En los últimos 60 años, los océanos a profundidades intermedias se han calentado 15 veces más rápido que en los 10 000 años anteriores<sup>145</sup> (Fig. 45, 46). Esto demuestra que los procesos de calentamiento global no solo afectan las capas superficiales del agua, sino también las partes más profundas del océano, donde ni siquiera llegan los rayos solares. Para calentar el agua a tales profundidades se requiere una enorme cantidad de energía, lo que subraya la magnitud del problema. Según las estimaciones de los científicos, para que el océano se caliente al ritmo actual, es necesario un liberación de energía equivalente a la explosión de 7 bombas atómicas cada segundo durante un año entero<sup>146</sup>, datos alarmantes que plantean una pregunta: ¿de dónde proviene toda esta energía?

El aumento de la temperatura del agua conlleva inevitablemente un aumento del nivel del mar, que amenaza con sumergir extensas zonas costeras. En los últimos dos siglos, el nivel del mar ha subido 21 cm, de los cuales 10,1 cm<sup>147</sup> se han registrado solo en los últimos 30 años. El ritmo actual de aumento es 2,5 veces mayor que el anterior y la tendencia parece destinada a continuar. Si la situación no cambia, millones de personas se convertirán en refugiados climáticos, obligados a abandonar sus hogares y buscar refugio lejos de las costas.

*“El aumento observado en 2024 fue mayor de lo que esperábamos”, declaró Josh Willis, investigador del nivel del mar en el Jet Propulsion Laboratory de la NASA en el sur de California. “Cada año es ligeramente diferente, pero está claro que el océano sigue subiendo, y la velocidad del aumento es cada vez más rápida”<sup>148</sup> (Fig. 47).*



**Figura 47:** Este gráfico muestra el nivel medio global del mar (en azul) desde 1993, medido por una serie de cinco satélites. La línea roja continua indica la trayectoria de este aumento, que se ha más que duplicado en las últimas tres décadas. La línea roja punteada representa la proyección del aumento futuro del nivel del mar. Créditos: NASA/JPL-Caltech.

Fuente: NASA. NASA Analysis Shows Unexpected Amount of Sea Level Rise in 2024  
<https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024>

El calentamiento de los océanos también contribuye a eventos meteorológicos extremos cada vez más frecuentes e intensos, como inundaciones, tifones y precipitaciones anómalas. Estos cambios amenazan los ecosistemas del planeta y la vida de miles de millones de personas, volviéndose cada año más evidentes.

<sup>145</sup>Rosenthal, Y., Linsley, B. K., & Oppo, D. W. (2013). Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science*, 342(6158), 617–621. <https://doi.org/10.1126/science.1240837>; Oppo, D. (2013, October 31). Is Global Heating Hiding Out in the Oceans? <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Acceso: 1 de mayo 2025)

<sup>146</sup>Взят прирост энергии океана в 1022 джоулей в 2022 году по сравнению с 2021 годом (Cheng, L. et al. Another Year of Record Heat for the Oceans. *Adv. Atmos. Sci.* 40, 963–974 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00376-023-2385-2>) и энергия ядерного взрыва  $6.3 \times 10^{13}$  джоулей.

<sup>147</sup>NASA. Tracking 30 Years of Sea Level Rise <https://earthobservatory.nasa.gov/images/150192/tracking-30-years-of-sea-level-rise> (Acceso: 1 de mayo 2025)

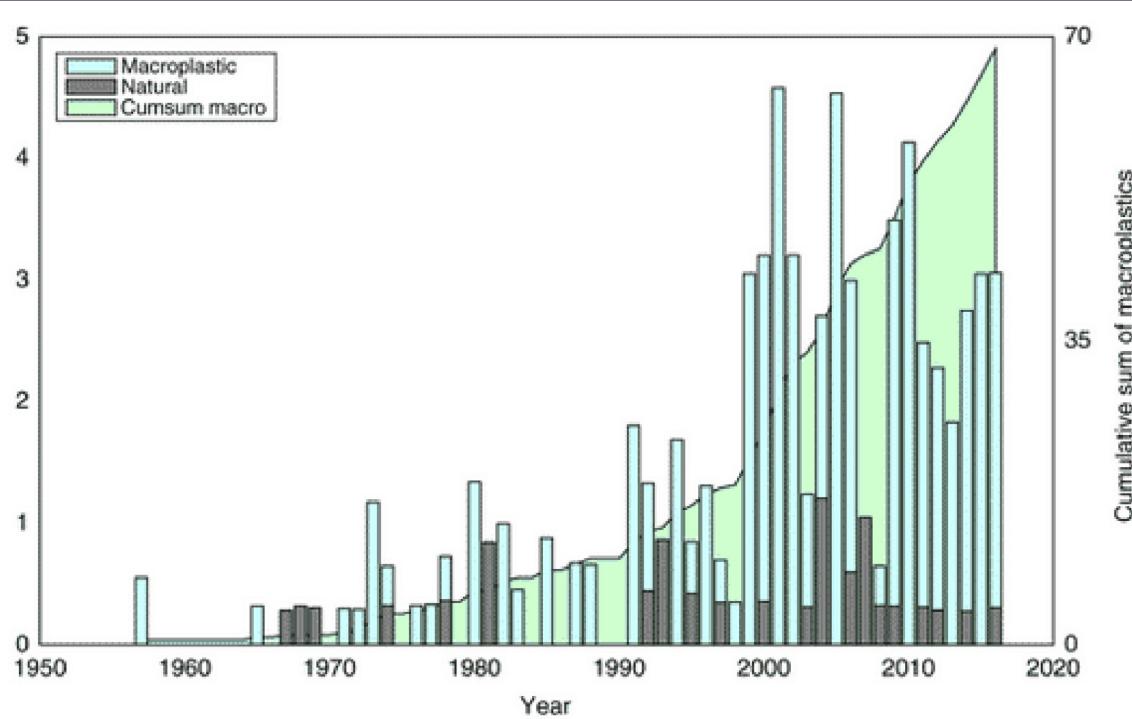
<sup>148</sup>NASA. NASA Analysis Shows Unexpected Amount of Sea Level Rise in 2024 <https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024> (Acceso: 1 de mayo 2025)

## ¿Por qué se calienta el océano? Hipótesis

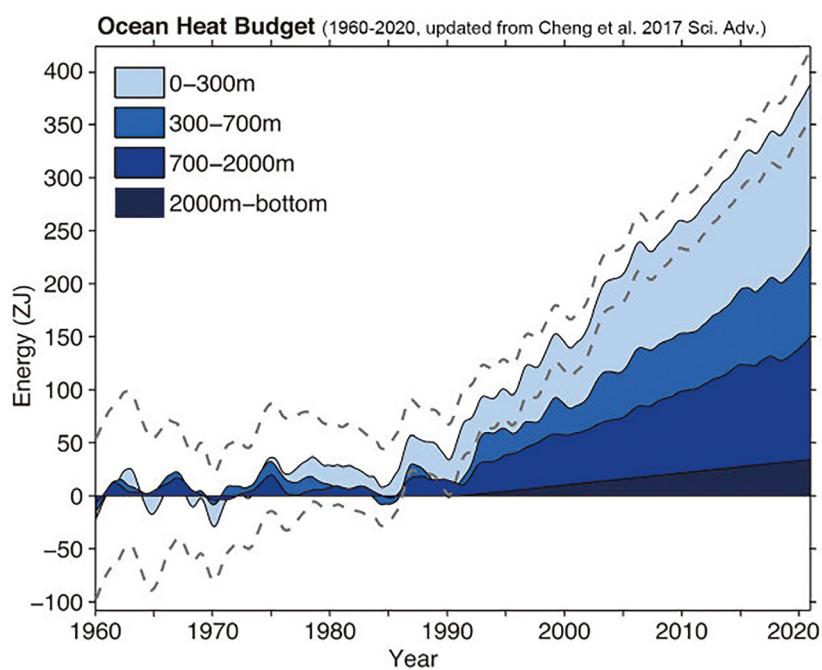
Los principales factores comúnmente reconocidos que contribuyen al calentamiento del océano son los gases de efecto invernadero, como el CO<sub>2</sub>, que retienen el calor en la atmósfera y aumentan la temperatura de las capas superficiales de las aguas oceánicas. Sin embargo, también existen otros factores que pueden influir significativamente en este proceso. Un factor adicional del calentamiento oceánico también será abordado en el capítulo “Factor X: El impacto de los micro y nanoplásticos en la dinámica del ciclo de cataclismos naturales”.

Desde la segunda mitad del siglo XX se observa un marcado aumento en la cantidad de plástico en los océanos, que coincide con el período de rápido desarrollo industrial y producción masiva de objetos de plástico (Fig. 48). Entre 1960 y 2019 también se registra una variación en la temperatura oceánica. El gráfico (Fig. 49) muestra un aumento paralelo de la temperatura media de la superficie oceánica, también a partir de la mitad del siglo XX.

Al comparar los dos gráficos (Fig. 48, 49), se puede notar una correlación entre el aumento de la concentración de plástico en los océanos y el calentamiento de las aguas. Esto sugiere que la contaminación por plástico en los océanos podría ser uno de los factores significativos, pero aún insuficientemente estudiados, que contribuyen al calentamiento de las aguas oceánicas.



**Figura 48:** Gráfico que muestra el aumento de la concentración de plástico en los océanos en las últimas décadas. Suma acumulada de macroplásticos presentes en el océano y valores anuales. Fuente: Ostle, C., Thompson, R. C., Broughton, D., Gregory, L., Wootten, M., & Johns, D. G. (2019). The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. *Nature Communications*, 10(1622). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>



**Figura 49:**

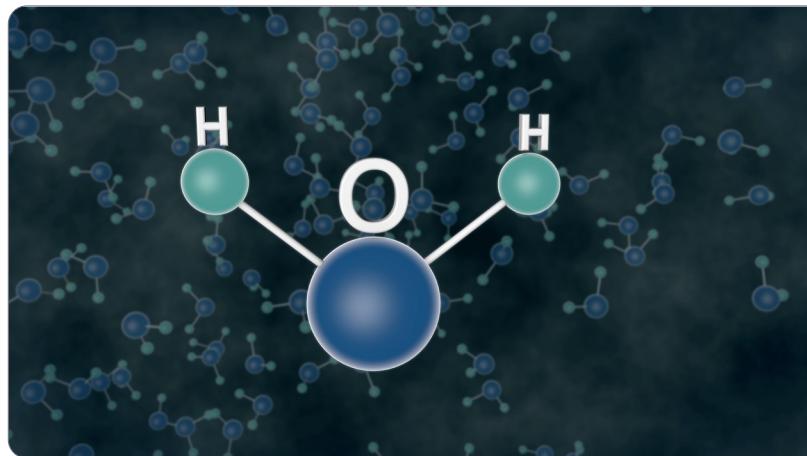
Gráfico de la variación de la temperatura del océano global en el mismo período (1960-2019).

Fuente: (Purkey and Johnson, 2010; información actualizada Cheng y otros., 2017) Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J., Trenberth, K. E., Fasullo, J., Boyer, T., Locarnini, R., Zhang, B., Yu, F., Wan, L., Chen, X., Song, X., Liu, Y., & Mann, M. E. (2020). Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37, 137–142. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

Para profundizar en este tema, es fundamental comprender si el plástico puede influir en las propiedades físicas del agua oceánica, como la conductividad térmica y la capacidad calorífica. ¿Podrían estos cambios contribuir al aumento de la temperatura de los océanos? Para responder a esta pregunta, examinaremos más de cerca las características fundamentales del agua y la forma en que interactúa con los contaminantes.

## Principales características del agua

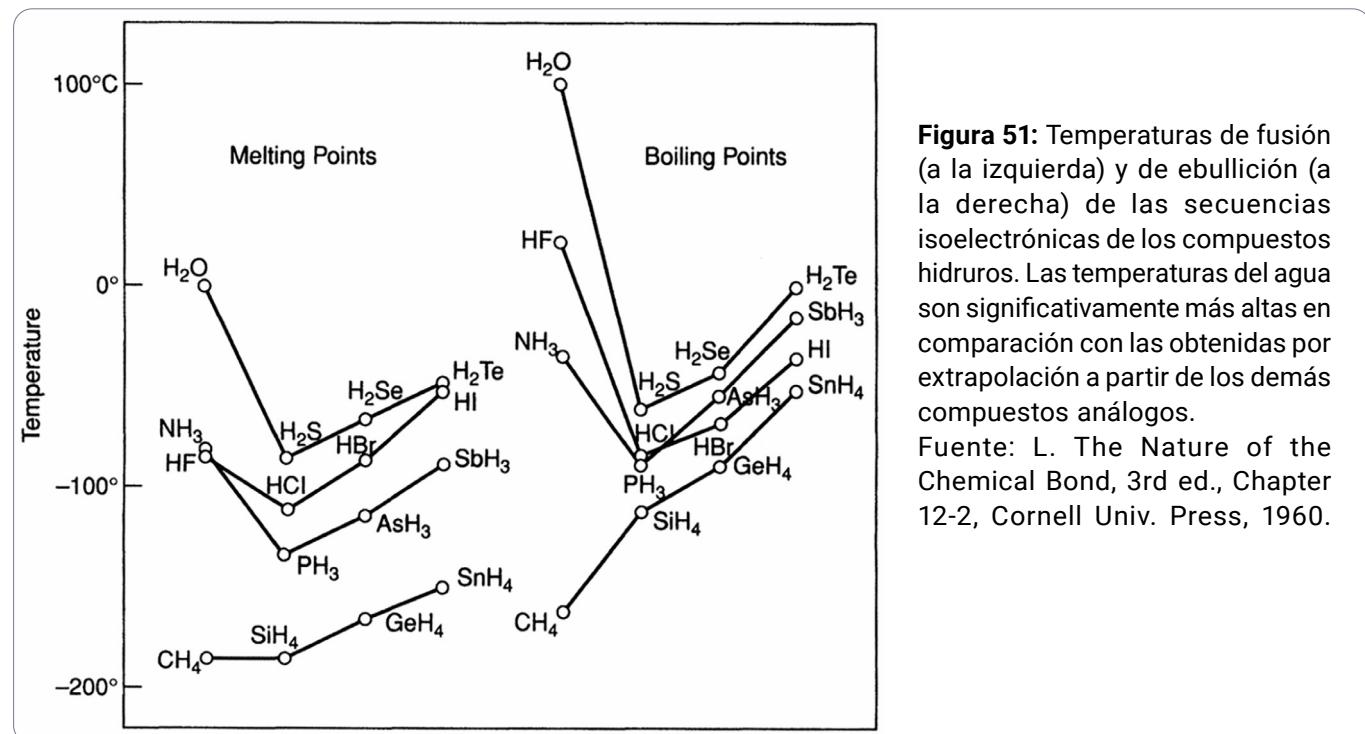
La molécula de agua tiene una forma en V simétrica, en la que los dos átomos de hidrógeno están dispuestos a un lado respecto al átomo de oxígeno, que es más grande (Fig. 50).



**Figura 50:**

Representación esquemática de la molécula de agua: dos átomos de hidrógeno (H) están unidos a un átomo de oxígeno (O) con un ángulo de aproximadamente 104,5°, formando un dipolo con cargas positiva y negativa.

Esta estructura es diferente de la de las moléculas lineales, como por ejemplo el CO<sub>2</sub>, en las que todos los átomos están dispuestos en línea recta. Esta forma de la molécula de agua la hace única y fundamental para numerosos procesos en la Tierra. Las características particulares de las moléculas de agua permiten que el agua permanezca en estado líquido a temperaturas que normalmente provocarían la transformación en gas de otras moléculas triatómicas (Fig. 51).



**Figura 51:** Temperaturas de fusión (a la izquierda) y de ebullición (a la derecha) de las secuencias isoelectrónicas de los compuestos hidruros. Las temperaturas del agua son significativamente más altas en comparación con las obtenidas por extrapolación a partir de los demás compuestos análogos.

Fuente: L. The Nature of the Chemical Bond, 3rd ed., Chapter 12-2, Cornell Univ. Press, 1960.

Esto ocurre gracias a los enlaces de hidrógeno<sup>149</sup> que unen las moléculas de agua, formando una estructura estable y ordenada.

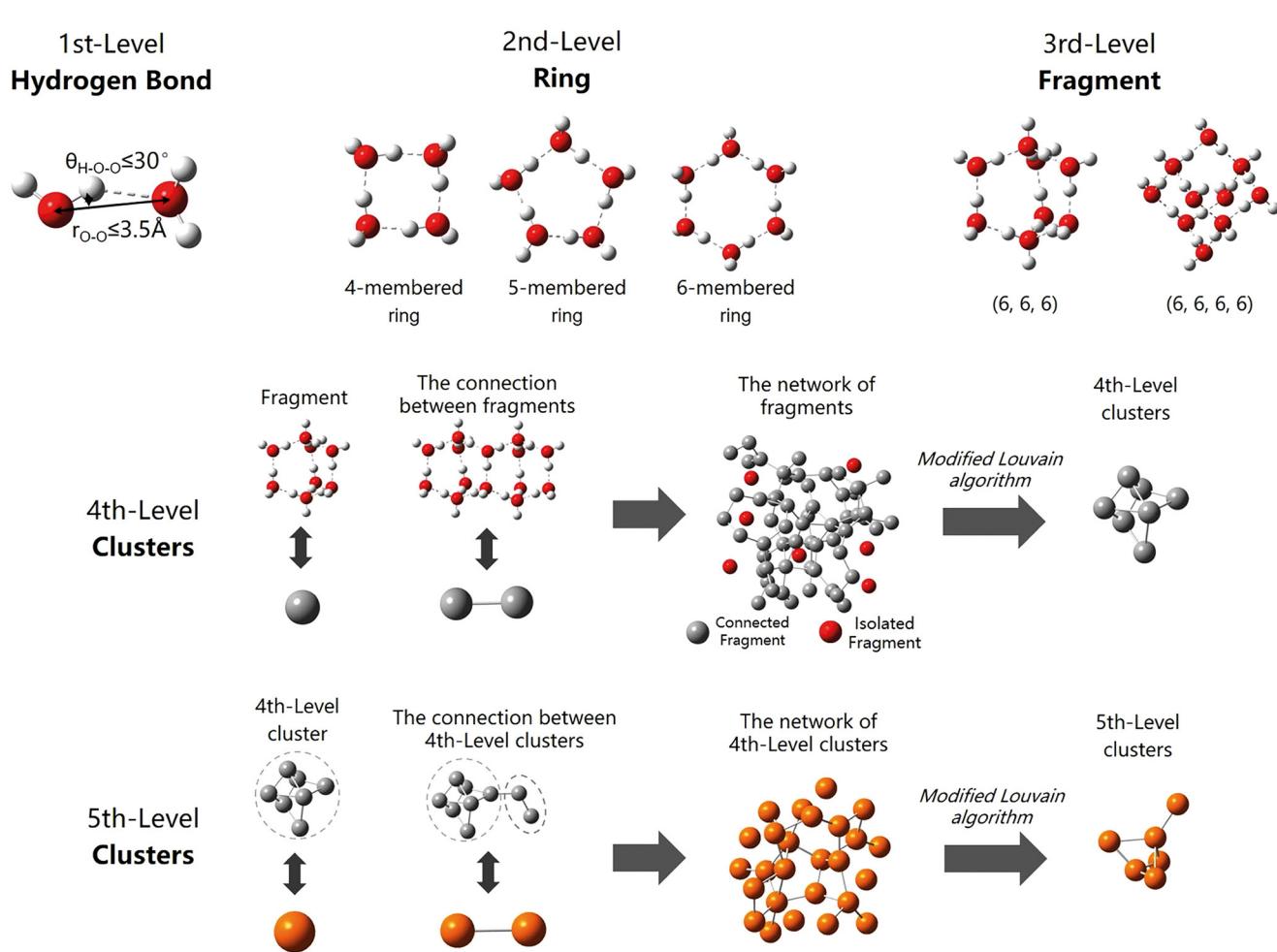
La mayoría de los enlaces de hidrógeno son atracciones débiles, con una fuerza equivalente a aproximadamente una décima parte de la de un enlace covalente normal. Sin embargo, son extremadamente importantes. Sin ellos, todas las estructuras de madera colapsarían, el cemento se desmenuzaría, los océanos se evaporarían y toda la vida se desintegraría en materia inanimada<sup>150</sup>.

Por esta razón, el agua tiene la capacidad de formar clústeres, lo que explica muchas de sus propiedades anómalas (Figs. 52, 53). Los clústeres de agua pueden involucrar más del 95 % de la red de enlaces de hidrógeno, y algunos clústeres pueden comprender miles de moléculas, extendiéndose más allá de los 3,0 nanómetros<sup>151</sup>.

<sup>149</sup> Pauling, L. The Nature of the Chemical Bond, 3rd edn, Chapter 12-2 (Cornell Univ. Press, 1960).

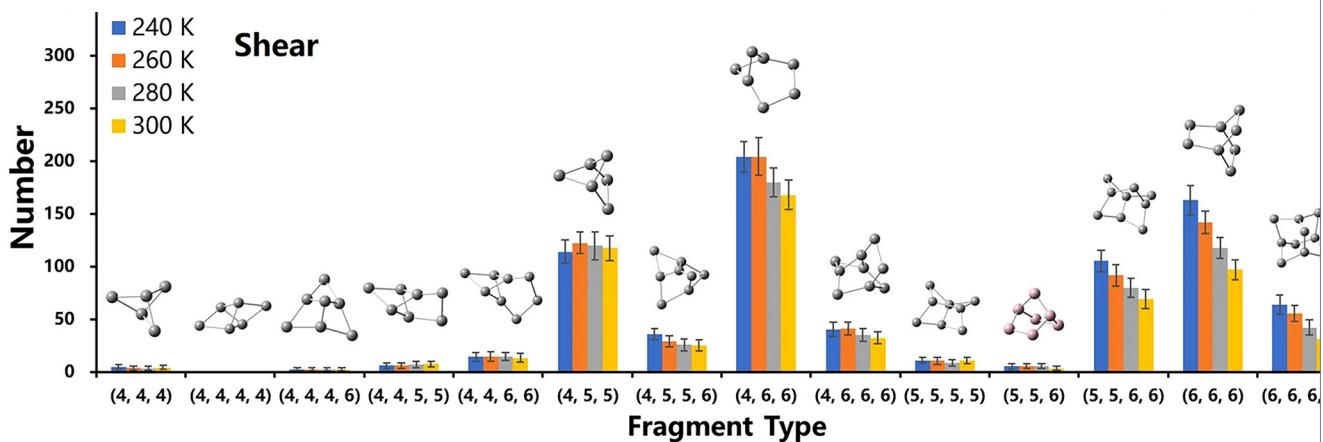
<sup>150</sup> Jeffrey, G. A. An Introduction to Hydrogen Bonding (Oxford University Press, New York, 1997). <https://books.google.com/books?vid=ISBN0195095499>

<sup>151</sup> Gao, Y., Fang, H., Ni, K. & Feng, Y. Water clusters and density fluctuations in liquid water based on extended hierarchical clustering methods. Sci Rep 12, 8036 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11947-6>



**Figura 52:** Esquema del método de agrupamiento jerárquico propuesto en este estudio. Los enlaces de hidrógeno, los anillos y los fragmentos se consideran estructuras de primer, segundo y tercer nivel, que desde una perspectiva química representan modelos de esferas y bastones, donde las esferas rojas y blancas indican, respectivamente, los átomos de oxígeno e hidrógeno. Las esferas llenas y punteadas indican respectivamente los enlaces covalentes O–H y los enlaces de hidrógeno. Los clústeres de 4º y 5º nivel se ilustran desde una perspectiva topológica. Las esferas representan la estructura de los últimos niveles. Cabe señalar que las estructuras en la figura son solo una selección entre las consideradas por el algoritmo de agrupamiento.

Fuente: Gao, Y., Fang, H. & Ni, K. A hierarchical clustering method of hydrogen bond networks in liquid water undergoing shear flow. Sci Rep 11, 9542 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88810-7>



**Figura 53:** Distribución de las estructuras jerárquicas de primer, segundo y tercer nivel en la red en diferentes casos.

- (a) Distribución de los enlaces de hidrógeno (estructuras de primer nivel) a distintas temperaturas.
- (b) Distribución de los anillos (estructuras de segundo nivel) a distintas temperaturas.
- (c) Distribución de los fragmentos (estructuras de tercer nivel) a distintas temperaturas. Cabe señalar que (4, 4, 4) representa un símbolo de fragmento que incluye tres anillos de cuatro miembros.

Fuente: Gao, Y., Fang, H. & Ni, K. A hierarchical clustering method of hydrogen bond networks in liquid water undergoing shear flow. Sci Rep 11, 9542 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88810-7>

## Capacidad térmica, conductividad térmica y densidad del agua y su significado funcional

### 1. Alta capacidad térmica del agua

El agua posee la capacidad térmica específica más alta entre los líquidos y sólidos en condiciones normales, superada solo por algunos gases como el hidrógeno<sup>152</sup>. Esto significa que es capaz de absorber, retener y transferir grandes cantidades de energía térmica con una variación relativamente pequeña de su propia temperatura. La capacidad térmica del agua se define como la cantidad de calor necesaria para aumentar la temperatura de 1 gramo de agua en 1 grado Celsius, y corresponde a aproximadamente 4,18 J/(g·°C) en condiciones estándar. Esta propiedad es uno de los factores clave en la regulación del clima: el agua de los océanos almacena calor durante el día y lo libera lentamente durante la noche.

En verano, el océano absorbe el exceso de calor, mientras que en invierno lo libera gradualmente, actuando como un enorme termostato y mitigando las oscilaciones térmicas del planeta.

### 2. Conductividad térmica del agua

El agua tiene una conductividad térmica relativamente baja en comparación con los metales, pero superior a la de muchos otros líquidos. La conductividad térmica representa la capacidad de una sustancia para transmitir calor de una parte a otra en ausencia de movimiento interno de la sustancia. En el caso del agua, es de aproximadamente 0,6 W/(m·K) en condiciones estándar (25 °C), lo que la convierte en un conductor de calor eficaz en procesos naturales, como la distribución del calor en los océanos y en otros cuerpos de agua.

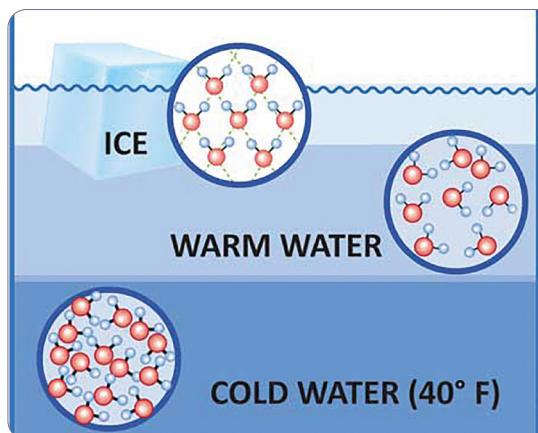
<sup>152</sup>Lide, D. R. (ed.) CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85th edn (CRC Press, 2004).

Las observaciones muestran que la conductividad térmica del agua aumenta con la temperatura hasta cierto límite<sup>152</sup>. Además, este valor puede variar en presencia de impurezas o sustancias disueltas<sup>153, 154</sup>. Estas características influyen en la distribución del calor en el agua, un aspecto crucial para comprender las interacciones entre el océano y la atmósfera.

### 3. Comportamiento anómalo de la densidad del agua

A diferencia de la mayoría de las sustancias, la densidad del agua se comporta de manera anómala al variar la temperatura. Al enfriarse hasta los 4 °C, su densidad aumenta, pero al continuar el enfriamiento (de 4 °C a 0 °C), la densidad comienza a disminuir (Fig. 54).

Cuando el agua se congela, su densidad se reduce entre un 8 % y un 9 %, razón por la cual el hielo no se hunde, sino que permanece en la superficie.



**Figura 54:** Imagen esquemática de la variación de la densidad del agua durante el enfriamiento: a medida que el agua se enfria, las moléculas de agua se acercan entre sí, aumentando la densidad, la cual alcanza su valor máximo a 4 °C. Con el enfriamiento continuo, los enlaces de hidrógeno comienzan a predominar y las moléculas de agua se organizan en una estructura cristalina de hielo, lo que provoca la expansión del agua y la disminución de la densidad del hielo, que se vuelve aproximadamente un 10 % menos denso que el agua líquida.

Fuente: <https://askascientistblog.wordpress.com/2015/11/04/if-molecules-in-colder-things-get-denser-why-does-ice-float/>

## Influencia de las propiedades del agua sobre el clima y los ecosistemas

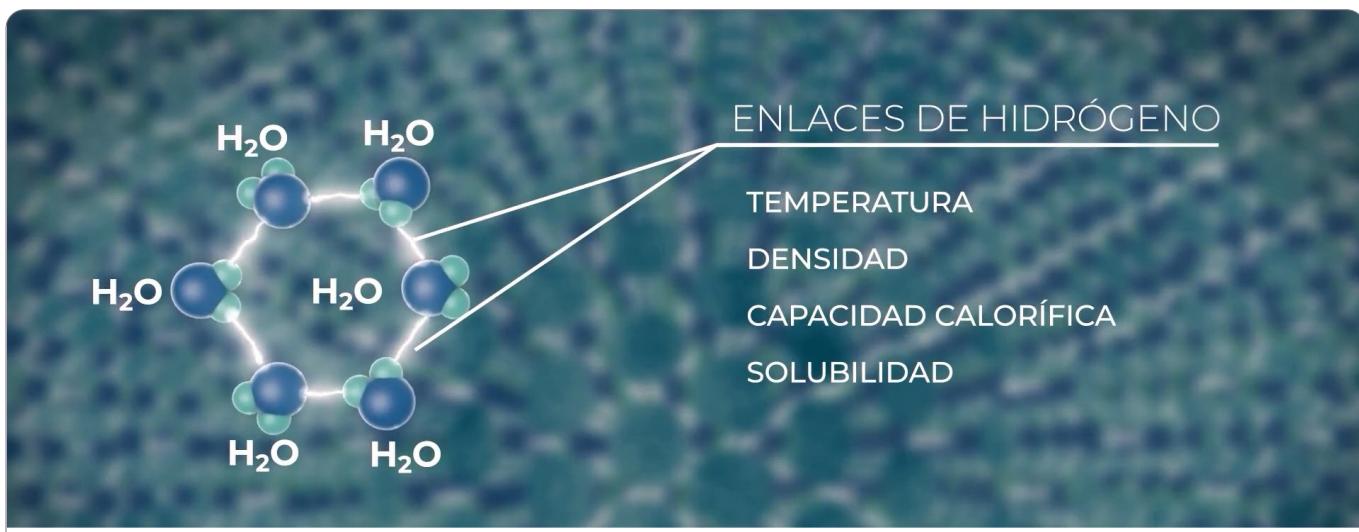
Las variaciones de la temperatura del agua pueden influir significativamente en el balance térmico del océano global y en su capacidad para almacenar y transferir calor. Esto, a su vez, tendrá un impacto en el sistema climático de la Tierra.

Por lo tanto, las propiedades físico-químicas del agua, en particular su capacidad y conductividad térmica, desempeñan un papel fundamental en el mantenimiento del equilibrio ecológico del planeta y en la regulación de los procesos climáticos (Fig. 55).

<sup>152</sup>Lide, D. R. (ed.) CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85th edn (CRC Press, 2004).

<sup>153</sup>Sharqawy, M. H., Lienhard, J. H. & Zubair, S. M. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. Desalination and Water Treatment 16, 354–380 (2010). <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1079>

<sup>154</sup>Jamieson, D. T. & Tudhope, J. S. Physical properties of sea water solutions: thermal conductivity. Desalination 8, 393–401 (1970). [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)80240-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)80240-4)

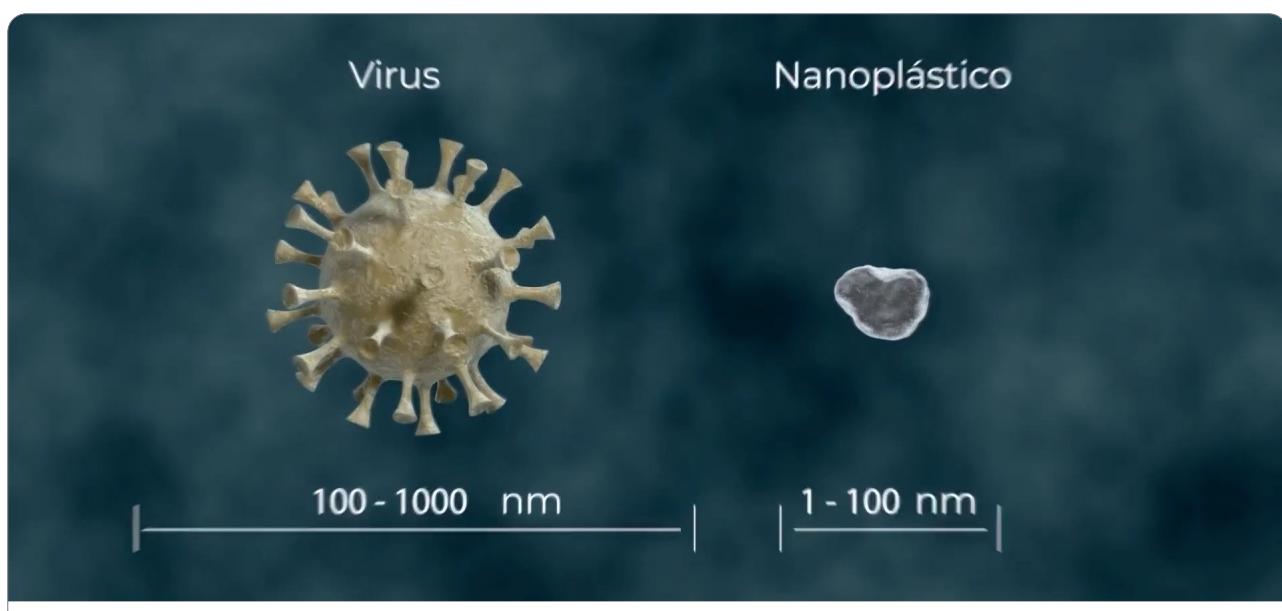


**Figura 55:** Representación esquemática de los enlaces de hidrógeno en las moléculas de agua y su impacto en las propiedades clave del agua: los enlaces de hidrógeno contribuyen a la alta capacidad térmica del agua, permitiéndole absorber y retener calor de manera eficaz. Estos enlaces también determinan la densidad del agua, que es máxima a 4 °C, así como su capacidad para disolver sustancias polares e iónicas, convirtiendo al agua en un solvente universal.

## Influencia de los micro y nanoplásticos sobre las propiedades del agua

El plástico, al ser un producto de la industria petroquímica, no se descompone en la naturaleza, sino que se fragmenta en partículas cada vez más pequeñas, como los micro y nanoplásticos<sup>155</sup>. Estas partículas, especialmente nanoplásticas, pueden influir de manera significativa en las propiedades físico-químicas del agua, con posibles repercusiones en los ecosistemas y los procesos climáticos.

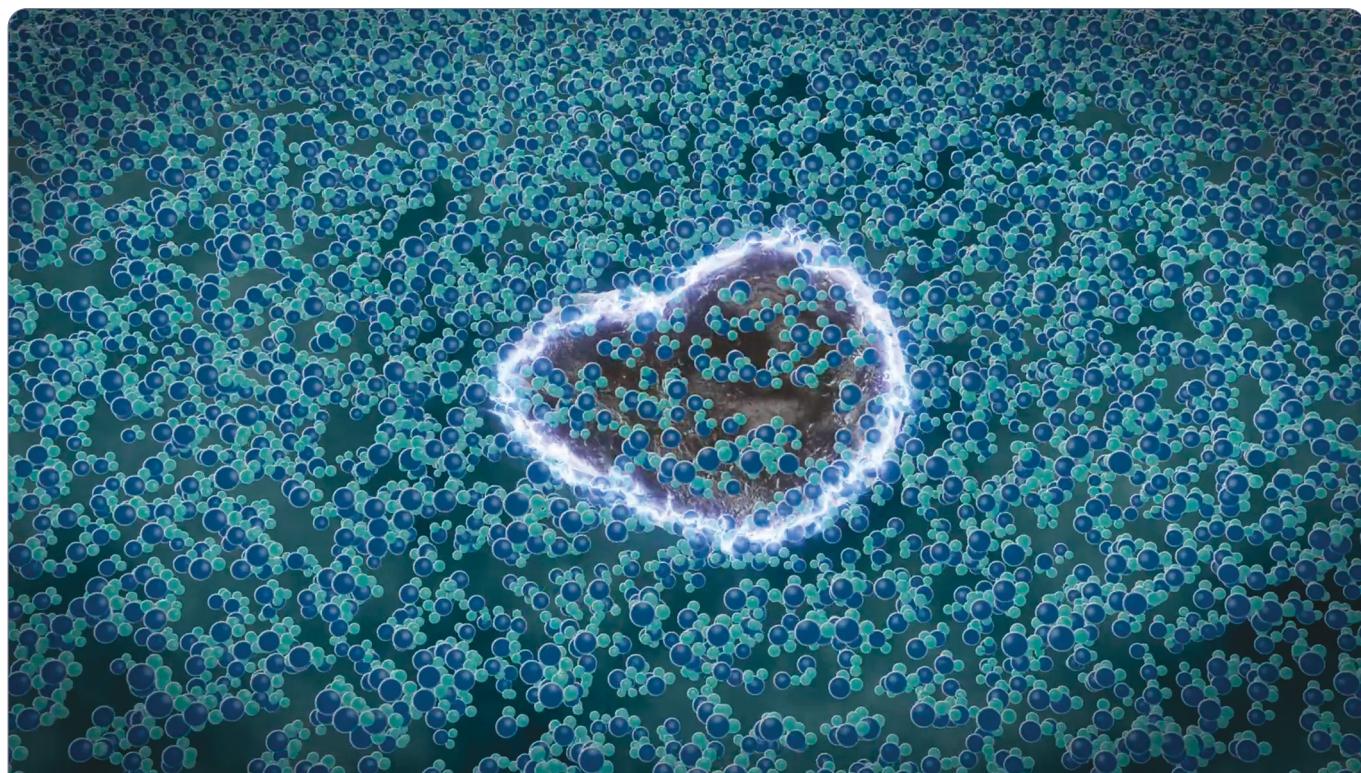
Los nanoplásticos son partículas de tamaño nanométrico, más pequeñas que un virus (Fig. 56).



**Figura 56:** Comparación esquemática del tamaño de un virus y las partículas de nanoplásticos.

<sup>155</sup>Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. Sustainability 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

Por ejemplo, el nanoplástico derivado del nailon (poliamida), que contiene nitrógeno y oxígeno, es capaz de formar enlaces de hidrógeno con las moléculas de agua<sup>156</sup>. Cuando las partículas de nanoplástico contaminan el agua, perturban la estructura ordenada basada en los enlaces de hidrógeno entre sus propias moléculas, alterando potencialmente sus propiedades físico-químicas (Fig. 57). En particular, las moléculas de agua pierden movilidad, reduciendo su capacidad para participar eficazmente en los procesos de intercambio térmico. Además, en soluciones acuosas que contienen diversas sustancias, las partículas de nanoplástico pueden adquirir una carga eléctrica<sup>157</sup>.



**Figura 57:** Representación esquemática de las nanopartículas de plástico cargadas en el agua: cuando se expone a condiciones inestables del agua, como la presencia de impurezas orgánicas o sintéticas, variaciones en el pH, temperatura o salinidad, la superficie de los nanoplásticos se vuelve potencialmente activa y capaz de generar cargas eléctricas en el entorno acuático.

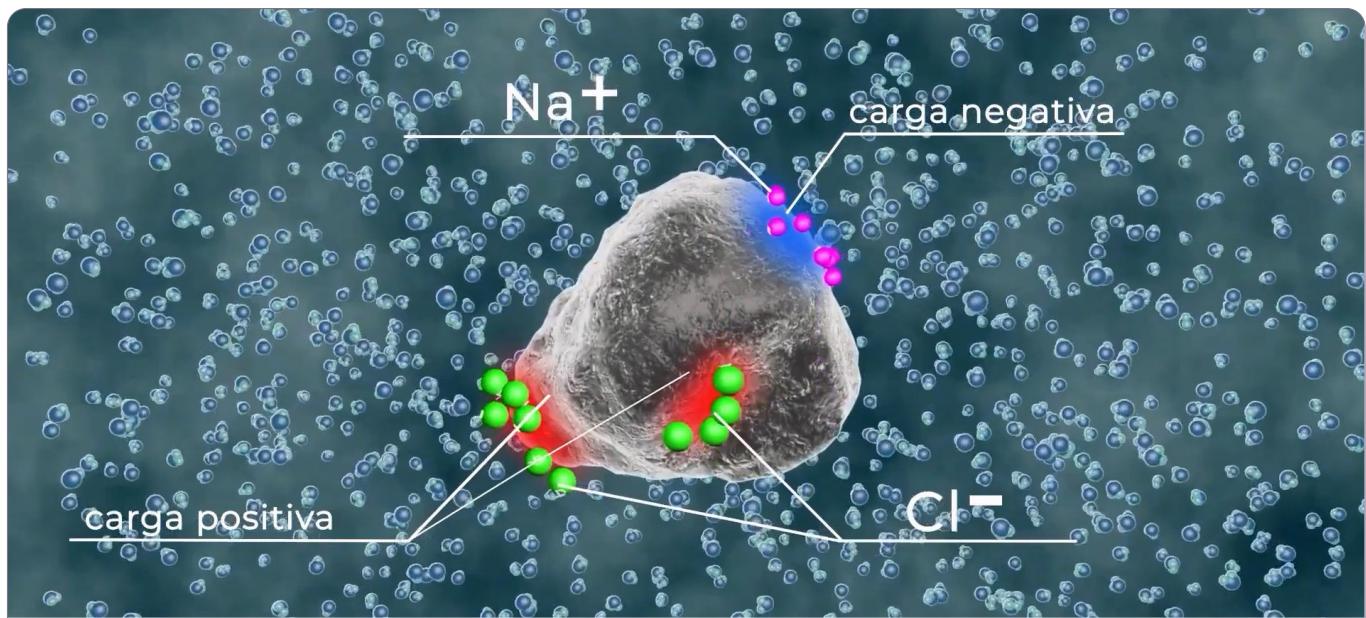
Fuente: Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. Water Science and Engineering 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

Esto ocurre debido a modificaciones químicas en su superficie, como la oxidación, así como la adsorción de iones, como sodio ( $\text{Na}^+$ ) y cloro ( $\text{Cl}^-$ ), presentes en el agua marina. Las nanopartículas de plástico cargadas, rodeadas de iones, atraen moléculas de agua y forman a su alrededor una capa de hidratación<sup>158</sup> (Fig. 58).

<sup>156</sup>Ivleva, N. P. Chemical Analysis of Microplastics and Nanoplastics: Challenges, Advanced Methods, and Perspectives. Chem. Rev. 121, 11886–11936 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00178>

<sup>157</sup>Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. Water Science and Engineering 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

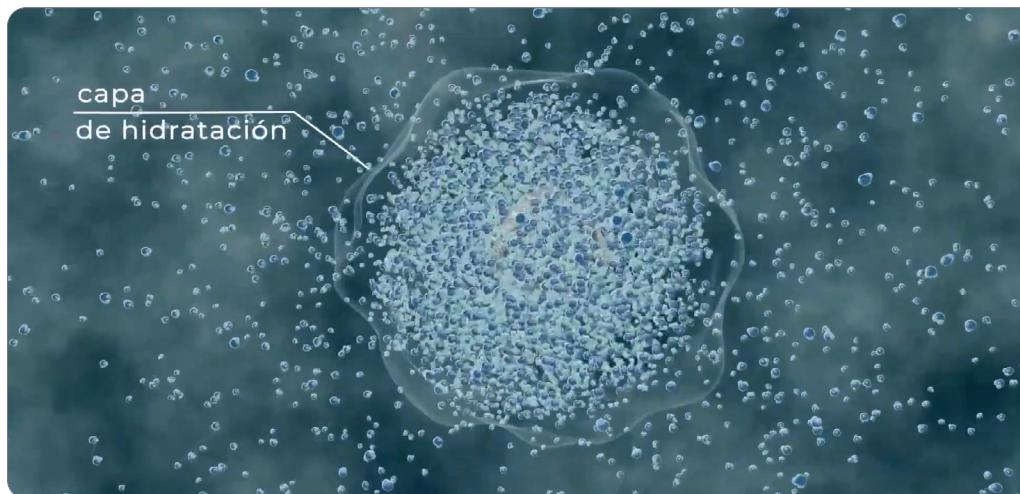
<sup>158</sup>Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. Sci. Adv. 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>



**Figura 58:** Representación esquemática del proceso de formación de una capa hidratada alrededor de las nanopartículas de plástico cargadas: en este proceso, las nanopartículas, al estar cargadas, atraen iones, lo que favorece la formación de moléculas de agua alrededor de ellas, creando una capa protectora hidratada.

Fuente: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>

Los investigadores de la Escuela Politécnica Federal de Lausana decidieron descubrir cuán grande es la capa de hidratación alrededor de los iones, es decir, cuántas moléculas de agua reaccionan con un solo ión. Se descubrió que un solo ión puede influir en aproximadamente un millón de moléculas de agua circundantes. Este efecto se amplifica si la partícula tiene una alta carga superficial y una fuerte concentración de iones adsorbidos. Como resultado, una sola partícula de nanoplástico puede modificar las propiedades de millones de moléculas de agua<sup>158</sup> (Fig. 59). Las moléculas unidas en la capa de hidratación se vuelven menos móviles<sup>159</sup>, lo que lleva a una reducción de la capacidad térmica total del agua<sup>160, 161</sup>.



**Figura 59:**  
Representación esquemática de la capa hidratada alrededor de una partícula de nanoplástico.

<sup>158</sup>Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>

<sup>159</sup>Laage, D., Elsaesser, T. & Hynes, J. T. Water Dynamics in the Hydration Shells of Biomolecules. *Chem. Rev.* 117, 10694–10725 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00765>

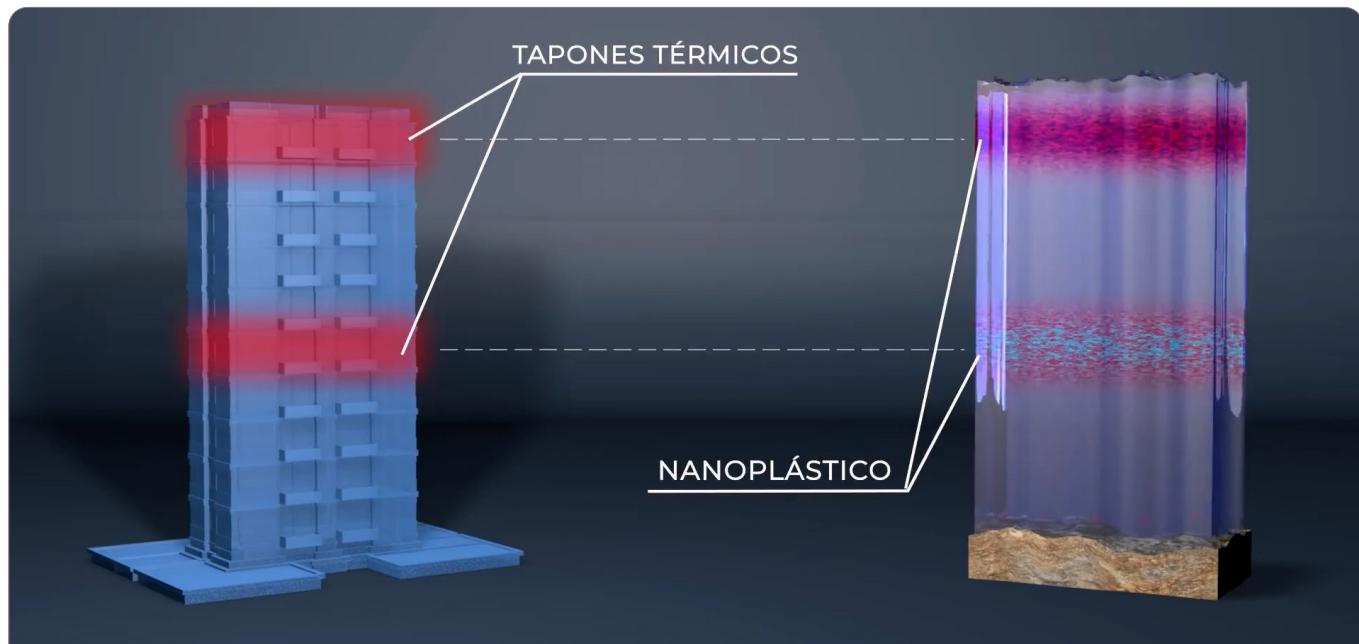
<sup>160</sup>Chew, T., Daik, R. & Hamid, M. Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Dodecylbenzenesulfonic Acid-Doped Polyaniline Particles—Water Based Nanofluid. *Polymers* 7, 1221–1231 (2015). <https://doi.org/10.3390/polym7071221>

<sup>161</sup>Riazi, H. et al. Specific heat control of nanofluids: A critical review. *International Journal of Thermal Sciences* 107, 25–38 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.024>

La ruptura de la estructura de los enlaces de hidrógeno también conduce a una reducción de la conductividad térmica<sup>162</sup>. Como resultado, el agua cerca de las partículas de nanoplástico puede permanecer caliente, ya que pierde la capacidad de transferir eficazmente el calor.

## Zonas de concentración de micro y nanoplástico en el océano

Los micro y nanoplásticos pueden dispersarse por todo el océano a través de las corrientes, mientras que las partículas más densas o los plásticos contaminados pueden depositarse en el fondo marino. Además, se observa una acumulación significativa de nanoplástico en las zonas del termoclino, la capa de transición entre las aguas superficiales cálidas y las capas profundas más frías<sup>163</sup> (Fig. 60).

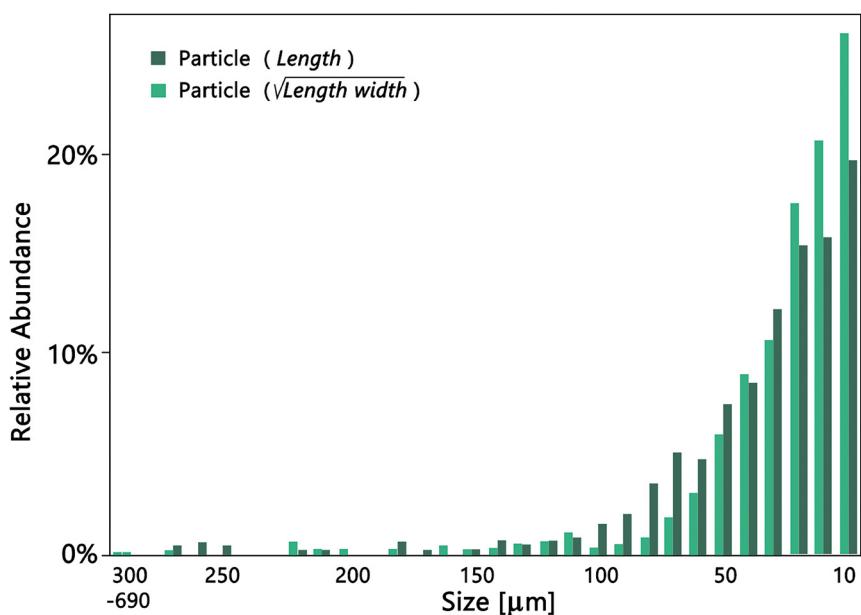


**Figura 60:** La imagen muestra una comparación figurativa entre las zonas de concentración de micro y nanoplásticos en el océano y un edificio de varios pisos con "bloques térmicos" en el 5º y 10º piso. Estos bloques obstruyen el intercambio normal de calor, causando una acumulación de calor en esos niveles. Una cámara térmica mostraría que la temperatura dentro del edificio es significativamente más alta en comparación con un edificio similar sin los bloques. De manera similar, los nanoplásticos en el agua alteran los mecanismos naturales de intercambio térmico, creando "bloques térmicos" en el océano.

El aumento de la concentración de nanoplásticos en los océanos puede causar cambios en el equilibrio térmico global. Esto puede contribuir al calentamiento de los océanos, lo que lleva a alteraciones climáticas. Es importante destacar que incluso una cantidad mínima de nanoplástico puede tener un impacto significativo en los ecosistemas. El aumento de la temperatura de la superficie oceánica acelera la fragmentación de los desechos plásticos en micro y nanoplásticos (Fig. 61). Como resultado, la cantidad de estas partículas aumenta y entran en la atmósfera junto con el vapor de agua. La presencia de micro y nanoplásticos en la atmósfera contribuye a un calentamiento adicional, lo que a su vez intensifica el calentamiento oceánico. Así, se crea un círculo vicioso, en el que los procesos se refuerzan mutuamente.

<sup>162</sup>Berger Bioucas, F. E. et al. Effective Thermal Conductivity of Nanofluids: Measurement and Prediction. *Int J Thermophys* 41, 55 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10765-020-2621-2>

<sup>163</sup>Tikhonova, D. A., Karetnikov, S. G., Ivanova, E. V. & Shalunova, E. P. The Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column of Lake Ladoga. *Water Resour 51*, 146–153 (2024). <https://doi.org/10.1134/S009780782370063X>



**Figura 61:** Distribución relativa de las partículas de microplástico por tamaño en todas las estaciones analizadas (np = 543). Las imágenes muestran las partículas de microplástico más pequeñas (a la izquierda) y las más grandes (a la derecha) encontradas y confirmadas mediante espectroscopía Raman.

Fuente: Enders, K., Lenz, R., Stedmon, C. A. & Nielsen, T. G. Abundance, size and polymer composition of marine microplastics  $\geq 10 \mu\text{m}$  in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution. Marine Pollution Bulletin 100, 70–81 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.027>

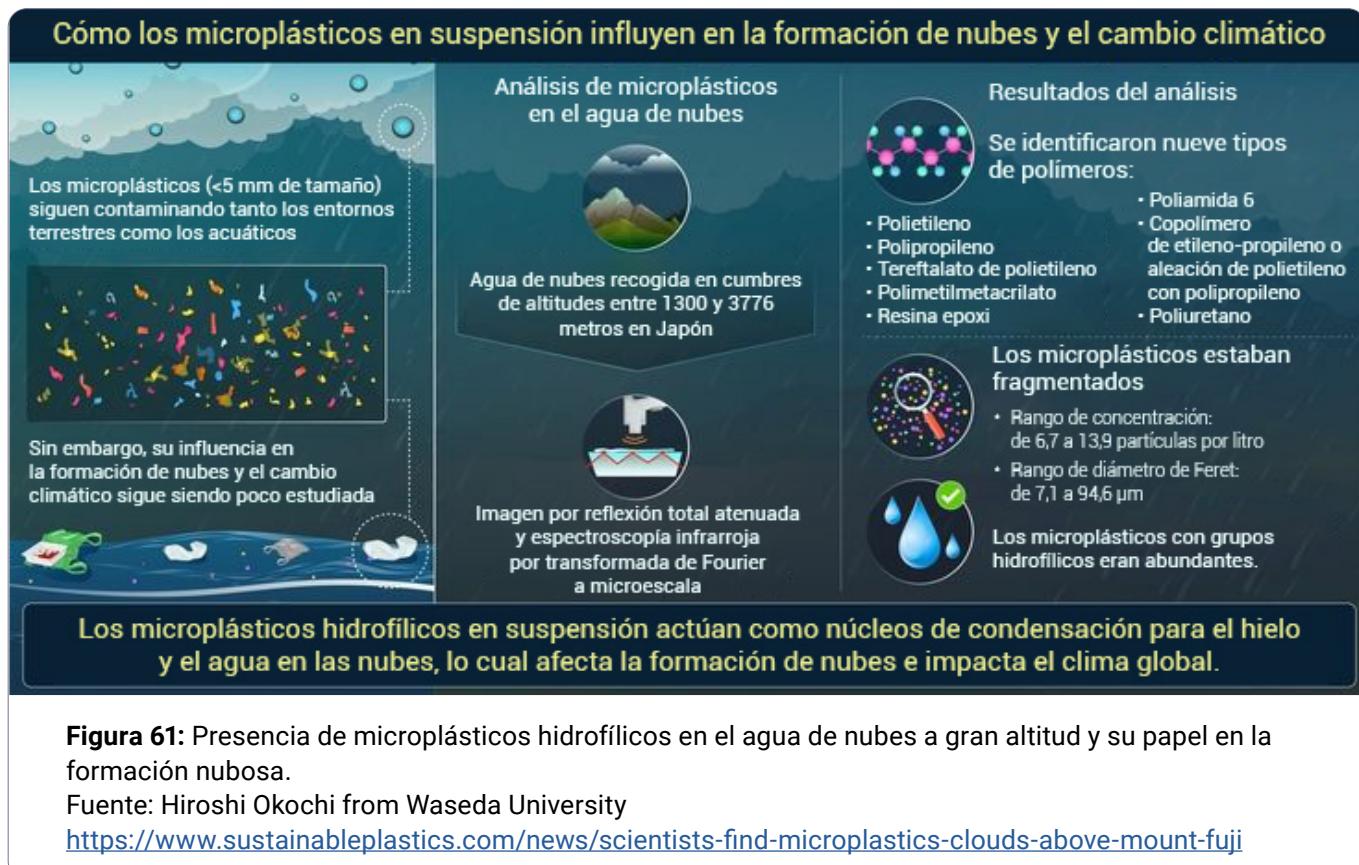
## Vínculo entre la carga electrostática de los micro y nanoplásticos y los fenómenos atmosféricos

Los micro y nanoplásticos entran en la atmósfera a través de diversas vías. El vapor de agua que se evapora de la superficie de los océanos y otros cuerpos de agua puede transportar micropartículas al aire<sup>164</sup>. En los continentes, las principales fuentes de plástico atmosférico son las fábricas, los incineradores y los vertederos. Además, el plástico puede ser levantado en la atmósfera por el secado y la dispersión eólica de fertilizantes agrícolas y mulching de plástico. También la fricción de los neumáticos de los automóviles contribuye de manera significativa a la liberación de microplásticos. Estas y muchas otras fuentes alimentan la contaminación atmosférica.

Estos procesos favorecen la acumulación y dispersión de microplásticos en el aire, generando graves amenazas ambientales y climáticas. Una vez en la atmósfera, las partículas de micro y nanoplásticos pueden actuar como núcleos de condensación para el vapor de agua. Cuantos más numerosos sean estos núcleos, más rápidamente se condensa el vapor en gotas de agua. Se han detectado microplásticos suspendidos en el aire en muestras de agua de nubes recolectadas en las cumbres montañosas en Japón<sup>165</sup> (Fig. 62).

<sup>164</sup>Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic. PNAS Nexus 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

<sup>165</sup>Wang, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. Environ Chem Lett 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>



**Figura 61:** Presencia de microplásticos hidrofílicos en el agua de nubes a gran altitud y su papel en la formación nubosa.

Fuente: Hiroshi Okochi from Waseda University

<https://www.sustainableplastics.com/news/scientists-find-microplastics-clouds-above-mount-fuji>

66

"En un ambiente contaminado, con una alta concentración de partículas aerosolizadas como los microplásticos, el agua disponible se distribuye entre un mayor número de partículas, formando gotas más pequeñas alrededor de cada una de ellas. Cuando aumenta la cantidad de gotas, al principio se reduce la precipitación, ya que estas solo caen cuando alcanzan un tamaño suficientemente grande. Como resultado, se acumula más agua dentro de la nube antes de que las gotas alcancen un tamaño suficiente para precipitar, lo que conduce a lluvias más intensas", explicó Miriam Friedman, profesora de química en el Departamento de Meteorología y Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Estatal de Pensilvania<sup>166</sup>.

Esto explica por qué en los últimos años se han observado precipitaciones anómalas en diversas regiones del mundo.

<sup>166</sup>The Pennsylvania State University Research. Microplastics impact cloud formation, likely affecting weather and climate. (2024) <https://www.psu.edu/news/research/story/microplastics-impact-cloud-formation-likely-affecting-weather-and-climate>

## Cargas eléctricas en las nubes

La atmósfera terrestre es un sistema eléctrico complejo en el que las moléculas de agua juegan un papel fundamental. Desde 1752, cuando Benjamin Franklin demostró por primera vez que la atmósfera está electrificada y que las tormentas tienen una naturaleza eléctrica, quedó claro que la interacción del agua (en forma de vapor, líquido o hielo) es esencial en estos procesos.

El agua, en su forma pura, es neutra, pero durante los cambios de fase, como la fusión y la congelación, así como durante las colisiones entre moléculas, puede transferir iones a otras partículas, generando efectos eléctricos.

En la atmósfera, las colisiones entre cristales de hielo, gotas de agua enfriadas y otras partículas, en presencia de campos eléctricos naturales, conducen a la separación de cargas. Este fenómeno es fundamental para la formación de electricidad atmosférica, especialmente en las nubes de tormenta. Las gotas cargadas se atraen, acelerando su coalescencia en gotas más grandes, lo que finalmente lleva a la formación de nubes capaces de generar precipitaciones: lluvia, nieve o granizo.

66

*"Las cargas son realmente importantes. En la formación de nubes, las cargas son prácticamente todo. Lo que hemos descubierto es que las cargas son fundamentales".*

— afirmó Gerald H. Pollack, PhD, profesor de bioingeniería en la Universidad de Washington, editor en jefe y fundador de la revista de investigación interdisciplinaria WATER<sup>167</sup>.

En 1843, Michael Faraday descubrió que la electricidad puede generarse por la fricción de las gotas de agua contra el metal, un fenómeno que carga eléctricamente el agua. Este descubrimiento impulsó el estudio de la electrificación del agua debido a la fricción, transiciones de fase y electrificación por contacto, y sirvió de inspiración para los intentos de aprovechar este efecto para crear nuevas fuentes de energía.

Es conocido que el aire húmedo puede neutralizar las cargas superficiales formando una delgada capa de agua que permite a los iones moverse y disipar la carga acumulada. Sin embargo, en ciertas circunstancias, las superficies que adsorben agua pueden acumular carga proveniente del aire húmedo, afectando el estado eléctrico del entorno circundante<sup>168</sup>. Además, investigaciones han demostrado que los metales pesados pueden adherirse fácilmente a las partículas de microplástico, y esta combinación puede representar una amenaza significativa para los ecosistemas del planeta.

<sup>167</sup>AllatRa TV. Anthropogenic factor in the oceans' demise: Popular science film. Time 55:00, (2025).

<https://allatra.tv/en/video/anthropogenic-factor-in-the-oceans-demise-popular-science-film> (Acceso: 1 de mayo 2025).

<sup>168</sup>Lax, J. Y., Price, C. & Saaroni, H. On the Spontaneous Build-Up of Voltage between Dissimilar Metals Under High Relative Humidity Conditions. Sci Rep 10, 7642 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64409-2>

Además, los microplásticos y las sustancias químicas presentes en su superficie no solo pueden adherirse a otros contaminantes, sino también interactuar entre sí, modificando sus propiedades químicas<sup>169</sup>. Cuando las partículas de micro y nanoplástico entran en la atmósfera, pueden alterar el delicado equilibrio de los procesos atmosféricos. Las partículas de plástico pueden portar una carga eléctrica, lo que refuerza la atracción de las moléculas polares de agua, favoreciendo así la formación de gotas. Estas partículas no se comportan como núcleos de condensación normales (como el polen, la sal marina o el hollín), sino que pueden recolectar agua de manera más eficiente que las partículas neutras<sup>170</sup>.

Esto significa que alrededor de las partículas cargadas las gotas de agua comienzan a formarse más rápidamente, afectando la estructura de las nubes y llevando a la formación de gotas más grandes y, en algunos casos, de cristales de hielo inusualmente grandes<sup>171</sup>. Por ejemplo, un estudio reciente reveló la presencia, en las nubes recolectadas en las cimas montañosas de Japón, de gránulos de plástico con superficies hidrofílicas, capaces de atraer agua<sup>172</sup>.

## Influencia en la formación de nubes y precipitaciones

Los microplásticos pueden influir en el tipo de precipitaciones, las predicciones meteorológicas, la modelización climática e incluso en la seguridad de los vuelos, ya que afectan la forma en que los cristales de hielo atmosférico contribuyen a la formación de nubes.

Un estudio<sup>173</sup> ha demostrado que las gotas de agua que contienen microplásticos se congelan a temperaturas de 4 a 10 grados superiores a las de aquellas que no contienen tales partículas, es decir, a altitudes más bajas. Normalmente, una gota de agua pura se congela a unos -38 °C. Sin embargo, en el caso de los microplásticos, el 50 % de las gotas se congela a una temperatura entre -18 °C y -24 °C, dependiendo del tipo de plástico.

Las gotas de agua que contienen microplásticos se congelan más rápidamente, formando partículas de hielo más grandes. Estas partículas son levantadas por las corrientes ascendentes de aire, se recubren repetidamente con capas de hielo y finalmente caen al suelo.

Este fenómeno puede aumentar el tamaño del granizo (Figs. 63, 64), intensificar los efectos destructivos y favorecer la formación de nubes de hielo. Como resultado, cambia la frecuencia e intensidad de las precipitaciones, incluidas las lluvias y nevadas. Tales alteraciones pueden generar efectos en cadena, afectando el clima, el ciclo hidrológico y los ecosistemas.

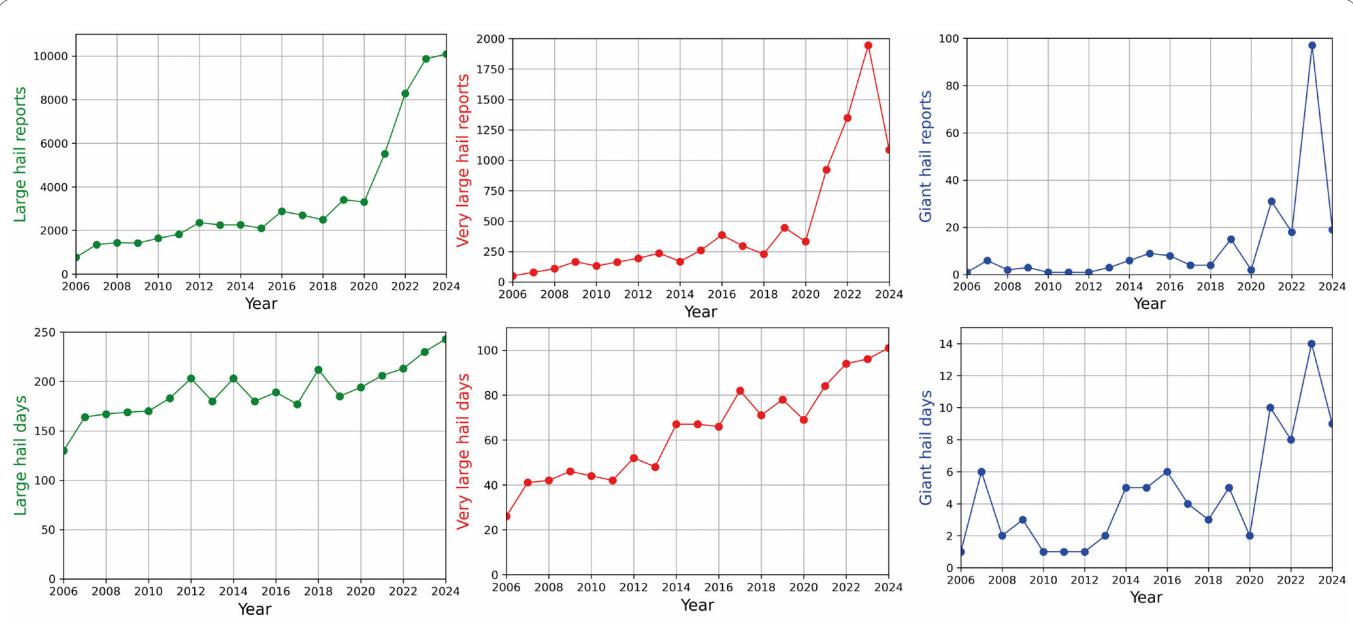
<sup>169</sup>Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. Environ. Sci. Technol. Lett. 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

<sup>170</sup>Harrison, R. G. Atmospheric electricity and cloud microphysics <https://cds.cern.ch/record/557170/files/p75.pdf>

<sup>171</sup>The Pennsylvania State University News. Microplastics impact cloud formation, likely affecting weather and climate. (2024) <https://www.psu.edu/news/research/story/microplastics-impact-cloud-formation-likely-affecting-weather-and-climate>

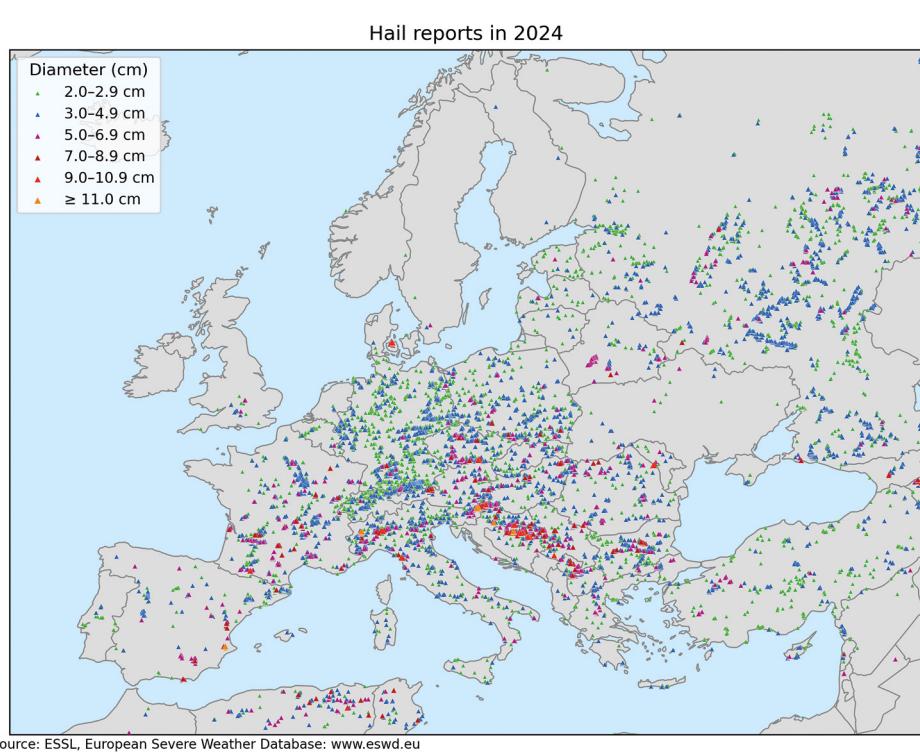
<sup>172</sup>Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. Environ Chem Lett 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

<sup>173</sup>Busse, H. L., Ariyasena, D. Dh., Orris J. & Freedman, M. Ar. Pristine and Aged Microplastics Can Nucleate Ice through Immersion Freezing. ACS ES&T Air 1, 1579–1588 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsestair.4c00146>



**Figura 63:** Número de informes y días con granizo de tamaños grandes (2+ cm), muy grandes (5+ cm) y gigantes (10+ cm) en el período de 2006 a 2024.

Fuente: European Severe Storms Laboratory. Hailstorms of 2024 <https://www.essl.org/cms/hailstorms-of-2024/>



**Figura 64:** Distribución espacial de los informes de granizo de gran tamaño en Europa y las áreas circundantes en 2024.

Fuente: European Severe Storms Laboratory. Hailstorms of 2024 <https://www.essl.org/cms/hailstorms-of-2024/>

Cuando las partículas de nanoplástico están presentes en la atmósfera, las nubes comienzan a formarse a altitudes más bajas, generalmente por debajo de los 2 kilómetros. Esto provoca una menor movilidad de las nubes, dificultando la distribución normal de las precipitaciones. Como resultado, algunas áreas pueden verse afectadas por sequías, mientras que otras pueden experimentar lluvias excesivas.

## El rol de los MNP en la alteración del equilibrio climático terrestre

Las nubes más densas comienzan a retener el calor en las capas inferiores de la atmósfera, actuando como una manta que absorbe y refleja parte de la radiación térmica de vuelta hacia la superficie terrestre. Esto reduce la dispersión de calor hacia el espacio y contribuye al calentamiento de la atmósfera. El aumento de la temperatura favorece una mayor evaporación de agua de los océanos, y una mayor cantidad de humedad en la atmósfera provoca un calentamiento adicional. Así, se crea un círculo vicioso. Es importante señalar que por cada grado de aumento de la temperatura, la cantidad de vapor de agua en el aire crece aproximadamente un 7 %<sup>174</sup>, y la frecuencia de los rayos aumenta un 12 %<sup>175</sup>.

66

Como observa Kevin Trenberth, climatólogo emérito del Centro Nacional para los Estudios Atmosféricos de los Estados Unidos (NCAR) y autor principal de los informes del IPCC: "*Esos dos factores, el aumento de la temperatura y el incremento del vapor de agua, conducen a una mayor inestabilidad de la atmósfera. Esto lleva a más convección, más tormentas, algunas de las cuales se vuelven más intensas. Y si las tormentas se combinan e interactúan, como ocurre en una tormenta tropical, puede terminar habiendo huracanes más fuertes. Todos estos factores se suman. El resultado es un aumento del riesgo de tormentas intensas: tormentas severas, particularmente superceldas, que producen granizo y que, en algunas áreas y en condiciones favorables, también pueden generar tornados.*"

Por lo tanto, el calentamiento extremo de los océanos, junto con un exceso de electricidad y calor en la atmósfera, agrava la crisis climática, dando lugar a fenómenos meteorológicos más destructivos como tormentas intensas, huracanes, rayos y sprites.

La presencia de plástico en la atmósfera no solo contamina el medio ambiente, sino que también altera los procesos climáticos, influyendo en la formación de nubes y precipitaciones. Aumenta la carga electrostática en la atmósfera, acelera la condensación del vapor de agua e influye en la densidad de las nubes, lo que puede dar lugar a una intensificación de tormentas, lluvias y otros fenómenos naturales destructivos. Estamos al borde de comprender las consecuencias a gran escala de este impacto en el clima, lo que requiere medidas urgentes y globales para reducir la contaminación por partículas de plástico en los océanos y en la atmósfera.

<sup>174</sup>NASA. Steamy relationships: How atmospheric water vapor amplifies Earth's greenhouse effect. (2022)

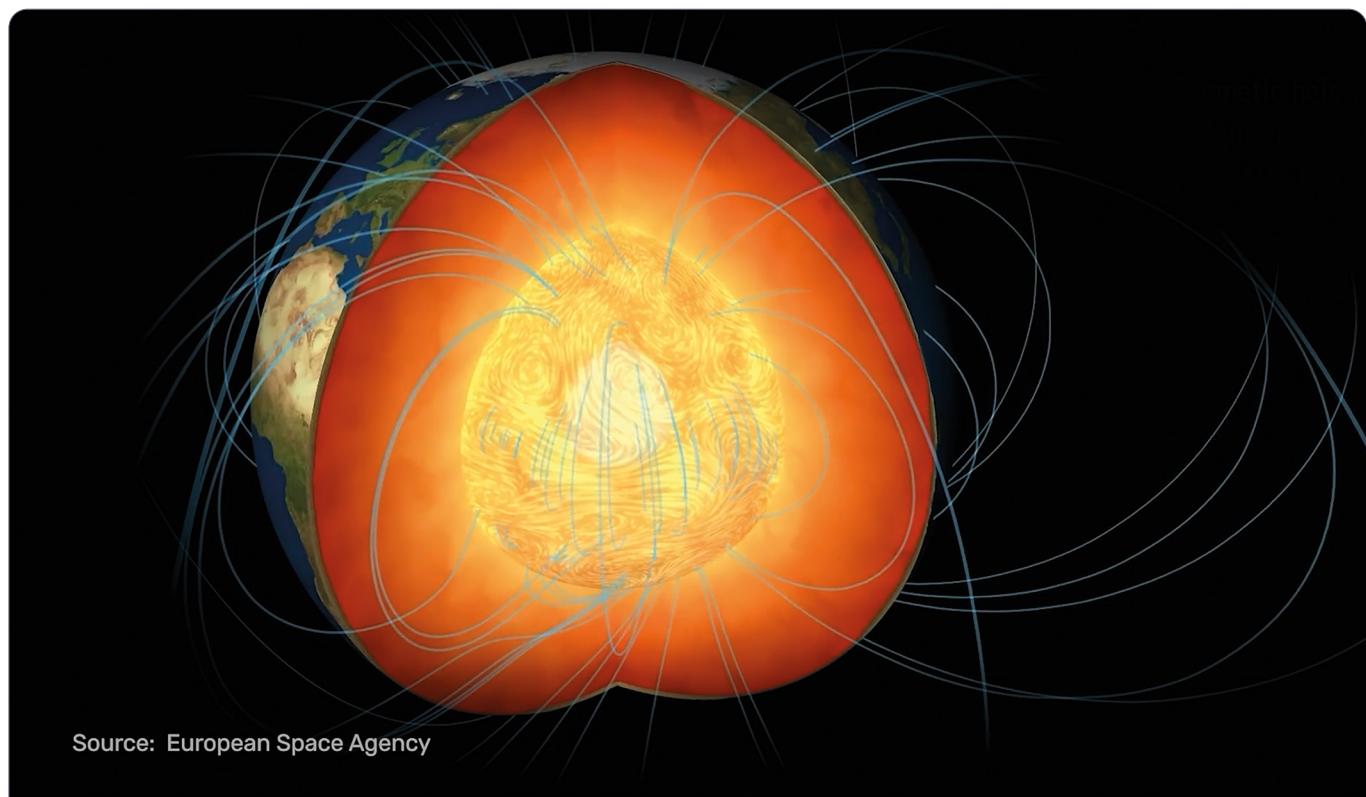
<https://science.nasa.gov/earth/climate-change/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifiesearths-greenhouse-effect>

<sup>175</sup>Romps, D. M., Seeley, J. T., Vollaro, D. & Molinari, J. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. Science 346, 851–854 (2014). <https://doi.org/10.1126/science.1259100>

## Interacción del océano con el campo magnético terrestre

Los océanos cubren aproximadamente el 70 % de la superficie terrestre y no solo son enormes reservorios de agua, sino también elementos fundamentales en los complejos procesos eléctricos del planeta. Interactúan con el campo magnético terrestre, participando en sus procesos electromagnéticos.

El campo magnético de la Tierra protege la superficie del planeta del viento solar y las radiaciones cósmicas, actuando como un escudo natural. Sin este campo, la atmósfera sería destruida. El campo geomagnético se genera en las profundidades del planeta, donde el núcleo externo líquido, compuesto de metales, se mueve alrededor del núcleo interno sólido, creando un generador natural, un proceso conocido como geodinamo (Fig. 65).



**Figura 65:** Imagen del proceso de formación del campo geomagnético: el núcleo externo líquido de la Tierra rota alrededor del núcleo interno sólido, formando un generador natural, conocido como geodinamo, gracias al cual se crea el campo magnético del planeta.

Fuente: The European Space Agency (ESA) <https://www.esa.int/>

El campo magnético terrestre interactúa con los fenómenos eléctricos presentes en los océanos y en la atmósfera. El agua marina, gracias a su contenido de sales e iones disueltos, posee una notable conductividad eléctrica, lo que le permite transportar corrientes eléctricas. Estas corrientes, a su vez, interactúan con el campo magnético, generando complejos procesos electromagnéticos que, a su vez, afectan la dinámica del campo magnético planetario.

Como se mencionó anteriormente, la contaminación de los océanos, en particular por micro y nanoplásticos, puede alterar las propiedades químicas y eléctricas del agua. Cuanto mayor es la concentración de sustancias contaminantes, más se comprometen los procesos electromagnéticos naturales. Cuando el agua contaminada se evapora, lleva consigo metales, microplásticos y otras sustancias, afectando los procesos atmosféricos. Durante la evaporación, pequeñas gotas y aerosoles pueden transportar micro y nanoplásticos, metales pesados<sup>176</sup> y otras partículas hacia la atmósfera, interfiriendo con los procesos electromagnéticos locales. Esto es similar a lo que ocurre cuando un objeto metálico colocado cerca de un imán altera la distribución del campo magnético, debilitándolo en una determinada área.

El impacto de la contaminación de los océanos en el campo magnético terrestre requiere más estudios, especialmente en el contexto de los cambios climáticos globales. Comprender estos procesos puede ayudar a evaluar su posible efecto en el sistema climático y en los ecosistemas del planeta.

---

<sup>176</sup>Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

## IMPACTO DE LOS MICRO Y NANOPLÁSTICOS EN LA SALUD HUMANA

66

*"El plástico no solo contamina nuestros océanos, cursos de agua y mata la vida marina: está presente en cada uno de nosotros, y no podemos evitar su consumo. Es urgente y necesario un esfuerzo global para hacer frente a esta crisis."*

Marco Lambertini  
Director General de WWF International

### Micro y nanoplásticos como nuevo factor de riesgo en el desarrollo de las epidemias del siglo XXI

En los últimos 30 años se ha observado un aumento continuo de infartos, accidentes cerebrovasculares, enfermedades oncológicas, diabetes mellitus, alergias y enfermedades inflamatorias intestinales. La reducción de la inmunidad se detecta tanto en niños como en adultos en todo el mundo. También está aumentando la incidencia de infertilidad. A pesar de que los datos sobre el número de personas y parejas infértilas son limitados, según las estimaciones de la Organización Mundial de la Salud, aproximadamente el 17,5 % de los adultos<sup>177</sup> —es decir, alrededor de una de cada seis personas en el mundo— se enfrenta a problemas de infertilidad.

Desde 2010 se observa una disminución en las capacidades intelectuales de la población. Incluso en los países desarrollados, el 25 % de los adultos no logra resolver problemas matemáticos básicos; en Estados Unidos esta cifra asciende al 35 %. Se asiste a una disminución de la capacidad de concentración, del pensamiento lógico y de la resolución de problemas elementales. Aumentan las formas de demencia y los trastornos cognitivos<sup>178</sup>.

El crecimiento de los trastornos mentales supera al de las enfermedades somáticas<sup>179</sup>. Los trastornos de ansiedad, el autismo, la depresión y el trastorno bipolar, así como el trastorno por déficit de atención e hiperactividad (TDAH), están adquiriendo proporciones pandémicas. Cada vez hay más datos que indican la implicación de los micro y nanoplásticos en la patogénesis de diversas enfermedades.

<sup>177</sup> World Health Organization. 1 in 6 people globally affected by infertility. (2023)

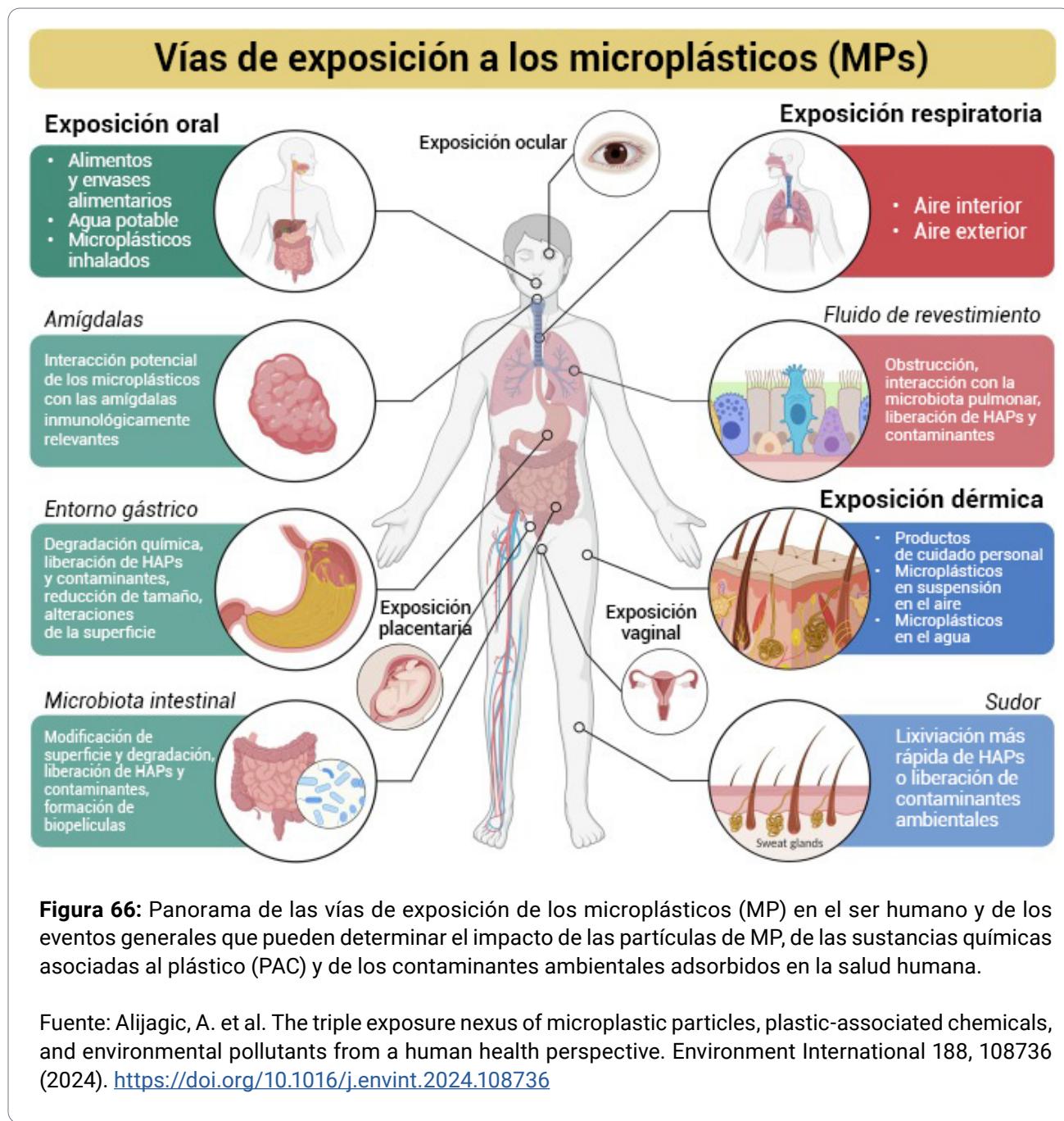
<https://www.who.int/news/item/04-04-2023-1-in-6-people-globally-affected-by-infertility> (Acceso: 1 de mayo 2025).

<sup>178</sup> Financial Times. Have humans passed peak brain power? <https://www.ft.com/content/a8016c64-63b7-458b-a371-e0e1c54a13fc> (Acceso: 1 de mayo 2025).

<sup>179</sup> The Guardian. Mental health overtakes cancer and obesity as Britons' biggest health worry. (2024) <https://www.theguardian.com/society/2024/sep/20/mental-health-overtakes-cancer-and-obesity-as-britons-biggest-health-worry> (Acceso: 1 de mayo 2025).

## Mecanismos moleculares de la toxicidad de los MNP: daños al ADN, a las mitocondrias y a las membranas celulares

Los micro y nanoplásticos (MNP) se encuentran entre las formas más extendidas de contaminación antropogénica en el medio ambiente. Debido a sus propiedades físicas y químicas, las partículas de plástico pueden recorrer largas distancias, cruzando tanto barreras geográficas como ecológicas. Las principales vías a través de las cuales los micro y nanoplásticos ingresan en el organismo humano son la ingestión (a través del agua y los alimentos)<sup>180</sup>, la inhalación del aire y la absorción a través de la piel (Fig. 66).



**Figura 66:** Panorama de las vías de exposición de los microplásticos (MP) en el ser humano y de los eventos generales que pueden determinar el impacto de las partículas de MP, de las sustancias químicas asociadas al plástico (PAC) y de los contaminantes ambientales adsorbidos en la salud humana.

Fuente: Alijagic, A. et al. The triple exposure nexus of microplastic particles, plastic-associated chemicals, and environmental pollutants from a human health perspective. Environment International 188, 108736 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108736>

<sup>180</sup>ScienceDirect. Ingestion. ScienceDirect Topics.

<https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/ingestion> (Acceso: 1 de mayo 2025).

Como se menciona en la sección: “*Las consecuencias de la contaminación por plásticos: micro y nanoplásticos (MNP) como un nuevo factor de la crisis planetaria*”, el ambiente marino representa una fuente significativa de microplásticos secundarios. Según las estimaciones, la brisa marina transporta aproximadamente 136 000 toneladas de microplásticos cada año hacia las áreas costeras. Además, las aguas abiertas en zonas urbanizadas, incluidos los sistemas de alcantarillado y las aguas pluviales, se convierten en importantes centros de acumulación y posterior difusión de partículas plásticas, cuya cantidad puede superar en un 90 % las estimaciones anteriores.

Los productos alimenticios representan una de las principales vías de entrada de los micro y nanoplásticos (MNP) al cuerpo humano. Las plantas son capaces de acumular nanoplásticos a través del aparato radicular: durante el riego o las precipitaciones, las partículas penetran en el suelo y son absorbidas junto con el agua, ascendiendo por el xilema y acumulándose en los tejidos de hojas y frutos<sup>181</sup>. Los niveles más elevados de partículas plásticas se han detectado en cultivos como manzanas, peras, zanahorias y brócoli.

Los mariscos representan también una vía relevante de transmisión de los MNP. La ingestión de microplásticos por parte de organismos marinos ha sido documentada en todos los niveles tróficos. Según un estudio de la Universidad de Newcastle, una persona promedio puede ingerir hasta 250 gramos de microplásticos al año, lo que equivale a aproximadamente 5 gramos por semana – el equivalente al peso de una tarjeta de crédito de plástico. Además, el calentamiento de recipientes de plástico, incluido el alimento para bebés, en hornos microondas puede liberar en la comida más de 2000 millones de nanopartículas y 4 millones de micropartículas de plástico por cada centímetro cuadrado de superficie.

Los microplásticos están ampliamente difundidos en el agua potable. Estudios demuestran que hasta el 90 % de las muestras de agua del grifo en Estados Unidos contienen partículas de MNP. Las principales vías a través de las cuales estas partículas ingresan en los sistemas hídricos son los desagües, las emisiones industriales y las precipitaciones atmosféricas que contienen plástico transportado por el aire. Cuando el agua contaminada se evapora, las partículas de plástico pueden ascender a la atmósfera y posteriormente volver a caer con la lluvia o la nieve. En un estudio realizado en 11 parques nacionales de Estados Unidos, se detectó, durante un período de 14 meses, una deposición atmosférica de más de 1000 toneladas de partículas de plástico – una cantidad suficiente para producir 120 millones de botellas de plástico.

La difusión aerosolizada de los MNP representa uno de los mecanismos más peligrosos de exposición para el ser humano. Las partículas de plástico se elevan desde la superficie de los océanos y cuerpos de agua, son transportadas por las corrientes de aire y pasan a formar parte de los aerosoles atmosféricos. Las estimaciones indican que, en un contexto metropolitano, una persona adulta puede inhalar hasta 106 000 partículas de microplástico durante una caminata de dos horas; cerca de cuerpos de agua, esta cifra puede aumentar diez veces.

<sup>181</sup>Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

Un nuevo estudio presentado en la conferencia del Colegio Americano de Cardiología (ACC.25) ha revelado que una mayor exposición a los microplásticos — que pueden ser ingeridos o inhalados de manera inconsciente — se asocia a una incidencia más elevada de enfermedades crónicas no transmisibles. La investigación mostró que, en las comunidades situadas a lo largo de las costas oriental, occidental y del Golfo, así como en algunas áreas lacustres de Estados Unidos, concentraciones más elevadas de microplásticos en el ambiente están correlacionadas con una mayor prevalencia de enfermedades crónicas no infecciosas como hipertensión, diabetes e ictus.

66

*“Este estudio proporciona pruebas iniciales de que la exposición a los microplásticos afecta la salud cardiovascular, en particular, las enfermedades crónicas no transmisibles como la hipertensión, la diabetes y el ictus”, declaró Sai Rahul Ponnana, MA, investigador en ciencias de datos en la Facultad de Medicina de la Universidad Case Western Reserve en Ohio y autor principal del estudio. “Cuando incluimos en nuestro análisis 154 variables socioeconómicas y ambientales diferentes, no esperábamos que los microplásticos se situaran entre los diez principales factores predictivos de la prevalencia de las enfermedades crónicas no transmisibles”<sup>182</sup>.*

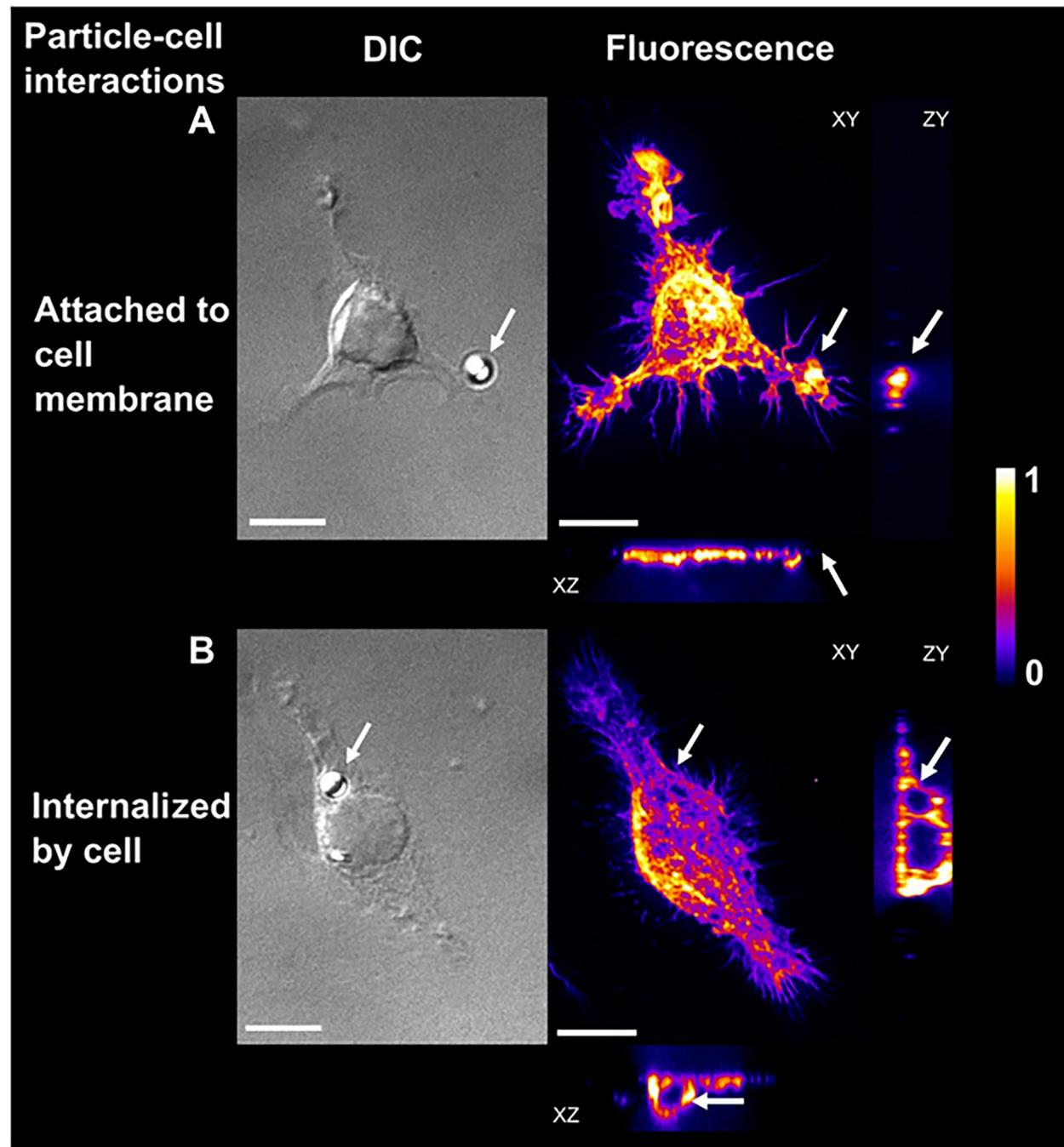
Los micro y nanoplásticos son capaces de atravesar las barreras biológicas, incluidas las intestinales, pulmonares, encefálicas y placentarias<sup>183</sup>. Los microplásticos expuestos al agua dulce o marina penetran más fácilmente en las células (Fig. 67) debido a la acumulación de biomoléculas en su superficie. Estas biomoléculas forman un recubrimiento (eco-corona) que ayuda a los microplásticos a atravesar el tracto digestivo e integrarse en los tejidos. Este recubrimiento actúa como un mecanismo que facilita la entrada de las partículas en las células, de manera similar a un caballo de Troya<sup>184</sup>.

<sup>182</sup>American College of Cardiology. New evidence links microplastics with chronic disease. (2025)

<https://www.acc.org/About-ACC/Press-Releases/2025/03/25/10/19/New-Evidence-Links-Microplastics-with-Chronic-Disease> (Acceso: 1 de mayo 2025).

<sup>183</sup>Alqahtani, S., Alqahtani, S., Saquib, Q. & Mohiddin, F. Toxicological impact of microplastics and nanoplastics on humans: understanding the mechanistic aspect of the interaction. *Front. Toxicol.* 5, 1193386 (2023). <https://doi.org/10.3389/ftox.2023.1193386>

<sup>184</sup>Ramsperger, A. F. R. M. et al. Environmental exposure enhances the internalization of microplastic particles into cells. *Sci. Adv.* 6, eabd1211 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1211>



**Figura 67:** Imágenes de las interacciones entre partículas y células de partículas de microplástico expuestas a agua dulce durante 2 semanas.

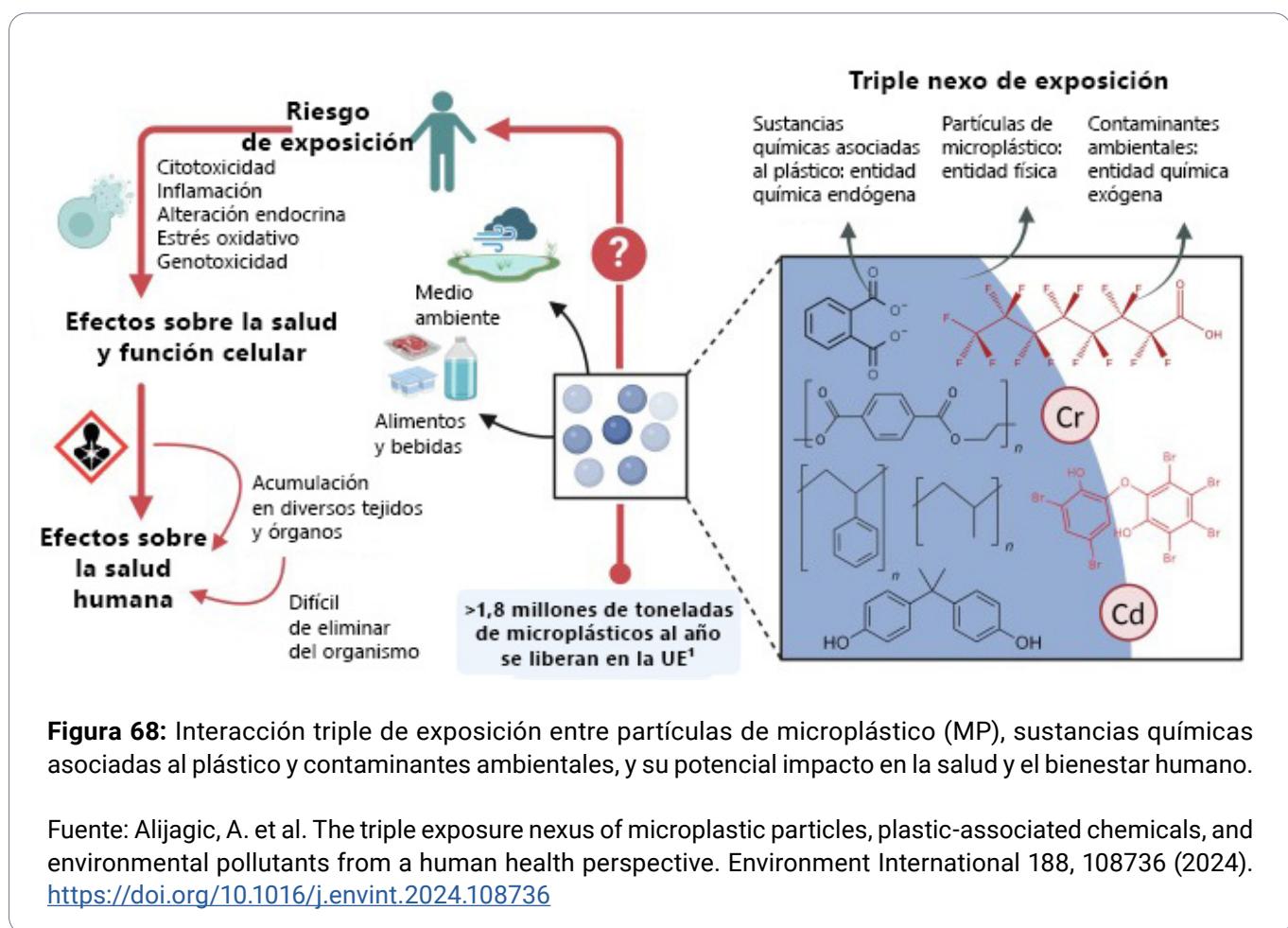
DIC: Imágenes microscópicas con contraste interferencial diferencial de las interacciones partícula-célula. Fluorescencia: Imágenes confocales de disco giratorio de las células con actina filamentosa marcada con fluorescencia (imágenes en falsos colores, proyección máxima de intensidad, que muestra unidades arbitrarias).

Las proyecciones XY, YZ y XZ de las imágenes confocales tridimensionales permiten distinguir las partículas de microplástico (A) adheridas a las membranas celulares o (B) partículas de microplástico internalizadas. Las flechas indican la posición de las partículas de microplástico. Barras de escala: 10  $\mu$ m.

Fuente: Ramsperger, A. F. R. M. et al. Environmental exposure enhances the internalization of microplastic particles into cells. Sci. Adv. 6, eabd1211 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1211>

La toxicidad de los microplásticos depende de numerosos factores: tamaño, forma, carga superficial, grado de degradación, duración de la exposición, composición de los aditivos y otras características<sup>185</sup>. Las partículas más pequeñas penetran con mayor facilidad en las células y provocan un estrés oxidativo más marcado. La carga superficial de los microplásticos es un factor clave para determinar qué tan eficientemente son absorbidas por las células, ya que influye en la adhesión. Además, los microplásticos están compuestos por polímeros y varios aditivos que potencian sus efectos negativos<sup>186</sup>.

Las partículas de micro y nanoplásticos, los compuestos químicos utilizados en los plásticos y los contaminantes del entorno que los plásticos absorben actúan conjuntamente de forma compleja<sup>187</sup> y perjudicial, representando una amenaza significativa para la salud humana (Fig. 68), representando una amenaza significativa.



**Figura 68:** Interacción triple de exposición entre partículas de microplástico (MP), sustancias químicas asociadas al plástico y contaminantes ambientales, y su potencial impacto en la salud y el bienestar humano.

Fuente: Alijagic, A. et al. The triple exposure nexus of microplastic particles, plastic-associated chemicals, and environmental pollutants from a human health perspective. Environment International 188, 108736 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108736>

<sup>185</sup>Li, Y. et al. Potential Health Impact of Microplastics: A Review of Environmental Distribution, Human Exposure, and Toxic Effects. Environ. Health 1, 249–257 (2023). <https://doi.org/10.1021/eh.3c00052>

<sup>186</sup>Alijagic, A. et al. The triple exposure nexus of microplastic particles, plastic-associated chemicals, and environmental pollutants from a human health perspective. Environment International 188, 108736 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108736>

<sup>187</sup> Shanwei Government. Content on environmental health. Microplastics found in the human body for the first time, are they harmful to health? Here's the answer. [https://www.shanwei.gov.cn/swbj/467/503/content/post\\_550539.html](https://www.shanwei.gov.cn/swbj/467/503/content/post_550539.html) (Acceso: 1 de mayo 2025).

Un gramo de microplástico puede contener hasta 24 000 nanogramos de contaminantes orgánicos persistentes<sup>187</sup>. Estas sustancias son altamente tóxicas, se acumulan en los organismos y pueden causar daños incluso a concentraciones muy bajas.

Los microplásticos pueden hacer que otros contaminantes sean aún más nocivos<sup>188</sup>, ya que las partículas de plástico y la mezcla de sustancias en su superficie no solo se adhieren a otros contaminantes, sino que también pueden interactuar entre sí, modificando sus propiedades químicas.

Las investigaciones demuestran que la exposición a micro y nanoplásticos provoca efectos tóxicos a diversos niveles de la organización biológica:

**Macromoléculas:** Daños al ADN, alteración de la expresión génica y modificaciones en la transcripción de proteínas.

**Células y orgánulos:** Trastornos en la división celular, citotoxicidad, apoptosis, estrés oxidativo, disfunción metabólica y aumento de la concentración intracelular de calcio.

**Tejidos:** Procesos inflamatorios, fibrosis, osteólisis del tejido óseo.

**Órganos:** Reacciones inmunitarias, disfunciones orgánicas, neurotoxicidad, cancerogénesis, alteraciones del metabolismo y del equilibrio energético.

**Poblaciones animales y humanas:** Reducción de la fertilidad, ralentización del crecimiento, despoblación.

Estos efectos evidencian el impacto multinivel de los micro y nanoplásticos en los sistemas biológicos<sup>189</sup>.

## 1. Alteración de las funciones celulares

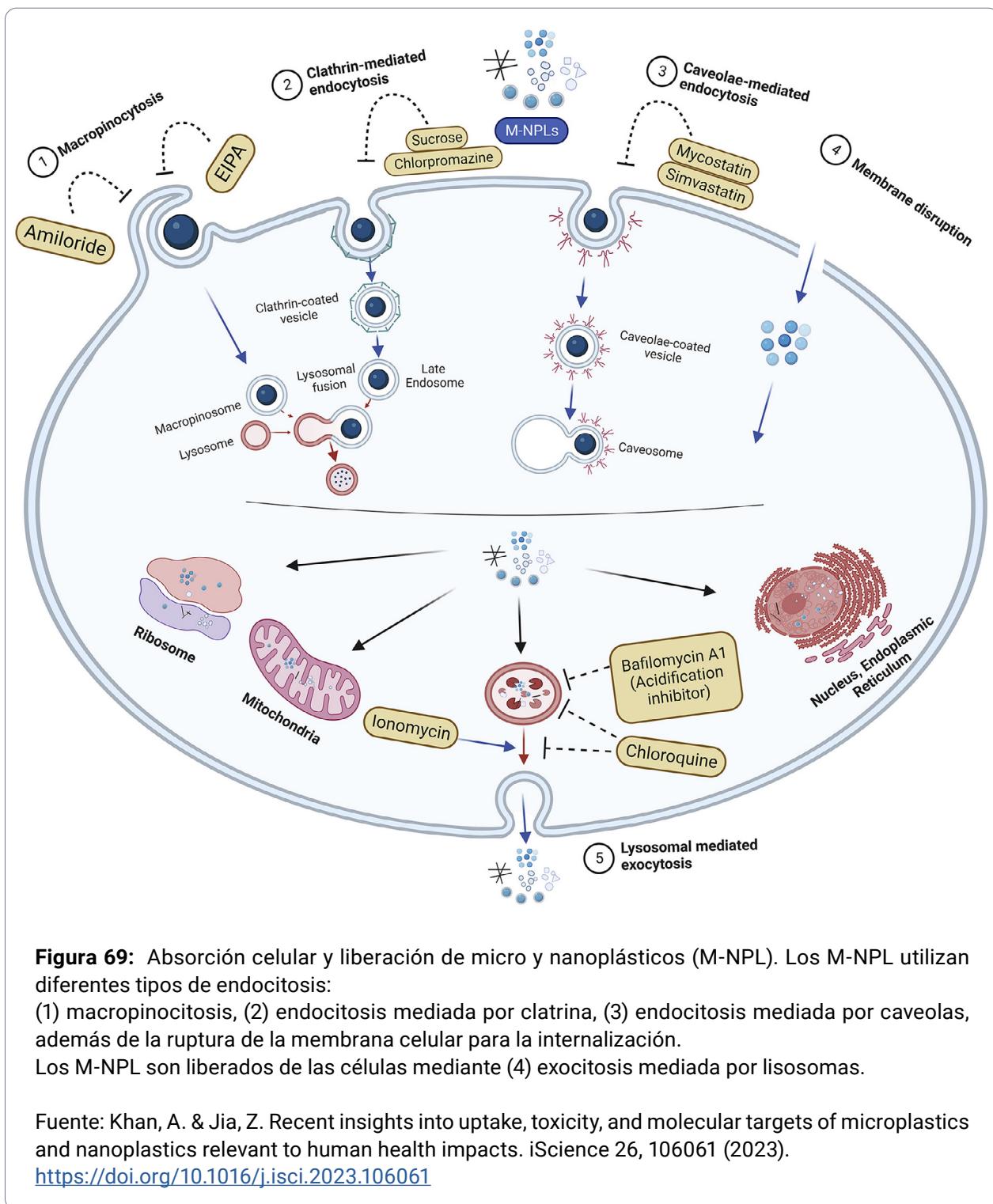
La degradación del organismo causada por los micro y nanoplásticos (MNP) comienza a nivel celular<sup>190</sup>. Los MNP interactúan con las membranas celulares mediante varios mecanismos, incluyendo enlaces de hidrógeno, interacciones halógenas, fuerzas hidrofóbicas, fuerzas de Van der Waals e interacciones electrostáticas. Actuando como factores desestabilizadores, los MNP comprometen la integridad y funcionalidad de las membranas celulares (Fig. 69).

<sup>187</sup> Shanwei Government. Content on environmental health. Microplastics found in the human body for the first time, are they harmful to health? Here's the answer. [https://www.shanwei.gov.cn/swbj/467/503/content/post\\_550539.html](https://www.shanwei.gov.cn/swbj/467/503/content/post_550539.html) (Acceso: 1 de mayo 2025).

<sup>188</sup> Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. Environ. Sci. Technol. Lett. 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

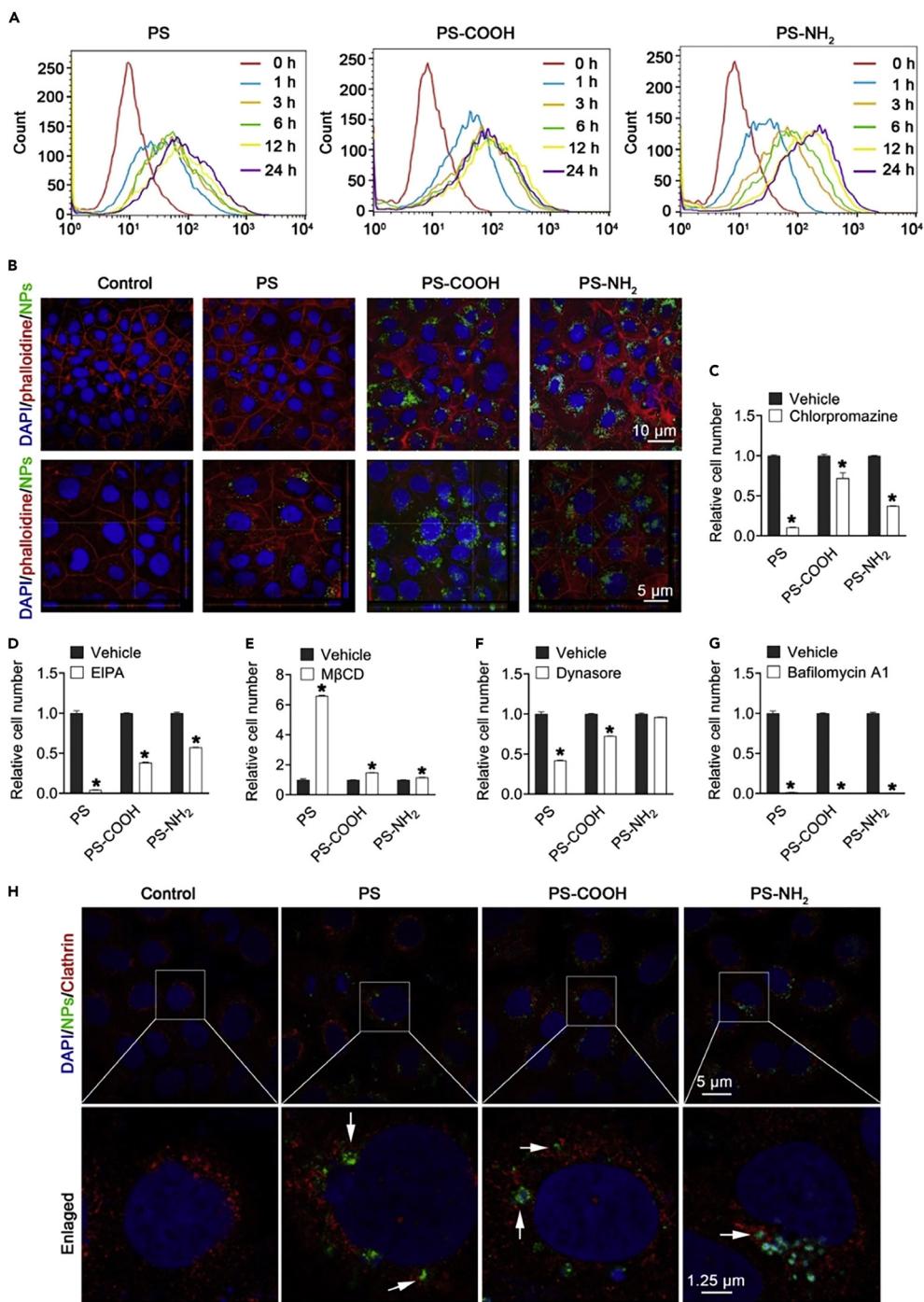
<sup>189</sup> Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain. Chemosphere 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>

<sup>190</sup> Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. iScience 26, 106061 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>



Gracias a sus reducidas dimensiones, los micro y nanoplásticos (MNP) son capaces de penetrar fácilmente en el interior de las células del organismo humano (Fig. 70). El pequeño tamaño y la carga electrostática acumulada en los MNP determinan su efecto sistémico en el organismo<sup>191</sup>.

<sup>191</sup>Casella, C. & Ballaz, S. J. Genotoxic and neurotoxic potential of intracellular nanoplastics: A review. *Journal of Applied Toxicology* 44, 1657–1678 (2024).  
<https://doi.org/10.1002/jat.4598>



**Figura 70:** Células Caco-2 que internalizan nanoplasticos (NP).

(A–G) Análisis de la internalización de los NP por las células Caco-2 mediante citometría de flujo (A) y microscopía confocal (B). Análisis de citometría de flujo de células Caco-2 pretratadas durante 1 hora con clorpromazina (C), EIPA (D), MβCD (E), dinasore (F) y bafilomicina A1 (G), seguido de exposición a los NP durante 24 horas.

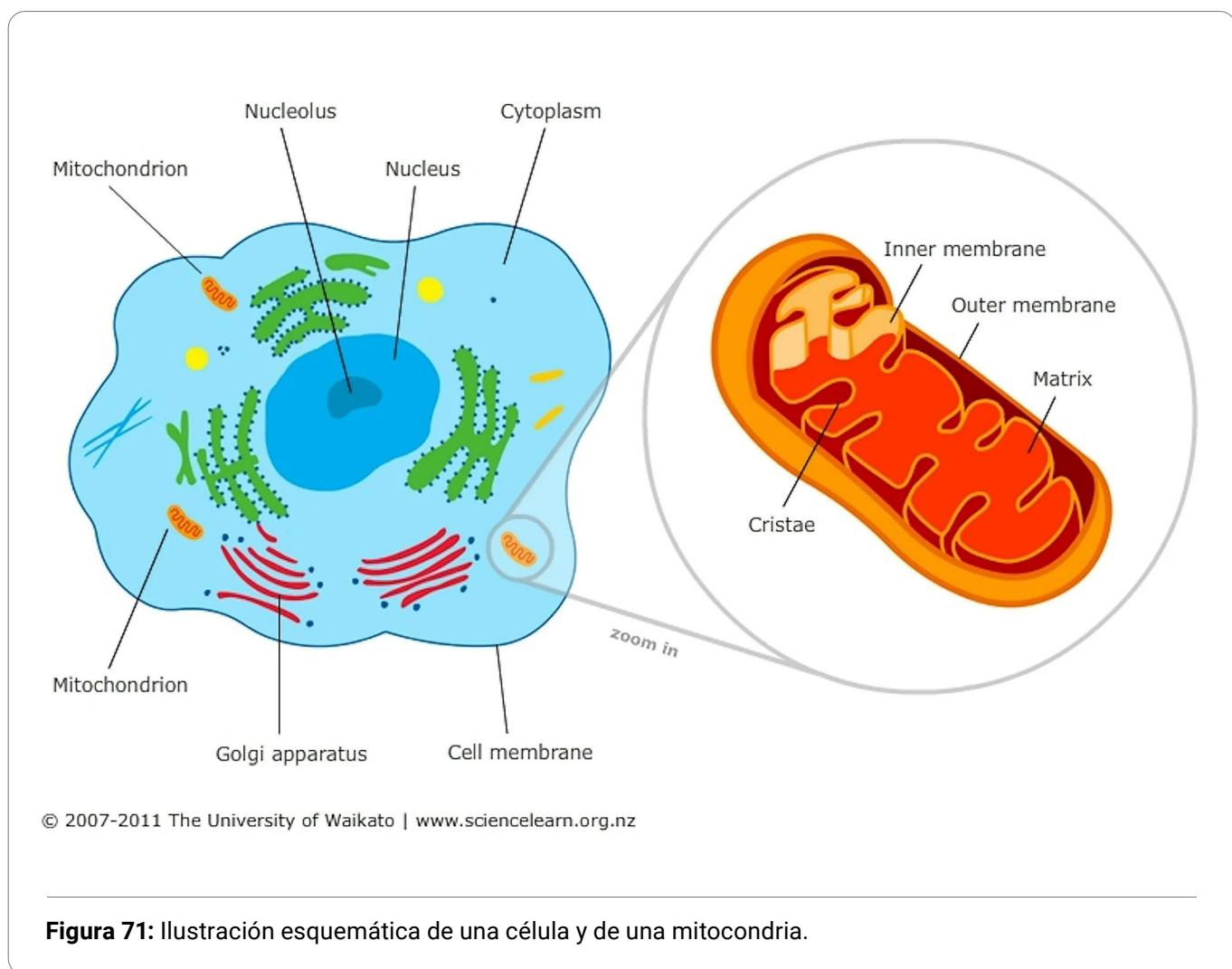
Localización de las NP en vesículas mediadas por clatrina, analizada mediante microscopía confocal (H).

Fuente: Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience* 26, 106061 (2023).

<https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

Un aspecto clave de la acción destructiva a nivel celular es el daño a las membranas celulares, a las mitocondrias y a la degradación del ADN. Las partículas de micro y nanoplásticos cargadas electrostáticamente pueden desestabilizar el potencial de membrana de las células, en particular de las neuronas, provocando señales eléctricas espontáneas, interferencias en la transmisión de información entre las células o muerte celular.

Dentro de la célula, el objetivo principal de la acción destructiva de los nanoplásticos son las mitocondrias – orgánulos fundamentales para la supervivencia y regeneración celular (Fig. 71). Además de su función como “centrales energéticas”, las mitocondrias desempeñan roles multifuncionales, determinando el estado de salud del organismo, la resistencia al estrés, el desarrollo de enfermedades crónicas y los procesos de envejecimiento.



**Figura 71:** Ilustración esquemática de una célula y de una mitocondria.

El correcto funcionamiento de las mitocondrias es fundamental para la supervivencia celular, la homeostasis y la producción de energía.

La estructura y función de las mitocondrias se mantienen mediante un sistema de control de calidad mitocondrial, que incluye procesos de biogénesis mitocondrial, dinámica mitocondrial ( fusión/ fisión), mitofagia y la respuesta mitocondrial a proteínas mal plegadas (UPRmt).

La disfunción y/o daño mitocondrial se asocian con la aparición y progresión de numerosas enfermedades humanas, entre ellas enfermedades neurodegenerativas, cardiovasculares, relacionadas con el envejecimiento, diabetes y cáncer.

El estrés ambiental y los contaminantes pueden aumentar la sensibilidad de las mitocondrias al daño, conduciendo a la disfunción mitocondrial.

Cada vez hay más evidencias que indican el impacto de los nanoplásticos y microplásticos en la salud y función mitocondrial. Se ha reportado que los MNP inducen estrés oxidativo y producción de especies reactivas de oxígeno, alterando finalmente el potencial de la membrana mitocondrial.

Los MNP pueden atravesar las barreras biológicas en el organismo humano y ser asimiladas por las células, modificando potencialmente la dinámica mitocondrial, la bioenergética y la transmisión de impulsos, influyendo así en el metabolismo y la función celular.

Dada la importancia crítica de las mitocondrias para la salud celular y del organismo en general, los MNP representan una amenaza significativa para la salud y función mitocondrial misma.

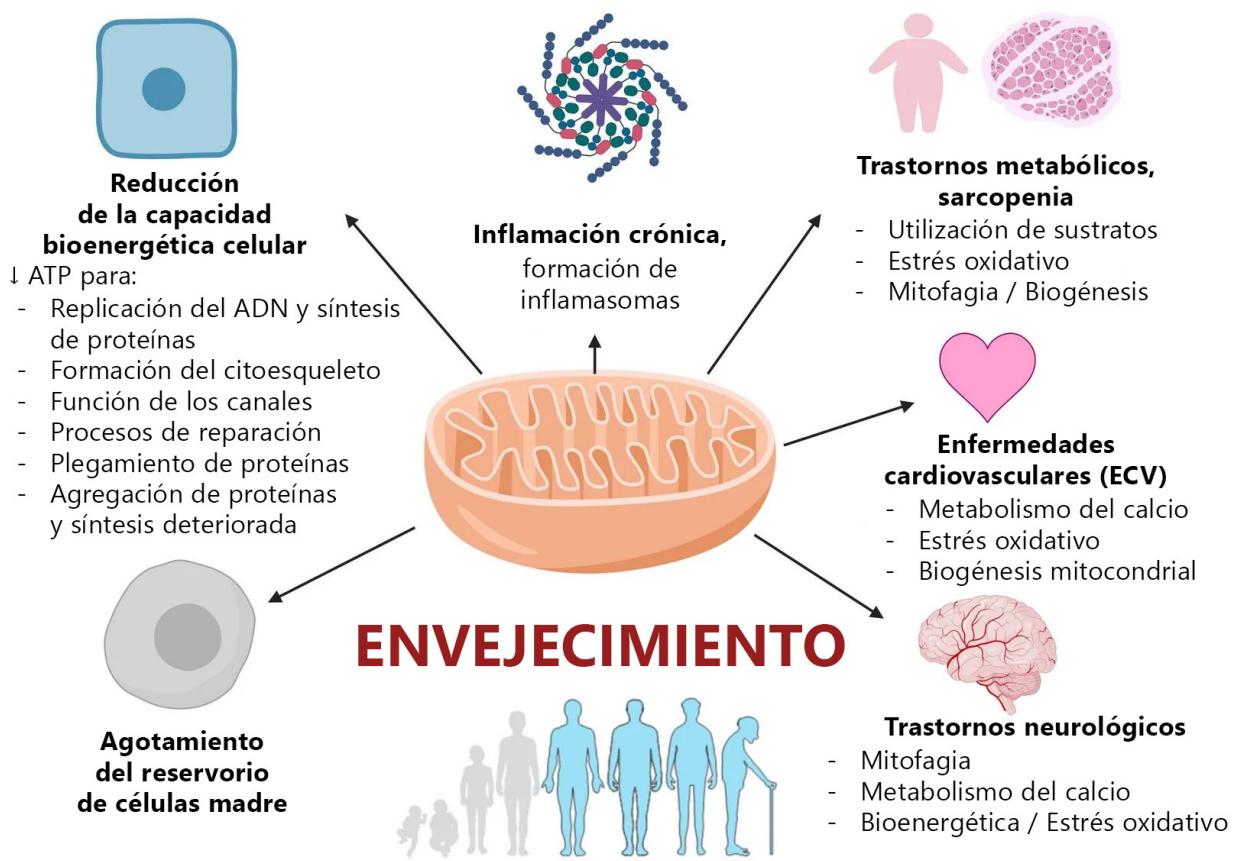
Las evidencias actuales subrayan la urgencia de abordar el problema global de la contaminación por MNP no solo para proteger el medio ambiente, sino también para salvaguardar la salud humana<sup>192</sup>.

Las mitocondrias sintetizan el ATP, la molécula universal de energía que alimenta todos los procesos biológicos: desde la contracción muscular y la transmisión de impulsos nerviosos hasta la síntesis hormonal y la división celular. Participan en el metabolismo de carbohidratos, grasas y aminoácidos, manteniendo el equilibrio metabólico del organismo.

Las mitocondrias controlan la muerte celular programada (apoptosis), un proceso crucial que impide la acumulación de células dañadas o potencialmente peligrosas. Alteraciones en este sistema se asocian con el desarrollo de enfermedades oncológicas, autoinmunes y neurodegenerativas.

Las mitocondrias desempeñan un papel clave en la defensa antioxidante, regulando los niveles de las especies reactivas del oxígeno (ROS). Cuando este sistema pierde su equilibrio, se acumulan daños, se acelera el envejecimiento y aumenta el riesgo de inflamaciones crónicas y patologías (Fig. 72).

<sup>192</sup>Yöntem, F. D. & Ahbab, M. A. Mitochondria as a target of micro- and nanoplastic toxicity. Cambridge Prisms: Plastics 2, e6 (2024). <https://doi.org/10.1017/plc.2024.6>



**Figura 72:** La disfunción mitocondrial causada por la contaminación ambiental puede conducir a diversas enfermedades.

Fuente: [https://openlongevity.org/mitochondria\\_medicine\\_1](https://openlongevity.org/mitochondria_medicine_1)

Las mitocondrias poseen su propio ADN, heredado por vía materna, lo que los convierte en participantes únicos en las enfermedades hereditarias. Regulan la actividad de los genes nucleares y la adaptación celular a los cambios del entorno externo. Además, las mitocondrias participan en la síntesis de hormonas esteroideas: cortisol, estrógenos y testosterona.

Es precisamente la alteración de las funciones mitocondriales, causada por la exposición a los nanoplásticos, la base de una cascada de procesos patológicos capaces de provocar consecuencias graves y potencialmente irreversibles, tanto a nivel de órganos y sistemas específicos como del organismo en su conjunto (Tabla 1).

<b>Enfermedades neurológicas</b>	Enfermedad de Parkinson, Enfermedad de Alzheimer, Esclerosis Lateral Amiotrófica (ELA), Epilepsia, Migrañas, Encefalomielopatías mitocondriales (por ejemplo, síndrome MELAS)
<b>Enfermedades cardiovasculares</b>	Cardiomiopatías, Insuficiencia cardíaca, Aterosclerosis (a través del estrés oxidativo)
<b>Enfermedades inmunitarias e inflamatorias</b>	Enfermedades autoinmunes (por ejemplo, lupus eritematoso sistémico), estados inflamatorios crónicos (mediados por disfunción de las ROS y de la señalización de citocinas)
<b>Trastornos metabólicos</b>	Diabetes mellitus tipo 2, Obesidad, Síndrome metabólico, Trastornos del metabolismo de los ácidos grasos y del lactato
<b>Enfermedades oncológicas</b>	En caso de disfunción mitocondrial, se produce un aumento del riesgo de mutaciones y de transformación maligna de las células
<b>Enfermedades musculares</b>	Miopatías mitocondriales, debilidad muscular crónica y fatiga
<b>Enfermedades de los órganos sensoriales</b>	Retinitis pigmentosa, Neuropatía óptica de Leber (pérdida hereditaria de la visión)
<b>Trastornos mitocondriales genéticos</b>	Síndrome de Leigh, Síndrome de Kearns-Sayre, Síndrome de Barth

**Tabla 1.** Panorama de algunas enfermedades asociadas con la disfunción mitocondrial

## Rol de los micro y nanoplásticos (MNP) en los mecanismos del envejecimiento prematuro y la oncogénesis

La exposición a los nanoplásticos puede provocar un envejecimiento prematuro al interferir con la función mitocondrial y alterar los programas genéticos del organismo. El daño a las mitocondrias conduce a una producción excesiva de especies reactivas de oxígeno (ROS), que causan estrés oxidativo. Esto daña el ADN, compromete la estabilidad genética, activa procesos inflamatorios y acelera el envejecimiento de los tejidos. Además, los nanoplásticos contribuyen al acortamiento de los telómeros, limitando la capacidad de división celular.

66

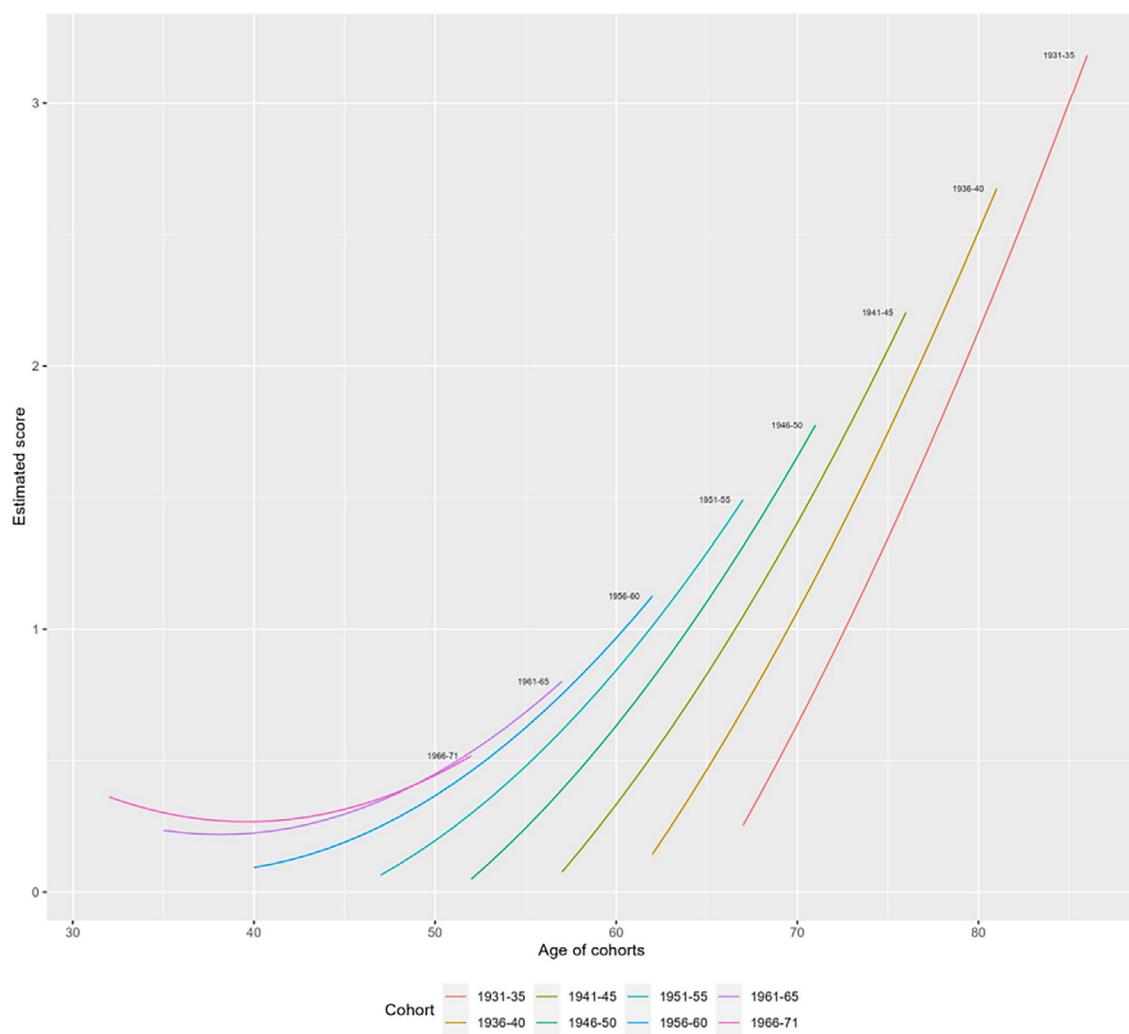
*“También hemos logrado demostrar que, en los seres humanos, incluso una sola variación de un nucleótido en el ADN mitocondrial, asociada a un deterioro de la función mitocondrial y a enfermedades mitocondriales pediátricas, puede acelerar los procesos de envejecimiento”, declaró Taosheng Huang, médico, doctor en investigación, profesor y director del Departamento de Genética en el Departamento de Pediatría de Jacobs School of Medicine and Biomedical Sciences de la Universidad de Buffalo. “Hemos descubierto que las especies reactivas de oxígeno, derivadas de una mala función mitocondrial, llevan a un aumento del daño al ADN con el tiempo”<sup>193</sup>.*

*El envejecimiento epigenético* es un conjunto de cambios en la regulación génica que ocurren a nivel de las modificaciones del ADN (activación/desactivación de genes), sin alterar la secuencia del ADN en sí. Se trata de un delicado “temporizador molecular” medible, que puede avanzar más rápido o más lento que el envejecimiento cronológico. Una alta actividad del ADN mitocondrial está asociada con una aceleración del envejecimiento epigenético. En algunas personas, ya entre los 20 y los 30 años, la edad biológica de las células puede ser significativamente mayor que la edad cronológica: esto significa que el organismo envejece más rápido de lo esperado.

En individuos con disfunciones mitocondriales, las enfermedades típicamente relacionadas con la edad — como la demencia, las enfermedades cardiovasculares, las arritmias y la insuficiencia cardíaca — pueden manifestarse ya en edades tempranas. Científicos escoceses han descubierto que cuanto más tarde nace una persona, mayor es el riesgo de desarrollar enfermedades antes de los 50 años. Por ejemplo, las personas nacidas entre 1956 y 1960 presentan en promedio un mayor número de enfermedades que aquellas nacidas entre 1951 y 1955 o entre 1946 y 1950<sup>194</sup> (Fig. 73).

<sup>193</sup>Medindia. Study unravels how mitochondrial dysfunction leads to premature aging. (2022) <https://www.medindia.net/news/study-unravels-how-mitochondrial-dysfunction-leads-to-premature-aging-208364-1.htm> (Acceso: 1 de mayo 2025).

<sup>194</sup>Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. Younger but sicker? Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study. European Journal of Public Health 34, 696–703 (2024). <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae062>



**Figura 73:** Tasas previstas de multimorbiidad por grupos y por edad (basadas en las estimaciones del Modelo 1 en la Tabla Suplementaria S3).

Fuente: Studio longitudinale scozzese. Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. Younger but sicker? Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study. European Journal of Public Health 34, 696–703 (2024). <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae062>

## Mutaciones del ADN mitocondrial en el envejecimiento y el cáncer

Los mecanismos clave detrás del envejecimiento y el desarrollo de neoplasias coinciden en gran medida. Uno de los puntos centrales es la disfunción de las mitocondrias, orgánulos celulares responsables de la producción de energía. Con el avance de la edad, en los tejidos humanos se acumulan mutaciones del ADN mitocondrial (mtDNA), y alteraciones similares se han detectado desde hace tiempo en diversas formas de cáncer<sup>195</sup>.

Cuando ocurre una mutación en una célula, esta puede modificar su comportamiento. Por ejemplo, la célula puede comenzar a crecer y dividirse más rápidamente, evadir el proceso de muerte programada, volverse “invisible” al sistema inmunitario o adaptarse mejor a la falta de oxígeno o nutrientes. Estas células adquieren una ventaja sobre las normales: viven más tiempo, se dividen con mayor frecuencia, ocupan más espacio y terminan por prevalecer sobre las demás. Cuando la acumulación de estas células mutantes se vuelve significativa, puede iniciarse la formación de un tumor.



**Figura 74:** Daños al ADN que conducen a mutaciones

Las células postmitóticas –como las neuronas, los cardiomiositos y algunas células musculares– son particularmente vulnerables a los daños mitocondriales. Estas células no se dividen, por lo que las mutaciones acumuladas con la edad, especialmente en el ADN mitocondrial (Fig. 74), permanecen en la célula durante toda su vida.

<sup>195</sup>Smith, A. L. M., Whitehall, J. C. & Greaves, L. C. Mitochondrial DNA mutations in ageing and cancer. *Molecular Oncology* 16, 3276–3294 (2022). <https://doi.org/10.1002/1878-0261.13291>

Las células postmitóticas son altamente activas: las neuronas consumen mucha energía para la transmisión de señales, mientras que las células del corazón bombean sangre constantemente. Esto significa que las mitocondrias trabajan a máxima capacidad, produciendo grandes cantidades de especies reactivas de oxígeno (ROS). Estas dañan las propias mitocondrias, aumentando aún más la producción de ROS e iniciando un círculo vicioso de destrucción.

Con el tiempo, los daños se acumulan y pueden activar procesos patológicos —como enfermedades neurodegenerativas, cardiovasculares o tumorales— hasta provocar la muerte celular.

Esto podría explicar por qué las enfermedades cardiovasculares, los infartos, los accidentes cerebrovasculares y los tumores son las principales causas de muerte a nivel global.

El efecto tóxico de los nanoplásticos en el organismo humano, que ha aumentado drásticamente en los últimos 10–20 años, también aclara por qué estas patologías han comenzado a afectar a personas más jóvenes y han alcanzado dimensiones pandémicas, causando decenas de millones de muertes cada año. Los nanoplásticos, de hecho, comprometen primordialmente el funcionamiento mitocondrial, provocan estrés oxidativo e inducen mutaciones en el ADN mitocondrial y nuclear.

## Desestabilización del sistema hormonal por efecto de los MNP (micro y nanoplásticos)

En la producción de plásticos se utilizan sustancias químicas que pueden interferir con el sistema endocrino y el equilibrio hormonal. Estos compuestos son capaces de imitar, bloquear o modificar la acción de las hormonas naturales, con posibles consecuencias negativas para la salud.

En el cuerpo humano se han detectado más de 3000 sustancias químicas procedentes de materiales de empaque<sup>196</sup>, y alrededor de 100 de ellas están clasificadas como de alto riesgo para la salud humana.

### Bisfenol

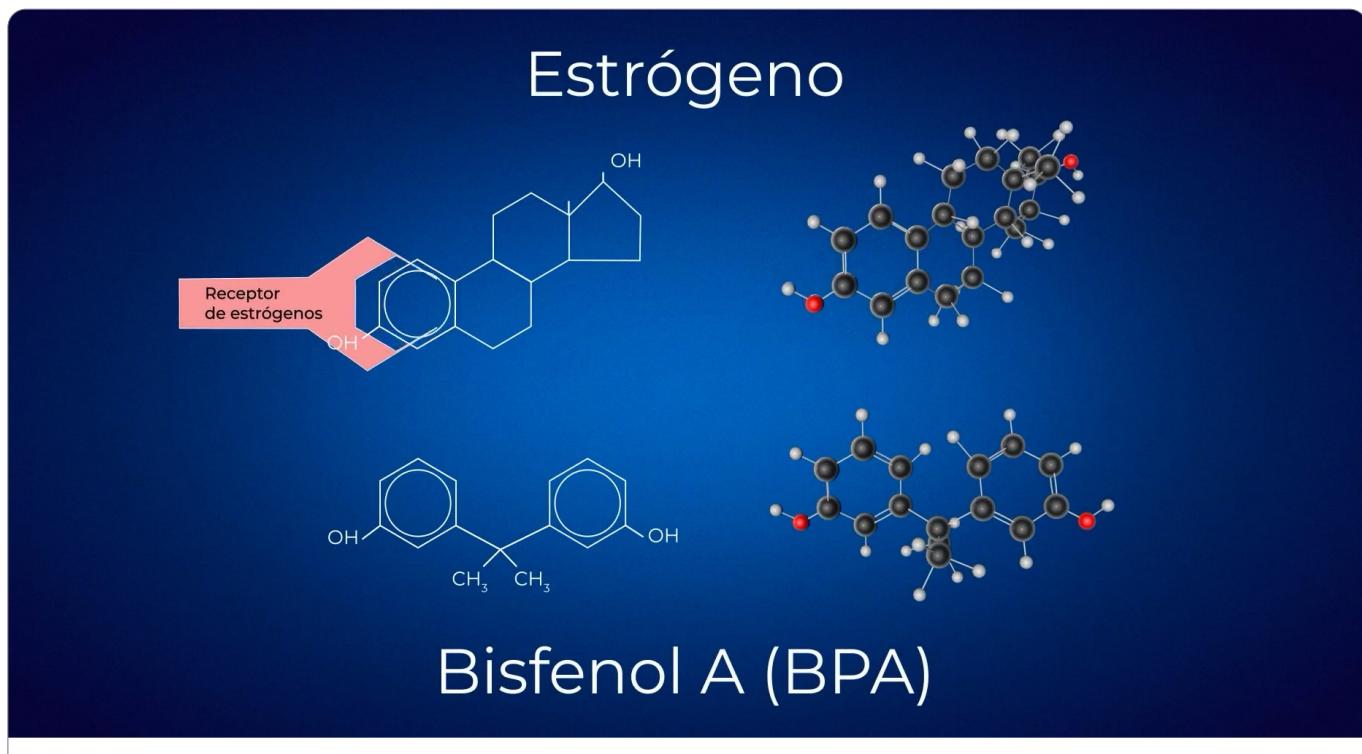
Bisfenol A (BPA, C<sub>15</sub>H<sub>16</sub>O<sub>2</sub>) — es un plastificante sintético ampliamente utilizado en la producción de plásticos de policarbonato (botellas, recipientes), resinas epoxi (recubrimiento de latas) y dispositivos médicos.

Cuando se calienta, el BPA migra hacia los alimentos y las bebidas.

<sup>196</sup>Geueke, B. et al. Evidence for widespread human exposure to food contact chemicals. J Expo Sci Environ Epidemiol 1–12 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41370-024-00718-2>

66

*"El BPA actúa como una hormona 'fuera de control', reemplazando a la natural que normalmente regula este proceso"*, declaró el profesor Ian Rae, experto en sustancias químicas ambientales de la Escuela de Química de la Universidad de Melbourne<sup>197</sup> (fig. 75).



**Figura 75:** El bisfenol A (BPA, C<sub>15</sub>H<sub>16</sub>O<sub>2</sub>) ejerce una acción disruptora endocrina debido a su similitud estructural con la hormona estrógeno.

Cada año se producen 8 millones de toneladas de bisfenol A a nivel mundial, y 100 toneladas se liberan en la biosfera<sup>198</sup>.

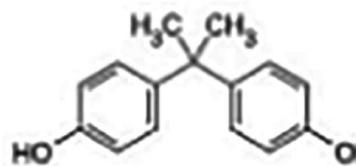
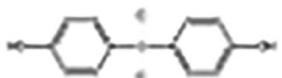
Las investigaciones demuestran que tanto el BPA como su sustituto, el bisfenol S (BPS), alteran la coordinación entre señales excitatorias e inhibitorias en el sistema nervioso<sup>199</sup>. Ambos compuestos, en altas concentraciones, inducen efectos patológicos similares (Fig. 76). Experimentos realizados en células cerebrales han revelado que incluso dosis bajas de BPA/BPS, administradas durante un mes, modifican la transmisión química y eléctrica de las señales sinápticas<sup>200</sup>.

<sup>197</sup>New Atlas. Autism in boys linked to common plastic exposure in the womb. (2024) <https://newatlas.com/health-wellbeing/prenatal-bisphenol-a-bpa-autism-boys> (Acceso: 1 de mayo 2025).

<sup>198</sup>Rubin, B. S. Bisphenol A: An endocrine disruptor with widespread exposure and multiple effects. The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology 127, 27–34 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.jsbmb.2011.05.002>

<sup>199</sup>Glausiusz, J. Toxicology: The plastics puzzle. Nature 508, 306–308 (2014). <https://doi.org/10.1038/508306a>

<sup>200</sup>News-Medical. Plasticizers can impair important brain functions in humans. (2021) <https://www.news-medical.net/news/20210412/Plasticizers-can-impair-important-brain-functions-in-humans.aspx> (Acceso: 1 de mayo 2025).

BPA (C<sub>15</sub>H<sub>16</sub>O<sub>2</sub>)BPC (C<sub>12</sub>H<sub>10</sub>O<sub>4</sub>S)**Figura 76:** Estructuras moleculares y fórmulas químicas del bisfenol A (BPA) y del bisfenol C (BPC).

En 2023, un estudio detectó que los niños con trastorno por déficit de atención e hiperactividad (TDAH) presentaban niveles más altos de bisfenol A y ftalatos en comparación con niños sin esta condición<sup>201</sup>.

Los investigadores del Florey Institute of Neuroscience and Mental Health en Melbourne descubrieron que los niños cuyas madres tenían niveles elevados de BPA en etapas avanzadas del embarazo tenían seis veces más riesgo de desarrollar autismo antes de los 11 años<sup>202</sup>.

66

*“El BPA puede interferir con el desarrollo cerebral del feto masculino, que está regulado por hormonas, de diversas formas, incluida la inhibición de la enzima clave aromatasa, que controla las neurohormonas y es particularmente importante para el desarrollo cerebral del feto masculino”, explicó la profesora Ponsonby. “Parece ser una pieza del rompecabezas del autismo”<sup>202</sup>.*

La inhibición de la enzima aromatasa puede explicar la disparidad de género en el autismo: 4–5 varones por cada mujer<sup>203</sup>. Las niñas desarrollan autismo con menor frecuencia, pero cuando ocurre, tienden a presentar una forma más severa<sup>204</sup>.

El bisfenol A (BPA) también está involucrado en el desarrollo de la diabetes tipo 2, induciendo hiperglucemia y resistencia a la insulina<sup>205</sup>. La mortalidad global causada por la diabetes está en constante aumento (Fig. 77).

<sup>201</sup>[EarthDay.org](https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know). Babies vs. Plastics Report. (2023) <https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know> (Acceso: 1 de mayo 2025)

<sup>202</sup>Symeonides, C., Vacy, K., Thomson, S. et al. Male autism spectrum disorder is linked to brain aromatase disruption by prenatal BPA in multimodal investigations and 10HDA ameliorates the related mouse phenotype. *Nat Commun* 15, 6367 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48897-8>

<sup>203</sup>Zeidan, J. et al. Global prevalence of autism: A systematic review update. *Autism Research* 15, 778–790 (2022). <https://doi.org/10.1002/aur.2696>

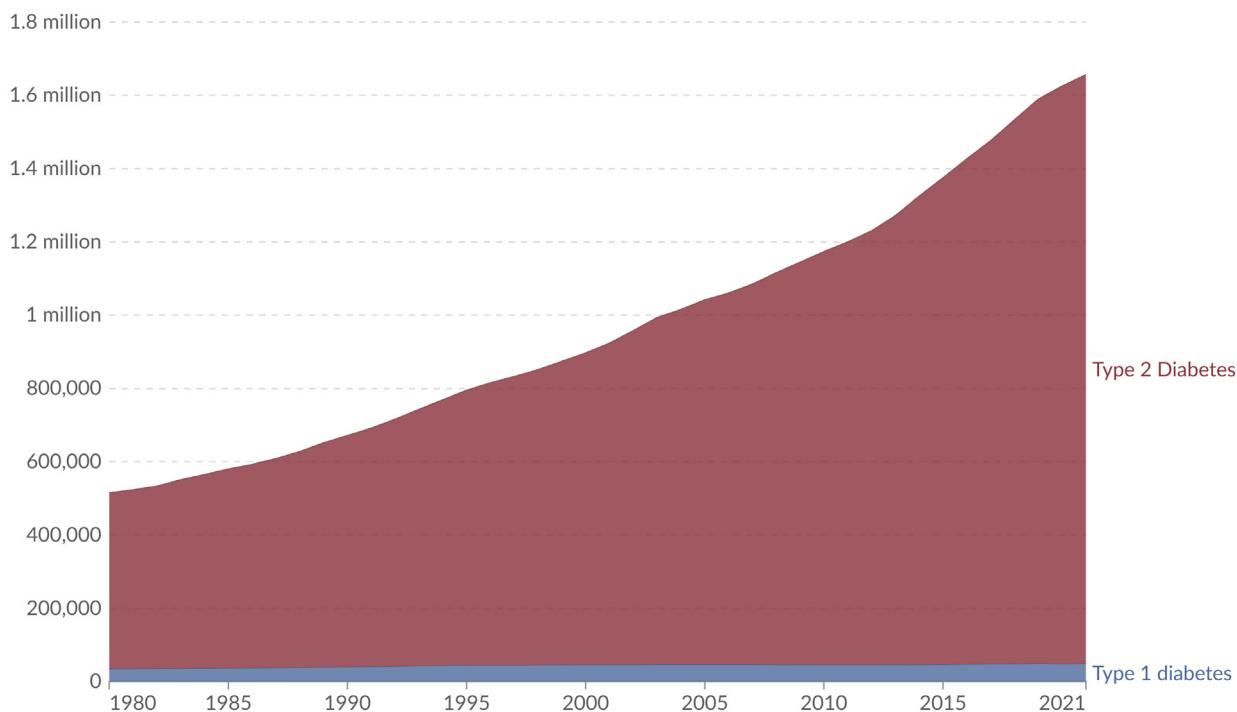
<sup>204</sup>Frazier, T. W., Georgiades, S., Bishop, S. L. & Hardan, A. Y. Behavioral and Cognitive Characteristics of Females and Males With Autism in the Simons Simplex Collection. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry* 53, 329–340.e3 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2013.12.004>

<sup>205</sup>Sun, Q. et al. Association of Urinary Concentrations of Bisphenol A and Phthalate Metabolites with Risk of Type 2 Diabetes: A Prospective Investigation in the Nurses' Health Study (NHS) and NHSII Cohorts. *Environ Health Perspect* 122, 616–623 (2014). <https://doi.org/10.1289/ehp.1307201>

## Deaths from diabetes, by type, World, 1980 to 2021

Our World  
in Data

Annual deaths from diabetes. Type 1 diabetes is an autoimmune disease, where cells making insulin are destroyed; Type 2 diabetes is insulin resistance. Both types lead to high levels of glucose in blood.



Data source: IHME, Global Burden of Disease (2024)

OurWorldinData.org/causes-of-death | CC BY

**Figura 77:** Mortalidad por tipo de diabetes en el mundo, 1980–2021.

<https://ourworldindata.org/grapher/deaths-from-diabetes-by-type>

## Ftalatos

Los ftalatos son un grupo de compuestos químicos utilizados principalmente como plastificantes, es decir, sustancias que hacen que los plásticos, como el cloruro de polivinilo (PVC), sean más flexibles, suaves y duraderos.

Los ftalatos se utilizan ampliamente en la industria y en la vida cotidiana, pero su capacidad para interferir con el sistema endocrino genera preocupación<sup>206</sup>.

Fórmula molecular (Fig. 78). Los ftalatos no son hormonas, pero pueden inhibir la acción de los andrógenos (como la testosterona), un aspecto particularmente crítico para el desarrollo masculino. Su exposición está asociada con una reducción de la motilidad de los espermatozoides y con anomalías en el desarrollo de los órganos genitales (por ejemplo, criptorquidismo en recién nacidos). En hombres infériles se ha detectado una mayor concentración de ftalatos.

<sup>206</sup>Arrigo, F., Impellitteri, F., Piccione, G. & Faggio, C. Phthalates and their effects on human health: Focus on erythrocytes and the reproductive system. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology 270, 109645 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2023.109645>

C<sub>8</sub>H<sub>6</sub>O<sub>4</sub>  
C<sub>6</sub>H<sub>4</sub> ( COOH )

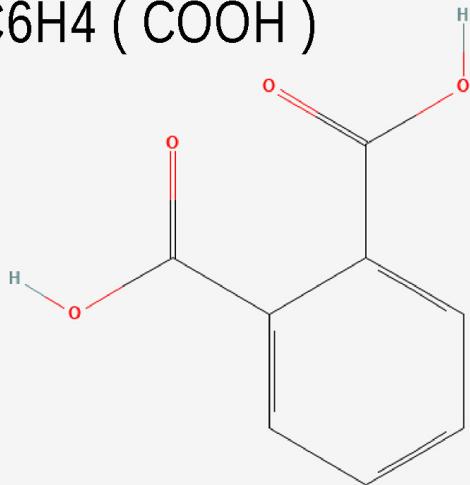


Figura 78:  
Centro Nacional de Información Biotecnológica.  
Bisfenol A, Estructura 2D. PubChem.

<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1017#-section=2D-Structure> (Acceso: 1 de mayo 2025).

Los ftalatos no son hormonas, pero pueden inhibir la acción de los andrógenos (como la testosterona), un aspecto particularmente crítico para el desarrollo masculino. Su exposición está asociada con una reducción de la motilidad de los espermatozoides y con anomalías en el desarrollo de los órganos genitales (por ejemplo, criotorquidismo en recién nacidos). En hombres infériles se ha detectado una mayor concentración de ftalatos.

En las mujeres, la exposición a ftalatos puede causar alteraciones en el ciclo menstrual, un aumento del riesgo de aborto espontáneo y parto prematuro. La exposición fetal durante el embarazo puede provocar retrasos en el desarrollo cerebral, reducción del coeficiente intelectual y trastornos del comportamiento<sup>207</sup>.

Los científicos han demostrado una relación causal entre la exposición a ftalatos ambientales (sustancias químicas tóxicas presentes en productos de consumo cotidianos) y el aumento del crecimiento de fibromas uterinos, los tumores benignos más comunes entre las mujeres<sup>208</sup>. La exposición a ftalatos presentes en plásticos está asociada con un aumento del 20 % en el riesgo de cáncer infantil, con un incremento de triple de tumores óseos malignos y una duplicación de los casos de linfoma y leucemia<sup>209</sup>.

Un estudio con más de 5000 madres estadounidenses reveló que los ftalatos están relacionados con un mayor riesgo de parto prematuro y bajo peso al nacer<sup>210</sup>. Los autores destacan que estos factores aumentan moderadamente la probabilidad de mortalidad infantil y pueden afectar el rendimiento escolar, incrementar el riesgo de enfermedades cardíacas y diabetes, así como de trastornos mentales como autismo y TDAH<sup>211</sup> en los niños.

<sup>207</sup> Welch, B. M. et al. Associations Between Prenatal Urinary Biomarkers of Phthalate Exposure and Preterm Birth: A Pooled Study of 16 US Cohorts. *JAMA Pediatrics* 176, 895–905 (2022). <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2022.2252>

<sup>208</sup> Iizuka, T. et al. Mono-(2-ethyl-5-hydroxyhexyl) phthalate promotes uterine leiomyoma cell survival through tryptophan-kynurene-AHR pathway activation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119, e2208886119 (2022). <https://doi.org/10.1073/pnas.2208886119>

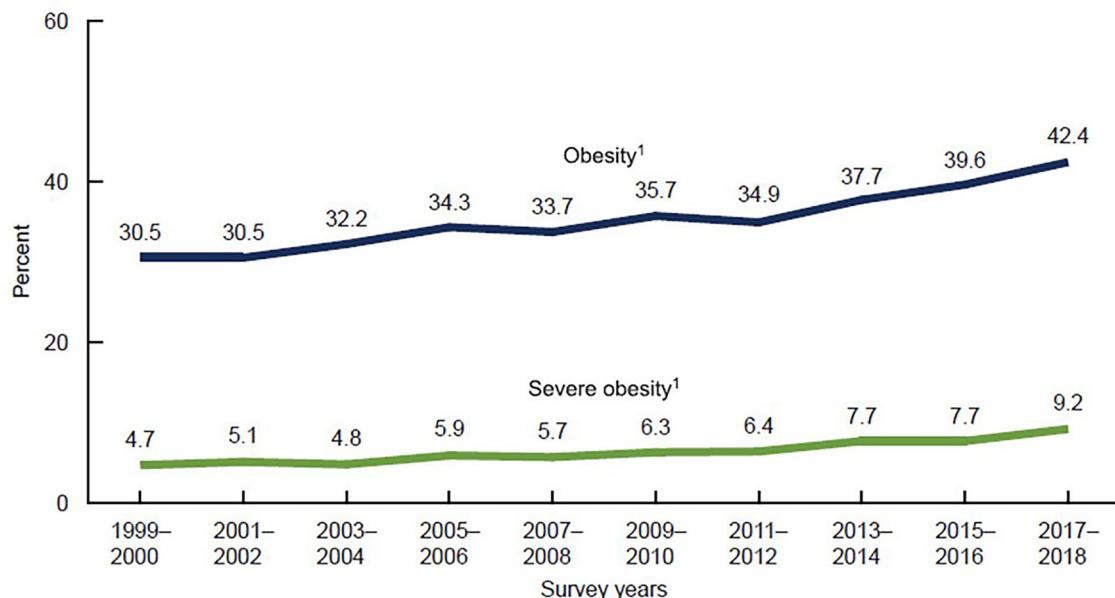
<sup>209</sup> Ahern, T. P. et al. Medication-Associated Phthalate Exposure and Childhood Cancer Incidence. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute* 114, 885–894 (2022). <https://doi.org/10.1093/jnci/djac045>

<sup>210</sup> Trasande, L. et al. Prenatal phthalate exposure and adverse birth outcomes in the USA: a prospective analysis of births and estimates of attributable burden and costs. *The Lancet Planetary Health* 8, e74–e85 (2024). [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00270-X](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00270-X)

<sup>211</sup> Baker, B. H. et al. Ultra-processed and fast food consumption, exposure to phthalates during pregnancy, and socioeconomic disparities in phthalate exposures. *Environment International* 183, 108427 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108427>

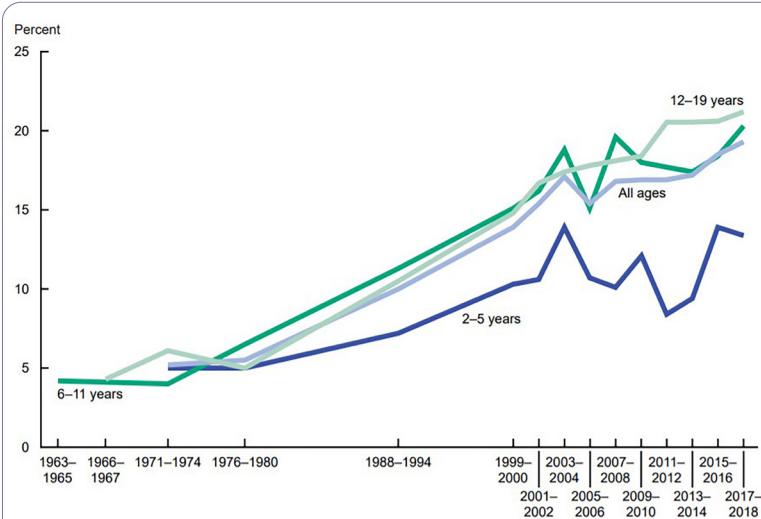
Los aditivos químicos presentes en los plásticos contribuyen al desarrollo de la obesidad<sup>212</sup>. Según datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS), entre 1990 y 2020, la tasa de obesidad entre adultos se ha más que duplicado a nivel global, mientras que entre los adolescentes se ha cuadruplicado<sup>213</sup>.

Tendencias de la obesidad en adultos y jóvenes en los Estados Unidos (Fig. 79, 80).



**Figura 79:** Tendencia de la prevalencia de la obesidad y la obesidad severa ajustada por edad entre adultos de 20 años y más: Estados Unidos, de 1999-2000 a 2017-2018.

Fuente: National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. Overweight & Obesity Statistics. NIDDK (2021) <https://www.niddk.nih.gov/health-information/health-statistics/overweight-obesity> (Acceso: 1 de mayo 2025).



**Figura 80:** Tendencias de la obesidad entre niños y adolescentes de 2 a 19 años, por edad: Estados Unidos, de 1963-1965 a 2017-2018.

Fuente: National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. Overweight & Obesity Statistics. NIDDK (2021) <https://www.niddk.nih.gov/health-information/health-statistics/overweight-obesity> (Acceso: 1 de mayo 2025).

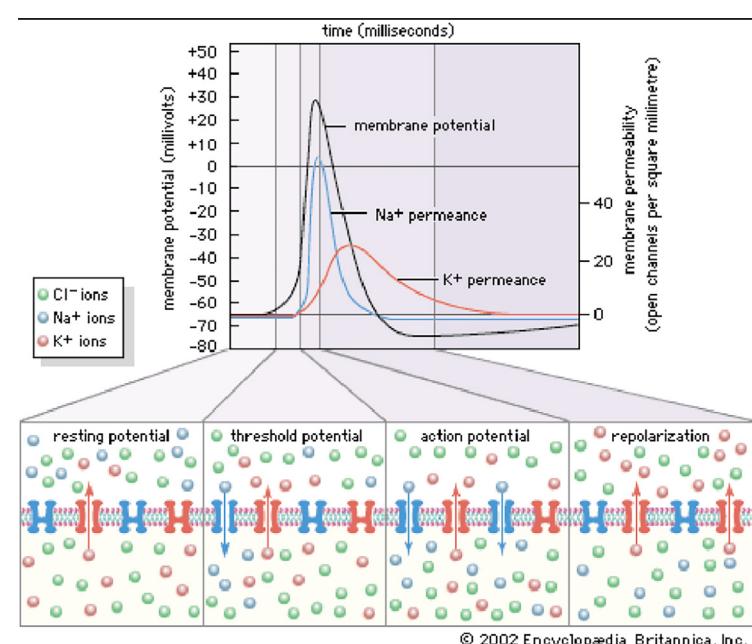
<sup>212</sup>Völker, J., Ashcroft, F., Vedøy, Å., Zimmermann, L. & Wagner, M. Adipogenic Activity of Chemicals Used in Plastic Consumer Products. Environ. Sci. Technol. 56, 2487–2496 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06316>

<sup>213</sup>World Health Organization. Obesity and overweight. WHO Fact Sheets. (2025) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight> (Acceso: 10 de mayo 2025).

## La carga electrostática de los nanoplásticos como factor clave de su alta toxicidad para el organismo humano

El cuerpo humano produce constantemente energía bioeléctrica. Todos los procesos fisiológicos —desde la actividad cardíaca y la percepción sensorial hasta las funciones cognitivas superiores— están determinados por reacciones químicas desencadenadas por el movimiento de cargas eléctricas. Los fluidos intracelulares y extracelulares, que contienen proteínas, están compuestos principalmente por agua con propiedades eléctricas polares. En consecuencia, las interacciones electrostáticas, incluidas las interacciones de hidrógeno, los enlaces iónicos y el empaquetamiento hidrofóbico, desempeñan un papel fundamental en la formación de las estructuras de las proteínas celulares, esenciales para su correcto funcionamiento y, por ende, para el mantenimiento de la vida del organismo<sup>214</sup>.

La electricidad biológica desempeña un papel directo en el funcionamiento celular a través de la interacción entre los canales iónicos y los potenciales de membrana. Cada célula mantiene una diferencia de potencial eléctrico entre el ambiente interno y externo —el potencial de membrana en reposo—, que se mantiene gracias a la distinta concentración de iones entre el interior y el exterior de la célula (Fig. 81). Los principales tipos de canales iónicos presentes en el cuerpo humano incluyen los canales de sodio, potasio, calcio y cloruro. Estos canales, junto con el potencial de membrana, son responsables de funciones clave en los diferentes tipos celulares (Fig. 82, 83).

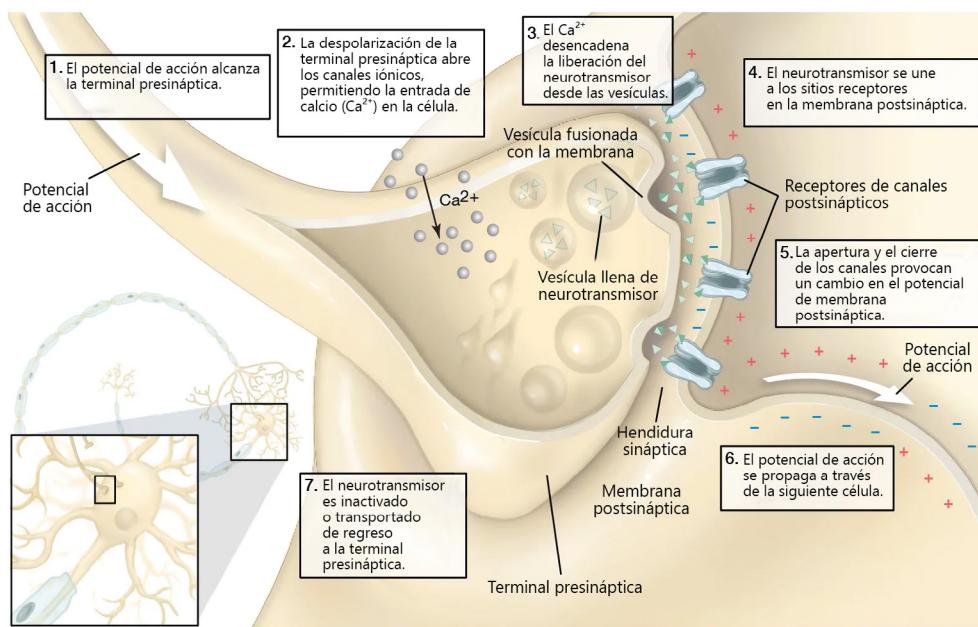


**Figura 81:** Permeabilidad iónica y potencial de acción

Variaciones en la permeabilidad iónica en la base del potencial de acción. El potencial eléctrico se indica a la izquierda en milivoltios, mientras que la permeabilidad iónica se muestra a la derecha como el número de canales abiertos por milímetro cuadrado. En el potencial de reposo, el potencial de membrana está cerca de E<sub>K</sub>, el potencial de equilibrio del potasio (K<sup>+</sup>). Cuando los canales de sodio se abren, la membrana se despolariza. Cuando la despolarización alcanza el potencial umbral, se desencadena un potencial de acción. La generación del potencial de acción acerca el potencial de membrana a E<sub>Na</sub>, el potencial de equilibrio del sodio (Na<sup>+</sup>). Cuando los canales de sodio se cierran (reduciendo la permeabilidad al Na<sup>+</sup>) y los canales de potasio se abren (aumentando la permeabilidad al K<sup>+</sup>), la membrana se repolariza.

Fuente: Encyclopædia Britannica, Inc. <https://www.britannica.com/science/neuron>

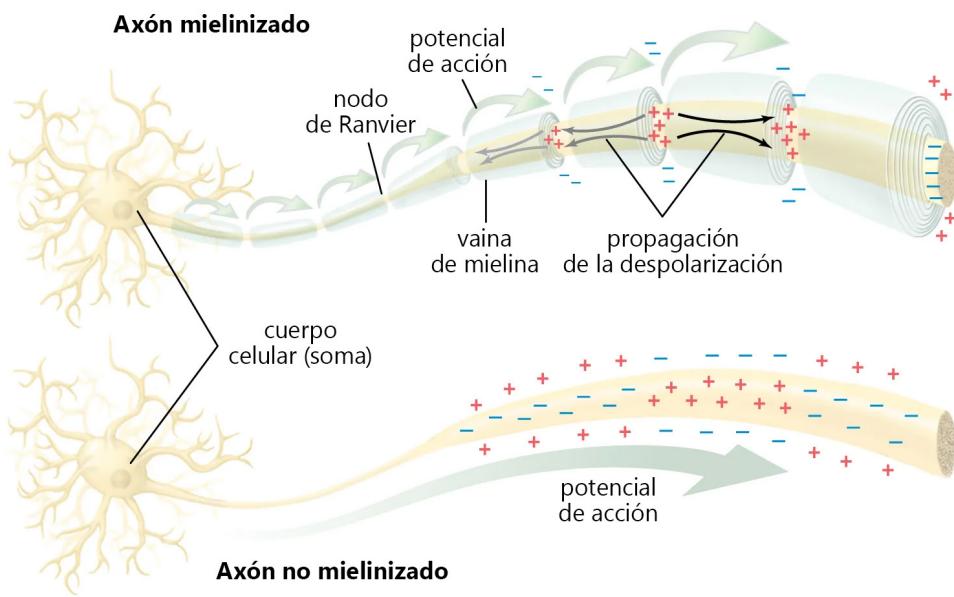
<sup>214</sup>Azim Premji University. The Biology of Electricity: How electricity is critical to the functioning of the human body. (2022) <https://azimpromjiuniversity.edu.in/news/2022/the-biology-of-electricity> (Acceso: 1 de mayo 2025).



**Figura 82:** Sinapsis

Transmisión química del impulso nervioso en la sinapsis. La llegada del impulso nervioso al terminal presináptico estimula la liberación de neurotransmisores en la hendidura sináptica. La unión de los neurotransmisores con los receptores en la membrana postsináptica estimula la regeneración del potencial de acción en la neurona postsináptica.

Fuente: Encyclopædia Britannica, Inc. <https://www.britannica.com/science/neuron> (acceso: 1 de mayo de 2025).



**Figura 83:** Neurona: conducción de un potencial de acción

En un axón mielinizado, la vaina de mielina impide que la corriente local (flechas negras pequeñas) fluya a través de la membrana. Esto obliga a la corriente a viajar a lo largo de la fibra nerviosa hacia los nodos de Ranvier, no mielinizados, que poseen una alta concentración de canales iónicos. Cuando se estimulan, estos canales iónicos propagan el potencial de acción (flechas verdes grandes) al nodo siguiente. De esta manera, el potencial de acción "salta" a lo largo de la fibra, regenerándose en cada nodo, en un proceso llamado conducción saltatoria. En un axón no mielinizado, en cambio, el potencial de acción se propaga a lo largo de toda la membrana, atenuándose mientras se difunde nuevamente en la zona despolarizada de origen.

Fuente: Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025) <https://www.britannica.com/science/neuron> (acceso: 1 de mayo de 2025).

La electricidad biológica generada en el cuerpo humano (por ejemplo, durante la contracción muscular o la transmisión de impulsos nerviosos) no es perjudicial, ya que es componente natural de los procesos fisiológicos. Sin embargo, los micro y nanoplásticos introducidos en el organismo traen consigo una carga electrostática que pueden retener durante mucho tiempo. Es precisamente esta carga la que puede interferir con los procesos biológicos y resultar perjudicial para la salud.

Los nanoplásticos están constituidos por partículas de plástico de dimensiones inferiores a 1 micrómetro. Gracias a su estructura única, estas partículas son capaces de acumular cargas electrostáticas, convirtiéndose en un objeto de creciente interés científico.

Cuando las partículas de micro y nanoplástico se electrizan a través del efecto triboeléctrico (es decir, debido al contacto o fricción con otras superficies), adquieren una carga positiva o negativa. Esta carga influye en su comportamiento tanto en el organismo como en el medio ambiente.

La estructura única de las nanopartículas plásticas les permite adsorber contaminantes, iones y moléculas orgánicas, lo que refuerza su papel como transportadoras de toxinas en los ecosistemas<sup>215,216</sup>.

La composición química de los nanoplásticos juega un papel crucial en la formación de sus propiedades electrostáticas. Polímeros comunes como el poliestireno (PS), el polietileno (PE) o el polipropileno (PP) pueden contener grupos funcionales —como los carboxílicos (-COOH), los sulfatos (-SO<sub>3</sub>H) o los amínicos (-NH<sub>2</sub>)— que se ionizan según las condiciones ambientales. Por ejemplo, un estudio publicado en la revista *Langmuir* ha demostrado que las nanopartículas de poliestireno con grupos carboxílicos (PS-COOH) muestran un potencial zeta negativo, mientras que aquellas con grupos amínicos (PS-NH<sub>2</sub>) presentan un potencial positivo, confirmando la influencia directa de las estructuras funcionales sobre la carga de los nanoplásticos<sup>217</sup>.

La acumulación de cargas no depende solo de la química del material. Durante la producción o a consecuencia de procesos mecánicos (como la fricción), los nanoplásticos pueden cargarse por efecto de electrización por contacto. Un estudio realizado sobre contenedores de plástico reveló que el poliestireno puede acumular cargas de hasta -10 kV, capaces de persistir durante mucho tiempo y atraer partículas con carga opuesta, como polvos o esporas bacterianas<sup>218</sup>. Además, las variaciones en la estructura del polímero, en particular la presencia de grupos polares, pueden determinar la polaridad de la carga en función del pH del ambiente. En ambiente ácido, los grupos amínicos confieren una carga positiva a las partículas, mientras que en ambiente básico prevalecen las cargas negativas debidas a los grupos carboxílicos. Este comportamiento también se ha observado en estudios realizados en plantas de *Arabidopsis thaliana*<sup>219</sup>.

<sup>215</sup>Rai, P. K., Sonne, C., Brown, R. J. C., Younis, S. A. & Kim, K.-H. Adsorption of environmental contaminants on micro- and nano-scale plastic polymers and the influence of weathering processes on their adsorptive attributes. *Journal of Hazardous Materials* 427, 127903 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127903>

<sup>216</sup>Zhang, W. et al. The mechanism for adsorption of Cr(VI) ions by PE microplastics in ternary system of natural water environment. *Environmental Pollution* 257, 113440 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113440>

<sup>217</sup>Perini, D. A. et al. Surface-Functionalized Polystyrene Nanoparticles Alter the Transmembrane Potential via Ion-Selective Pores Maintaining Global Bilayer Integrity. *Langmuir* 38, 14837–14849 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c02487>

<sup>218</sup>Baribio, L. E., Avens, J. S. & O'Neill, R. D. Effect of Electrostatic Charge on the Contamination of Plastic Food Containers by Airborne Bacterial Spores. *Applied Microbiology* 14, 905–913 (1966). <https://doi.org/10.1128/am.14.6.905-913.1966>

<sup>219</sup>Sun, X.D., Yuan, X.Z., Jia, Y. et al. Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Nat. Nanotechnol.* 15, 755–760 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0707-4>

Por lo tanto, la comprensión de la estructura de los nanoplásticos y de sus características electrostáticas no solo revela su naturaleza física, sino que también representa la base para analizar cómo estas partículas pueden influir en los ecosistemas y en los organismos, como se examinará más adelante en el contexto de sus mecanismos patogénicos.

Gracias a su elevada constante dieléctrica (es decir, la capacidad de retener cargas eléctricas), los nanoplásticos que penetran en el organismo continúan acumulando nuevas cargas dañinas, las cuales normalmente serían neutralizadas o dispersadas por los sistemas conductivos naturales del cuerpo. Este fenómeno interfiere con los procesos de autorregulación del organismo, generando un riesgo para las estructuras celulares debido a la prolongada exposición a campos electrostáticos anómalos.

Para evaluar plenamente la magnitud de la amenaza representada por los nanoplásticos introducidos en el organismo, es necesario volver a los sistemas bioeléctricos del cuerpo humano: mecanismos sofisticados en los que los impulsos eléctricos constituyen el lenguaje de la comunicación intracelular.

Cada movimiento y cada pensamiento son posibles gracias a señales invisibles que transmiten órdenes a las células. Las neuronas se comunican a través de impulsos eléctricos, los músculos se contraen en respuesta a estas señales, y el cerebro procesa la información mediante una combinación de procesos bioeléctricos y químicos. Incluso la respiración, los reflejos, la vista y el oído dependen de diminutas descargas eléctricas que regulan el funcionamiento de los órganos.

Estas corrientes invisibles, perfeccionadas por millones de años de evolución, transforman los impulsos bioeléctricos en el propio lenguaje de la vida. Sin embargo, dicha armonía se ve perturbada por elementos extraños: las microscópicas partículas de nanoplásticos.

Una vez dentro del organismo, los nanoplásticos son capaces de adsorber iones y crear zonas con una conductividad eléctrica anómala, interfiriendo con el equilibrio iónico natural y con los mecanismos de neutralización local de las cargas, regulados por los fluidos intercelulares.

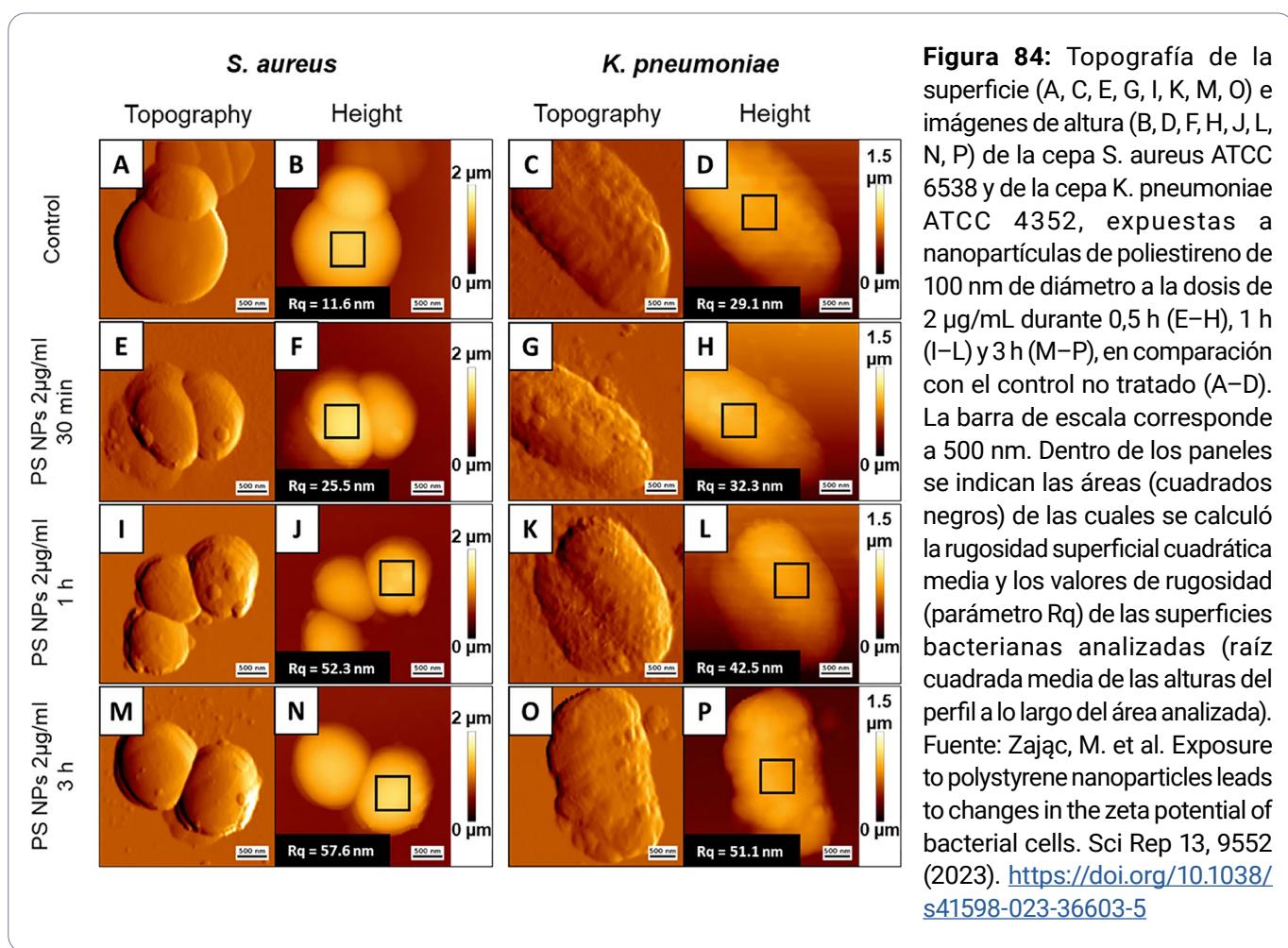
La adsorción de iones en la superficie de los nanoplásticos conduce a la acumulación de cargas electrostáticas, un fenómeno que puede desencadenar estrés oxidativo mediante la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y alterar la comunicación electroquímica entre las células, comprometiendo así sus funciones vitales.

Todo esto ha sido confirmado por un estudio<sup>220</sup> en el que partículas de poliestireno de 100 nm, incluso en presencia de iones sodio ( $\text{Na}^+$ ), mantenían la estabilidad y se adsorbían en la superficie de bacterias, a pesar de la carga negativa de estas últimas. Por ejemplo, experimentos con *Staphylococcus aureus* y *Klebsiella pneumoniae* demostraron que los nanoplásticos modifican significativamente el potencial zeta de las células bacterianas, haciendo su superficie más negativa y comprometiendo el equilibrio electrostático natural.

<sup>220</sup>Zajac, M. et al. Exposure to polystyrene nanoparticles leads to changes in the zeta potential of bacterial cells. Sci Rep 13, 9552 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36603-5>

Las partículas de nanoplástico cargadas pueden influir en los campos eléctricos alrededor de las células, distorsionando la transmisión de señales. Es como una interferencia en las comunicaciones por radio: en lugar de órdenes claras, se genera un ruido caótico que dificulta el intercambio de información entre las células. Aunque el impacto directo sobre las neuronas no ha sido estudiado de manera específica, y las conclusiones sobre el organismo humano siguen siendo preliminares y requieren investigaciones adicionales, la modificación de la carga superficial de las bacterias observada sugiere que los nanoplásticos pueden alterar las propiedades electroquímicas de las membranas celulares. Por ejemplo, a concentraciones superiores a 64 µg/mm, las partículas de poliestireno provocaban importantes variaciones del potencial zeta, potencialmente capaces de comprometer el funcionamiento de canales iónicos o receptores fundamentales para la comunicación intercelular.

Además, la capacidad de las nanopartículas de "adherirse" a las superficies, documentada mediante imágenes de microscopía de fuerza atómica en el estudio citado (Fig. 84), plantea preocupaciones sobre los efectos a largo plazo. Una vez depositadas en los tejidos, estas partículas pueden formar anomalías electrostáticas persistentes, que los iones sodio y potasio no logran neutralizar completamente, especialmente si los nanoplásticos penetran en el interior de las células, superando las defensas ofrecidas por los fluidos intersticiales.



Otro peligro asociado a la carga patógena acumulada en los nanoplásticos consiste en la posibilidad de que estas generen disturbios eléctricos alrededor de las células inmunitarias. Esto fue confirmado por un estudio<sup>221</sup> en el que se demostró que las nanopartículas de poliestireno cargadas positivamente ( $\text{PS}-\text{NH}_2$ ) reducen significativamente la vitalidad de las células inmunitarias y la estabilidad de las membranas lisosomales en comparación con las cargadas negativamente ( $\text{PS}-\text{COOH}$ ), evidenciando la importancia del tipo de carga en la interacción con las células.

Las partículas de MNP cargadas electrostáticamente presentan una mayor capacidad de adsorberse a las membranas celulares, a los tejidos y a otras superficies biológicas, adhiriéndose literalmente a ellas, lo que incrementa el riesgo de daños mecánicos y químicos a las células, comprometiendo su estructura y funcionalidad.

La carga electrostática puede facilitar la penetración de los MNP a través de barreras biológicas complejas como la barrera hematoencefálica o la barrera hematoplacentaria. En consecuencia, las toxinas pueden alcanzar el cerebro o el feto, aumentando el riesgo de efectos neurotóxicos y alteraciones en el desarrollo intrauterino.

El efecto electrostático de los MNP puede interferir con la estructura y funcionalidad de proteínas, canales iónicos y receptores celulares, provocando disfunciones en la transmisión de señales entre células, induciendo estrés oxidativo y debilitando las defensas inmunitarias del organismo.

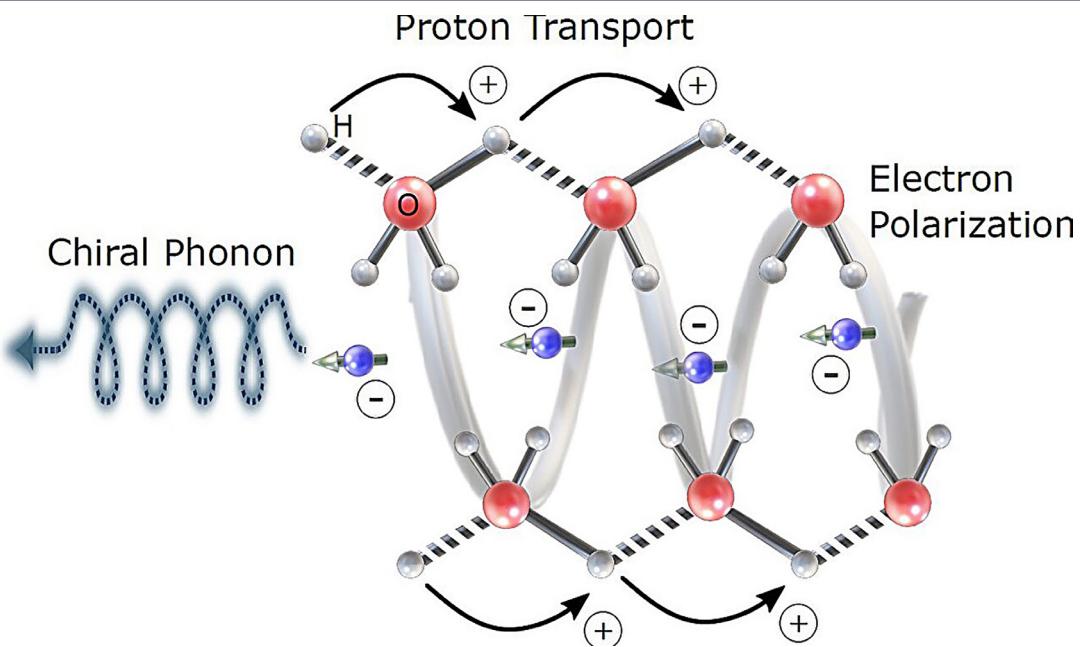
Tales alteraciones pueden activar una cascada de procesos patológicos, entre ellos inflamaciones crónicas, trastornos neurodegenerativos, desarrollo de tumores malignos y disfunciones sistémicas, incrementando significativamente el riesgo de enfermedades graves.

Por lo tanto, la acumulación de carga electrostática sobre los nanoplásticos no es solo un fenómeno físico, sino un mecanismo que amplifica la peligrosidad de los MNP, especialmente considerando que la carga puede persistir durante mucho tiempo y que las partículas de micro y nanoplástico difícilmente son eliminadas del organismo.

El estudio de este fenómeno es hoy de fundamental importancia, ya que permite comprender cómo las cargas eléctricas patógenas acumuladas sobre los nanoplásticos pueden constituir una amenaza macroscópica para la propia supervivencia de la especie humana.

Hasta hace poco tiempo se creía que la base de la energética celular —el transporte de protones— estaba determinada exclusivamente por la química: se pensaba que los protones simplemente “saltaban” de una molécula de agua a otra. Sin embargo, un nuevo estudio publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences* cambia radicalmente esta concepción. Ha surgido, de hecho, que el transporte de protones en los organismos vivos depende no solo de las propiedades químicas, sino también de las cuánticas —en particular del espín de los electrones y de la quiralidad de las moléculas biológicas (Fig. 85).

<sup>221</sup>Murano, C., Bergami, E., Liberatori, G., Palumbo, A. & Corsi, I. Interplay Between Nanoplastics and the Immune System of the Mediterranean Sea Urchin *Paracentrotus lividus*. *Front. Mar. Sci.* 8, 647394 (2021). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.647394>



**Figura 85:** Modelo esquemático simplificado. El transporte de protones va acompañado de una polarización electrónica en ambientes quirales. Debido al efecto CISS, esta polarización electrónica genera una polarización de espín. La conservación del momento angular genera fonones quirales, que potencian el transporte de protones.

Créditos: Naama Goren. [Phys.org. Quantum effects in proteins: How tiny particles coordinate energy transfer inside cells. \(2025\)](https://phys.org/news/2025-05-quantum-effects-proteins-tiny-particles.html) <https://phys.org/news/2025-05-quantum-effects-proteins-tiny-particles.html>

Un estudio realizado por investigadores israelíes de la Universidad Hebreo demostró que, en proteínas como la lisozima, el transporte de protones se acelera considerablemente cuando se introducen electrones con el “espín correcto” —y, por el contrario, se ralentiza con el espín opuesto. Esto ocurre porque, en los sistemas vivos, protones y electrones se comportan como un mecanismo cuántico coordinado. Incluso los cambios mínimos en la orientación del espín pueden influir en procesos fundamentales —producción de energía, metabolismo y regulación intracelular.

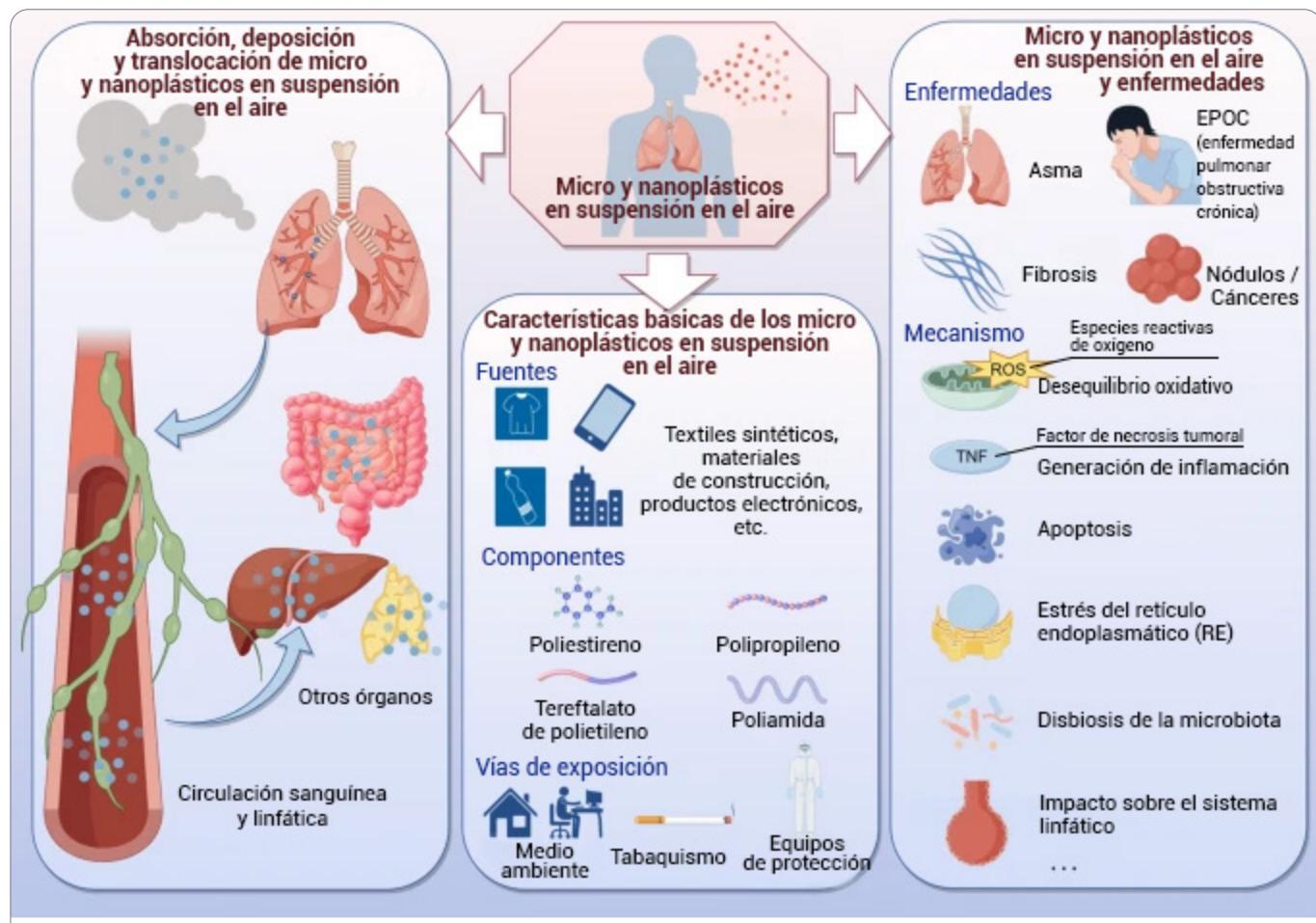
66

Como observó la responsable del estudio, Naama Goren: “*Nuestros resultados muestran que la forma en que los protones se mueven en los sistemas biológicos no solo tiene que ver con la química, sino también con la física cuántica*”. Esto significa que incluso leves alteraciones en la carga eléctrica o en la orientación magnética pueden afectar el metabolismo celular, la producción de energía y el estado general de salud<sup>222</sup>.

<sup>222</sup>[Phys.org. Quantum effects in proteins: How tiny particles coordinate energy transfer inside cells. \(2025\)](https://phys.org/news/2025-05-quantum-effects-proteins-tiny-particles.html) <https://phys.org/news/2025-05-quantum-effects-proteins-tiny-particles.html> (Acceso: 10 de mayo 2025).

## Impacto sistémico de los MNP en los órganos y en los sistemas funcionales del ser humano

Después de ingresar al organismo humano, las partículas de MNP se dispersan a través del torrente sanguíneo, alcanzando todos los órganos y tejidos (Fig. 86). Se han detectado rastros de partículas de plástico en la sangre humana, en tejidos cardíacos y óseos, en el cerebro, la placenta, los pulmones, el hígado y otros órganos<sup>223</sup>.



**Figura 86:** MNP: fuentes, vías de exposición y efectos tóxicos.

Fuente: Gou, Z., Wu, H., Li, S., Liu, Z. & Zhang, Y. Airborne micro and nanoplastics: emerging causes of respiratory diseases. Particle and Fibre Toxicology 21, 50 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00613-6>

<sup>223</sup>Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. iScience 26, 106061 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

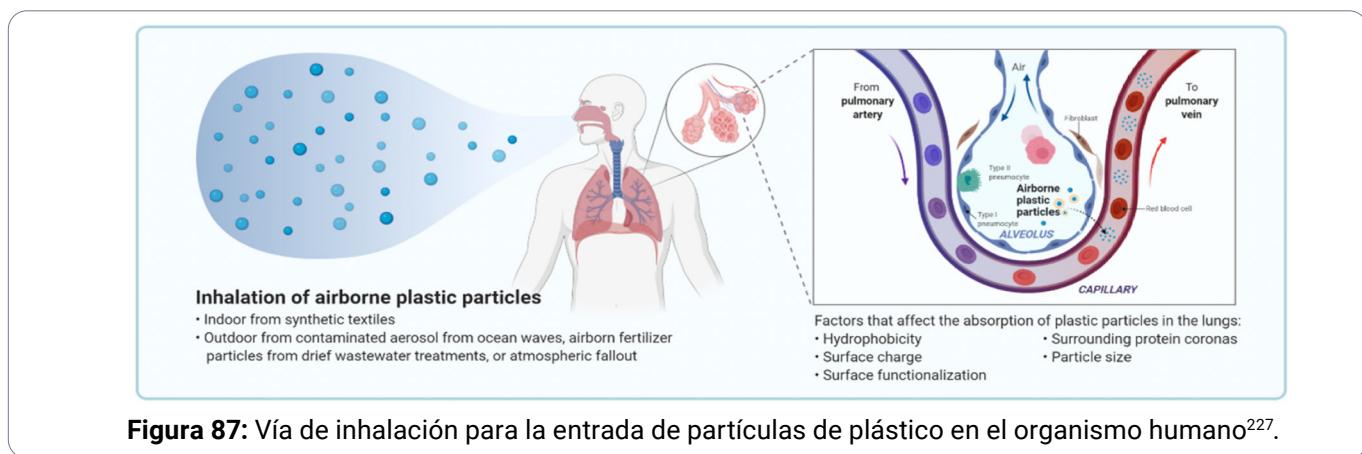
## Mecanismos de daño al aparato respiratorio por inhalación de MNP

Una de las principales vías por las que los MNP ingresan al cuerpo humano es a través de la inhalación. Los resultados de un estudio realizado por investigadores chinos<sup>224</sup> mostraron que, en solo dos horas de actividad al aire libre, un adulto inhala aproximadamente 106 000 partículas de microplástico, mientras que un niño inhala alrededor de 73 700.

Las partículas de tamaño inferior a 0,1 µm, gracias a sus propiedades termodinámicas, pueden depositarse eficazmente a lo largo de todo el tracto respiratorio (desde las vías aéreas superiores hasta los alvéolos)<sup>225</sup>.

Los pulmones presentan una amplia superficie alveolar (aproximadamente 150 m<sup>2</sup>) y una barrera tisular delgada (menos de 1 µm), lo que permite que las NP penetren fácilmente en el torrente sanguíneo (Fig. 87).

En 13 de 20 muestras de tejido pulmonar humano se detectó la presencia de MP<sup>226</sup>.



**Figura 87:** Vía de inhalación para la entrada de partículas de plástico en el organismo humano<sup>227</sup>.

Según un estudio, en todas las muestras de esputo de 22 pacientes con enfermedades pulmonares se detectó la presencia de microplásticos<sup>228</sup>: de 18,75 a 91,75 partículas por cada 10 ml<sup>229</sup>.

Además, se encontró una asociación entre la rinitis alérgica y los microplásticos<sup>230</sup>. Los MNP están estrechamente relacionados con la aparición y el desarrollo de diversas enfermedades respiratorias, entre ellas el asma, la fibrosis pulmonar, la EPOC y los tumores<sup>229</sup>. Un estudio mostró que el 97 % de las muestras de tumores malignos pulmonares contenían fibras de microplástico<sup>231</sup>.

<sup>224</sup>Peking University Center for Environmental Science and Engineering. Prof. Yi Huang's team made new progress in atmospheric microplastic distribution and its human health risk. CESE. (2022) <https://cese.pku.edu.cn/kycg/156506.htm> (Acceso: 1 de mayo 2025).

<sup>225</sup>Gou, Z., Wu, H., Li, S., Liu, Z. & Zhang, Y. Airborne micro- and nanoplastics: emerging causes of respiratory diseases. Particle and Fibre Toxicology 21, 50 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00613-6>

<sup>226</sup>Amato-Lourenço, L. F. et al. Presence of airborne microplastics in human lung tissue. Journal of Hazardous Materials 416, 126124 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126124>

<sup>227</sup>Yee, M. S.-L. et al. Impact of Microplastics and Nanoplastics on Human Health. Nanomaterials 11, 496 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11020496>

<sup>228</sup>Huang, S. et al. Detection and Analysis of Microplastics in Human Sputum. Environ. Sci. Technol. 56, 2476–2486 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03859>

<sup>229</sup>Xu, M. et al. Internalization and toxicity: A preliminary study of effects of nanoplastic particles on human lung epithelial cell. Science of The Total Environment 694, 133794 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133794>

<sup>230</sup>Tuna, A., Taş, B.M., Başaran Kankılıç, G. et al. Detection of microplastics in patients with allergic rhinitis. Eur Arch Otorhinolaryngol 280, 5363–5367 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00405-023-08105-7>

<sup>231</sup>Dris, R. et al. A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. Environmental Pollution 221, 453–458 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>

Los posibles mecanismos incluyen el estrés oxidativo, la inflamación y el desequilibrio del microbioma pulmonar. Los MNP pueden contribuir al desarrollo de inflamaciones pulmonares<sup>232</sup>.

Según un informe de la OMS, actualmente las infecciones de las vías respiratorias inferiores representan la enfermedad infecciosa más letal del mundo y ocupan el quinto lugar entre todas las causas de muerte<sup>233</sup>. Además, el número de fallecimientos por cáncer de tráquea, bronquios y pulmones ha aumentado, situándose en el sexto lugar entre las principales causas de mortalidad.

## Acción neurotóxica de los MNP: daños en el sistema nervioso central y periférico

Las investigaciones confirman que los trastornos neurológicos representan la principal causa de discapacidad física y cognitiva a nivel mundial, afectando actualmente aproximadamente al 15 % de la población mundial. El número absoluto de pacientes ha aumentado significativamente en los últimos 30 años<sup>234</sup>.

Además, se prevé que la carga de las enfermedades neurodegenerativas crónicas se duplicará al menos en las próximas dos décadas.

Según datos de la OMS, una de cada ocho personas en el mundo padece un trastorno mental<sup>235</sup>. La incidencia del trastorno bipolar entre adolescentes y adultos jóvenes ha aumentado a nivel global, pasando de 79,21 por cada 100 000 habitantes en 1990 a 84,97 por cada 100 000 habitantes en 2019<sup>236</sup>. En las últimas tres décadas se ha registrado un aumento de casos tanto en hombres como en mujeres (Fig. 88). Los estudios muestran un aumento de los trastornos mentales entre niños y adolescentes en los últimos años. Según el Informe de 2022 sobre calidad nacional y disparidades en la atención sanitaria, entre 2016 y 2019 el número de ingresos en urgencias por motivos relacionados con la salud mental en niños de 0 a 17 años aumentó de 784,1 a 869,3 por cada 100 000 habitantes. Además, entre 2008 y 2020, la tasa de mortalidad por suicidio en personas de 12 años en adelante creció un 16 %, pasando de 14,0 a 16,3 por 100 000<sup>237</sup>. Según un nuevo informe del seguro de salud Blue Cross Blue Shield, desde 2013 el número de diagnósticos de depresión clínica, también conocida como depresión mayor, ha aumentado un 33 %. “Algunas fuentes ya comienzan a prever que, para 2030, la depresión será la principal causa de pérdida de longevidad o de vida”, afirma el doctor Trent Haywood, médico jefe de la Asociación Blue Cross Blue Shield. El informe destaca que las personas con depresión, tanto mujeres como hombres, pueden perder en promedio hasta 9,7 años de vida en buena salud<sup>238</sup>.

<sup>232</sup>Bengalli, R. et al. Characterization of microparticles derived from waste plastics and their bio-interaction with human lung A549 cells. Journal of Applied Toxicology 42, 2030–2044 (2022). <https://doi.org/10.1002/jat.4372>

<sup>233</sup>World Health Organization. The top 10 causes of death. WHO Fact Sheets. (2024) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death> (Acceso: 1 de mayo 2025).

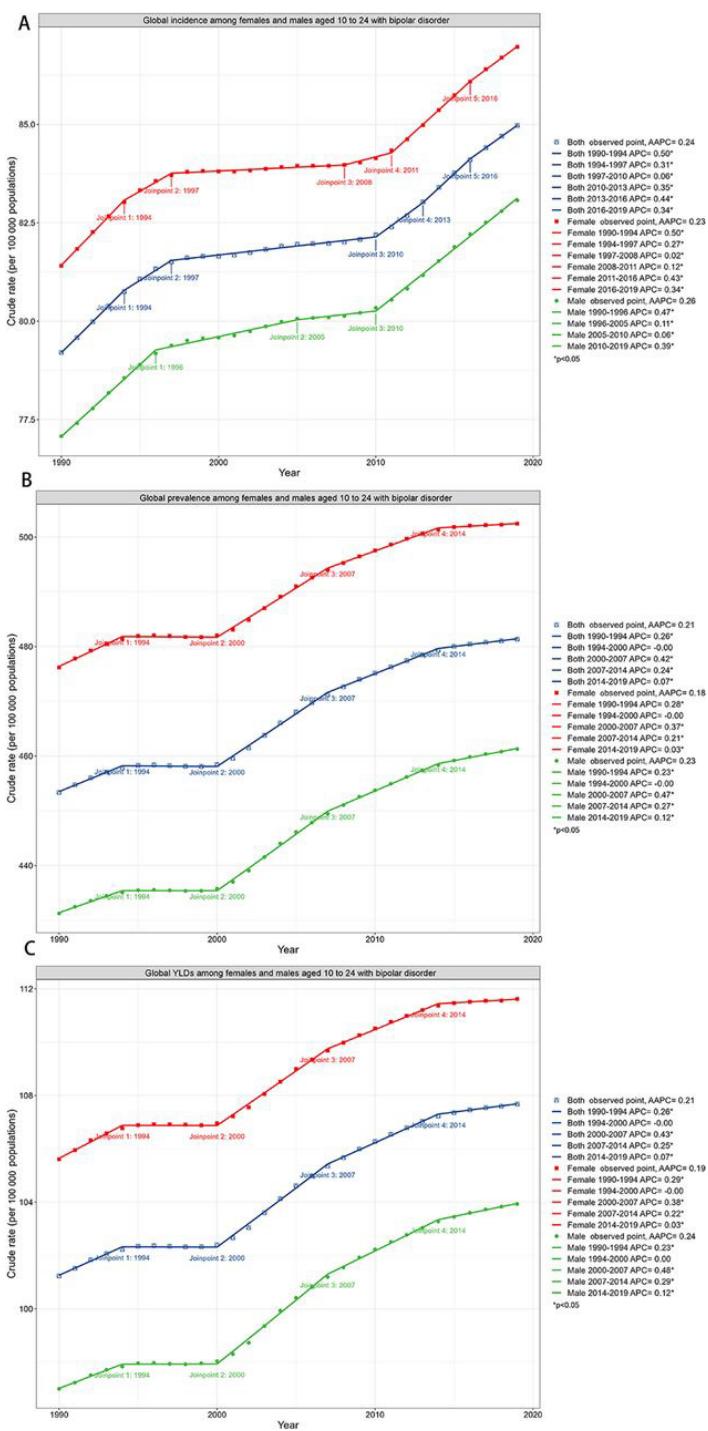
<sup>234</sup>Van Schependom, J. & D'haeseleer, M. Advances in Neurodegenerative Diseases. Journal of Clinical Medicine 12, 1709 (2023). <https://doi.org/10.3390/jcm12051709>

<sup>235</sup>World Health Organization. Mental disorders. WHO Fact Sheets. (2022) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mental-disorders> (Acceso: 1 de mayo 2025).

<sup>236</sup>Zhong, Y. et al. Global, regional and national burdens of bipolar disorders in adolescents and young adults: a trend analysis from 1990 to 2019. Gen Psych 37, e101255 (2024). <https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>

<sup>237</sup>U.S. Department Of Health And Human Services. 2022 National Healthcare Quality and Disparities Report. Rockville, MD: Agency for Healthcare Research and Quality. (2022) <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK587174> (Acceso: 1 de mayo 2025).

<sup>238</sup>Lépine, J.-P. & Briley, M. The increasing burden of depression. NDT 7, 3–7 (2011). <https://doi.org/10.2147/NDT.S19617>



**Figura 88:** Análisis de regresión de los puntos de inflexión en la incidencia global del trastorno bipolar, la prevalencia y los años vividos con discapacidad (YLDs) entre todos los adolescentes y jóvenes de 10 a 24 años entre 1990 y 2019. \*p<0,05; AACP – cambio porcentual anual promedio; APC – cambio porcentual anual; YLDs – años vividos con discapacidad.

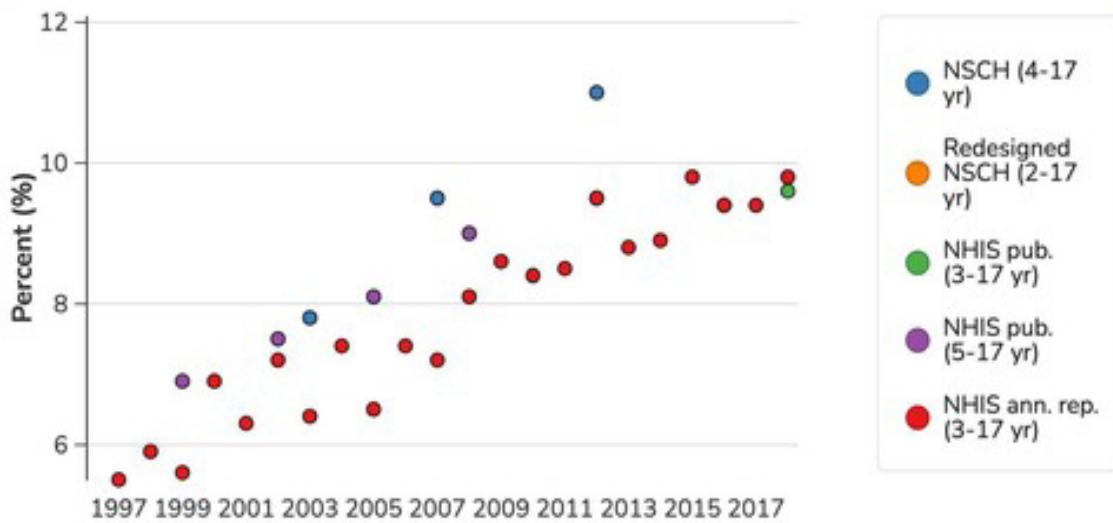
Fuente: Zhong, Y. et al. Global, regional and national burdens of bipolar disorders in adolescents and young adults: a trend analysis from 1990 to 2019. Gen Psych 37, e101255 (2024). <https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>

En las últimas décadas se ha registrado un aumento constante en los diagnósticos de trastorno por déficit de atención e hiperactividad (TDAH). Las encuestas nacionales en Estados Unidos muestran un aumento en la prevalencia del 6,1 % al 10,2 % durante los 20 años comprendidos entre 1997 y 2016<sup>239</sup> (Fig. 89). Una revisión de 2023, que involucró a 31 países, detectó una disminución en los niveles de alfabetización y en las habilidades matemáticas<sup>240</sup> (Fig. 90).

<sup>239</sup>Xu, G., Strateharn, L., Liu, B., Yang, B. & Bao, W. Twenty-Year Trends in Diagnosed Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Among US Children and Adolescents, 1997-2016. JAMA Network Open 1, e181471 (2018). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.1471>

<sup>240</sup>Organisation for Economic Co-operation and Development. Do adults have the skills they need to thrive in a changing world? OECD Publications. (2024) [https://www.oecd.org/en/publications/do-adults-have-the-skills-they-need-to-thrive-in-a-changing-world\\_b263dc5d-en.html](https://www.oecd.org/en/publications/do-adults-have-the-skills-they-need-to-thrive-in-a-changing-world_b263dc5d-en.html) (Acceso: 1 de mayo 2025).

## Porcentaje de niños con un diagnóstico de TDAH reportado por los padres

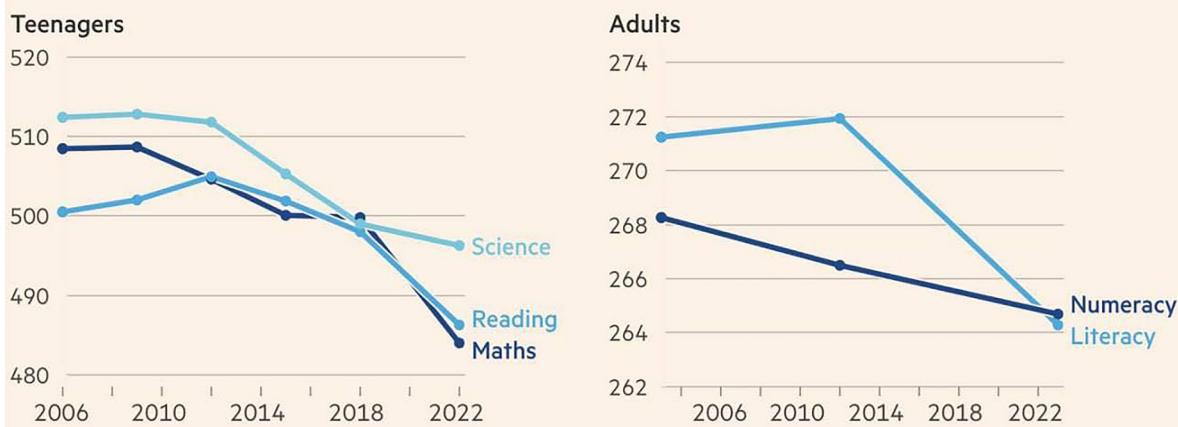


**Figura 89:** Gráfico del aumento de la prevalencia del TDAH desde 1997 hasta 2016.

Fuente: Xu, G., Strathearn, L., Liu, B., Yang, B. & Bao, W. Twenty-Year Trends in Diagnosed Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Among US Children and Adolescents, 1997–2016. JAMA Network Open 1, e181471 (2018). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.1471>

## Performance in reasoning and problem-solving tests is declining

Average scores on assessments across different domains in high-income countries (teen and adult scores use different scales)



Source: OECD PISA, PIAAC and Adult Literacy and Lifeskills Survey

FT graphic: John Burn-Murdoch / @jburnmurdoch

©FT

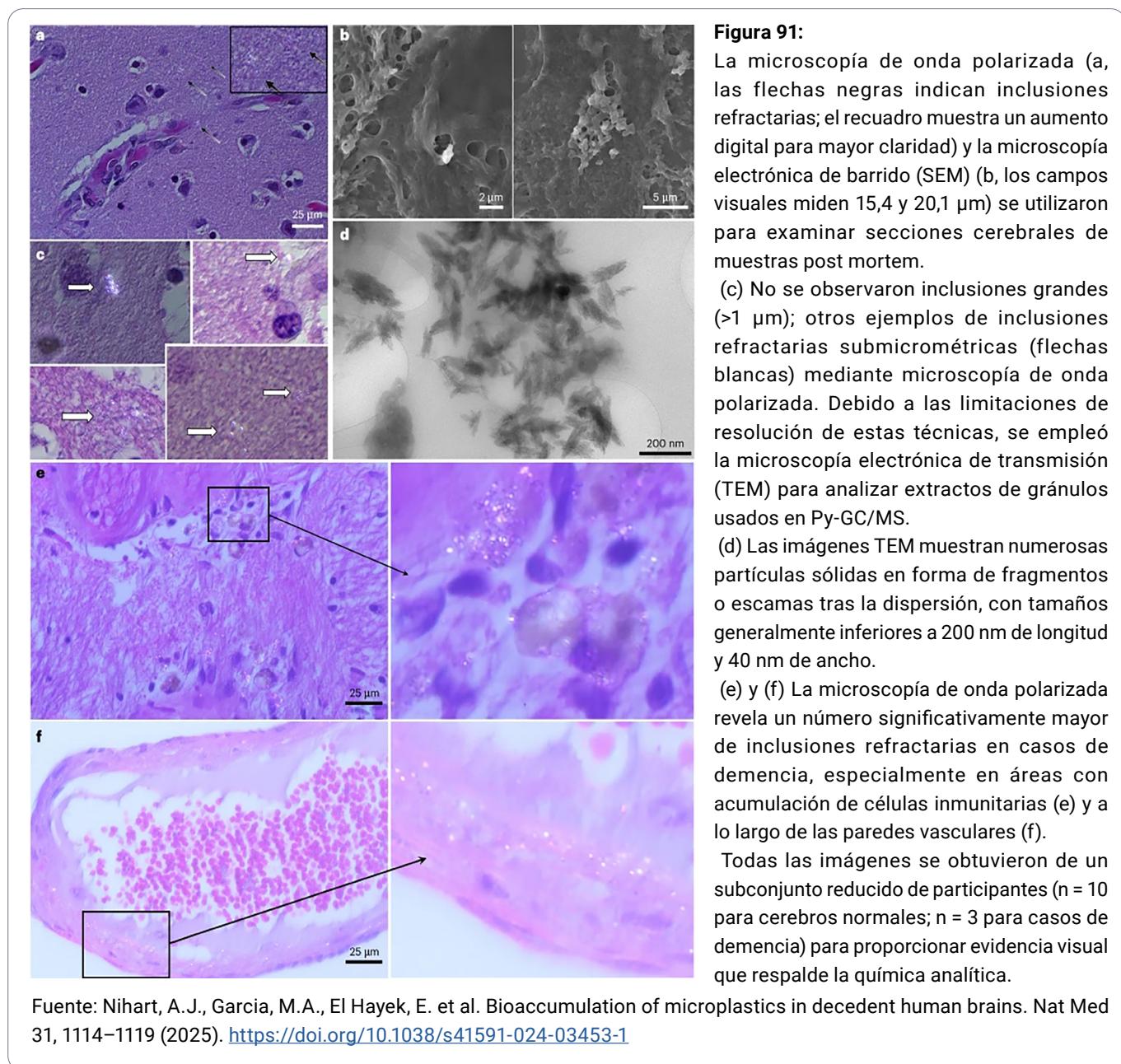
**Figura 90:** El rendimiento en las pruebas de lógica y resolución de problemas disminuye.

Fuente: OECD PISA, PIAAC and Adult Literacy and Lifeskills Survey

FT gráfico: John-Murdoch / @jburnmurdoch

Las crecientes tendencias de las enfermedades neurodegenerativas y neuropsiquiátricas muestran una clara correlación con el aumento de la presencia de plástico en el medio ambiente.

Se han detectado concentraciones más altas de nanoplásticos en los tejidos cerebrales humanos — de 7 a 30 veces superiores en comparación con las encontradas en el hígado o los riñones — y las muestras de tejido cerebral de personas con diagnóstico de demencia mostraron una presencia aún mayor de MNP, hasta 10 veces superior en comparación con el tejido cerebral de sujetos sin demencia<sup>241</sup> (Fig. 91). Las partículas predominantes en el cerebro resultaron ser diminutos fragmentos o escamas de polietileno, uno de los plásticos más comúnmente utilizados en embalajes.



Fuente: Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. Nat Med 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

<sup>241</sup>Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. Nat Med 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

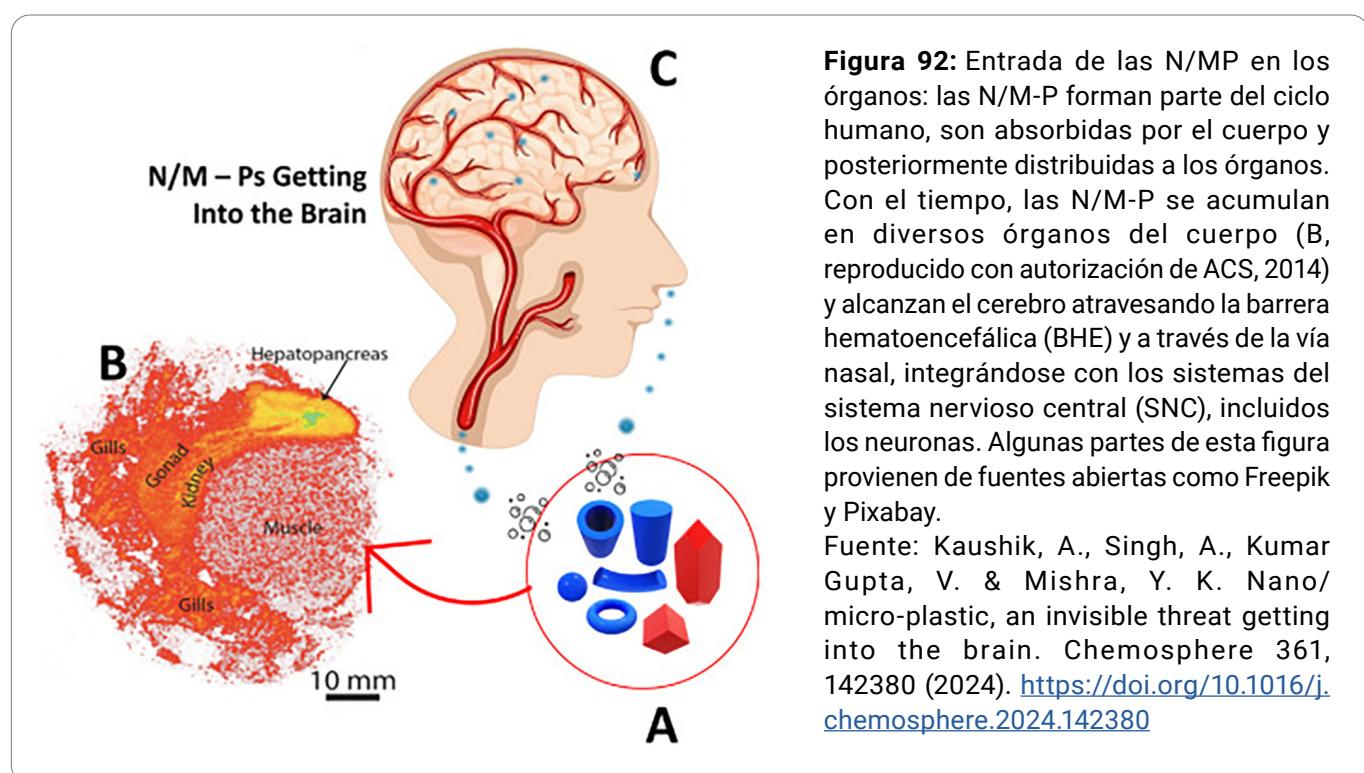
Nuevos datos confirman que, entre 2016 y 2024, es decir, en solo ocho años, el contenido de plástico en el cerebro humano ha aumentado un 50 %<sup>241</sup>.

66

*"En personas sanas de entre 45 y 50 años hemos encontrado un promedio de 4900 microgramos de partículas plásticas por gramo de tejido cerebral. Una cucharadita entera de plástico. Esa es aproximadamente la cantidad de microplástico presente en nuestro cerebro. Esto significa que hoy nuestro cerebro está compuesto en un 99,5 % por materia cerebral y el resto por plástico", afirmó el investigador principal Matthew Campen de la Universidad de Nuevo México<sup>242</sup>.*

Considerando el aumento de partículas de plástico en la atmósfera, el agua y los alimentos, se puede afirmar con certeza que la cantidad de nanoplásticos en nuestro organismo seguirá creciendo. Si esta tendencia continúa, en cuatro años el nivel de plástico en el cerebro aumentará otro 50 %.

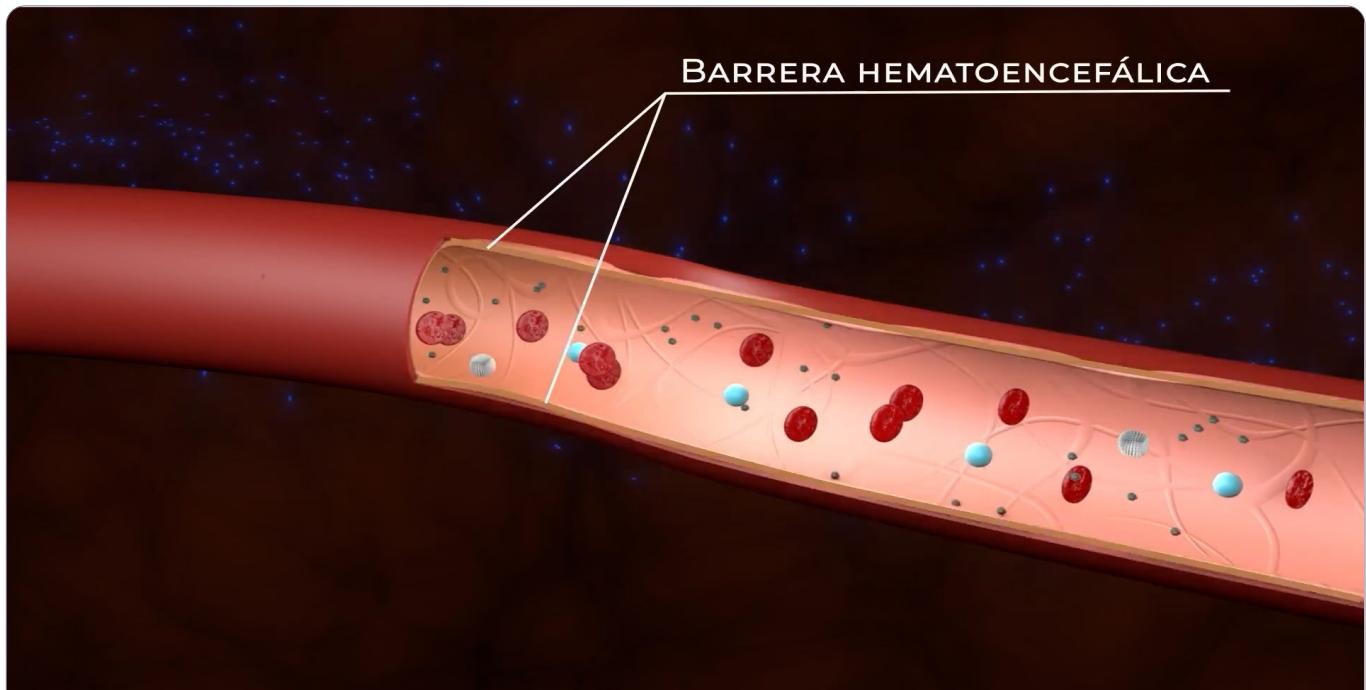
Los MNP penetran en el cerebro a través de la sangre, superando la barrera hematoencefálica (BHE), y también mediante la inhalación a través de los nervios olfativos (Fig. 92).



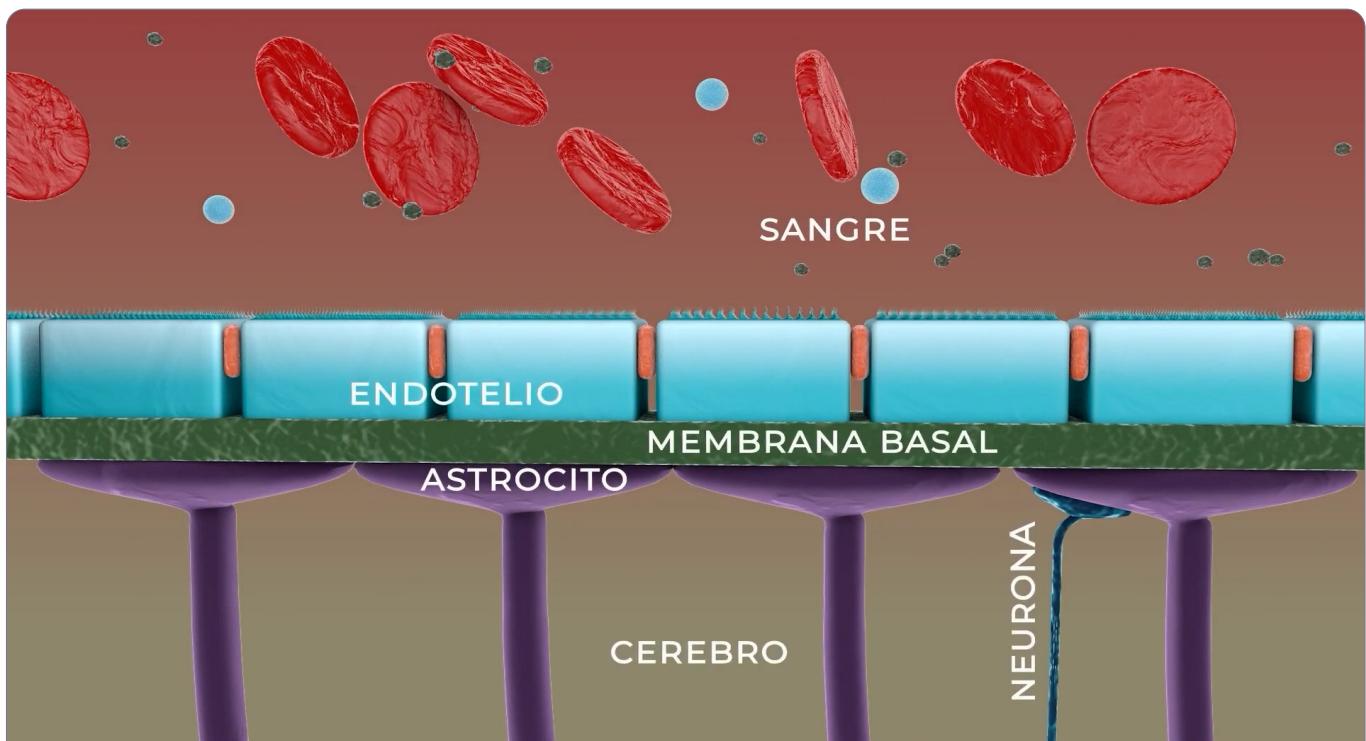
<sup>241</sup>Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. Nat Med 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

<sup>242</sup>VRT NWS. Brain contains "full plastic spoonful" of microplastics. (2025) <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2025/02/04/microplastics-in-de-hersenen> (Acceso: 1 de mayo 2025).

La barrera hematoencefálica es un sistema fisiológico especializado que regula el paso de sustancias desde el flujo sanguíneo hacia el sistema nervioso central (Fig. 93). Permite selectivamente el paso de nutrientes y oxígeno, bloqueando la entrada de toxinas y patógenos (Fig. 94). Este mecanismo proporciona una protección crítica al cerebro, manteniendo la homeostasis del ambiente neuronal.



**Figura 93:** Ilustración esquemática de un vaso sanguíneo cerebral



**Figura 94:** Representación esquemática de la barrera hematoencefálica.

Debido a su tamaño submicrónico y a sus propiedades fisicoquímicas, las nanopartículas de plástico pueden penetrar en el cerebro en tan solo dos horas después de entrar en el organismo<sup>243</sup>.

Durante la inhalación, las nanopartículas de plástico alcanzan directamente el área cerebral responsable del olfato a través de los nervios olfativos<sup>244</sup> (Fig. 95). En consecuencia, siguen un camino más corto y directo hacia el cerebro en comparación con otros órganos.



**Figura 95:** Penetración de las nanopartículas en el cerebro a través de los nervios olfativos.

Una vez que los nanoplásticos penetran en el cerebro, comprometen el funcionamiento de las células cerebrales – las neuronas. Se ha demostrado que la superficie de las nanopartículas y su carga eléctrica pueden influir significativamente en la interacción con las neuronas y en la transmisión de los impulsos nerviosos.

La carga electrostática de los nanoplásticos permite perturbar libremente el funcionamiento de cada célula del cuerpo humano, penetrando en su interior, induciendo estrés oxidativo e inflamación crónica, comprometiendo la función de las mitocondrias hasta su completa destrucción y la muerte celular. Un estudio<sup>245</sup> demostró que las nanopartículas con carga negativa pueden causar la despolarización de la membrana neuronal, provocando alteraciones en su actividad eléctrica.

<sup>243</sup>Kopatz, V. et al. Micro- and Nanoplastics Breach the Blood–Brain Barrier (BBB): Biomolecular Corona’s Role Revealed. *Nanomaterials* 13, 1404 (2023). <https://doi.org/10.3390/nano13081404>

<sup>244</sup>Amato-Lourenço, L. F. et al. Microplastics in the Olfactory Bulb of the Human Brain. *JAMA Netw Open* 7, e2440018 (2024). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.40018>

<sup>245</sup>Dante, S. et al. Selective Targeting of Neurons with Inorganic Nanoparticles: Revealing the Crucial Role of Nanoparticle Surface Charge. *ACS Nano* 11, 6630–6640 (2017). <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b00397>

Durante el experimento se detectó que las partículas de nanoplástico con carga negativa se unían selectivamente a las neuronas activamente involucradas en la transmisión del impulso nervioso. Estas partículas adherían a los cuerpos celulares de las neuronas, a las dendritas y a las hendiduras sinápticas, mientras que las células gliales, que carecen de actividad eléctrica, no interactuaban con ellas.

Esto significa que la actividad eléctrica de las neuronas representa el principal mecanismo desencadenante para la unión de los nanoplásticos con carga negativa a las membranas celulares. Según los estudios, los micro y nanoplásticos tienden a acumularse en la vaina de mielina del cerebro, rica en lípidos, que envuelve a las neuronas y asegura la transmisión de las señales nerviosas<sup>246</sup>. Los nanoplásticos provocan la degradación de la vaina de mielina de los axones<sup>247,248</sup>, comprometiendo la transmisión de los impulsos nerviosos entre las neuronas.

## **Impacto de las nanopartículas plásticas en las neuronas**

La exposición a las nanopartículas plásticas puede afectar a las neuronas a través de los siguientes mecanismos principales:

### **1. Alteración del potencial de membrana de las neuronas**

Las neuronas funcionan gracias a una diferencia de potencial en la membrana (aproximadamente -70 mV en reposo), mantenida por los gradientes iónicos ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ , etc.) y la actividad de los canales iónicos. La presencia de una partícula de nanoplástico con carga eléctrica cerca de la membrana neuronal puede modificar el campo eléctrico local y desestabilizar el potencial de membrana. Esto puede causar una despolarización o hiperpolarización, y en los casos más graves, llevar a la activación espontánea de la neurona o al bloqueo de la transmisión de la señal.

### **2. Interacción electrostática con los canales iónicos**

Los canales iónicos presentes en la membrana de las neuronas contienen aminoácidos cargados, especialmente en las "puertas" del canal. Una partícula con una carga eléctrica fuerte, ya sea negativa o positiva, puede interactuar electrostáticamente con estas regiones, alterando la conformación del canal. Esto puede provocar el bloqueo del canal o su activación inapropiada, comprometiendo el funcionamiento normal de la neurona.

### **3. Compromiso de la función sináptica**

La transmisión sináptica depende de la actividad precisa de iones como  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$ , así como de la liberación de neurotransmisores<sup>249</sup>. Las partículas de nanoplástico cargadas electrostáticamente pueden interferir con la liberación correcta de los neurotransmisores o generar señales falsas, provocando fallos en la transmisión de los impulsos nerviosos.

<sup>246</sup>Peking University Center for Environmental Science and Engineering. Prof. Yi Huang's team made new progress in atmospheric microplastic distribution and its human health risk. CESE. (2022) <https://cese.pku.edu.cn/kycg/156506.htm> (Acceso: 1 de mayo 2025).

<sup>247</sup>Kim, D. Y. et al. Effects of Microplastic Accumulation on Neuronal Death After Global Cerebral Ischemia. *Cells* 14, 241 (2025). <https://doi.org/10.3390/cells14040241>

<sup>248</sup>Zhang, Y. et al. Selective bioaccumulation of polystyrene nanoplastics in fetal rat brain and damage to myelin development. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 278, 116393 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116393>

<sup>249</sup>Moiniafshari, K. et al. A perspective on the potential impact of microplastics and nanoplastics on the human central nervous system. *Environmental Science: Nano* 12, 1809–1820 (2025). <https://doi.org/10.1039/D4EN01017E>

#### **4. Estrés oxidativo e inflamación**

Los nanoplásticos cargados electrostáticamente pueden aumentar la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), causando estrés oxidativo. Este fenómeno ocurre cuando los niveles de ROS superan la capacidad de las células para neutralizarlas, provocando daños en el ADN, las membranas celulares, las proteínas y las mitocondrias. En las neuronas, esto compromete la transmisión de los impulsos nerviosos, llevando a la degeneración y, finalmente, a la muerte celular. Dado que las neuronas tienen una capacidad limitada de regeneración, los daños por estrés oxidativo suelen ser irreversibles y pueden contribuir a un deterioro progresivo de la memoria, la atención y otras funciones cognitivas.

#### **5. Efecto sobre la función mitocondrial**

Los nanoplásticos con carga electrostática positiva, una vez que penetran en la célula, pueden acumularse en las mitocondrias, alterando su potencial de membrana. Esto compromete la cadena respiratoria mitocondrial, causando pérdidas de electrones que, al reaccionar con el oxígeno, generan especies reactivas de oxígeno (ROS), como los aniones superóxido. La acumulación excesiva de ROS intensifica el estrés oxidativo, dañando estructuras celulares fundamentales.

#### **6. Mutaciones mitocondriales**

Las nanopartículas de plástico pueden dañar el ADN mitocondrial, interfiriendo con el correcto funcionamiento de las mitocondrias. Esto compromete procesos celulares esenciales como la producción de energía, la gestión del estrés oxidativo, la apoptosis (muerte celular programada) y el metabolismo. Las disfunciones en estos sistemas pueden crear condiciones favorables para el desarrollo de patologías crónicas y neurodegenerativas.

#### **7. Propiedades reactivas de la superficie de las nanopartículas de plástico**

La alta superficie específica de las nanopartículas de plástico es uno de los principales factores que determinan su alta reactividad química y su capacidad para generar especies reactivas de oxígeno (ROS). En comparación con los microplásticos, las nanopartículas poseen una superficie por unidad de masa decenas o cientos de veces mayor, aumentando significativamente las interacciones con biomoléculas y el entorno circundante.

La carga electrostática de las partículas de plástico puede interferir con el funcionamiento de las neuronas, bloqueando o alterando la transmisión de los impulsos nerviosos. Esto provoca disfunciones en el sistema nervioso y puede inducir una amplia gama de condiciones patológicas. Estos efectos se manifiestan en forma de trastornos neurológicos, autonómicos, cognitivos y psíquicos (Tabla 2).

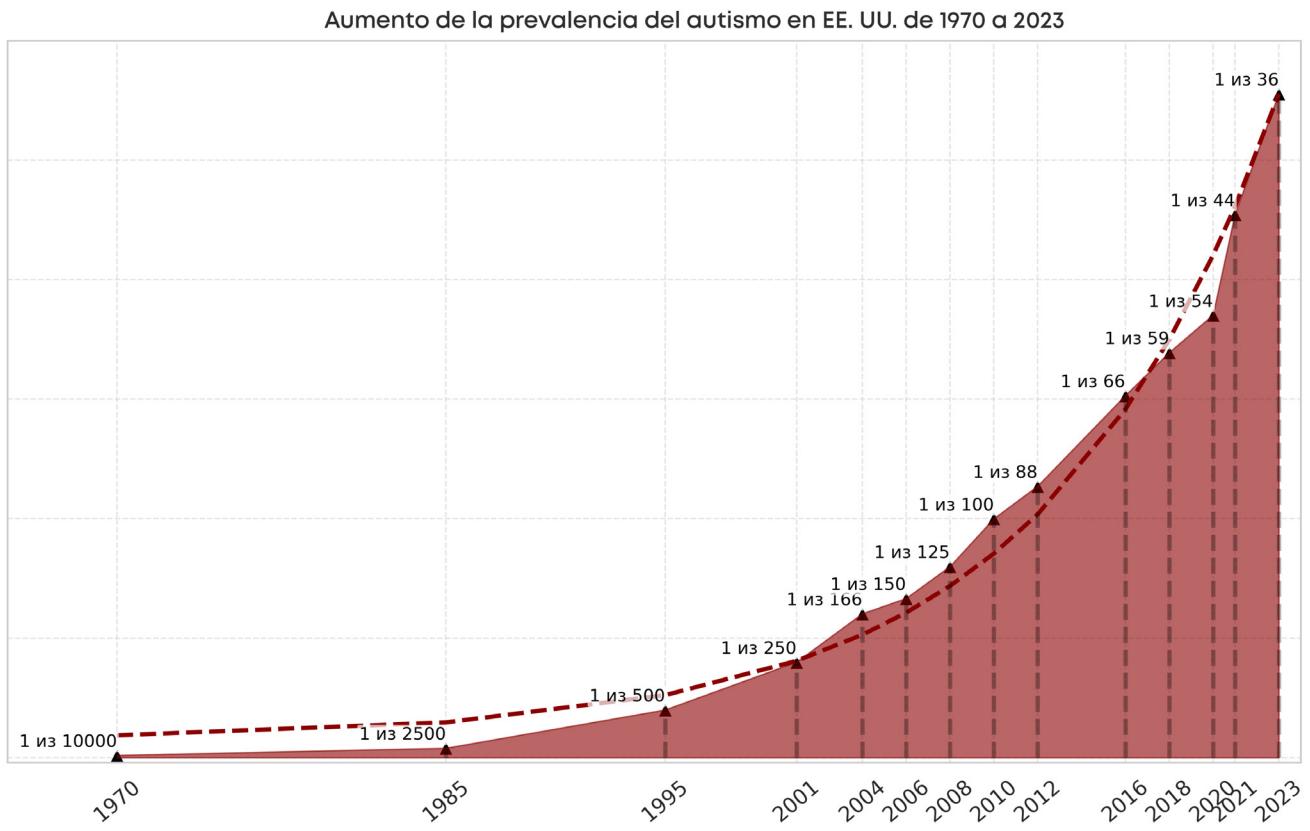
Los efectos de las nanopartículas de plástico en las células nerviosas incluyen un amplio espectro de patologías: esclerosis múltiple y lateral amiotrófica, enfermedad de Alzheimer y de Parkinson, enfermedades autoinmunes, epilepsia, ictus isquémico y hemorrágico, depresión, trastornos de ansiedad y cognitivos, esquizofrenia, trastorno bipolar, autismo, etc.

Categoría	Manifestación	Causa / Mecanismo
<b>Trastornos motores</b>	Parálisis	Interrupción en la transmisión de impulsos motores desde el sistema nervioso central hacia los músculos
	Convulsiones	Desequilibrio entre señales neuronales excitatorias e inhibitorias
	Pérdida de sensibilidad	Disfunción en las vías neuronales sensoriales que transmiten información desde los receptores al cerebro
	Alteración de la coordinación	Daño en las vías de conducción cerebelosas o espinales
<b>Alteraciones sensoriales</b>	Trastornos del habla, la visión y la audición	Daño en las vías neuronales conectadas con los centros sensoriales y motores del cerebro
<b>Disfunciones autonómicas</b>	Problemas respiratorios, cardíacos y digestivos	Alteración del sistema nervioso autónomo
	Alteración de la termorregulación y disfunción orgánica	Disfunción en los centros reguladores autonómicos
<b>Alteraciones cognitivas</b>	Déficits de memoria y atención	Cambios estructurales o funcionales en la corteza cerebral
	Alteración de la conciencia, coma	Daño en la formación reticular cerebral, que desempeña un papel clave en la regulación de la vigilia y la conciencia
<b>Trastornos psicológicos y emocionales</b>	Ansiedad, depresión y trastornos del estado de ánimo	Desequilibrios de neurotransmisores; daño en los centros emocionales del cerebro

**Tabla 2.** Espectro de condiciones patológicas causadas por la exposición de las nanopartículas de plástico a las neuronas.

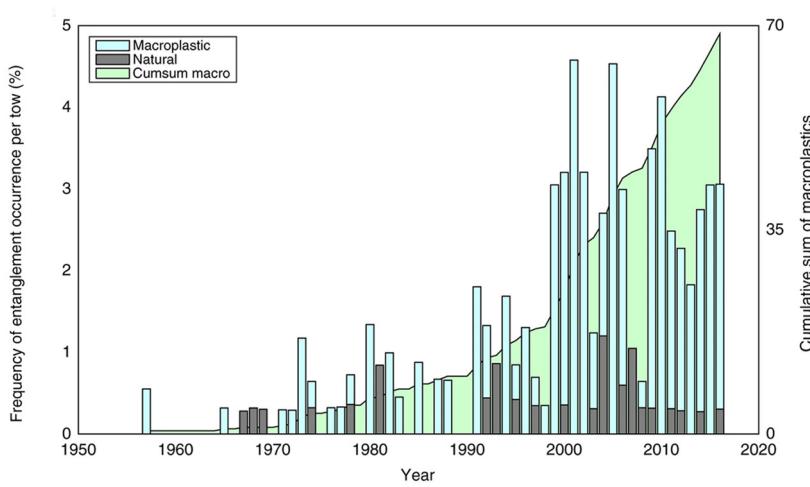
### **Micro y nanoplásticos como factor de riesgo para los trastornos del espectro autista (TEA)**

Paralelamente al aumento de la contaminación ambiental por plástico, se observa un crecimiento en la prevalencia de los trastornos del espectro autista (TEA) (Fig. 96, 97).



**Figura 96:** Aumento de la prevalencia del autismo en Estados Unidos desde 1970 hasta 2023.

Fuente: Rogers, T. The political economy of autism. Substack. <https://tobyrogers.substack.com/p/the-political-economy-of-autism> (acceso: 1 de mayo de 2025).



**Figura 97:** Aumento de la cantidad de plástico en los océanos desde 1957 hasta 2020.

Fuente: Ostle, C. et al. The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. Nat Commun 10, 1622 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>

En Estados Unidos, 1 de cada 36 niños ha sido diagnosticado con un trastorno del espectro autista (TEA), según las estimaciones del CDC Autism and Developmental Disabilities Monitoring Network (ADDM). Según los datos de 2020, el número de casos de autismo ha aumentado un 317 % en comparación con el año 2000<sup>250,251</sup>.

Desde el período embrionario y durante los primeros años de vida, se desarrolla el sistema nervioso humano. Las investigaciones indican un posible vínculo entre la exposición a micro y nanoplásticos y el desarrollo de trastornos del espectro autista.

Datos experimentales obtenidos por científicos surcoreanos demuestran que la exposición prenatal y postnatal a micro y nanoplásticos puede contribuir a la aparición de alteraciones en el desarrollo neurológico<sup>252</sup>.

Un estudio sobre los efectos moleculares de los nanoplásticos de poliestireno en células madre neurales humanas mostró que la exposición a nanoplásticos puede provocar daños en los tejidos y trastornos relacionados con el desarrollo neurológico<sup>253</sup>.

Estudios realizados en roedores<sup>254</sup> han demostrado que la exposición a micro y nanoplásticos durante el embarazo y la lactancia puede afectar la neurogénesis en el hipocampo de la descendencia, así como reducir el volumen de varias estructuras cerebrales, incluyendo la corteza motora, el hipocampo, el hipotálamo, el bulbo olfativo y el bulbo raquídeo.

Se sabe que las alteraciones en la estructura y función de las proteínas en los tejidos nerviosos juegan un papel crucial en el desarrollo de numerosas patologías, incluido el autismo<sup>255</sup>.

Investigaciones recientes han demostrado que los nanoplásticos interactúan con las proteínas principalmente a través de enlaces débiles, como interacciones hidrofóbicas, enlaces de hidrógeno, fuerzas de Van der Waals y fuerzas electrostáticas<sup>256</sup>. Estas interacciones provocan deformaciones estructurales en las moléculas proteicas, comprometiendo su funcionalidad.

Considerando el papel de las proteínas en la formación de redes neuronales y en la transmisión sináptica, tales alteraciones podrían influir en el desarrollo de los trastornos del espectro autista (TEA).

<sup>250</sup>Autism Parenting Magazine. Autism Statistics You Need To Know in 2024. (2025) <https://www.autismparentingmagazine.com/autism-statistics> (Acceso: 1 de mayo 2025).

<sup>251</sup>Centers for Disease Control and Prevention. Autism Prevalence Higher, According to Data from 11 ADDM Communities. <https://www.cdc.gov/media/releases/2023/p0323-autism.html> (Acceso: 1 de mayo 2025).

<sup>252</sup>Zaheer, J. et al. Pre/post-natal exposure to microplastic as a potential risk factor for autism spectrum disorder. Environment International 161, 107121 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107121>

<sup>253</sup>Martin-Folgar, R. et al. Molecular effects of polystyrene nanoplastics on human neural stem cells. PLOS ONE 19, e0295816 (2024). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295816>

<sup>254</sup>Kim, N.-H., Choo, H.-I. & Lee, Y.-A. Effect of nanoplastic intake on the dopamine system during the development of male mice. Neuroscience 555, 11–22 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2024.07.018>

<sup>255</sup>Panisi, C. & Marini, M. Dynamic and Systemic Perspective in Autism Spectrum Disorders: A Change of Gaze in Research Opens to A New Landscape of Needs and Solutions. Brain Sciences 12, 250 (2022). <https://doi.org/10.3390/brainsci12020250>

<sup>256</sup>Windheim, J. et al. Micro- and Nanoplastics' Effects on Protein Folding and Amyloidosis. International Journal of Molecular Sciences 23, 10329 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijms231810329>

## Rol de los MNP en la patogenia de las enfermedades cardiovasculares

Las partículas de plástico no solo circulan en el torrente sanguíneo, sino que también pueden depositarse en las paredes vasculares, desencadenando una serie de cambios patológicos. Resulta particularmente alarmante la detección de microplásticos dentro de las placas ateroscleróticas<sup>257</sup>. Un estudio reciente demostró que los pacientes con microplásticos en las arterias carótidas tenían un riesgo 4,5 veces mayor de infarto de miocardio, accidente cerebrovascular y muerte. Esto sugiere que los fragmentos plásticos participan activamente en la formación y desestabilización de las placas ateroscleróticas, provocando su ruptura y la formación de trombos<sup>258</sup>. Los MNP también comprometen la integridad del endotelio, la capa celular que recubre la superficie interna de los vasos sanguíneos y que regula el tono vascular, previene la trombosis y modula las respuestas inflamatorias.

El daño al endotelio causado por las partículas de plástico conduce a inflamación crónica y aumento del riesgo trombótico, especialmente en las arterias que irrigan el corazón y el cerebro<sup>259</sup>. Además, los microplásticos interactúan con los elementos corpusculares de la sangre, como plaquetas y eritrocitos. Favorecen la agregación plaquetaria e inician la formación de trombos. Asimismo, la superficie rugosa de las partículas puede causar daños mecánicos a las células y activar las cascadas de coagulación, llevando con el tiempo a un estado de hipercoagulabilidad crónica y disfunciones de la microcirculación.

Las células inmunitarias son capaces de fagocitar las partículas de plástico, pero no poseen los mecanismos necesarios para su degradación completa. Esto provoca deformaciones celulares y un aumento de su volumen. La acumulación de estas células alteradas en los pequeños vasos cerebrales favorece la formación de microtrombos, comprometiendo la irrigación del cerebro y aumentando el riesgo de accidente cerebrovascular, incluso en edades jóvenes<sup>260</sup>.

Una reducción crónica del aporte de oxígeno al cerebro (hipoxia) conduce a la muerte de las neuronas y al desarrollo de alteraciones neurodegenerativas, entre ellas la atrofia del tejido cerebral<sup>261</sup>. La exposición prolongada a estas condiciones puede causar la reducción del volumen de estructuras cerebrales específicas. Gracias a su carga electrostática, los MNP interactúan activamente con las membranas celulares, alterando su potencial eléctrico. Este fenómeno afecta la contractilidad vascular, la transmisión de señales en los miocitos y el ritmo cardíaco. La mortalidad por enfermedades cardiovasculares está en constante aumento a nivel mundial (Fig. 98). Merece especial atención el síndrome de muerte súbita cardíaca entre los adultos jóvenes de entre 25 y 44 años<sup>262</sup> (Fig. 99). En Estados Unidos, es reconocida como la principal causa de muerte en este grupo etario. En los últimos veinte años, los casos han aumentado drásticamente. Considerando la presencia ubicua de los MNP, no se puede descartar su posible papel en estos trágicos eventos.

<sup>257</sup>Liu, S. et al. Microplastics in three types of human arteries detected by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry (Py-GC/MS). *Journal of Hazardous Materials* 469, 133855 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133855>

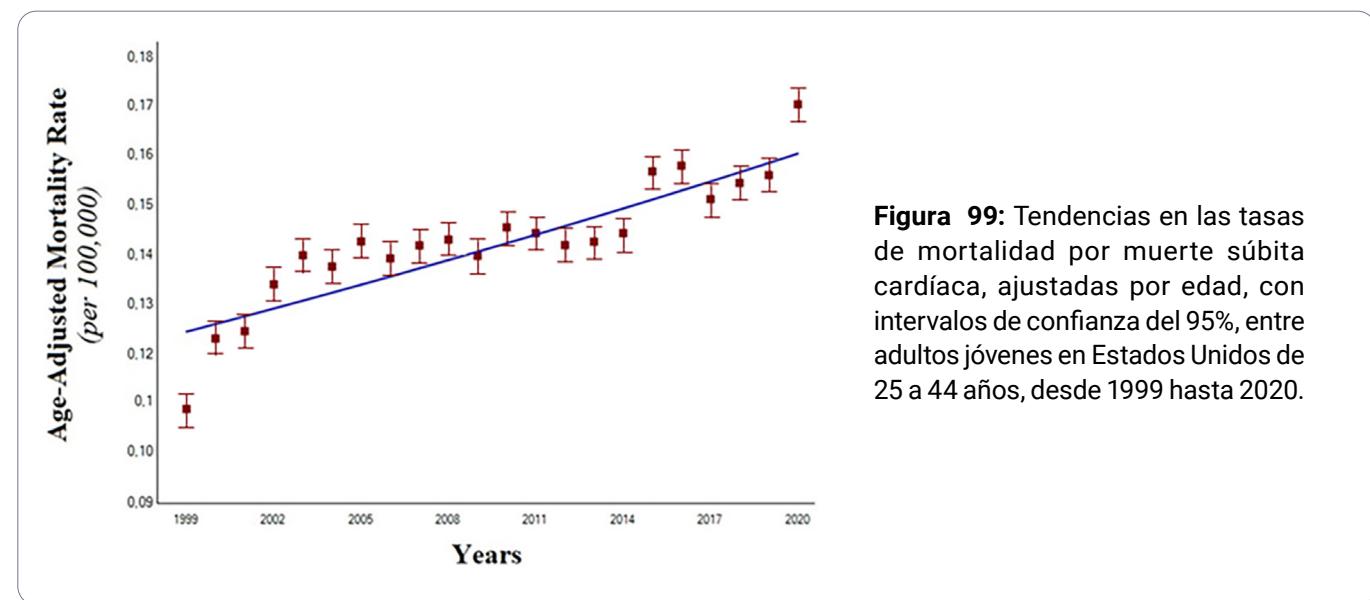
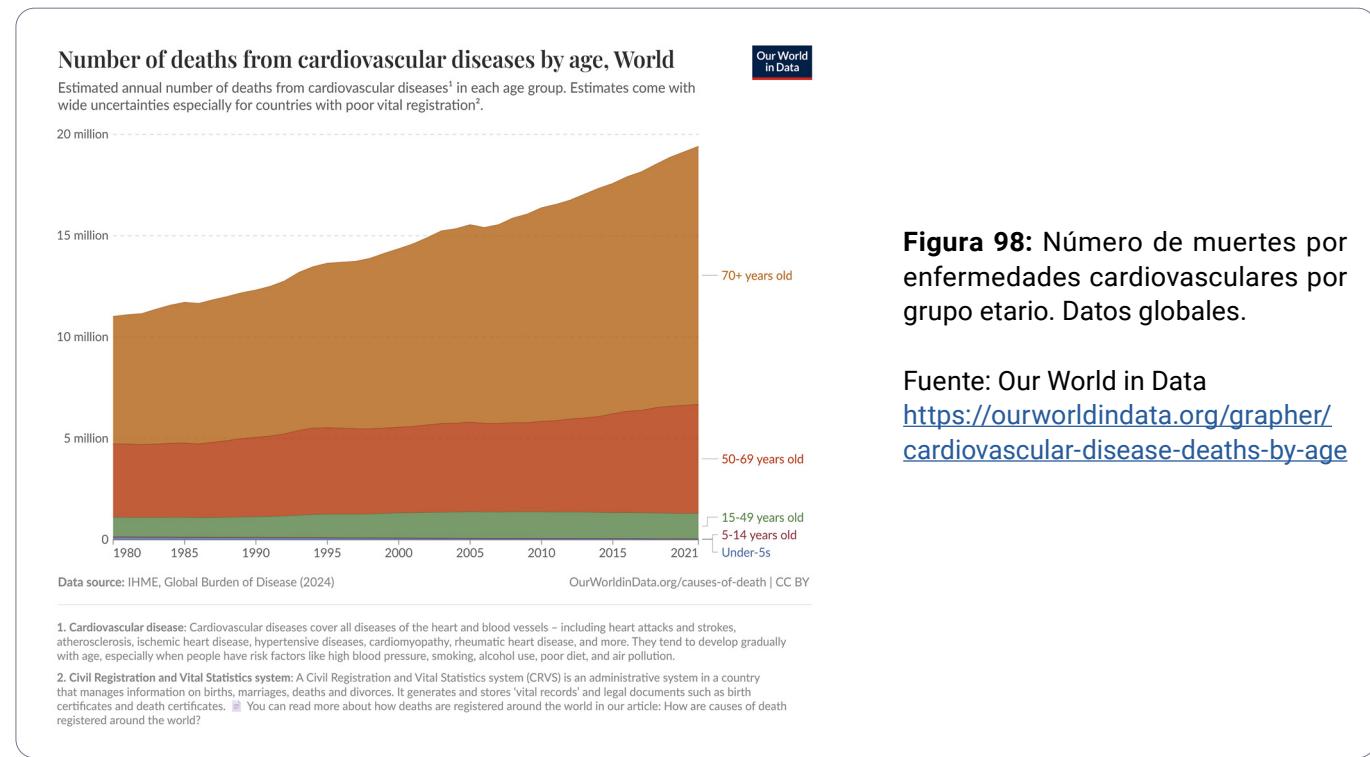
<sup>258</sup>Marfella, R. et al. Microplastics and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events. *N Engl J Med* 390, 900–910 (2024). <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2309822>

<sup>259</sup>Rajendran, D. & Chandrasekaran, N. Journey of micronanoplastics with blood components. *RSC Adv.* 13, 31435–31459 (2023). <https://doi.org/10.1039/D3RA05620A>

<sup>260</sup>Huang, H. et al. Microplastics in the bloodstream can induce cerebral thrombosis by causing cell obstruction and lead to neurobehavioral abnormalities. *Sci. Adv.* 11, ead8243 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adr8243>

<sup>261</sup>Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain. *Chemosphere* 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>

<sup>262</sup>Zuin, M. et al. Trends in Sudden Cardiac Death Among Adults Aged 25 to 44 Years in the United States: An Analysis of 2 Large US Databases. *JAH* 14, e035722 (2025). <https://doi.org/10.1161/JAH.124.035722>



Otro problema grave es el aumento del síndrome de muerte súbita del lactante (SMSL). Solo en Estados Unidos, la tasa de este síndrome aumentó un 15 % entre 2019 y 2020, pasando del cuarto al tercer lugar entre las causas de mortalidad infantil<sup>263</sup>. Aunque las causas del SMSL aún no se comprenden completamente, muchos científicos suponen que factores capaces de alterar la regulación del ritmo cardíaco y del tono vascular en los recién nacidos pueden desempeñar un papel clave. La nanoplástico, que puede atravesar la placenta y acumularse en los tejidos del organismo en desarrollo, representa uno de los posibles factores de riesgo. Cada vez más investigadores coinciden en que la nanoplástico es uno de los principales candidatos para el papel de "asesino invisible".

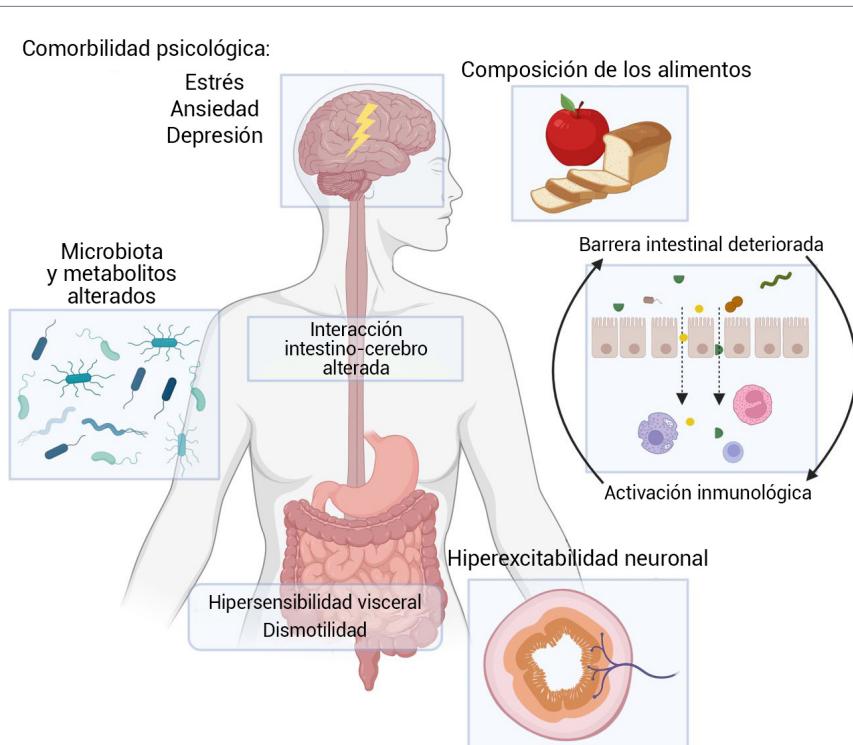
<sup>263</sup>Shapiro-Mendoza, C. K. et al. Sudden Unexpected Infant Deaths: 2015–2020. Pediatrics 151, e2022058820 (2023). <https://doi.org/10.1542/peds.2022-058820>

El corazón, al ser uno de los órganos con mayor consumo energético, depende de manera crítica del correcto funcionamiento de las mitocondrias, que suministran la energía necesaria para su actividad. La exposición a partículas de microplástico compromete los procesos mitocondriales, resultando en un déficit energético en el miocardio y potenciales disfunciones cardíacas.

## Alteración de las funciones gastrointestinales causada por los MNP

El intestino es el órgano inmunológico más grande del cuerpo humano: contiene aproximadamente el 70 % de todas las células inmunitarias, alrededor de 500 millones de neuronas y más de 100 billones de microorganismos<sup>264</sup>. La microbiota intestinal desempeña un papel clave en el mantenimiento del sistema inmunológico. Un desequilibrio de la microbiota puede debilitar la inmunidad y contribuir al desarrollo de diversas patologías.

El intestino es a menudo denominado “segundo cerebro” debido a la densa red de neuronas y a su capacidad de comunicarse con el sistema nervioso central<sup>265</sup>. El intercambio de señales bioquímicas complejas entre el cerebro y el intestino se conoce como “eje intestino-cerebro” y tiene un papel crucial en la regulación tanto del estado físico como emocional. (Fig. 100)



**Figura 100:** Mecanismos fisiopatológicos en los trastornos de la interacción intestino-cerebro.

Fuente: Vanuytsel, T., Bercik, P. & Boeckxstaens, G. Understanding neuroimmune interactions in disorders of gut-brain interaction: from functional to immune-mediated disorders. Gut 72, 787–798 (2023).

<https://doi.org/10.1136/gutjnl-2020-320633>

<sup>264</sup>Sofield, C. E., Anderton, R. S. & Gorecki, A. M. Mind over Microplastics: Exploring Microplastic-Induced Gut Disruption and Gut-Brain-Axis Consequences. Current Issues in Molecular Biology 46, 4186–4202 (2024). <https://doi.org/10.3390/cimb46050256>

<sup>265</sup>Jiefang Daily. Intestine is the second brain? It can also communicate with multiple organs in both directions | New People - Health News. (2025) <https://www.jfdaily.com/staticsg/res/html/web/newsDetail.html?id=866347> (Acceso: 1 de mayo 2025).

Una barrera intestinal sana impide que los microbios y las partículas extrañas penetren desde el lumen intestinal al torrente sanguíneo<sup>264</sup>. Los micro y nanoplásticos comprometen esta protección, aumentando la permeabilidad de la pared intestinal. Esto conlleva una inflamación, tanto a nivel intestinal como sistémico, que debilita el sistema inmunológico<sup>266</sup>. Al mismo tiempo, los MNP alteran la composición de la microbiota intestinal, provocando un desequilibrio entre los microorganismos beneficiosos y los patógenos. Esto compromete los procesos digestivos, reduce la capacidad del organismo para degradar los alérgenos alimentarios y aumenta el riesgo de desarrollar alergias alimentarias<sup>267</sup>.

De este modo, se establece un círculo vicioso: el plástico altera la microbiota, intensifica la inflamación y la permeabilidad intestinal y, una vez superada la barrera hematoencefálica, desencadena reacciones inflamatorias también en el cerebro.

La alteración de la interacción entre el microbioma intestinal y el sistema nervioso central está directamente asociada a trastornos neurológicos. Por ejemplo, en el 82 % de los niños con trastornos del espectro autista se ha detectado un marcado desequilibrio de la microbiota, confirmado tanto por análisis microbiológicos como por evaluaciones de la funcionalidad del sistema digestivo<sup>268</sup>.

Las investigaciones en pacientes con enfermedades intestinales inflamatorias muestran una correlación positiva entre la gravedad de la enfermedad y la concentración de microplásticos en las heces, la cual es más alta (41,8 unidades/g) en comparación con las personas sanas (28,0 unidades/g).

Además, en estos pacientes se ha observado una acumulación significativa de microplásticos en las lesiones ulcerosas de la mucosa del recto<sup>269</sup>. Asimismo, los microplásticos que permanecen en el intestino continúan ejerciendo efectos perjudiciales incluso mucho tiempo después de su ingreso inicial en el organismo.

## Efectos de los MNP sobre el sistema inmunitario

Los MNP comprometen la respuesta inmunitaria del organismo, creando condiciones favorables para la proliferación de patógenos. El impacto combinado de los MNP sobre el microbioma, los patógenos y el sistema inmunitario constituye un riesgo complejo para la salud.

Las células inmunitarias en contacto con microplásticos mueren aproximadamente tres veces más rápido que aquellas que no los encuentran<sup>270</sup>.

<sup>264</sup>Sofield, C. E., Anderton, R. S. & Gorecki, A. M. Mind over Microplastics: Exploring Microplastic-Induced Gut Disruption and Gut-Brain-Axis Consequences. *Current Issues in Molecular Biology* 46, 4186–4202 (2024). <https://doi.org/10.3390/cimb46050256>

<sup>266</sup>Winiarska, E., Jutel, M. & Zemelka-Wiaczek, M. The potential impact of nano- and microplastics on human health: Understanding human health risks. *Environmental Research* 251, 118535 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118535>

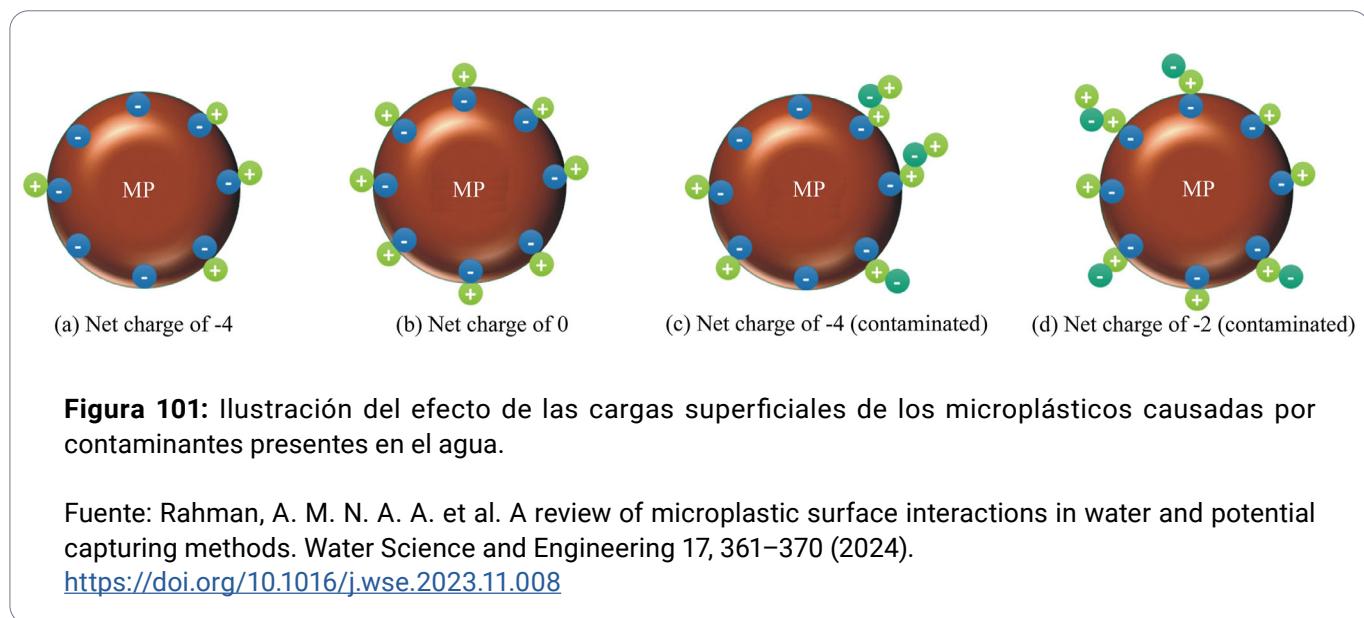
<sup>267</sup>ScienceDirect. Food allergy. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/food-allergy> (Acceso: 1 de mayo 2025).

<sup>268</sup>The Guardian. Autism could be diagnosed with stool sample, scientists say. <https://www.theguardian.com/science/article/2024/jul/08/autism-could-be-diagnosed-with-stool-sample-microbes-research> (Acceso: 1 de mayo 2025).

<sup>269</sup>ScienceDirect. Inflammatory bowel disease. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/inflammatory-bowel-disease> (Acceso: 1 de mayo 2025).

<sup>270</sup>Plastics News. Study highlights health hazards of microplastics. (2019) <https://www.plasticsnews.com/news/study-highlights-health-hazards-microplastics> (Acceso: 1 de mayo 2025).

Las partículas de MNP cargadas atraen con mayor facilidad otras moléculas, como toxinas, sales de metales pesados, bacterias y virus (Fig. 101). Esto las convierte en una especie de “plataforma de transporte” para compuestos tóxicos, aumentando la actividad biológica y la toxicidad de estas sustancias. La carga electrostática de los nanoplásticos actúa como una “recarga”, gracias a la cual bacterias y virus logran mantener su vitalidad durante más tiempo.



**Figura 101:** Ilustración del efecto de las cargas superficiales de los microplásticos causadas por contaminantes presentes en el agua.

Fuente: Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. *Water Science and Engineering* 17, 361–370 (2024).

<https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

Y, finalmente, las partículas cargadas de micro y nanoplásticos pueden persistir durante más tiempo en el agua y en el aire, elevarse más fácilmente en forma de aerosol y penetrar en las vías respiratorias, aumentando así el riesgo de entrada en el organismo humano.

Las partículas de microplástico son capaces de absorber virus en su superficie mediante interacciones electrostáticas e hidrofóbicas, incrementando así su vitalidad<sup>271</sup>.

Los virus presentes en la superficie del microplástico pueden permanecer activos hasta tres días, tiempo suficiente, por ejemplo, para recorrer el trayecto desde las plantas de tratamiento de aguas residuales hasta las playas<sup>272</sup>.

El microplástico facilita la difusión de patógenos y puede favorecer su recombinación genética. Un estudio ha demostrado que las partículas de plástico no solo reducen la eficacia de los medicamentos, sino que también pueden favorecer el desarrollo de bacterias resistentes a los antibióticos<sup>273</sup>.

<sup>271</sup>Moresco, V. et al. Binding, recovery, and infectiousness of enveloped and non-enveloped viruses associated with plastic pollution in surface water. *Environmental Pollution* 308, 119594 (2022).

<sup>272</sup>University of Stirling. Hitch-hiking viruses can survive on microplastics in freshwater, new study finds. (2022) <https://www.stir.ac.uk/news/2022/june-2022-news/hitch-hiking-viruses-can-survive-on-microplastics-in-freshwater-new-study-finds> (Acceso: 1 de mayo 2025).

<sup>273</sup>Dick, L. et al. The adsorption of drugs on nanoplastics has severe biological impact. *Sci Rep* 14, 25853 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75785-4>

Las partículas cargadas de MNP actúan como plataforma para la colonización por parte de microorganismos<sup>274</sup>. Bacterias y hongos, aprovechando los campos electrostáticos de los nanoplásticos, muestran un crecimiento acelerado. Estudios realizados en pulgas de agua (*Daphnia*) han detectado que la exposición a nanoplásticos induce estrés oxidativo y aumenta 11 veces la incidencia de infecciones fúngicas (especie *Metschnikowia*)<sup>275</sup>. Este fenómeno es coherente con la expansión global del área de difusión y de la resistencia de las enfermedades fúngicas, reconocidas por la OMS como una amenaza creciente para la salud pública.

66

*“Saliendo de la sombra de la pandemia, la resistencia de las bacterias a los antimicrobianos ha abierto el camino a otra amenaza: las infecciones fúngicas se están propagando y se vuelven cada vez más resistentes a los tratamientos, convirtiéndose en un problema de salud pública global”*, declaró el Dr. Hanan Balkhy, Asistente del Director General de la OMS para la resistencia a los antimicrobianos<sup>276</sup>.

Los metabolitos fúngicos liberados en presencia de MNP están asociados con el crecimiento tumoral<sup>277</sup> y la inflamación crónica. Se ha detectado ADN de hongos en algunos tipos de cáncer, lo que sugiere un posible papel de los nanoplásticos en el proceso de oncogénesis<sup>278</sup>.

<sup>274</sup>Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. *Water Science and Engineering* 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

<sup>275</sup>Manzi, F., Schröder, P., Owczarz, A. & Wolinska, J. Polystyrene nanoplastics differentially influence the outcome of infection by two microparasites of the host *Daphnia magna*. *Phil. Trans. R. Soc. B* 378, 20220013 (2023). <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0013>

<sup>276</sup>World Health Organization. WHO releases first-ever list of health-threatening fungi. (2022) <https://www.who.int/news-room/detail/25-10-2022-who-releases-first-ever-list-of-health-threatening-fungi> (Acceso: 1 de mayo 2025).

<sup>277</sup>Aykut, B., Pushalkar, S., Chen, R. et al. The fungal mycobiome promotes pancreatic oncogenesis via activation of MBL. *Nature* 574, 264–267 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1608-2>

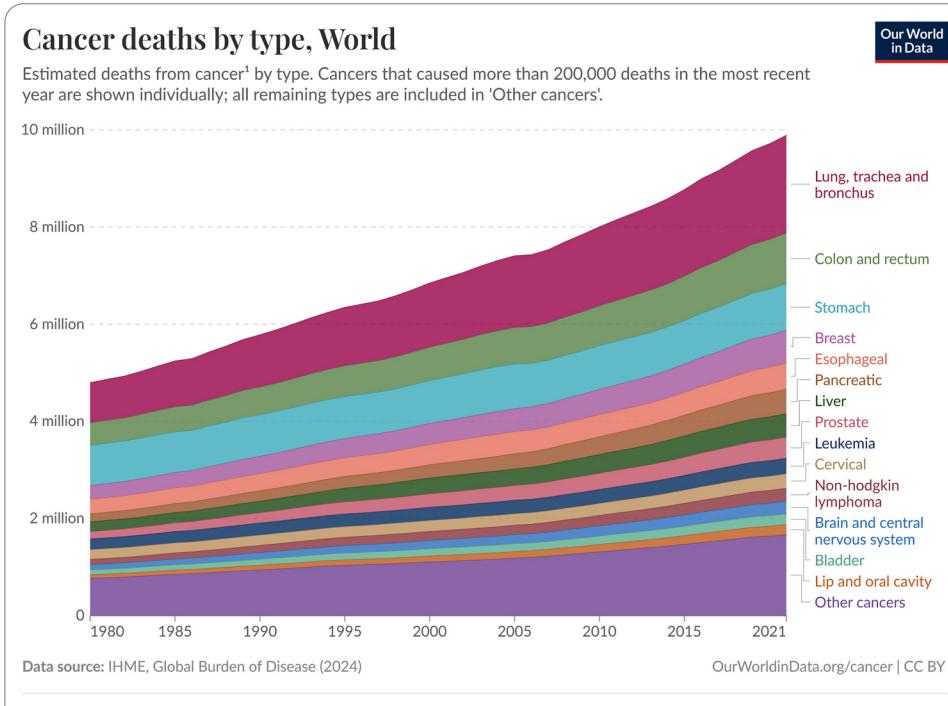
<sup>278</sup>Dohlmán, A. B. et al. A pan-cancer mycobiome analysis reveals fungal involvement in gastrointestinal and lung tumors. *Cell* 185, 3807–3822.e12 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cell.2022.09.015>

## Acción cancerígena de los MNP: mecanismos de mutación y desarrollo de metástasis

Según la información expuesta, los micro y nanoplásticos representan un factor significativo en el desarrollo de neoplasias malignas debido a su impacto negativo a nivel celular y sistémico.

Las investigaciones demuestran que los micro y nanoplásticos pueden actuar como catalizadores ocultos del desarrollo del cáncer, favoreciendo la migración celular y la metastatización<sup>279</sup>. Además, se ha observado que las partículas de MNP pueden persistir dentro de las células durante largos períodos y transmitirse a las células hijas durante la división celular.

Actualmente, la mortalidad por enfermedades oncológicas continúa aumentando a nivel global (Fig. 102). Se prevé que para 2050 el número de nuevos casos de cáncer aumentará un 77 %<sup>280</sup>.



**Figura 102:** Mortalidad por tipo de cáncer. Mundo.

Fuente: Our World in Data – <https://ourworldindata.org/grapher/cancer-deaths-by-type-grouped>

<sup>279</sup>Brynzak-Schreiber, E. et al. Microplastics role in cell migration and distribution during cancer cell division. Chemosphere 353, 141463 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141463>

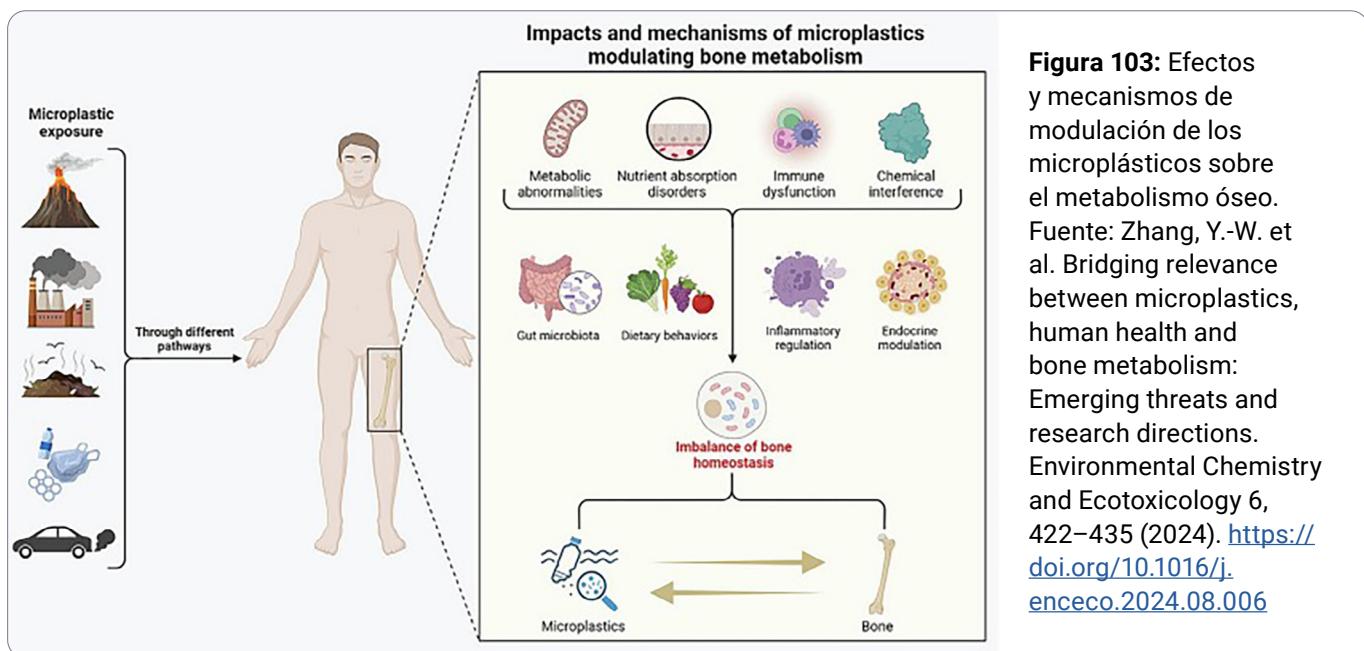
<sup>280</sup>World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024) <https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing--amidst-mounting-need-for-services> (Accesso: 1 de mayo 2025).

## Efectos de los MNP en el metabolismo del calcio y en la estructura ósea

Las partículas de plástico pueden penetrar también en el sistema musculoesquelético, la base del funcionamiento físico del ser humano (Fig. 103). Allí, donde reina un equilibrio preciso entre destrucción y reconstrucción, donde los huesos se renuevan diariamente, las articulaciones absorben la fricción y los músculos sostienen el movimiento y el calor, el microplástico —también gracias a su carga electrostática— puede sustituir a las moléculas estructurales, desencadenando procesos lentos y destructivos.

Los estudios muestran que el microplástico puede penetrar en el tejido óseo, donde su estructura molecular le permite imitar el calcio y otros minerales necesarios para el metabolismo óseo. En consecuencia, el plástico puede ser erróneamente reconocido por el organismo como material de construcción para los huesos. El cuerpo, literalmente, comienza a “construir” huesos con plástico.

Este error en el reconocimiento molecular se asocia con numerosas consecuencias negativas: el microplástico puede comprometer la función de los osteoblastos y osteoclastos, alterar el metabolismo de calcio y fósforo, contribuyendo así al desarrollo de osteoporosis. Se activan cascadas inflamatorias, la expresión génica se altera y el tejido óseo pierde densidad y resistencia. Además, la presencia de nanoplástico puede provocar inflamaciones crónicas que dañan el cartílago articular y el tejido óseo, aumentando el riesgo de osteoartritis, dolor y rigidez articular<sup>281,282</sup>.



<sup>281</sup>Zhang, Y.-W. et al. Bridging relevance between microplastics, human health and bone metabolism: Emerging threats and research directions. Environmental Chemistry and Ecotoxicology 6, 422–435 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.08.006>

<sup>282</sup>China Environment News. Microplastics "secretly attack" the human body, how much damage can they cause? (2025) <https://cenews.com.cn/news.html?aid=1205048> (Acceso: 1 de mayo 2025).

Un estudio realizado en roedores demostró que el número de osteoblastos se redujo significativamente en ratones expuestos a microplásticos de poliestireno<sup>280</sup>.

No menos amenazante es la acción del plástico sobre la musculatura esquelética. Las investigaciones indican que los nanoplásticos son capaces de penetrar en las células musculares, comprometiendo el funcionamiento de las mitocondrias. Esto resulta en un déficit energético, con activación de especies reactivas de oxígeno, que acelera el envejecimiento celular, dificulta la recuperación muscular tras el esfuerzo físico y favorece la atrofia. Los más vulnerables son los ancianos y los pacientes con enfermedades crónicas.

Los micro y nanoplásticos también se acumulan en la médula ósea<sup>283</sup>, comprometiendo la formación de células madre (hematopoyéticas y mesenquimales)<sup>284</sup>, de las cuales se originan eritrocitos, leucocitos, plaquetas, osteocitos, condrocitos y adipocitos. Su disfunción puede causar daños sistémicos en el organismo.

## Trastornos reproductivos asociados a la exposición a MNP: infertilidad y disfunción eréctil

### Reducción de la fertilidad

Según las previsiones, para 2045 el mundo podría volverse completamente infértil<sup>285</sup>.

Ya en 2018, un grupo de destacados médicos y científicos, durante el XIII Simposio Internacional de Espermatología en Estocolmo, instó a los gobiernos a reconocer la disminución de la fertilidad masculina como un serio problema de salud pública, subrayando la importancia de la salud reproductiva masculina para la supervivencia de la especie humana<sup>286</sup>.

Contrariamente a lo que comúnmente se cree, la salud reproductiva no está determinada solo por el equilibrio hormonal, la genética o el estilo de vida. Un número creciente de estudios científicos destaca el papel crucial de las mitocondrias en los procesos de concepción y en el desarrollo del embrión. Estos diminutos orgánulos, responsables de la producción de energía necesaria para todas las funciones vitales, juegan un papel fundamental en la fertilidad tanto masculina como femenina, y su importancia para la función reproductiva humana resulta ser mucho más profunda de lo que se pensaba anteriormente.

Las disfunciones mitocondriales pueden ser una causa de infertilidad tanto en mujeres como en hombres. En los hombres, las mitocondrias situadas en la parte caudal de los espermatozoides son responsables de la motilidad necesaria para la fertilización. Su mal funcionamiento reduce la movilidad de los espermatozoides y puede provocar anomalías.

<sup>280</sup>World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024) <https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing--amidst-mounting-need-for-services> (Acceso: 1 de mayo 2025).

<sup>283</sup>Guo, X. et al. Discovery and analysis of microplastics in human bone marrow. Journal of Hazardous Materials 477, 135266 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135266>

<sup>284</sup>Sun, R. et al. Preliminary study on impacts of polystyrene microplastics on the hematological system and gene expression in bone marrow cells of mice. Ecotoxicology and Environmental Safety 218, 112296 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112296>

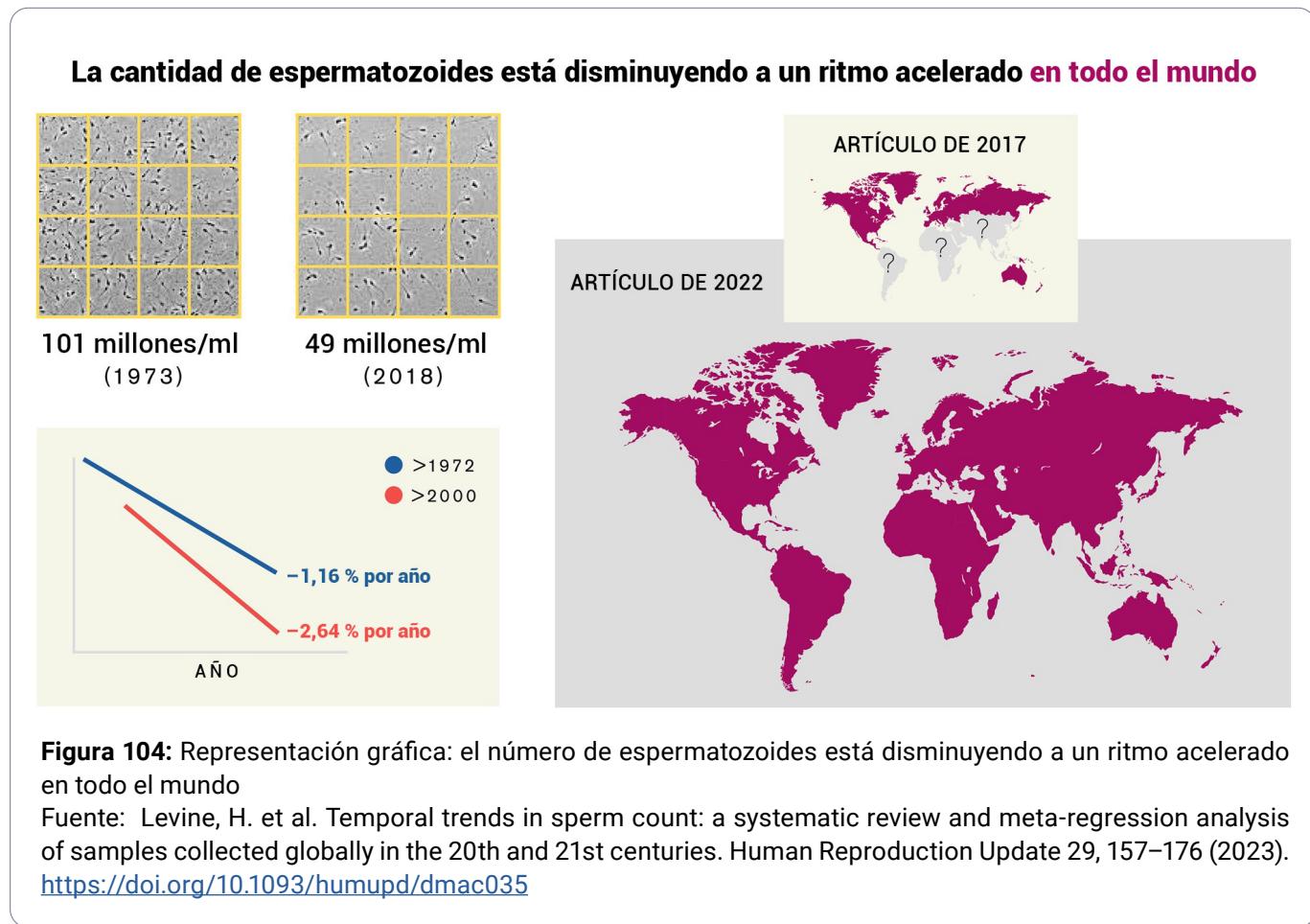
<sup>285</sup>The Guardian. Shanna Swan: 'Most couples may have to use assisted reproduction by 2045'. (2021) <https://www.theguardian.com/society/2021/mar/28/shanna-swan-fertility-reproduction-count-down> (Acceso: 1 de mayo 2025).

<sup>286</sup>Levine, H. et al. Male reproductive health statement (XIIIth international symposium on Spermatology, may 9th–12th 2018, Stockholm, Sweden. Basic Clin. Androl. 28, 13 (2018). <https://doi.org/10.1186/s12610-018-0077-z>

En estudios realizados por científicos chinos, se detectó microplástico en todas las muestras de semen analizadas — con un promedio de dos partículas por muestra, de tamaños de hasta 7 µm, predominantemente de poliestireno<sup>287</sup>.

La presencia de estas partículas se asoció con anomalías morfológicas en los espermatozoides y el acortamiento de los telómeros. Gracias a su tamaño microscópico y carga, los nanoplásticos pueden superar la barrera hematotesticular y penetrar en los tejidos genitales, comprometiendo su funcionalidad.

Particularmente preocupante es la tendencia observada en la reducción del número total de espermatozoides en hombres, disminuido en un 62,3 % entre 1973 y 2018<sup>288</sup> (Fig. 104).

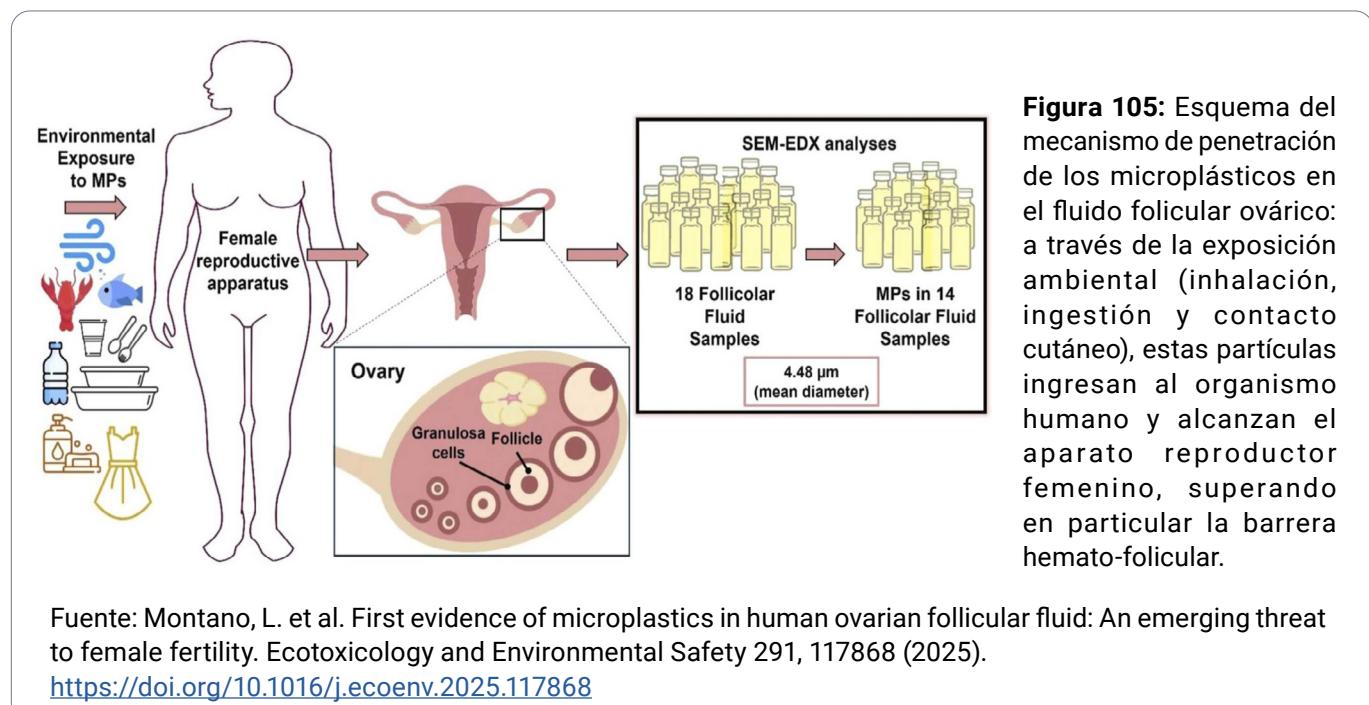


Aunque la fertilidad está influenciada por numerosos factores, un número creciente de científicos coincide en que los compuestos químicos presentes en el plástico juegan un papel clave en este proceso. Los ftalatos, usados para hacer el plástico más flexible, alteran el equilibrio hormonal, reducen la libido y pueden favorecer la pubertad precoz y la disfunción testicular.

<sup>287</sup>Li, N. et al. Prevalence and implications of microplastic contaminants in general human seminal fluid: A Raman spectroscopic study. Science of The Total Environment 937, 173522 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173522>

<sup>288</sup>Levine, H. et al. Temporal trends in sperm count: a systematic review and meta-regression analysis of samples collected globally in the 20th and 21st centuries. Human Reproduction Update 29, 157–176 (2023). <https://doi.org/10.1093/humupd/dmac035>

No menos preocupante es la situación de la fertilidad femenina. Un estudio de 2025 detectó la presencia de partículas de microplástico en el fluido folicular ovárico en 14 de 18 mujeres examinadas, con un promedio de más de 2000 partículas por mililitro, la mayoría con un diámetro inferior a 5 micrómetros<sup>289</sup> (Fig. 105).



Estos datos evidencian la capacidad de las partículas de plástico para atravesar la barrera hemato-folicular en los ovarios. A nivel celular, los micro y nanoplásticos pueden dañar el ADN, alterar la división celular y provocar inflamaciones. Se ha demostrado que interfieren con la regulación hormonal, comprometen las funciones de la placenta, afectan la angiogénesis y están asociadas al desarrollo de miomas uterinos.

### Disfunción eréctil

Los resultados de un estudio nacional realizado en Japón mostraron una disminución de la función eréctil y de la actividad sexual entre las generaciones jóvenes<sup>290</sup>. La evaluación basada en la escala EHS reveló una prevalencia de disfunción eréctil (DE) del 30,9 %, afectando a aproximadamente 14 millones de hombres, con deseo sexual, rigidez de la erección, orgasmos y satisfacción inferiores a lo esperado entre los hombres jóvenes japoneses, especialmente en el grupo de edad de 20 a 24 años. De hecho, la tasa de prevalencia en este grupo fue del 26,6 %, casi igual a la del grupo de 50 a 54 años (27,8 %) (Fig. 106, 107).

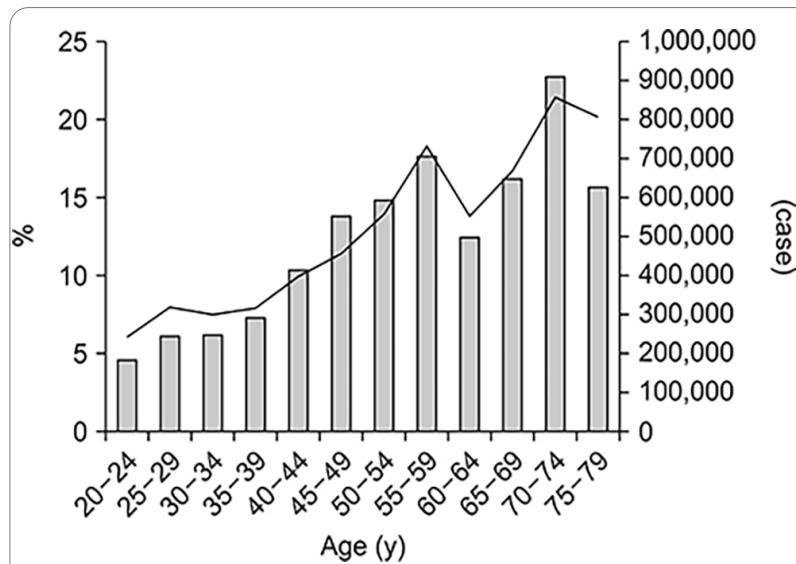
<sup>289</sup>Montano, L. et al. First evidence of microplastics in human ovarian follicular fluid: An emerging threat to female fertility. Ecotoxicology and Environmental Safety 291, 117868 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117868>

<sup>290</sup>Tsujiimura, A. et al. Erectile Function and Sexual Activity Are Declining in the Younger Generation: Results from a National Survey in Japan. The World Journal of Men's Health 43, 239–248 (2025). <https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>

Además, otro estudio realizado a nivel global informó que tres de cada cuatro hombres presentan síntomas de DE, indicando que esta condición no es rara y puede afectar a hombres de cualquier edad.

El primer estudio nacional oficial sobre la función sexual en Japón, realizado en 1998, estimó que aproximadamente 11,3 millones de hombres sufrían de disfunción eréctil (DE) moderada o completa. Además, los estudios nacionales sobre infertilidad masculina llevados a cabo en Japón en 1996 y 2015 revelaron datos sorprendentes. En la encuesta de 2015, el 13,5 % de los hombres enfrentó infertilidad masculina debido a la DE como causa principal, una cifra casi cuatro veces superior en comparación con 1996.

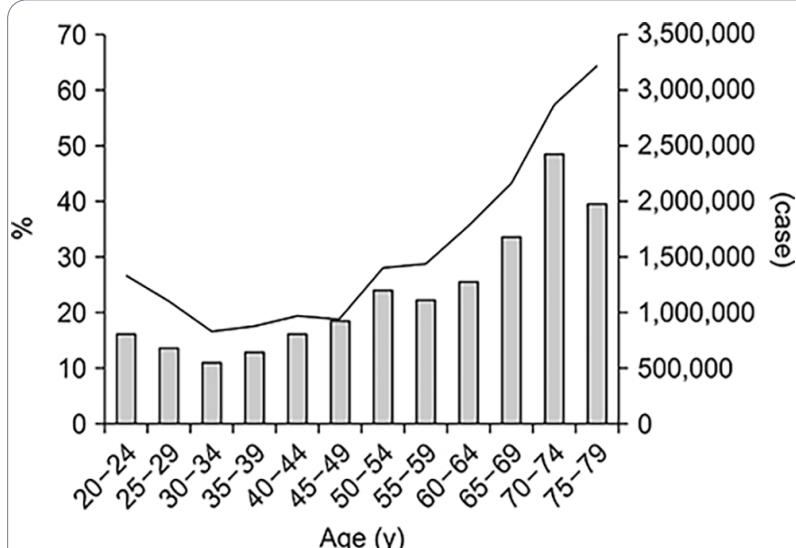
El conjunto de datos científicos actuales indica que los micro y nanoplásticos presentes en el organismo representan una de las causas ocultas pero significativas del deterioro de la salud reproductiva. Estas partículas penetran en los órganos sexuales, alteran la función mitocondrial, provocan inflamaciones, desequilibrios hormonales y daños en el ADN, y reducen la motilidad y la calidad morfológica de los espermatozoides. Se han detectado en el líquido seminal y en el fluido folicular, lo que evidencia su capacidad para superar las barreras biológicas y su profundo impacto sistémico. Todo ello pone en riesgo no solo la salud individual, sino también el futuro de la capacidad reproductiva de la humanidad.



**Figura 106:** Prevalencia y número estimado de pacientes con disfunción eréctil (DE), calculados según la prevalencia de DE basada en la respuesta a la pregunta: «¿La DE es para usted motivo de preocupación?»

Fuente: Tsujimura, A. et al. Erectile Function and Sexual Activity Are Declining in the Younger Generation: Results from a National Survey in Japan. The World Journal of Men's Health 43, 239–248 (2025).

<https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>



**Figura 107:** Gráfico que muestra la prevalencia y el número de pacientes con disfunción eréctil, evaluados según la escala de dureza de la erección.

Fuente: Tsujimura, A. et al. Erectile Function and Sexual Activity Are Declining in the Younger Generation: Results from a National Survey in Japan. The World Journal of Men's Health 43, 239–248 (2025).

<https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>

## Penetración de los MNP a través de la barrera placentaria e impacto en el cuerpo en desarrollo

### Exposición prenatal a micro y nanoplásticos en el feto

Las mujeres embarazadas muestran una vulnerabilidad particular a la exposición a microplásticos<sup>291</sup>. Una vez que estas partículas de plástico ingresan al organismo materno, pueden alcanzar al feto atravesando la placenta, interferir con la secreción de las hormonas que regulan el embarazo y aumentar el riesgo de parto prematuro, aborto espontáneo y trastornos del desarrollo fetal (Fig. 108). Según estimaciones, en 2020 aproximadamente 13,4 millones de niños (1 de cada 10) nacieron prematuramente (<37 semanas), y el nacimiento prematuro sigue siendo la principal causa de mortalidad infantil. Los niños que sobreviven presentan un riesgo incrementado de padecer enfermedades graves y condiciones crónicas<sup>292</sup>.

El sistema endocrino en desarrollo en los niños es particularmente sensible a las sustancias químicas contenidas en el plástico, las cuales pueden imitar o bloquear las hormonas<sup>293</sup> (Fig. 109). La exposición en los recién nacidos también puede ocurrir a través de la leche materna. Además, la nanoplástico puede ejercer efectos retardados, interfiriendo con la formación de las células germinales durante la infancia y la adolescencia, reduciendo así la fertilidad en la edad adulta.

La barrera hematoplacentaria (BEP) desempeña un papel crucial en la regulación del intercambio metabólico entre madre y feto, protegiéndolo de sustancias dañinas. Sin embargo, estudios recientes indican que los micro y nanoplásticos son capaces de atravesar esta barrera.

En 2020, un estudio dirigido por Antonio Ragusa, utilizando espectroscopía Raman (una técnica basada en el análisis de la dispersión de la luz para determinar la composición química de los materiales), detectó la presencia de microplásticos en las placas de cuatro de seis mujeres con embarazos normales. En las muestras se identificaron 12 partículas de tamaños comprendidos entre 5 y 10 µm, incluyendo polipropileno y pigmentos utilizados en cosméticos, pinturas, adhesivos y productos de higiene<sup>294</sup>.

<sup>291</sup>Dugershaw-Kurzer, B. et al. Nanoparticles Dysregulate the Human Placental Secretome with Consequences on Angiogenesis and Vascularization. *Advanced Science* 11, 2401060 (2024). <https://doi.org/10.1002/advs.202401060>

<sup>292</sup>World Health Organization. 1 in 10 babies worldwide are born early, with major impacts on health and survival. (2023)

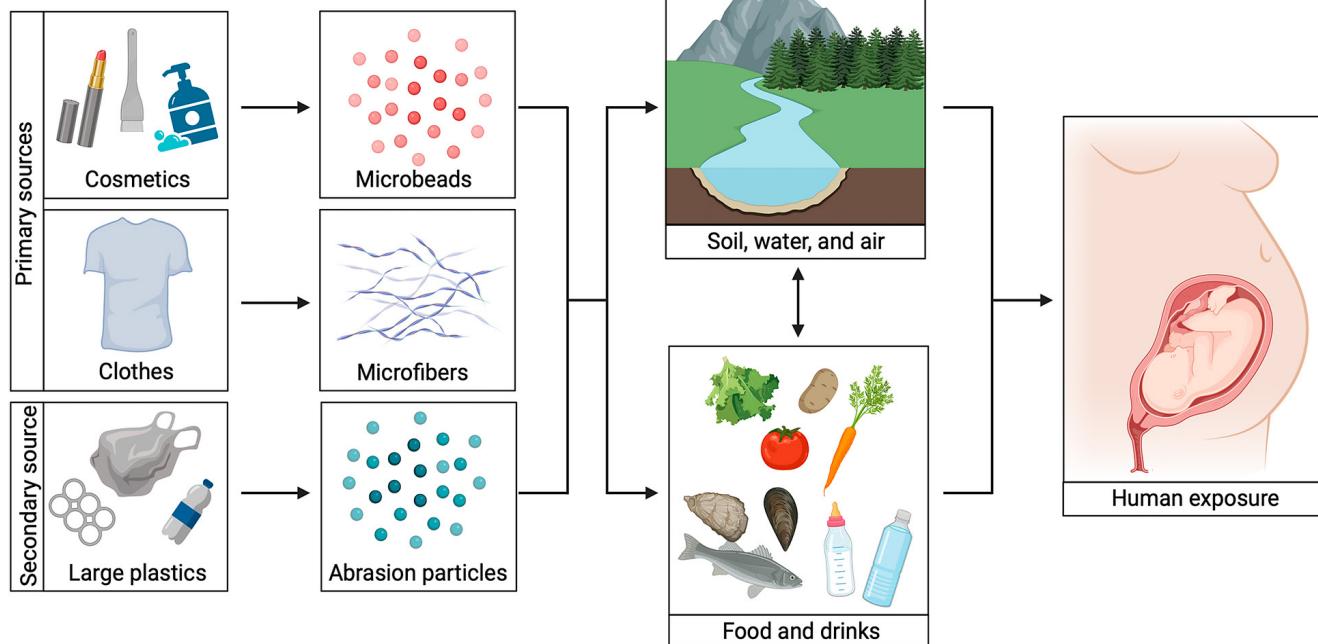
<https://www.who.int/news/item/06-10-2023-1-in-10-babies-worldwide-are-born-early-with-major-impacts-on-health-and-survival> (Acceso: 1 de mayo 2025).

<sup>293</sup>Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. *Cureus* 16, e60712 (2024).

<https://doi.org/10.7759/cureus.60712>

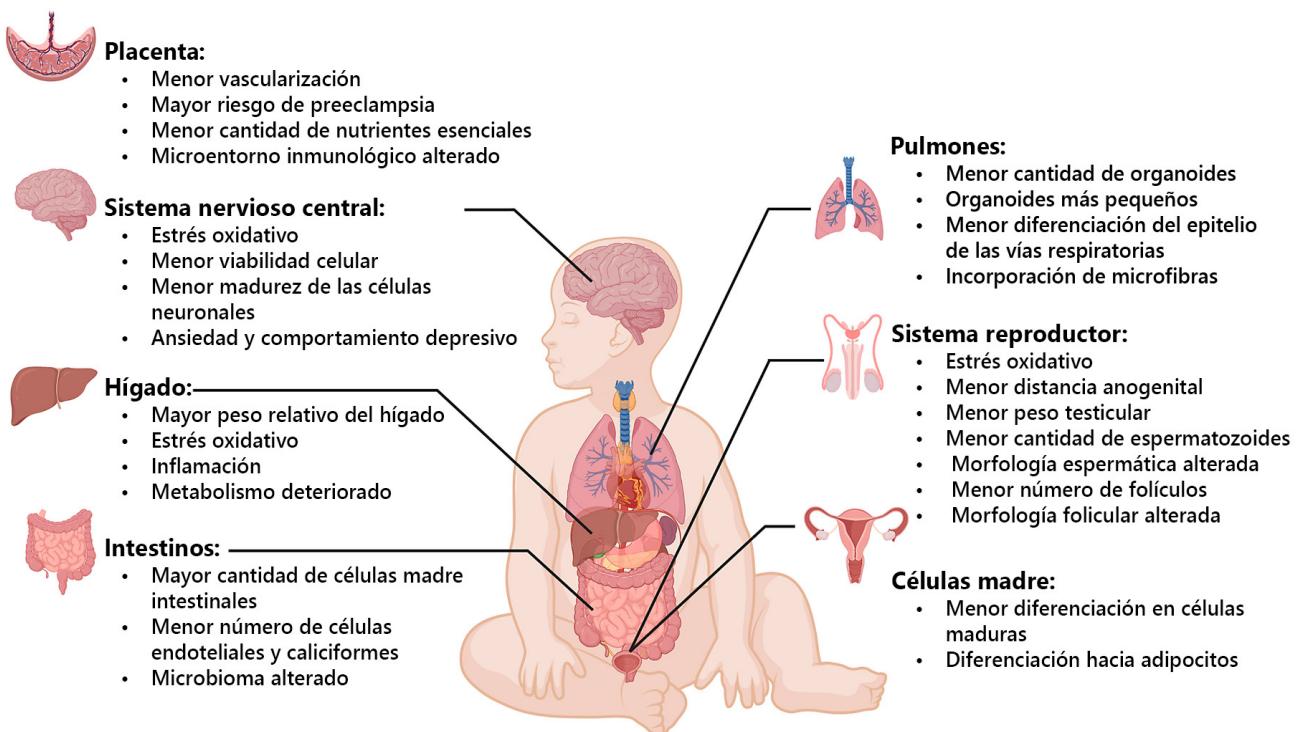
<sup>294</sup>Ragusa, A. et al. Plasticina: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International* 146, 106274 (2021).

<https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>



**Figura 108:** Entrada de microplásticos en el organismo materno.

Fuente: Hofstede, L. T., Vasse, G. F. & Melgert, B. N. Microplastics: A threat for developing and repairing organs? Cambridge Prisms: Plastics 1, e19 (2023). <https://doi.org/10.1017/plc.2023.19>



**Figura 109:** Efectos de los microplásticos en diversos órganos y tejidos del feto en desarrollo

Fuente: Hofstede, L. T., Vasse, G. F. & Melgert, B. N. Microplastics: A threat for developing and repairing organs? Cambridge Prisms: Plastics 1, e19 (2023). <https://doi.org/10.1017/plc.2023.19>

Un estudio realizado por la Universidad de Nuevo México demostró que la concentración de microplásticos y nanoplásticos en las placas de bebés prematuros es mayor que en las de bebés a término. El análisis de 175 placas mediante espectrometría de masas reveló que en mujeres que dieron a luz prematuramente hubo una acumulación más elevada de partículas de plástico<sup>295</sup>.

66

*“Las nanopartículas parecen ejercer un efecto indirecto sobre el feto en el útero materno, inhibiendo la formación de vasos sanguíneos a través de mediadores químicos”, afirma la bióloga Tina Bürki<sup>296</sup>.*

Las partículas de poliestireno a escala nanométrica pueden provocar trastornos en el desarrollo cerebral del feto, en particular déficits cognitivos<sup>297</sup>.

Según las investigaciones, la exposición a microplásticos durante el embarazo y en los primeros meses de vida puede causar alteraciones irreversibles en los sistemas reproductivo y nervioso central en la descendencia de diversas especies<sup>298</sup>.

## Exposición postnatal a micro y nanoplásticos en recién nacidos

Los recién nacidos están constantemente expuestos a micro y nanoplásticos provenientes del ambiente externo.

Según un estudio realizado en 2020<sup>299</sup>, los lactantes pueden ingerir hasta 4,5 millones de partículas de plástico al día simplemente durante la alimentación con biberones de polipropileno, que representan la mayoría de los biberones utilizados a nivel mundial.

Además, los recién nacidos pueden ingerir microplásticos a través de la leche materna. En 2022, un análisis de la leche de 34 mujeres sanas detectó la presencia de microplásticos en el 76 % de las muestras<sup>300</sup> (Fig. 110). Datos adicionales muestran que el nivel de micro y nanoplásticos (MNP) en las heces de los recién nacidos es 14 veces superior al de los adultos<sup>301</sup>.

<sup>295</sup>Jochum, M. et al. Elevated Micro- and Nanoplastics Detected in Preterm Human Placentae. Preprint (2025). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5903715/v1>

<sup>296</sup>Federal Office of Public Health. Impact of pollution on embryonic development - Nanoparticles: Risk for babies in the womb. FOPH. (2024) <https://www.bpt.admin.ch/en/nsb?id=101285> (Acceso: 1 de mayo 2025).

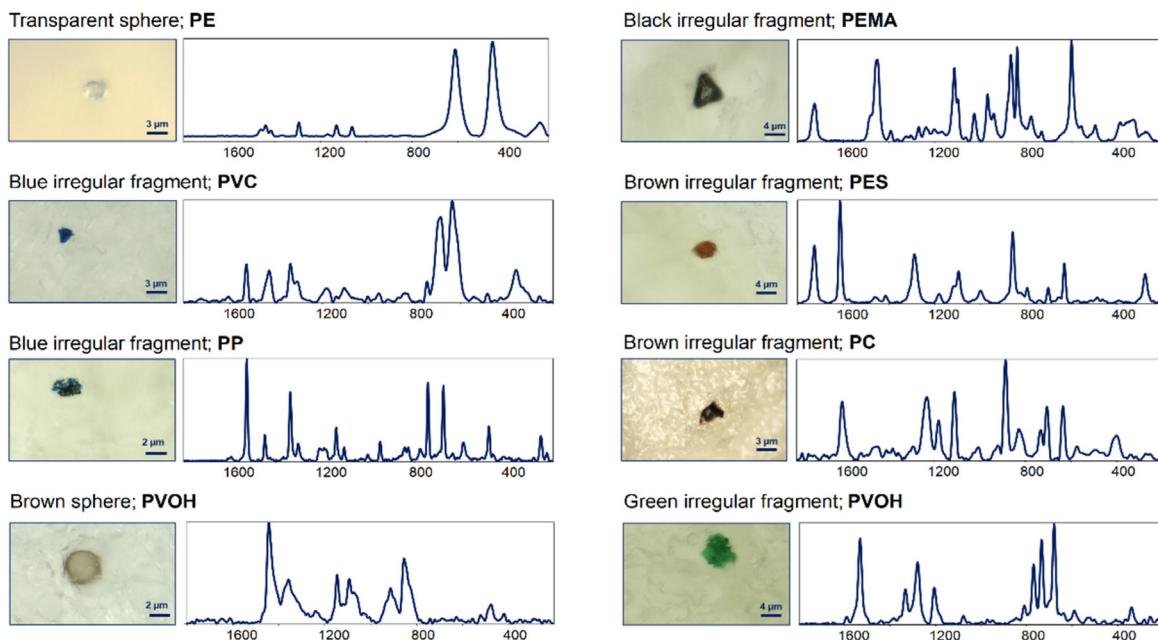
<sup>297</sup>Jeong, B. et al. Maternal exposure to polystyrene nanoplastics causes brain abnormalities in progeny. Journal of Hazardous Materials 426, 127815 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127815>

<sup>298</sup>Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. Cureus 16, e60712 (2024). <https://doi.org/10.7759/cureus.60712>

<sup>299</sup>Li, D., Shi, Y., Yang, L. et al. Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation. Nat Food 1, 746–754 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00171-y>

<sup>300</sup>Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. Polymers 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>

<sup>301</sup>Zhang, J., Wang, L., Trasande, L. & Kannan, K. Occurrence of Polyethylene Terephthalate and Polycarbonate Microplastics in Infant and Adult Feces. Environ. Sci. Technol. Lett. 8, 989–994 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00559>



**Figura 110:** Microfotografías y espectros Raman (números de onda,  $\text{cm}^{-1}$ ) de algunas microplásticos seleccionados detectados en muestras de leche materna analizadas.

PE: polietileno; PVC: cloruro de polivinilo; PP: polipropileno; PVA: alcohol polivinílico; PEVA: poli (etileno-co-acetato de vinilo); PEVA: poli (metacrilato de etilo); PES: poliéster; PC: policarbonato.

Fuente: Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. *Polymers* 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>

Los nanoplasticos y las sustancias químicas asociadas a ellas alteran las estructuras moleculares y la funcionalidad de la leche materna. Estos compuestos pueden modificar las proteínas presentes en la leche materna humana y en las fórmulas infantiles, lo que podría causar problemas en el desarrollo futuro<sup>302,303</sup>.

Las altas concentraciones de MNP ejercen un impacto tóxico acumulativo en el cuerpo en desarrollo. Al penetrar en las células, los nanoplasticos pueden causar daños estructurales al ADN y alterar los procesos metabólicos. Estos efectos aumentan los riesgos de mutaciones genéticas y patologías a largo plazo, creando una amenaza para la salud de las futuras generaciones.

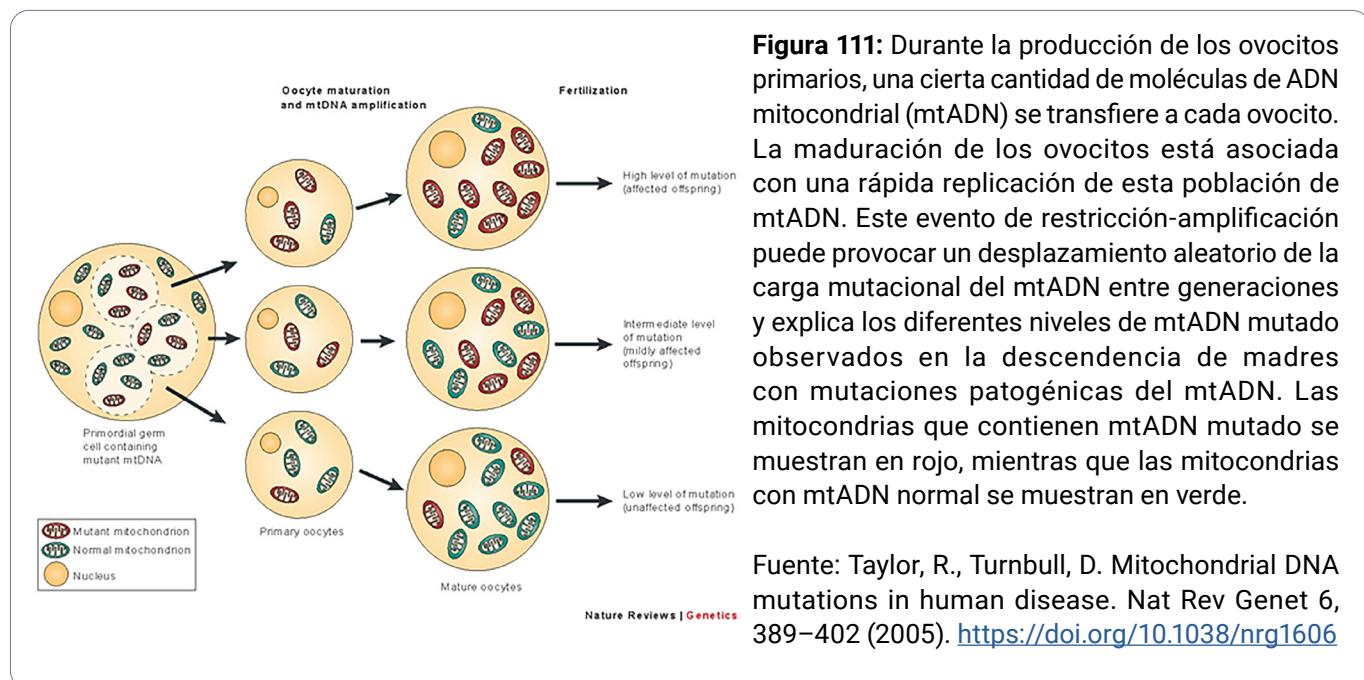
<sup>302</sup>Yadav, A., Vuković, L. & Narayan, M. An Atomic and Molecular Insight into How PFOA Reduces  $\alpha$ -Helicity, Compromises Substrate Binding, and Creates Binding Pockets in a Model Globular Protein. *J. Am. Chem. Soc.* 146, 12766–12777 (2024). <https://doi.org/10.1021/jacs.4c02934>

<sup>303</sup>Karim, A. et al. Interfacial Interactions between Nanoplastics and Biological Systems: toward an Atomic and Molecular Understanding of Plastics-Driven Biological Dyshomeostasis. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 16, 25740–25756 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsami.4c03008>

## Efectos de la exposición a MNP y su relación con anomalías congénitas

Además de su capacidad para penetrar capilarmente en los tejidos y las células, los MNP presentan otra característica peligrosa: la posibilidad de ser transmitidas “heredadas” a las futuras generaciones. Durante la división celular, los fragmentos de micro y nanoplásticos pasan de una célula a otra. Además, gracias a su pequeño tamaño y carga estática, estas partículas atraviesan fácilmente la barrera hemato-placentaria, penetrando en los tejidos y células del feto y causando efectos dañinos en el desarrollo del organismo. Y, como se ha subrayado repetidamente en el informe, los MNP provocan disfunciones mitocondriales.

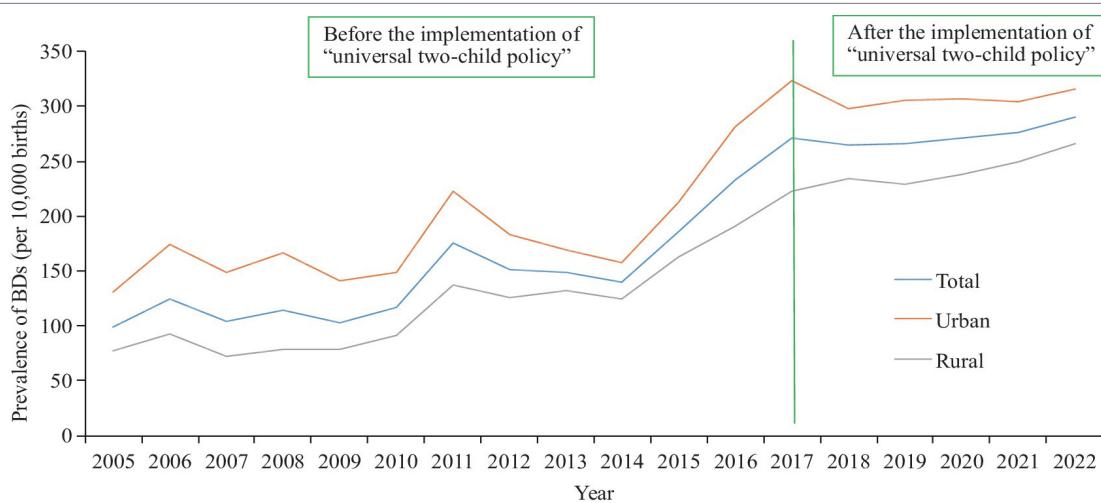
Un estudio mendeliano aleatorizado reciente proporcionó pruebas convincentes de una conexión causal entre la expresión de las proteínas mitocondriales y el riesgo de anomalías congénitas. El estudio utilizó variantes genéticas como variables instrumentales para reducir los sesgos típicos de los datos observacionales. De los 66 rasgos de proteínas mitocondriales examinados, se encontraron asociaciones significativas con malformaciones del corazón, oído, sistema nervioso, sistema urinario, sistema sexual y extremidades. Esto confirma la hipótesis del papel fundamental de la actividad mitocondrial en la morfogénesis embrionaria<sup>304</sup>. Las mutaciones del ADN mitocondrial (mtADN), tanto heredadas como activadas de novo, causan una amplia gama de síndromes clínicos: MELAS, MERRF, NARP, el síndrome de Leigh y otros. Estas enfermedades afectan principalmente a los órganos con alta demanda energética – corazón, cerebro, músculos y ojos. La transmisión ocurre exclusivamente por línea materna, debido al origen mitocondrial del ovocito (Fig. 111). Tales trastornos se manifiestan frecuentemente en edad temprana y se caracterizan por graves alteraciones neurológicas y metabólicas.



<sup>304</sup>Li, X. et al. Mitochondrial proteins and congenital birth defect risk: a mendelian randomization study. *BMC Pregnancy Childbirth* 25, 444 (2025). <https://doi.org/10.1186/s12884-025-07562-8>

Los niños con trastornos mitocondriales a menudo enfrentan retrasos en el desarrollo, debilidad muscular, discapacidades cognitivas y problemas de coordinación. El síndrome de Kearns-Sayre, el síndrome de Barth, la enfermedad de Alpers y otras patologías pueden llevar a consecuencias graves, incluyendo discapacidad permanente o incluso la muerte.

En los últimos veinte años, los médicos han registrado un preocupante aumento de los defectos congénitos al nacer. Solo en China, la frecuencia de estos defectos casi se ha triplicado, pasando de 99,15 por cada 10 000 nacimientos en 2005 a 290,27 por cada 10 000 en 2022<sup>305</sup> (Fig.112). Una dinámica similar se observa también en otros países. Las causas de este aumento son multifactoriales, pero cada vez más datos científicos sugieren una nueva y creciente amenaza: los microplásticos y, en particular, los nanoplasticos, que pueden penetrar en los tejidos embrionarios e interferir en los procesos de formación de órganos y sistemas.



**Figura 112:** La prevalencia de las malformaciones congénitas entre las zonas urbanas y rurales desde 2005 hasta 2020

Fuente: Wei, W. et al. Analyzing the Trends and Causes of Birth Defects – Jinan City, Shandong Province, China, 2005–2022. CCDCW 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>

La carga electrostática que portan los nanoplasticos es particularmente peligrosa en los tejidos embrionarios, donde cualquier error puede convertirse en una anomalía potencial. Estas partículas muestran una mayor adhesión a las superficies celulares, incluidas las células de la cresta neural, que están involucradas en la formación del corazón, los vasos sanguíneos y las estructuras craneofaciales. En experimentos con embriones de pollo, los nanoplasticos causaron malformaciones graves, entre ellas defectos del corazón y de los principales vasos sanguíneos. Una de las anomalías que se está difundiendo con mayor rapidez es la gastosquisis, un defecto en el desarrollo de la pared abdominal anterior, en el que los órganos del feto sobresalen a través de una abertura en la piel y los músculos (Fig. 113, 114, 115). Según datos internacionales, su prevalencia ha aumentado un 161 % en las últimas tres décadas, y entre las madres menores de 20 años, ha aumentado varias veces<sup>306</sup>. Se cree que los nanoplasticos interfieren con el desarrollo de la pared abdominal en las primeras etapas del embarazo (4-8 semanas), causando inflamación y disfunción en el cierre de la parte anterior del cuerpo.

<sup>305</sup>Wei, W. et al. Analyzing the Trends and Causes of Birth Defects – Jinan City, Shandong Province, China, 2005–2022. CCDCW 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>

<sup>306</sup>Feldkamp, M. L. et al. Gastosquisis prevalence patterns in 27 surveillance programs from 24 countries, International Clearinghouse for Birth Defects Surveillance and Research, 1980–2017. Birth Defects Research 116, e2306 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2306>



**Figuras 113-115:** Gastrosquisis

Un defecto congénito más, la hipospadias — una anomalía en la que la uretra en los varones se abre en un punto incorrecto<sup>307</sup> — también muestra un aumento constante (Figs. 116, 117, 118). Por ejemplo, en Estados Unidos, entre 1997 y 2024, el incremento cuantitativo de casos fue de aproximadamente 1,26 por cada 1000 recién nacidos varones vivos (de 6,1 a 7,36 por 1000), con un aumento porcentual cercano al 20,66 %<sup>308</sup>. Estudios en modelos animales han demostrado que la exposición a ftalatos, presentes frecuentemente en los microplásticos, interfiere con la síntesis de testosterona en los fetos varones.



**Figuras 116-118.** Hipospadias

Estos compuestos, ligados a la superficie cargada de los nanoplásticos, se transportan fácilmente en el flujo sanguíneo y a través de la placenta, acentuando los cambios hormonales durante los períodos críticos de la diferenciación sexual. En este contexto, se observa un aumento en la frecuencia del síndrome de Down, trisomía, defectos atrioventriculares cardíacos y otros trastornos graves, con un incremento de 12,78 por cada 10 000 nacidos vivos en el período 1999–2001 a 15,55 por cada 10 000 en el período 2016–2020<sup>308</sup>. Al mismo tiempo, se registra un aumento de problemas psiconeurológicos en los niños, incluyendo trastornos de ansiedad y déficits cognitivos. Aunque la relación causal directa con los microplásticos aún está en estudio, los mecanismos conocidos, como la inflamación, la modulación epigenética y las disfunciones mitocondriales, hacen sospechar que los microplásticos pueden ser uno de los factores contribuyentes<sup>309,310</sup>.

<sup>307</sup>Chen, M. J., Karaviti, L. P., Roth, D. R. & Schlomer, B. J. Birth prevalence of hypospadias and hypospadias risk factors in newborn males in the United States from 1997 to 2012. *Journal of Pediatric Urology* 14, 425.e1-425.e7 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jpurol.2018.08.024>

<sup>308</sup>Stallings, E. B. et al. National population-based estimates for major birth defects, 2016–2020. *Birth Defects Research* 116, e2301 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2301>

<sup>309</sup>Zhang, Y., Wang, J., Yang, H. & Guan, Y. The potential mechanisms underlying phthalate-induced hypospadias: a systematic review of rodent model studies. *Front. Endocrinol.* 15, (2024). <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1490011>

<sup>310</sup>Chen, M. J., Karaviti, L. P., Roth, D. R. & Schlomer, B. J. Birth prevalence of hypospadias and hypospadias risk factors in newborn males in the United States from 1997 to 2012. *Journal of Pediatric Urology* 14, 425.e1-425.e7 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jpurol.2018.08.024>

## Conclusiones y perspectivas: ¿es posible reducir el impacto de los micro y nanoplásticos (MNP) en la salud humana?

El análisis de los datos generales demuestra que los micro y nanoplásticos (MNP) representan un factor de riesgo significativo y subestimado para la salud humana. La evidencia científica moderna confirma de manera contundente que los MNP forman parte integral de la carga tóxica global que afecta al cuerpo humano. Gracias a su capacidad para superar barreras biológicas y acumularse en diversos tejidos, como el cerebro, corazón, pulmones y placenta, los MNP ejercen una acción tóxica a nivel molecular, celular y sistémico.

Junto con los aditivos químicos y contaminantes ambientales absorbidos, el plástico se convierte en un factor capaz de provocar inflamación crónica, estrés oxidativo, disfunciones mitocondriales y mutaciones en el ADN, procesos que están en la base de una amplia gama de enfermedades, incluyendo trastornos neurodegenerativos, oncológicos, cardiovasculares, endocrinos y autoinmunes.

Lo especialmente preocupante es que las partículas de MNP prácticamente no se eliminan del cuerpo, acumulándose con la edad y agravando el efecto acumulativo de su exposición.

Los datos modernos confirman que evitar el contacto con los MNP no es posible: están presentes en el aire, en el agua, en los alimentos e incluso dentro de las células de animales y plantas que consumimos. En consecuencia, la exposición a partículas plásticas se ha vuelto omnipresente y continua, desde el inicio del desarrollo embrionario hasta las etapas más avanzadas de la vida.

En particular, la vía de exposición por inhalación es especialmente peligrosa, ya que las nanopartículas, al atravesar la barrera hematoencefálica, penetran directamente en los tejidos cerebrales, convirtiendo al sistema nervioso central en uno de los objetivos más vulnerables.

El riesgo biológico adicional está relacionado con la actividad electrostática de las partículas de MNP, que potencia su interacción con las estructuras biológicas y favorece la disfunción de la homeostasis. Además, se destaca su posible papel en el transporte de patógenos y microorganismos resistentes a los antibióticos, lo que confiere al problema de la contaminación por micro y nanoplásticos un carácter interdisciplinario que involucra la ecología, toxicología, inmunología, neurología y medicina reproductiva.

En este sentido, una de las direcciones estratégicas propuestas por ALLATRA, dentro de un esfuerzo más amplio para contrarrestar la amenaza de los MNP, es el desarrollo de métodos para neutralizar o bloquear la carga electrostática de los nanoplásticos. La reducción de la actividad electrostática de estas partículas podría disminuir de manera significativa sus efectos nocivos y ralentizar su acumulación en el organismo.

Según los autores de este informe, los métodos de bloqueo o neutralización de la carga podrían reducir los riesgos potenciales asociados a los MNP en al menos un 50 %. Esto brindaría un tiempo adicional que podría ser crucial para desarrollar estrategias más completas para el diagnóstico, la prevención y la eliminación de los MNP del cuerpo.

En este contexto, se vuelve particularmente importante profundizar las investigaciones en los campos de la biofísica, nanotecnología y toxicología molecular.

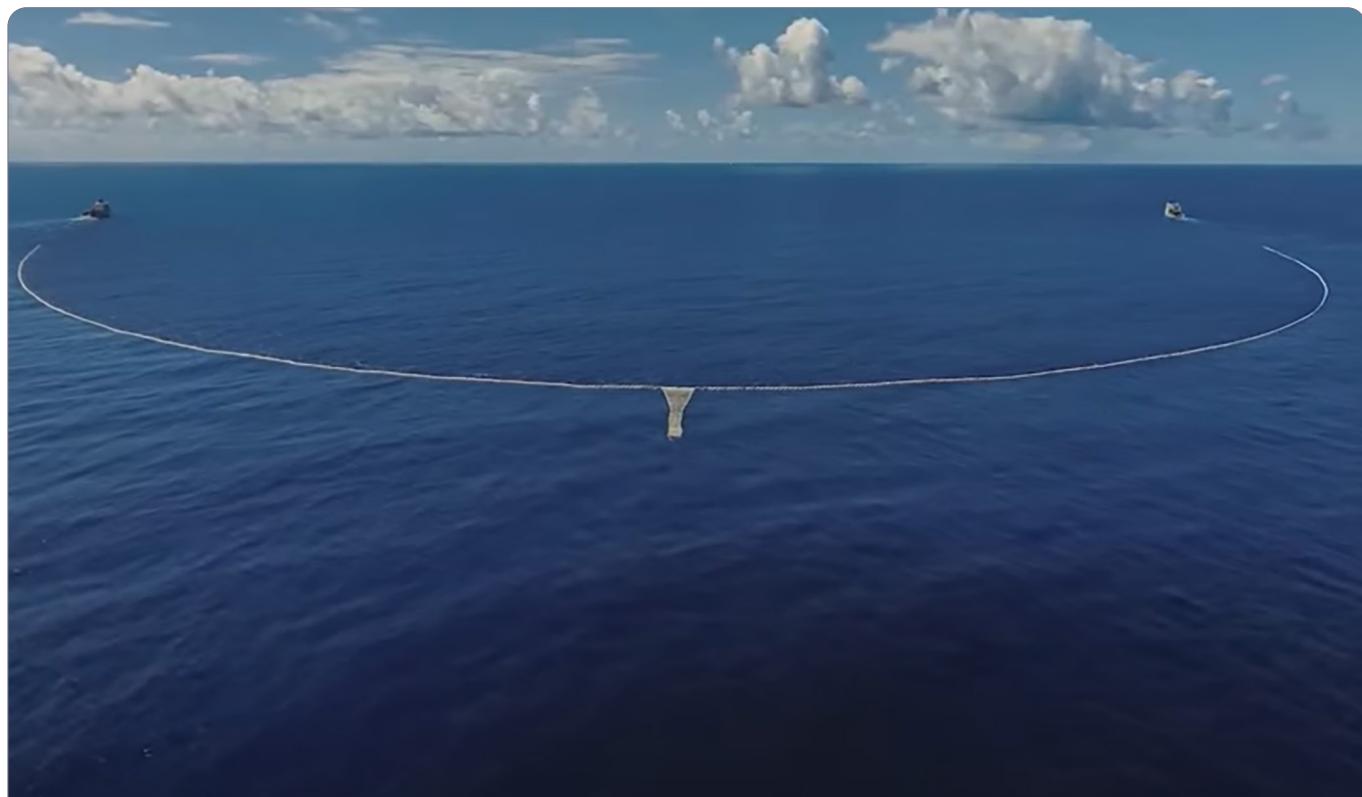
A pesar del aumento de las publicaciones científicas sobre este tema, el impacto de los MNP en la salud humana sigue siendo poco estudiado y apenas considerado en la formulación de estrategias para la protección de la salud y el medio ambiente.

Teniendo en cuenta la magnitud de la contaminación por plástico, la actividad biológica de estas partículas y las posibles consecuencias irreversibles de su impacto, este campo requiere una mayor prioridad por parte de la comunidad científica y las autoridades sanitarias, la sistematización de datos, el desarrollo de estándares para la evaluación de riesgos y la expansión de la cooperación científica internacional e intergubernamental.

## ANÁLISIS DE LOS ENFOQUES ACTUALES PARA LA REDUCCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR PLÁSTICO

### Tecnologías para la eliminación de plásticos de gran tamaño en los ecosistemas acuáticos

Las iniciativas para mitigar los efectos de la contaminación oceánica se centran principalmente en la eliminación de residuos visibles de gran tamaño en la superficie del agua. Actualmente, uno de los proyectos más ambiciosos para la recolección de plástico y otros tipos de desechos flotantes es la iniciativa The Ocean Cleanup. Sus sistemas flotantes capturan los residuos superficiales (Fig. 119), que luego son seleccionados y empaquetados para su reciclaje o eliminación.



**Figura 119:** La imagen muestra la tecnología The Ocean Cleanup en acción. Una larga barrera flotante en forma de U, fabricada con un material resistente, recoge los desechos plásticos en la superficie del océano.

Fuente: <https://theoceancleanup.com/>

Aunque este método parece prometedor, es importante considerar algunos aspectos que requieren especial atención:

**1. El proceso de recolección de residuos no es selectivo** y, junto con el plástico, también atrapa organismos vivos como microalgas, larvas de peces y medusas. Actualmente, no existen estimaciones cuantitativas sobre el volumen de organismos atrapados en el sistema de recolección; en cualquier caso, su eliminación a gran escala puede tener efectos negativos en los ecosistemas marinos, comprometiendo las cadenas alimentarias naturales. A pesar de los esfuerzos para garantizar la seguridad de la fauna marina, este problema sigue sin resolverse.

2. Los activistas están sinceramente comprometidos con la limpieza del océano, sin embargo, **los esfuerzos realizados no son suficientes para lograr resultados significativos**.

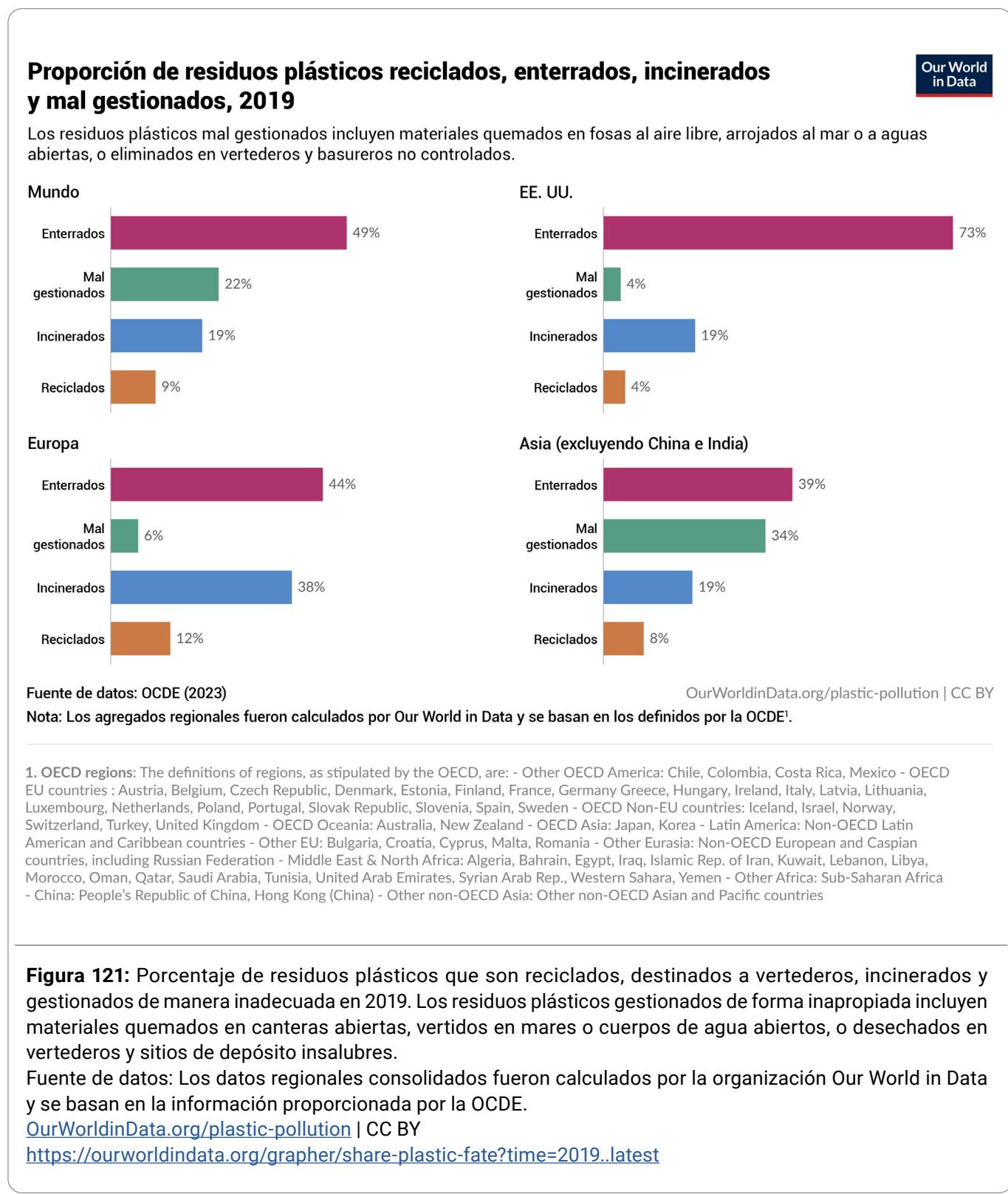
En noviembre de 2024, la iniciativa The Ocean Cleanup ha removido aproximadamente 20 000 toneladas de residuos plásticos de los océanos. Sin duda, se trata de un resultado importante. Sin embargo, en el contexto del problema global, representa solo el 0,01 % del total de residuos plásticos en los océanos, estimado en alrededor de 200 millones de toneladas. Además, cada año se añaden aproximadamente 11 millones de toneladas de nuevos residuos plásticos (Fig. 120). Estos datos evidencian la desproporción entre los esfuerzos de limpieza y la magnitud del problema.



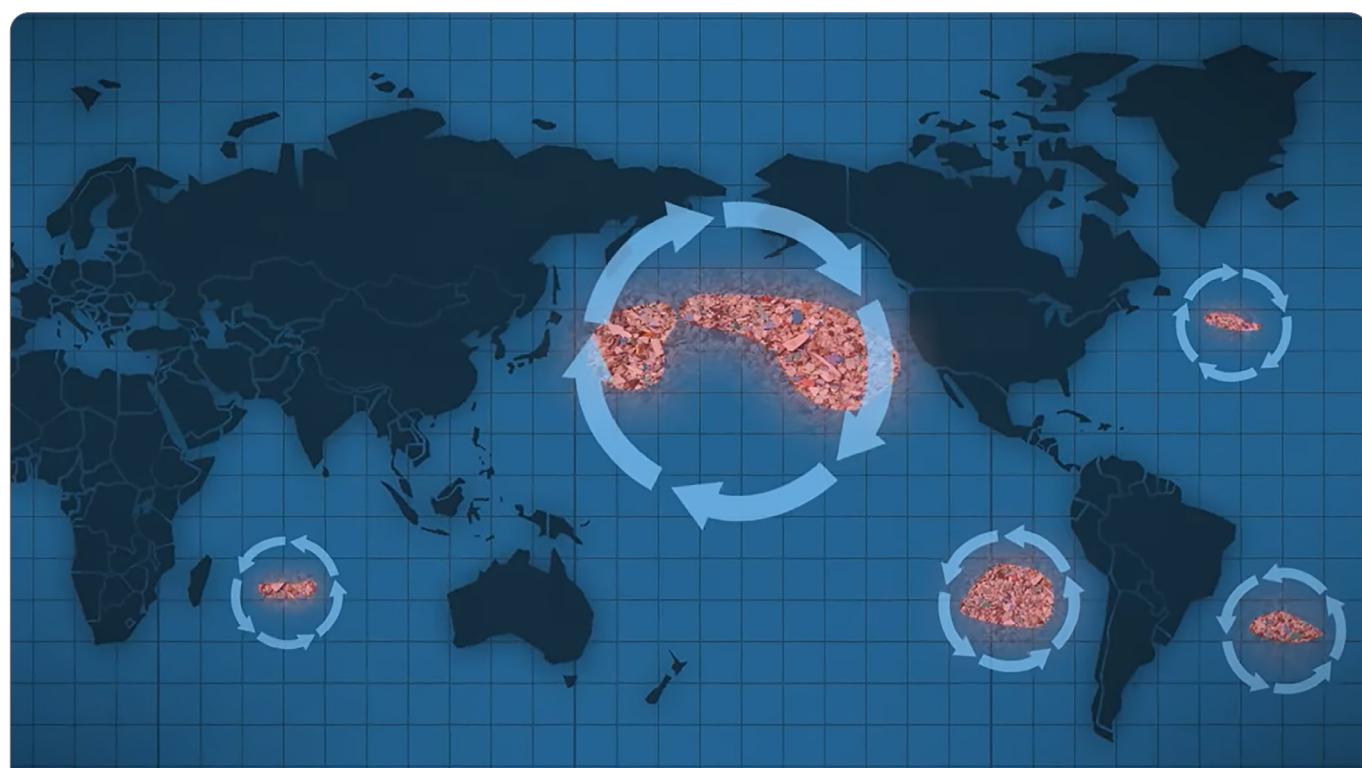
**Figura 120:** El gráfico compara tres métricas clave relacionadas con la contaminación plástica en los océanos: la cantidad de residuos plásticos flotantes, el plástico vertido anualmente en los océanos y el volumen recolectado por la organización The Ocean Cleanup.

Fuente: <https://theoceancleanup.com/>

**3. Una cuestión crucial sigue siendo el destino final del plástico recuperado.** Actualmente, la tasa global de reciclaje de residuos plásticos no supera el 9 % (Fig. 121). En consecuencia, existe una posibilidad real de que una parte significativa del plástico recogido sea destinada a vertederos, lo que no resuelve el problema de la contaminación a largo plazo.



Además, las operaciones de limpieza de los océanos implican costos financieros significativos. Por ejemplo, la gran distancia de la gran mancha de basura del Pacífico respecto a las aguas territoriales de cualquier país genera una situación en la que no está claramente definida la responsabilidad para financiar y llevar a cabo las actividades de remediación. Según Charles Moore — oceanógrafo e investigador que fue el primero en descubrir la gran mancha de basura del Pacífico — una limpieza a gran escala de esta área “llevaría a la bancarrota a cualquier país” que intentara emprender tal esfuerzo. Es importante destacar que se han identificado cinco acumulaciones similares de residuos en los océanos del mundo (Fig. 122), lo que agrava aún más el problema.

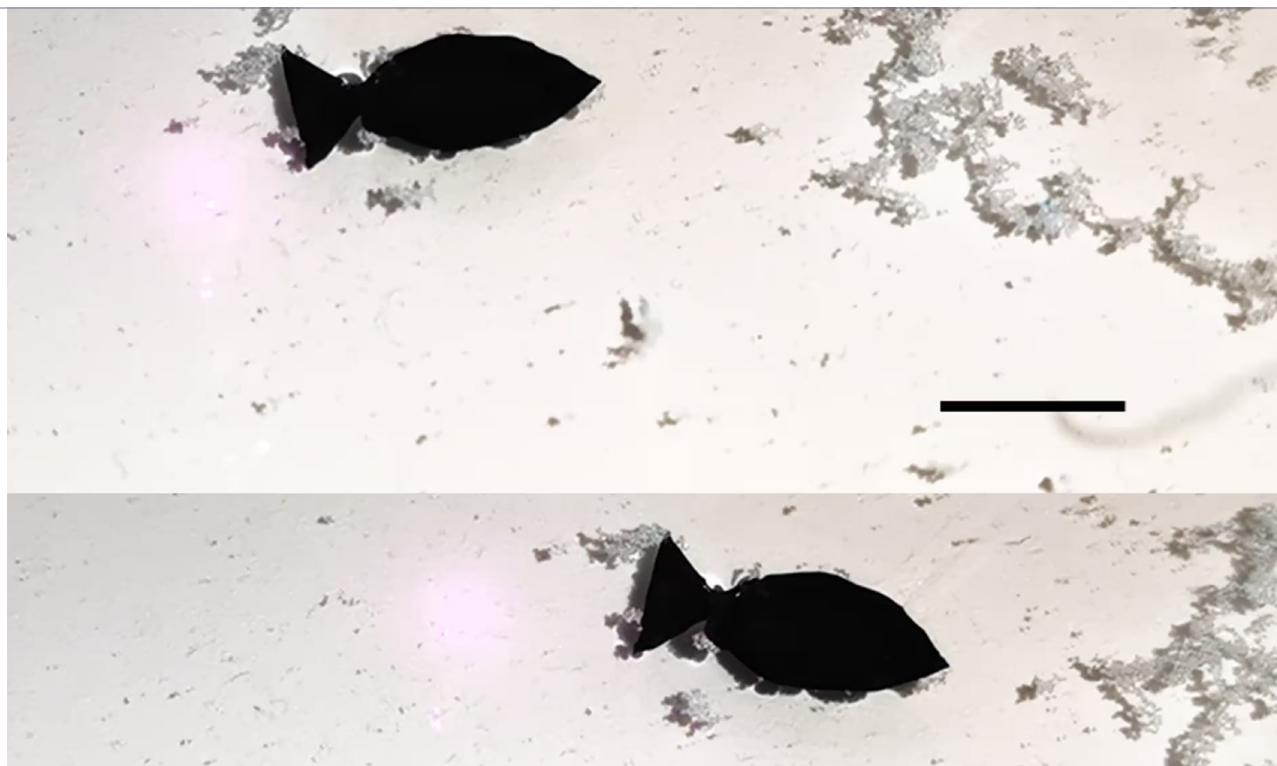


**Figura 122:** Representación esquemática de la ubicación de las cinco principales acumulaciones de residuos en los océanos mundiales

Es importante destacar que los residuos plásticos visibles de gran tamaño representan solo una parte del problema general de la contaminación plástica en los océanos. Según Melanie Bergmann, bióloga marina del Instituto Alfred Wegener, “esto representa únicamente el plástico presente en la superficie del océano, que es una pequeña fracción — menos del 1 % del plástico que realmente está en los océanos”.

A medida que el plástico se fragmenta en micro y nanopartículas, la tarea de limpiar los océanos de este tipo de contaminación se vuelve mucho más compleja. Ya existen algunas tecnologías experimentales para la eliminación de microplásticos del agua. Por ejemplo, investigadores de la Universidad de Sichuan han desarrollado un mini robot con forma de pez (Fig. 123), capaz de nadar en ambientes acuáticos y absorber fragmentos de microplástico flotantes cercanos<sup>311</sup>.

Este robot biónico, de 13 mm de longitud, recolecta eficazmente partículas de microplástico gracias a enlaces químicos fuertes e interacciones electrostáticas entre los materiales de su cuerpo y los componentes del microplástico, tales como colorantes orgánicos, antibióticos y metales pesados.



**Figura 123:** La imagen muestra un pequeño pez robot desarrollado por investigadores de la Universidad de Sichuan. Este dispositivo compacto, parecido a un pez real, nada en el ambiente acuático y adsorbe activamente los fragmentos de microplásticos presentes en el agua.

<https://www.theguardian.com/environment/2022/jun/22/scientists-unveil-bionic-robo-fish-to-remove-microplastics-from-seas>

Sin embargo, a pesar de estas innovaciones, la aplicación práctica de estas tecnologías a escala global sigue siendo limitada. Los robots en miniatura solo absorben microplásticos en las inmediaciones, lo que hace que el proceso sea localizado; incluso en grandes cantidades, no pueden cubrir la extensión de los océanos del mundo. Además, podrían ingresar a la cadena alimentaria marina. También existen incertidumbres sobre su capacidad para funcionar en condiciones oceánicas complejas, como corrientes fuertes, alta presión y salinidad. Por lo tanto, las soluciones actuales aún no son suficientemente efectivas y enfrentan obstáculos significativos para su escalabilidad.

<sup>311</sup>Wang, Y. et al. Robust, Healable, Self-Locomotive Integrated Robots Enabled by Noncovalent Assembled Gradient Nanostructure. *Nano Lett.* 22, 5409–5419 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c01375>

## Métodos actuales para la eliminación de micro y nanoplasticos

Cada vez se presta más atención al posible uso de microorganismos, en particular bacterias, para la degradación enzimática de polímeros sintéticos, especialmente del tereftalato de polietileno (PET). Esta tecnología se promociona como una alternativa potencialmente ecológica a los métodos tradicionales de eliminación de residuos plásticos, como la incineración. Sin embargo, los datos empíricos disponibles actualmente generan dudas sobre su eficacia, seguridad y aplicabilidad a escala industrial.

En 2016, un equipo de investigadores japoneses liderado por Shosuke Oda descubrió la bacteria *Ideonella sakaiensis*, capaz de degradar el PET mediante la producción de dos enzimas: PETasa y MHEtasa. Este hallazgo representó un evento significativo en el campo de la microbiología<sup>312</sup>. Sin embargo, los experimentos de laboratorio revelaron que el proceso de degradación es extremadamente lento: para descomponer una lámina de plástico de 20 gramos, las bacterias tardaron aproximadamente siete semanas en condiciones óptimas. Es evidente que esta velocidad de eliminación no puede considerarse satisfactoria para abordar el problema de la contaminación por plástico. A escala global, donde se liberan millones de toneladas de plástico al medio ambiente cada año, esta velocidad es comparable a intentar vaciar el océano con una cucharita.

Los esfuerzos científicos se han centrado en modificar la enzima PETasa, utilizada por la bacteria para degradar el plástico. Sin embargo, como admiten los propios investigadores, la enzima de *Ideonella sakaiensis* aún se encuentra en las primeras etapas de su evolución: su eficiencia es baja, la estabilidad limitada y la aceleración de la reacción requiere temperaturas incompatibles con el ambiente natural. Además, la ingeniería genética, por el momento, no puede predecir con certeza qué mutaciones podrían conducir a mejoras significativas. Como declaró Elizabeth Bell, del National Renewable Energy Laboratory de Estados Unidos, se trata de “dos pasos adelante y uno atrás”.

Además, la degradación enzimática no es una solución universal: solo algunos tipos de plástico, como el PET, pueden ser teóricamente degradados por estas enzimas. Otros materiales comúnmente usados, como el polietileno y el polipropileno, siguen siendo prácticamente indigeribles para los microorganismos. Como también informó la revista Nature, la mayoría de los plásticos requieren demasiada energía para ser degradados eficazmente mediante vías bioquímicas.

Incluso en el supuesto de que se desarrolle un microorganismo altamente eficiente, surgen preocupaciones mucho más serias: ¿es seguro liberarlo en el ambiente? **Cualquier bacteria genéticamente modificada representa una amenaza ecológica potencial. Actualmente, casi todos los países regulan estrictamente —o prohíben completamente— la liberación de tales organismos en la naturaleza.**

<sup>312</sup>Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). Science 351, 1196–1199 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

Las razones son evidentes: no sabemos cómo se comportará la bacteria una vez "cumplida su misión". ¿Podría atacar otras moléculas orgánicas importantes? ¿Podría suplantar a otros microorganismos? ¿O causar mutaciones con consecuencias aún menos previsibles?

En definitiva, un problema ecológico podría fácilmente ser reemplazado por otro —aún más imprevisible y destructivo.

A pesar del indudable valor de la investigación básica sobre la biodegradación de polímeros, en el estado actual esta tecnología no puede considerarse una solución eficaz, escalable y segura al problema de la contaminación por plástico.

## ENFOQUES DE LA COMUNIDAD CIENTÍFICA ALLATRA PARA COMBATIR LA EPIDEMIA DE MICRO Y NANOPLÁSTICOS

### Tecnologías de Generadores de Agua Atmosférica (GAA) para la limpieza oceánica de micro y nanoplásticos (MNP)

La restauración del equilibrio ecológico requiere la adopción a gran escala de tecnologías innovadoras, como los generadores de agua atmosférica (GAA). Actualmente, estos dispositivos están disponibles en una amplia gama de modelos, desde los domésticos hasta los industriales. Son capaces de producir agua potable a partir del aire, eliminando eficazmente las sustancias contaminantes, incluidos los microplásticos (Fig. 124). Además, el agua puede ser mineralizada para mejorar su sabor y aportar beneficios a la salud.

El principio de funcionamiento de los generadores se basa en la condensación de la humedad contenida en el aire.



**Figura 124:** La imagen muestra una representación esquemática de un generador de agua atmosférica, ilustrando sus partes constituyentes y el principio de funcionamiento.

Los GAA funcionan según dos tecnologías principales:

**1. Tecnología basada en condensación** – Este método aspira el aire circundante hacia el interior del dispositivo, haciendo que el aire entre en contacto con una superficie fría o un serpentín refrigerante, lo que provoca la condensación del vapor de agua en forma líquida. El proceso es similar a la formación de condensación en un objeto frío recién sacado del congelador. Los GAA por condensación funcionan mejor en ambientes cálidos y húmedos.

**2. Tecnología basada en adsorción** – Para capturar la humedad del aire se utilizan materiales higroscópicos como gel de sílice, zeolitas o estructuras metal-orgánicas. El agua absorbida se libera calentando el material.

Actualmente, estos dispositivos se emplean localmente para proveer agua potable a la población, incluso en situaciones de emergencia climática.

La adopción a gran escala de los GAA para satisfacer las necesidades hídricas de industrias y poblaciones podría, en pocos años, conducir a una reducción significativa de la contaminación oceánica.

Actualmente, las fuentes de agua utilizadas para fines domésticos, incluyendo el consumo alimentario, suelen ser cuerpos hídricos contaminados con altos niveles de micro y nanoplásticos. Esto implica una acumulación de plástico en el cuerpo humano. Pasar a la producción de agua a partir del aire, en lugar de fuentes contaminadas, podría mejorar notablemente la calidad del agua consumida.

## Recuperación de los ecosistemas mediante filtración natural y generadores de agua atmosférica

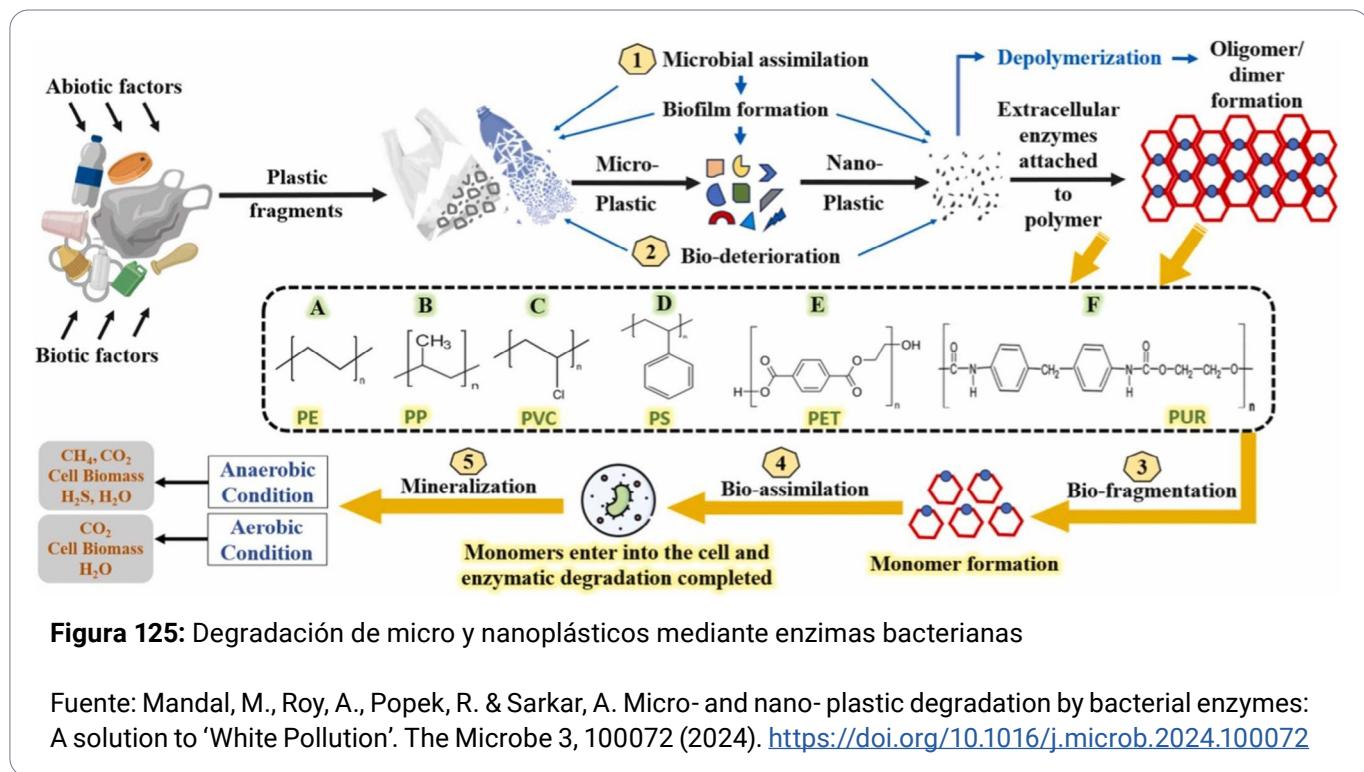
Para una eliminación eficaz de las microplásticos en las aguas residuales, es necesario emplear tecnologías innovadoras, sistemas modernos de filtración y asimilación. Además, es fundamental reconvertir las plantas de tratamiento para que las aguas depuradas no se descarguen en los cuerpos de agua, sino que se redirijan al suelo, donde habitan microorganismos naturalmente capaces de degradar el plástico<sup>313</sup>.

Estos organismos se distinguen claramente de aquellos modificados genéticamente o creados artificialmente en laboratorio. Su presencia en los ecosistemas es natural y no presenta características invasivas en el ambiente en que se encuentran.

<sup>313</sup>Park, S. Y. & Kim, C. G. Biodegradation of micro-polyethylene particles by bacterial colonization of a mixed microbial consortium isolated from a landfill site. Chemosphere 222, 527–533 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.159>

Las investigaciones<sup>314</sup> demuestran que diversos microorganismos del suelo presentes en ambientes naturales<sup>315</sup> muestran una eficiencia significativa en la degradación de polímeros<sup>316</sup> como el polietileno<sup>317</sup> y el tereftalato de polietileno<sup>318</sup> (PET). Por ejemplo, la mayor actividad de degradación fúngica – con una reducción media de la masa de polietileno del 36,4 ± 5,53 % en 16 semanas – se observó en la cepa *Aspergillus oryzae* A5,1.

La capacidad de los microorganismos para biodegradar los polímeros se debe a la producción de enzimas capaces de romper las complejas estructuras moleculares de los plásticos<sup>315</sup>.



Estos datos, confirmados por observaciones experimentales, indican el potencial uso de las comunidades microbianas naturales para reducir el nivel de contaminación ambiental por micro y nanoplasticos.

*“Entre los diversos métodos de remediación actualmente disponibles, la remediación microbiana muestra las mejores perspectivas para la degradación o eliminación sostenible de los microplásticos del ambiente”*, se afirma en una revisión realizada por científicos indios<sup>315</sup>.

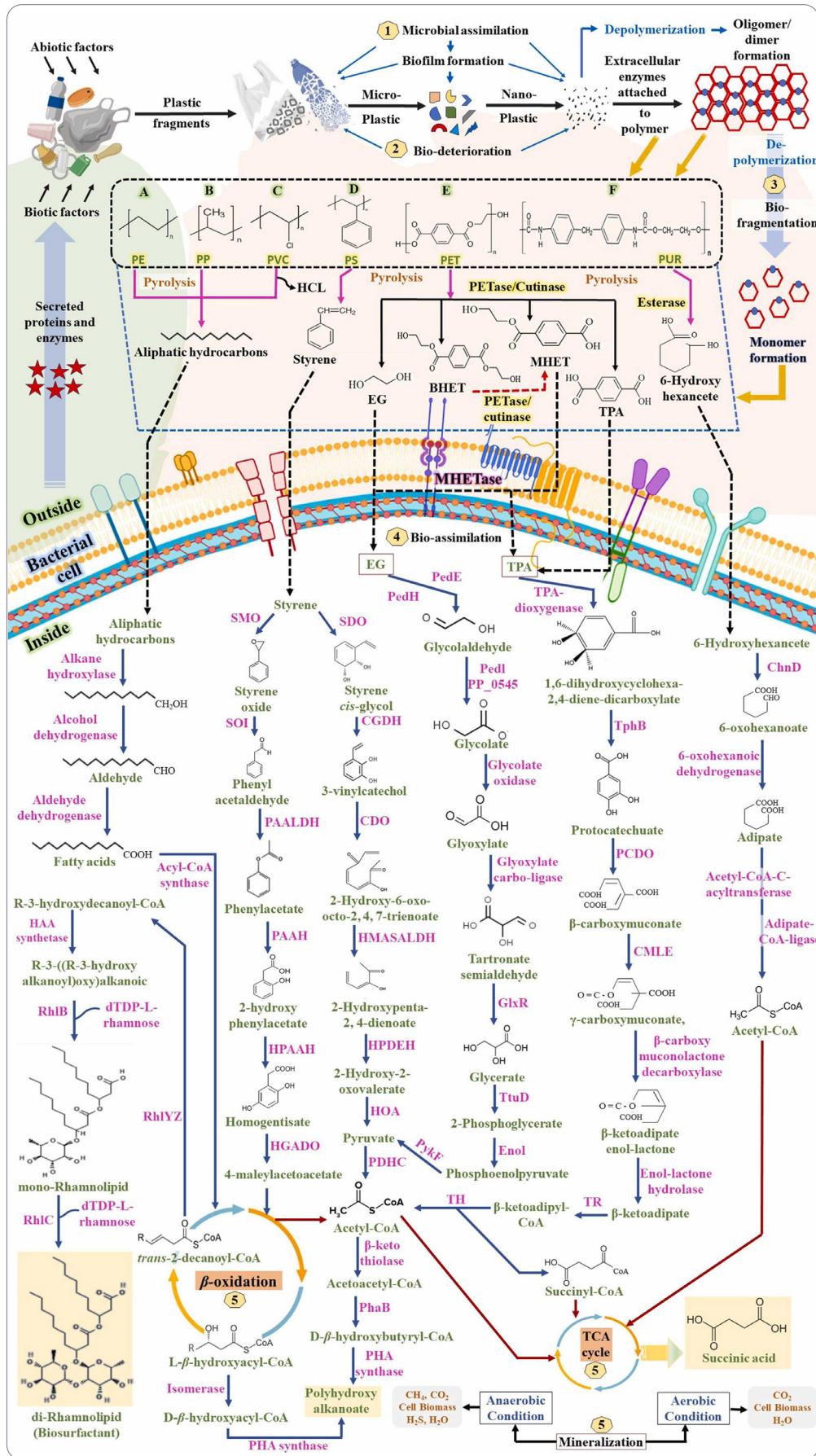
<sup>314</sup>Auta, H. S. et al. Enhanced microbial degradation of PET and PS microplastics under natural conditions in mangrove environment. *Journal of Environmental Management* 304, 114273 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114273>

<sup>315</sup>Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to 'White Pollution'. *The Microbe* 3, 100072 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072>

<sup>316</sup>Auta, H. S., Emenike, C. U., Jayanthi, B. & Fauziah, S. H. Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by *Bacillus* sp. and *Rhodococcus* sp. isolated from mangrove sediment. *Marine Pollution Bulletin* 127, 15–21 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.036>

<sup>317</sup>Muhorja, C. N., Makonde, H., Magoma, G. & Imbuga, M. Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya. *PLOS ONE* 13, e0198446 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198446>

<sup>318</sup>Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science* 351, 1196–1199 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

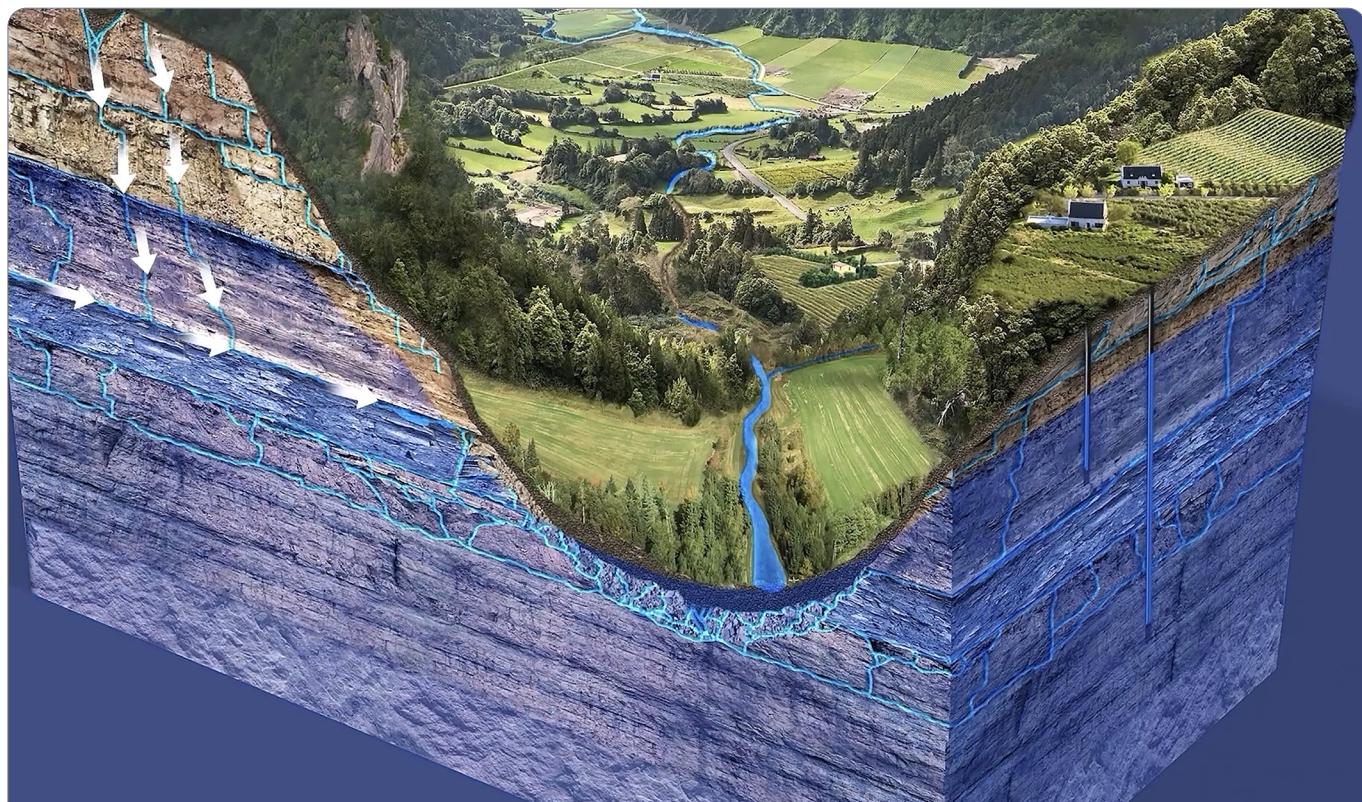


**Figura 126:** Los desechos plásticos se degradan en micro y nanoplásticos debido a diversos factores abióticos y bióticos

Fuente: Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to 'White Pollution'. *The Microbe* 3, 100072 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072>

Por lo tanto, la transición a la tecnología de extracción de agua del aire mejorará notablemente la calidad del agua consumida y, en combinación con la remediación microbiana, contribuirá a una reducción significativa de la contaminación ambiental por micro y nanoplásticos.

En la capa superficial del suelo, así como en los cuerpos de agua, la concentración de plástico permanecerá elevada durante un tiempo. Sin embargo, a medida que el agua penetre a mayores profundidades, se producirá un proceso de autodepuración (Fig. 127). Los microorganismos presentes en el suelo contribuirán a la degradación de las partículas de nanoplásticos.



**Figura 127:** La imagen muestra de manera esquemática el proceso de depuración biológica del agua vertida en el suelo a través de formaciones geológicas. Las flechas indican el recorrido de las aguas residuales que atraviesan las capas de tierra y rocas, donde los microorganismos y los materiales filtrantes eliminan los contaminantes. Las capas del suelo están diferenciadas por colores: marrón para la tierra, gris para arena y grava.

El aumento del volumen de agua usada y filtrada en las plantas depuradoras, reintroducida en el suelo, favorece la proliferación de microorganismos, incluidos bacterias, hongos y arqueas, que desempeñan un papel fundamental en la formación de un suelo sano, en el ciclo de nutrientes y en la resiliencia de los ecosistemas. Posteriormente, el agua depurada filtrará hacia capas más profundas y regresará a los océanos.

La instalación de generadores de agua atmosférica (GAA) en regiones desérticas, junto con la reintegración del agua usada al suelo, representa una solución prometedora para superar la crisis

hídrica y combatir la desertificación, ya que activa procesos que favorecen la regeneración de la vegetación<sup>319</sup> y los ecosistemas. El uso de los GAA mejorará la calidad de vida de las poblaciones locales, abordando el problema de la escasez de agua potable.

En combinación con la biorremediación microbiana, el uso de los GAA puede representar un paso fundamental hacia una gestión sostenible de los recursos hídricos y la rehabilitación de suelos degradados.

El cambio completo a los GAA prevé el uso del agua atmosférica para todas las necesidades de la población, incluidas las domésticas, industriales y agrícolas. La adopción a escala global de esta tecnología aumentará la evaporación, lo que enfriará los océanos y acelerará su proceso de purificación. Además, la reducción del exceso de humedad atmosférica mediante los GAA disminuirá la frecuencia de precipitaciones extremas y vientos intensos, contribuyendo así a mitigar el impacto destructivo de los desastres naturales (para más detalles, véan el documental: "Agua del aire: El camino para salvar a la humanidad").

### **Desafíos y riesgos asociados con el uso de generadores de agua atmosférica**

Sin embargo, existe un aspecto negativo menos estudiado relacionado con la amplia implementación de las tecnologías de generación de agua atmosférica (GAA). La principal preocupación radica en la evaluación insuficiente del impacto directo de los GAA en la salud humana. Aunque esta tecnología tiene el potencial de contribuir a la purificación del agua oceánica y a mejorar la conductividad térmica, su aplicación a gran escala podría provocar inadvertidamente un aumento significativo en las concentraciones de microplásticos en la atmósfera. El mecanismo de funcionamiento de los GAA consiste en condensar la humedad de la atmósfera, la cual se repone posteriormente mediante la evaporación oceánica. Dado que las aguas oceánicas contienen actualmente niveles elevados de micro y nanoplásticos, la humedad que entra en la atmósfera a través de este ciclo podría transportar partículas plásticas ultrafinas. Como resultado, las regiones que adopten sistemas de GAA—particularmente las grandes áreas metropolitanas—podrían experimentar concentraciones de nanoplásticos en el aire comparables a las que se observan actualmente en las zonas costeras.

Este mecanismo implica el riesgo de un aumento en la concentración de nanopartículas plásticas en el aire, representando una amenaza para la salud humana. La inhalación de nanoplásticos contribuye a su acumulación en el organismo, incluso en el cerebro. Y este es el punto crítico. Es fundamental comprender que el concepto de utilizar los generadores de agua atmosférica (GAA) como un método para purificar el agua oceánica fue propuesto por los científicos de ALLATRA hace más de veinte años, en una época en la que las concentraciones de microplásticos atmosféricos seguían siendo extremadamente bajas. En aquel entonces, la implementación de tales tecnologías realmente podía aportar beneficios ambientales tangibles sin representar riesgos graves para la salud humana.

Sin embargo, la situación ha cambiado drásticamente. La implementación a gran escala de los GAA daría lugar principalmente a un aumento de los micro y nanoplásticos (MNP) en el aire.

<sup>319</sup>Islam, W., Zeng, F., Alotaibi, M. O. & Khan, K. A. Unlocking the potential of soil microbes for sustainable desertification management. *Earth-Science Reviews* 252, 104738 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104738>

Con los niveles actuales de MNP atmosféricos ya elevados, la introducción de volúmenes adicionales a través de los GAA podría resultar fatal para la salud humana.

Así, una tecnología que alguna vez se consideró prometedora e innovadora ha perdido su relevancia. Como sociedad global, hemos perdido la ventana crítica en la que los GAA podrían haber sido una solución viable. En el contexto del clima y la contaminación ambiental, el factor tiempo desempeña un papel decisivo. Lo que hace dos décadas podría haber preservado la salud de millones y contribuido verdaderamente a la limpieza del planeta, ahora se ha convertido en un riesgo potencial.

Los GAA ya no son la tecnología del futuro: es un recordatorio de una oportunidad perdida. En las condiciones actuales, la prioridad debe trasladarse a tecnologías capaces de eliminar los MNP tanto de la atmósfera como del cuerpo humano. En primer lugar, debemos ganar tiempo.

## **Enfoque científico innovador para reducir la toxicidad de los micro y nanoplásticos**

A la luz de los datos presentados sobre el impacto multinivel y acumulativo de los microplásticos y, en particular, de los nanoplásticos en la salud humana, se hace evidente que la civilización moderna enfrenta un desafío ecológico y biomédico que va más allá de las concepciones tradicionales de contaminación ambiental. Este problema no solo afecta a biosferas individuales, sino también la sostenibilidad a largo plazo de la población de *Homo sapiens*.

Hoy en día, prácticamente todo el plástico producido —más de 9 mil millones de toneladas— continúa acumulándose en el ambiente, fragmentándose hasta alcanzar tamaños micro y nano, los cuales poseen una alta actividad química y biológica. Los micro y nanoplásticos han sido detectados en el suelo, en el agua, en el aire y en todas las categorías principales de productos alimenticios —desde frutas y verduras hasta carne, pescado, miel, leche y sal. Esto indica una penetración total de partículas plásticas en las cadenas alimentarias, transformando sustancialmente la concepción tradicional de alimentos “seguros” o “saludables”.

La vía de entrada de las partículas en el organismo humano determina en gran medida su comportamiento biológico y distribución. Mientras que el plástico que ingresa a través del tracto digestivo puede ser parcialmente eliminado, la vía inhalatoria presenta un riesgo significativamente mayor. Las nanopartículas inhaladas se depositan en el tejido pulmonar, atraviesan las barreras hematógenas y pueden llegar directamente al cerebro, donde pueden acumularse a largo plazo. Además, los mecanismos naturales de desintoxicación (hígado, riñones) no disponen de medios efectivos para reconocer y eliminar dichas partículas.

La mayor concentración de microplásticos se registra cerca de cuerpos de agua, en zonas costeras y áreas forestales, especialmente bajo condiciones de alta humedad y temperatura. En estos ambientes, el plástico permanece más tiempo, participa en el transporte por aerosol y provoca estrés oxidativo en las plantas, reduciendo la eficacia de los procesos fotosintéticos. La permanencia en la costa, antes considerada beneficiosa para la salud, hoy implica una carga inhalatoria adicional: se estima que la cantidad de plástico inhalado cerca de cuerpos de agua abiertos puede superar varias veces la presente en ambientes urbanos.

Los estudios epidemiológicos muestran una asociación constante entre los niveles de contaminación por micro y nanoplásticos (MNP) y la prevalencia de enfermedades crónicas no transmisibles, incluyendo hipertensión, diabetes, ictus, trastornos depresivos y cognitivos. Gracias a su capacidad para superar las barreras biológicas y acumularse en diversos tejidos, incluidos el cerebro, el corazón, los pulmones y la placenta, los MNP ejercen una acción tóxica a nivel molecular, celular y orgánico. El plástico, al acumularse en el organismo, genera efectos inmunosupresores, inflamatorios y genotóxicos. A pesar de los avances en la detección de riesgos, hasta la fecha no se han desarrollado mecanismos efectivos para neutralizar y eliminar los MNP del cuerpo humano.

Una de las propiedades más críticas de los nanoplásticos, que ejerce un impacto biológico sistémico, es su capacidad para mantener una carga electrostática. A diferencia de las partículas inertes, los nanoplásticos interactúan activamente con las superficies celulares, las proteínas, los receptores e incluso con el material genético, formando enlaces estables a nivel molecular. Esta propiedad no solo incrementa la penetración de las partículas de nanoplástico a través de las barreras biológicas, incluida la barrera hematoencefálica, sino que también dificulta su posterior eliminación, favoreciendo un prolongado estancamiento en los tejidos, especialmente en el cerebro. La interacción electrostática inicia una cascada de anomalías celulares, entre ellas la despolarización de membranas, disfunciones mitocondriales, estrés oxidativo y apoptosis, aumentando notablemente la toxicidad incluso a bajas concentraciones de partículas de nanoplástico.

**Los autores de este informe consideran que la solución para neutralizar o bloquear la carga electrostática de los micro y nanoplásticos** podría representar un avance fundamental, capaz de reducir significativamente la actividad biológica de los nanoplásticos y ralentizar la velocidad con la que se acumulan en órganos vitales. Según las estimaciones de los autores del informe, el aislamiento o bloqueo de la carga electrostática podría disminuir el peligro potencial de los MNP en al menos un 50 %, haciendo de esta línea de investigación una prioridad crítica. Esto proporcionaría a la comunidad científica una ventana temporal necesaria para desarrollar enfoques más complejos en el diagnóstico, la desintoxicación y la prevención de los efectos de las MNP. En este contexto, las investigaciones en biofísica, ciencia de materiales nanoestructurados y toxicología molecular adquieren una importancia prioritaria. Retrasar este progreso implicaría una potencial aceleración de los procesos de degradación.

Paralelamente a las soluciones biomédicas, se requiere una estrategia científicamente fundamentada para la gestión segura de los residuos plásticos. El sistema actual de eliminación no es capaz de prevenir la fragmentación adicional y la entrada de microplásticos en la biosfera. En un contexto de globalización, es necesario crear una plataforma tecnológica internacional para el desarrollo, implementación y difusión de métodos seguros de recolección y reciclaje del plástico. Tales medidas solo pueden llevarse a cabo con el apoyo institucional, regulación transfronteriza y diplomacia científica.

Es de particular importancia aumentar la conciencia de la comunidad científica, los representantes de la atención médica y del público en general. Actualmente, la mayoría de las personas no es consciente del alcance del impacto de los micro y nanoplásticos (MNP) y continúa contribuyendo de manera inadvertida a su dispersión.

Por lo tanto, el problema de los micro y nanoplásticos ha dejado de ser una amenaza potencial y se ha convertido en un factor de riesgo sistémico. Esta cuestión requiere una atención prioritaria por parte de la comunidad científica y de las autoridades sanitarias, la sistematización de datos, el desarrollo de estándares para la evaluación de riesgos y la ampliación de la cooperación interestatal e internacional. Para desarrollar soluciones efectivas que garanticen la seguridad biológica a corto y largo plazo, es necesario un enfoque interdisciplinario, el reconocimiento institucional y la consolidación internacional de los esfuerzos.

## EL FACTOR X. IMPACTO DE LOS MICRO Y NANOPLÁSTICOS EN LA DINÁMICA DEL CICLO DE DESASTRES NATURALES

Como ya se mencionó en el capítulo “Impacto de los micro y nanoplásticos (MNP) en el clima”, las partículas de micro y nanoplásticos reducen la conductividad térmica de las aguas oceánicas, lo que provoca la acumulación de calor en los océanos y, en consecuencia, un aumento crítico de la temperatura oceánica. Sin embargo, los micro y nanoplásticos no son en sí mismos una fuente directa de calentamiento de los océanos.

Desde la primavera de 2023 y durante más de un año, la temperatura media de la superficie del océano mundial ha seguido estableciendo nuevos récords diarios, un fenómeno nunca antes observado (Fig. 128). Científicos de todo el mundo expresan gran preocupación por este calentamiento anómalo.

66

El doctor Brian McNoldy, investigador senior en la Rosenstiel School of Marine, Atmospheric, and Earth Science de la Universidad de Miami, señala: *“No se trata simplemente de los récords de temperatura de los océanos, que se han observado durante todo un año, sino de la magnitud con la que estos nuevos récords superan a los anteriores. Los valores actuales no son ni remotamente comparables con los récords anteriores”*<sup>320</sup>.

66

Esta preocupación también es compartida por el doctor Rob Larter, geofísico marino británico, quien afirma: *“Esto es realmente preocupante, también porque no escucho a ningún científico que haya dado una explicación convincente sobre por qué se está observando un desvío tan fuerte. Pero ahora parece que todo está evolucionando mucho más rápido e intensamente de lo que esperábamos”*<sup>321</sup>.

Según las investigaciones climáticas, los modelos actuales prevén un aumento gradual de la temperatura de la superficie oceánica, pero la velocidad observada de este proceso supera con creces todas las previsiones.

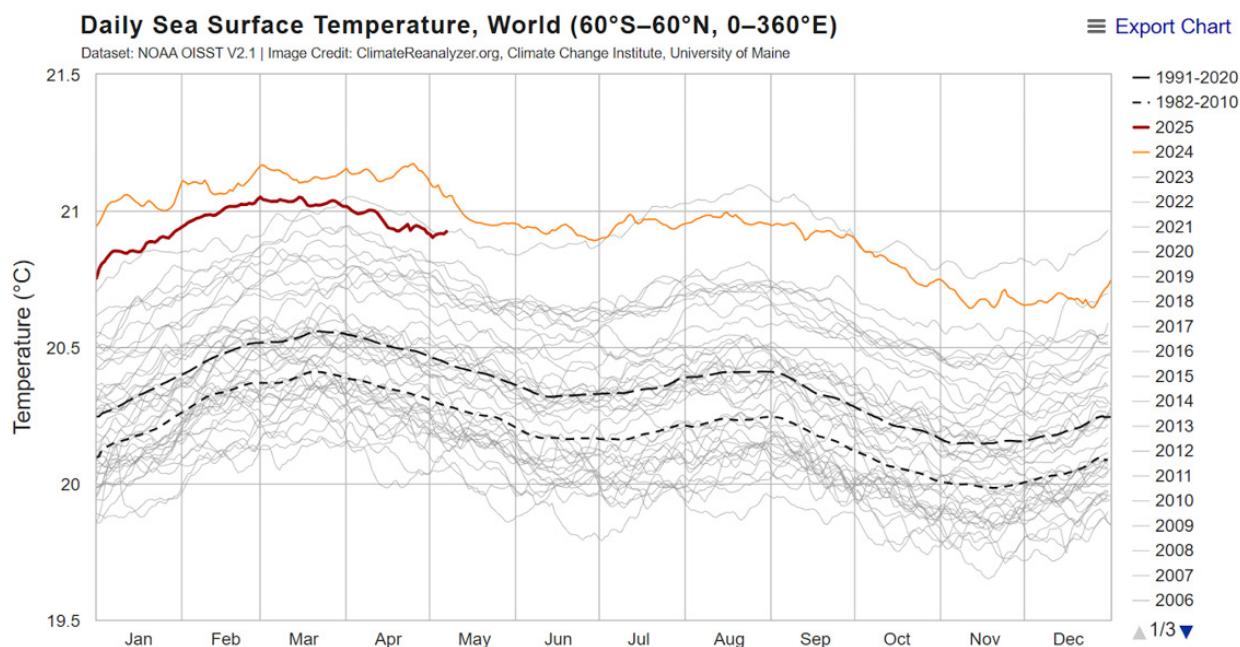
Los científicos consideran que el cambio climático causado por el ser humano desempeña un cierto papel, pero no puede, por sí solo, explicar el fenómeno en curso.

<sup>320</sup>NBC News. '12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned'. (2024)  
<https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179>

<sup>321</sup>The New York Times. Scientists are freaking out about ocean temperatures. (2024)  
<https://www.nytimes.com/2024/02/27/climate/scientists-are-freaking-out-about-ocean-temperatures.html> (Acceso: 1 de mayo 2025).

El profesor John Abraham, de la Universidad de Saint Thomas, quien estudia la temperatura del océano, ha planteado la hipótesis de la existencia de factores previamente desconocidos que podrían estar influyendo en los cambios a largo plazo de la temperatura de la superficie oceánica<sup>320</sup>. Ha señalado que estos factores no se habían tenido en cuenta en las previsiones anteriores.

Los autores de este informe plantean la hipótesis de la existencia de un "factor X" que podría ser responsable del calentamiento adicional del océano y de la atmósfera.



**Figura 128:** Temperatura media diaria de la superficie oceánica, 1981–2025.

Fuente de datos: Dataset NOAA OISST V2.1 | Fuente de la imagen: [ClimateReanalyzer.org](https://climatereanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2), Climate Change Institute, University of Maine, Dataset NOAA OISST. [https://climatereanalyzer.org/clim/sst\\_daily/?dm\\_id=world2](https://climatereanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2)

<sup>320</sup>NBC News. '12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned'. (2024)  
<https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179>

## ¿Podrían los micro y nanoplásticos en el océano ser el factor X no identificado?

Analizando la posibilidad de que sean precisamente los micro y nanoplásticos la causa principal del actual calentamiento de los océanos, nos enfrentamos a una seria contradicción. Es cierto que los nanoplásticos reducen la capacidad del océano para disipar el calor; sin embargo, no generan energía térmica: simplemente obstaculizan su dispersión.

En los últimos 60 años, las capas oceánicas profundas se han calentado 15 veces más rápido que en los anteriores 10 000 años<sup>322,323</sup>, y este proceso continúa acelerándose. Esta progresión aumenta cada año con mayor rapidez. Se requiere una enorme cantidad de energía para calentar las profundidades oceánicas, donde los rayos solares ya no alcanzan<sup>324,325</sup>.

A su vez, la entrada masiva de micro- y nanoplásticos en los océanos comenzó relativamente hace poco —hace unos 30 años—, mientras que la aceleración del calentamiento de las profundidades oceánicas se observa desde hace más de 60 años. Por lo tanto, la contribución del plástico no puede explicar una tendencia de calentamiento a largo plazo y creciente, iniciada mucho antes de la aparición significativa de estos contaminantes en el océano.

Tampoco la radiación solar puede explicar este calentamiento, ya que los rayos solares penetran solo hasta unos 200 metros de profundidad. El agua puede ser calentada por el Sol hasta un máximo de 700 metros, pero solo gracias a fenómenos de mezcla vertical<sup>326</sup>.

Para calentar las capas profundas del océano —aquellas donde la luz solar no penetra— se necesita una cantidad colosal de energía. Esto indica que el calor acumulado debe provenir de una fuente diferente, mientras que la presencia de nanoplásticos contribuye a "atrapar" este calor dentro del océano.

Dado que el calentamiento solar no logra explicar el crecimiento exponencial de las temperaturas oceánicas, se ha planteado la hipótesis de la existencia de fuentes de calor adicionales en diversas regiones de los océanos.

## Distribución vertical de las anomalías térmicas

El análisis de los datos del sistema Argo sobre las variaciones globales de la temperatura a diferentes profundidades en las últimas dos décadas ha revelado una serie de anomalías térmicas que no son

<sup>322</sup>Rosenthal, Y. et al. Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science* 342, 617–621 (2013). <https://doi.org/10.1126/science.1240837>

<sup>323</sup>Columbia Climate School. 'Is Global Heating Hiding Out in the Oceans?'. (2013) <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Acceso: 10 de mayo 2025).

<sup>324</sup>NOAA Ocean Service. 'How far does light travel in the ocean?'. (n.d.) [https://oceanservice.noaa.gov/facts/light\\_travel.html](https://oceanservice.noaa.gov/facts/light_travel.html) (Acceso: 10 de mayo 2025).

<sup>325</sup>NOAA Ocean Exploration. 'Marine Life'. (n.d.) <https://oceanelinker.noaa.gov/explainers/marine-life.html> (Acceso: 10 de mayo 2025).

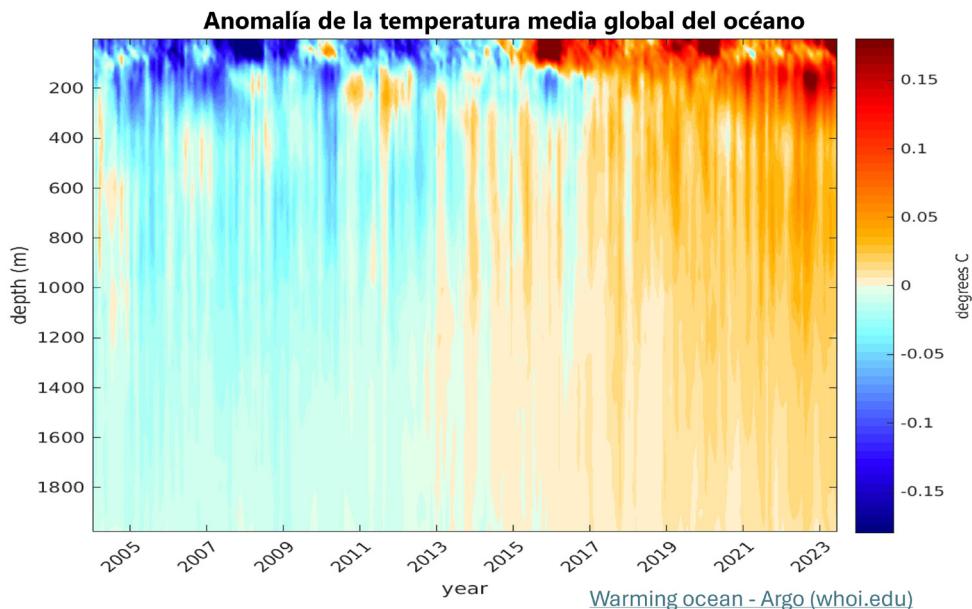
<sup>326</sup>Climate.gov. 'The role of the ocean in tempering global warming'. (2014)

<https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/role-ocean-tempering-global-warming> (Acceso: 10 de mayo 2025).

coherentes con el modelo tradicional de transmisión de calor descendente desde la superficie hacia las capas profundas del océano<sup>327,328</sup>.

Se han registrado casos estadísticamente significativos de inversión del gradiente térmico, en los que masas de agua más cálidas se encuentran por debajo de capas superficiales relativamente más frías (Fig. 129). Una estratificación de temperaturas de este tipo es físicamente imposible en el caso de una transferencia de calor exclusivamente descendente desde la superficie, ya que la energía térmica no puede atravesar una capa intermedia fría de arriba hacia abajo, según las leyes de la física.

**Los datos de ARGO muestran variaciones de temperatura a diversas profundidades durante los últimos 20 años**



**Figura 129:** Anomalías globales de la temperatura del océano a profundidades entre 0 y 1900 m desde 2004  
Fuente: Argo <https://www2.whoi.edu/site/argo/impacts/warming-ocean/>

Nuevas investigaciones realizadas por científicos de la Universidad Oceanográfica de China<sup>329</sup> confirman la presencia de anomalías térmicas en las masas de agua que no se manifiestan en la superficie del océano. Los estudios demostraron que un tercio de las olas de calor marinas no se manifiestan en absoluto en la superficie, mientras que aproximadamente la mitad no se manifiestan en todas las fases de su ciclo vital. El número anual de estas olas de calor submarinas ha aumentado significativamente debido al calentamiento oceánico en los últimos tres decenios. El hecho de que una parte relevante de las olas de calor marinas no sea detectable en la superficie indica claramente que no pueden ser causadas por el calor atmosférico.

<sup>327</sup>Johnson, Gregory C., et al. "Argo-Two Decades: Global Oceanography, Revolutionized." *Annual Review of Marine Science*, vol. 14, 2022, pp. 379–403. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-022521-102008>.

<sup>328</sup>Wong, Annie P. S., et al. "Argo Data 1999–2019: Two Million Temperature-Salinity Profiles and Subsurface Velocity Observations From a Global Array of Profiling Floats." *Frontiers in Marine Science*, vol. 7, 2020, article 700. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00700>.

<sup>329</sup>Sun, D., Li, F., Jing, Z., Hu, S., & Zhang, B. (2023). Frequent marine heatwaves hidden below the surface of the global ocean. *Nature Geoscience*, 16(12), 1099–1104. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01325-w>

## Estudio de las fuentes de calentamiento en el fondo oceánico

Las investigaciones y el monitoreo regular de la temperatura en el fondo oceánico son hoy extremadamente raros y limitados. Durante mucho tiempo, la ciencia no se propuso observar los cambios precisamente a estas profundidades. Los sistemas modernos de monitoreo, como la red de boyas ARGO, permiten recopilar datos de apenas el 0,03 % de la superficie oceánica, y la mayoría de las boyas se sumergen solo hasta la mitad de la profundidad media, sin alcanzar el fondo oceánico propiamente dicho<sup>330</sup>.

La humanidad ha explorado realmente solo alrededor del 3–3,5 % de la superficie del fondo oceánico<sup>331</sup>. Esto se debe a varias razones importantes. En primer lugar, la mayor parte del Océano Mundial se encuentra a profundidades comprendidas entre 3000 y 6000 metros. La creación de vehículos submarinos capaces de resistir la presión extrema de tales profundidades requiere enormes recursos tecnológicos y financieros. En segundo lugar, las propias expediciones son sumamente complejas y costosas: en toda la historia solo se han construido ocho vehículos especializados para este tipo de exploración. Por este motivo, hoy conocemos ciertos aspectos del espacio más a fondo que los rincones más remotos del Océano Mundial.

Al mismo tiempo, se hace cada vez más evidente que los procesos geológicos en el fondo oceánico pueden desempeñar un papel significativo en los cambios climáticos y en el equilibrio térmico de los océanos. En el fondo marino se encuentran millones de estructuras geológicas únicas — volcanes, fallas y fuentes hidrotermales — que poseen una enorme cantidad de energía. Sin embargo, debido a su difícil accesibilidad y a un monitoreo insuficiente, el alcance de su potencial impacto sigue siendo en gran parte un misterio para la ciencia.

A pesar de ello, algunas investigaciones sobre el fondo oceánico se realizan, y numerosos estudios indican un calentamiento de las aguas oceánicas a nivel del fondo.

Así, en dos profundas áreas de la Cuenca Argentina<sup>332</sup>, a profundidades superiores a los 4500 metros, se han observado tendencias significativas de calentamiento:  $0,02\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$  por década en el período 2009–2019. Se trata de una cantidad colosal de energía necesaria para calentar tal volumen de agua fría en el fondo oceánico.

Justo frente a las costas de la Antártida Occidental se registra un calentamiento anómalo de las aguas profundas del Mar de Weddell<sup>333</sup>. Mientras que los primeros 700 metros de agua muestran un calentamiento mínimo, en las regiones más profundas se observa un aumento constante de la temperatura. Por un lado, el Mar de Weddell está delimitado por la fractura de la Antártida Occidental; por otro lado, está flanqueado por una dorsal volcánica submarina que incluye las islas Sandwich del Sur.

<sup>330</sup>Argo Program. 'Mission'. (n.d.) <https://argo.ucsd.edu/about/mission/> (Acceso: 10 de mayo 2025).

<sup>331</sup>Bell, Katherine L. C., et al. "How Little We've Seen: A Visual Coverage Estimate of the Deep Seafloor." *Science Advances*, vol. 11, no. 19, 2025, eadp8602.

<https://doi.org/10.1126/sciadv.adp8602>.

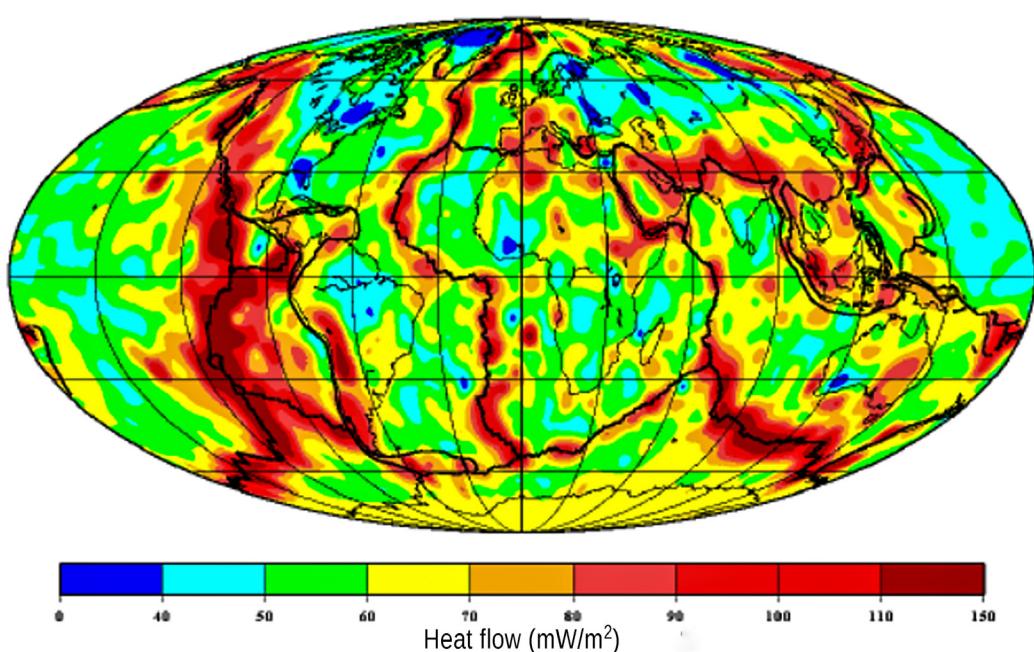
<sup>332</sup>Meinen, C. S., Perez, R. C., Dong, S., Piola, A. R. & Campos, E. Observed Ocean Bottom Temperature Variability at Four Sites in the Northwestern Argentine Basin: Evidence of Decadal Deep/Abyssal Warming Amidst Hourly to Interannual Variability During 2009–2019. *Geophysical Research Letters* 47, e2020GL089093 (2020). <https://doi.org/10.1029/2020GL089093>

<sup>333</sup>Strass, V. H., Rohardt, G., Kanzow, T., Hoppema, M. & Boebel, O. Multidecadal warming and density loss in the Deep Weddell Sea, Antarctica. *Journal of Climate* 33, 9863–9881 (2020). <https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0271.1>

## El papel del flujo de calor geotérmico, los procesos tectónicos y las erupciones volcánicas en el fondo oceánico

En el contexto de las anomalías observadas en el calentamiento de las capas profundas de los océanos, donde la influencia de la atmósfera es mínima, resulta lógico considerar el flujo de calor geotérmico proveniente de las profundidades de la Tierra como una posible fuente adicional de energía térmica. Tradicionalmente, en los modelos climáticos, el flujo geotérmico desde abajo se considera constante y aproximadamente igual a  $0,09 \text{ W/m}^2$  (es decir,  $90 \text{ mW/m}^2$ )<sup>334</sup>, un valor de varias órdenes de magnitud inferior al flujo solar<sup>335,336</sup>.

Sin embargo, un número creciente de datos científicos indica que esta fuente de calor, hasta ahora subestimada, podría tener un papel más relevante. Amplias investigaciones geotérmicas han demostrado que el flujo de calor a través del fondo oceánico depende de la edad de la corteza oceánica: es máximo en las zonas jóvenes de expansión oceánica y mínimo en las cuencas oceánicas más antiguas<sup>337</sup> (Fig. 130). Estas anomalías locales pueden influir en la estructura vertical de la temperatura del agua, debilitar el termoclino y favorecer el remezclado de las masas de agua, con impactos en la circulación, en la productividad biológica e incluso en la estabilidad de los glaciares en las regiones polares.



**Figura 130:** Representación global del flujo de calor basada en datos observacionales, complementada con estimaciones derivadas de mapas digitales y correlación empírica con la edad.

Ilustración tomada del artículo: Vieira F., Hamza V. M. Global Heat Flow: New Estimates Using Digital Maps and GIS Techniques // International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applied Geothermics. 2018. Vol. 1, n. 1. pp. 6–13.

<sup>334</sup>Pollack, H. N., Hurter, S. J. & Johnson, J. R. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. Rev. Geophys. 31, 267–280 (1993).

<https://doi.org/10.1029/93RG01249>

<sup>335</sup>Kopp, G. & Lean, J. L. A New, Lower Value of Total Solar Irradiance: Evidence and Climate Significance. Geophysical Research Letters 38, L01706 (2011).

<https://doi.org/10.1029/2010GL045777>

<sup>336</sup>World Energy Council. World Energy Resources: Solar 2013. (2013) <https://www.worldenergy.org/publications> (Acceso: 10 de mayo 2025).

<sup>337</sup>Khutorskoy, M. D., y Polyak, B. G. (2014). Otrazhenie kontrastnykh geodinamicheskikh obstanovok v teplovom pole [Manifestación de entornos geodinámicos contrastantes en el campo térmico]. Georesursy, (2), 24–43.

*El flujo geotérmico es la cantidad de energía térmica que proviene del interior de la Tierra y atraviesa una unidad de superficie en una unidad de tiempo, medida en miliavatios por metro cuadrado ( $\text{mW/m}^2$ ).*

Mientras que la energía media del flujo geotérmico para los continentes es de 40-60  $\text{mW/m}^2$  y para el fondo oceánico es de aproximadamente 100  $\text{mW/m}^2$ , en algunas regiones se registran valores que superan varias veces estos niveles. Los valores más extremos de flujo geotérmico se han detectado en zonas tectónica y volcánicamente activas: por ejemplo, en las dorsales mediooceánicas y en áreas de fractura activas, el flujo puede superar los 200–1000  $\text{mW/m}^2$ <sup>338</sup>.

Un flujo térmico particularmente elevado se observa en las zonas de campos hidrotermales – áreas donde fluidos calientes emergen del fondo oceánico, calentando el agua hasta temperaturas de 350–400 °C. Estos sistemas forman ecosistemas únicos y generan anomalías locales en el flujo de calor que influyen significativamente en el régimen térmico de las aguas del fondo.

La principal zona bien estudiada de alto flujo geotérmico en el fondo oceánico está representada por las dorsales mediooceánicas – áreas donde las placas litosféricas se separan entre sí y donde ocurre la formación activa de la nueva corteza oceánica. Este sistema global de dorsales submarinas tiene una longitud total de aproximadamente 60 000 kilómetros<sup>339</sup>, rodeando el planeta como las costuras de una pelota de béisbol. Las dorsales mediooceánicas se caracterizan por una alta concentración de fuentes hidrotermales, volcanes submarinos y fallas activas, a través de las cuales una cantidad significativa de energía térmica proveniente del manto terrestre se libera en el océano<sup>340</sup>.

El flujo geotérmico en estas zonas supera de 10 a 100 veces los valores medios del resto del fondo oceánico<sup>330</sup>, convirtiéndolas en áreas clave para el intercambio de calor entre las capas internas de la Tierra y el Océano Global.

El profesor Arthur Viterito, de la Universidad de Maryland, ha detectado un aumento en el número de terremotos en el fondo oceánico a lo largo de las dorsales mediooceánicas desde 1995<sup>341</sup> (Fig.131). Con un coeficiente de correlación de 0,7, este aumento corresponde al incremento de las temperaturas globales. Además, el aumento de la temperatura ocurre con un retraso de dos años respecto al incremento de la actividad sísmica. El aumento de la actividad sísmica en estas zonas está relacionado con el ascenso del magma, que forma una nueva corteza oceánica.

<sup>338</sup>Polyak B. G., & Khutorskoy M. D. (2018). Teplovoy potok iz nedr – indikator glubinnykh protsessov [Flujo de calor desde las profundidades: un indicador de los procesos internos]. Georesursy, 20(4), Ch. 2, 366–376. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.366-376>

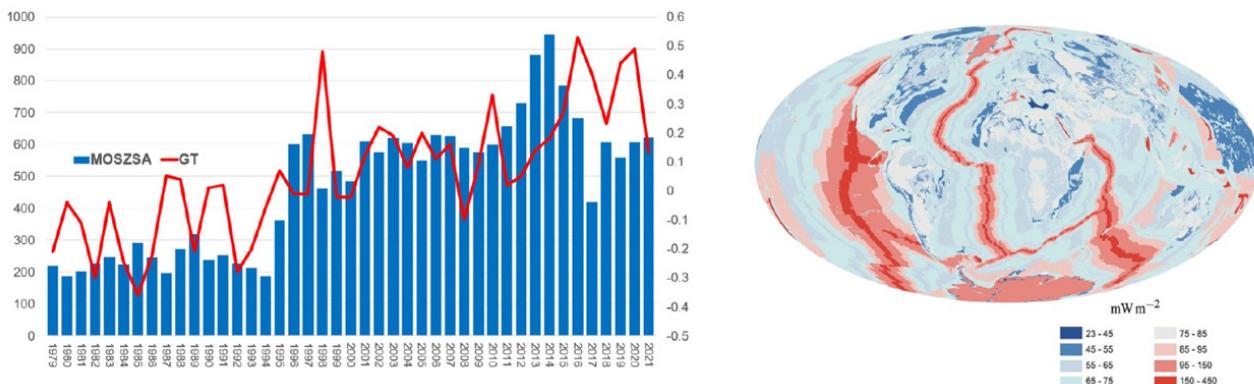
<sup>339</sup>LaFemina, P. C. Plate Tectonics and Volcanism. in The Encyclopedia of Volcanoes (ed. Sigurdsson, H.) 65–92 (Academic Press, 2015).  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00003-1>

<sup>340</sup>Baker, E. T. & German, C. R. On the Global Distribution of Hydrothermal Vent Fields. in Mid-Ocean Ridges: Hydrothermal Interactions Between the Lithosphere and Oceans (eds German, C. R., Lin, J. & Parson, L. M.) 245–266 (American Geophysical Union, 2004).

<sup>330</sup>Argo Program. 'Mission'. (n.d.) <https://argo.ucsd.edu/about/mission/> (Acceso: 10 de mayo 2025).

<sup>341</sup>Viterito, A. 1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History. Int. J. Environ. Sci. Nat. Res. 29, 556271 (2022).  
<https://doi.org/10.19080/IJESNR.2022.29.556271>

### Aumento del número de terremotos en el fondo oceánico a lo largo de las dorsales mediooceánicas



**Figura 131:** Crecimiento simultáneo del número de terremotos submarinos con magnitud 4,0–6,0 y de las temperaturas atmosféricas globales.

Fuente: Viterito, A. (2022). 1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History. International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources, 29(5). <https://doi.org/10.19080/ijesnr.2022.29.556271>

Aunque no existen mediciones directas del volumen de magma ascendente, la red global de monitoreo sísmico permite estimar indirectamente la magnitud de estos procesos basándose en el número y la intensidad de los eventos sísmicos, que aumentan independientemente de la cantidad de datos recolectados. Según la hipótesis de Viterito, la actividad sísmica y volcánica a lo largo de las dorsales oceánicas provoca un aumento de las emisiones hidrotermales y el calentamiento de las aguas, lo que a su vez contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero y al calentamiento de la atmósfera. Viterito concluye, por tanto, que los océanos se calientan no solo desde arriba, sino también desde abajo, debido a los procesos geológicos.

El vulcanismo submarino también puede desempeñar un papel importante en la formación del régimen térmico del fondo oceánico. Los datos actuales indican que aproximadamente el 75 % de todas las erupciones volcánicas de la Tierra ocurren bajo el agua<sup>342</sup>. Anteriormente, se suponía que estas erupciones consistían principalmente en flujos de lava no explosivos, y que las erupciones explosivas eran imposibles debido a la presión de la columna de agua. Por lo tanto, se creía que los volcanes submarinos no podían calentar las aguas profundas, ya que la lava emergente se solidificaba casi instantáneamente. Sin embargo, investigaciones recientes han cambiado esta comprensión del mecanismo de las erupciones volcánicas submarinas.

La presión del magma varía entre 10 000 y 30 000 bares, mientras que la presión de la columna de agua en las partes más profundas del océano es de solo 1000 bares. Cuando el magma irrumpie, se produce una ebullición instantánea del agua con la disociación de las moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$ , lo que da lugar a una cavidad de vapor y agua con presiones de cientos o miles de bares<sup>343</sup>, lo que provoca erupciones explosivas de gran intensidad.

<sup>342</sup>Crisp, J. A. Rates of magma emplacement and volcanic output. *J. Volc. Geotherm. Res.* 20, 177–211 (1984). [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(84\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90039-8)

<sup>343</sup>Lyons, J. J., Haney, M. M., Fee, D. et al. Infrasound from giant bubbles during explosive submarine eruptions. *Nat. Geosci.* 12, 952–958 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0461-0>

Estas erupciones van acompañadas de la liberación de tefra e hidrotermia: gigantescas columnas de agua sobre calentada, cuyo volumen puede equivaler a 40 millones de piscinas olímpicas. Tales emisiones pueden comprometer el equilibrio térmico del océano no solo a nivel local, sino también global.

Las investigaciones realizadas por la Universidad de Leeds han identificado campos de tefra volcánica que se extienden por kilómetros en el fondo del Océano Pacífico<sup>344</sup>, confirmando la existencia de potentes erupciones submarinas explosivas. Una única erupción de este tipo puede generar una potencia térmica del orden de 1 teravatio, equivalente al doble del consumo energético de los Estados Unidos.

## 66

El aporte de las erupciones explosivas al calentamiento oceánico también está confirmado por el profesor Bernd Zimanowski, de la Universidad Julius-Maximilian en Baviera<sup>345</sup>:

*“Durante las erupciones submarinas efusivas, el calor de la lava se transfiere al agua de manera relativamente lenta. Sin embargo, durante las erupciones explosivas, el magma se fragmenta en partículas diminutas. Esto puede producir impulsos térmicos tan intensos que alteran las corrientes de equilibrio térmico en los océanos, tanto a nivel local como global”.*

Según las estimaciones actuales, el número de formaciones hidrotermales submarinas activas varía entre 100 000 y 10 000 000<sup>346,347</sup>, lo que indica que la contribución de la actividad hidrotermal al balance térmico de los océanos podría estar significativamente subestimada. Las erupciones explosivas de magma generan potentes impulsos térmicos capaces de alterar las corrientes térmicas oceánicas a nivel local. Sin embargo, considerando las dimensiones del océano, incluso estas erupciones submarinas muy intensas no son suficientes para calentar el océano en su conjunto. Los volcanes no están distribuidos de manera uniforme, sus erupciones son episódicas y su energía no es suficiente para calentar todo el océano. No obstante, puede ser suficiente para generar olas de calor localizadas en el océano.

Un ejemplo específico de estas anomalías térmicas locales son las olas de calor marinas, es decir, áreas de agua oceánica local y persistentemente calentadas. Otro nombre con el que se conocen es “blob”, es decir, enormes áreas de agua superficial con temperaturas anormalmente elevadas. Desde 1995, el número de blobs ha aumentado significativamente<sup>348</sup> y estos fenómenos ocurren con mayor frecuencia en diversas partes del océano mundial, incluyendo las costas de Nueva Zelanda, el suroeste de África y la parte meridional del Océano Índico.

<sup>344</sup>Pegler, S.S., Ferguson, D.J. Rapid heat discharge during deep-sea eruptions generates megaplumes and disperses tephra. *Nat Commun* 12, 2292 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22439-y>

<sup>345</sup>Dürig, T., White, J.D.L., Murch, A.P. et al. Deep-sea eruptions boosted by induced fuel-coolant explosions. *Nat. Geosci.* 13, 498–503 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0603-4>

<sup>346</sup>Baker, E. T. et al. How many vent fields? New estimates of vent field populations on ocean ridges from precise mapping of hydrothermal discharge locations. *Earth Planet. Sci. Lett.* 449, 186–196 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.05.031>

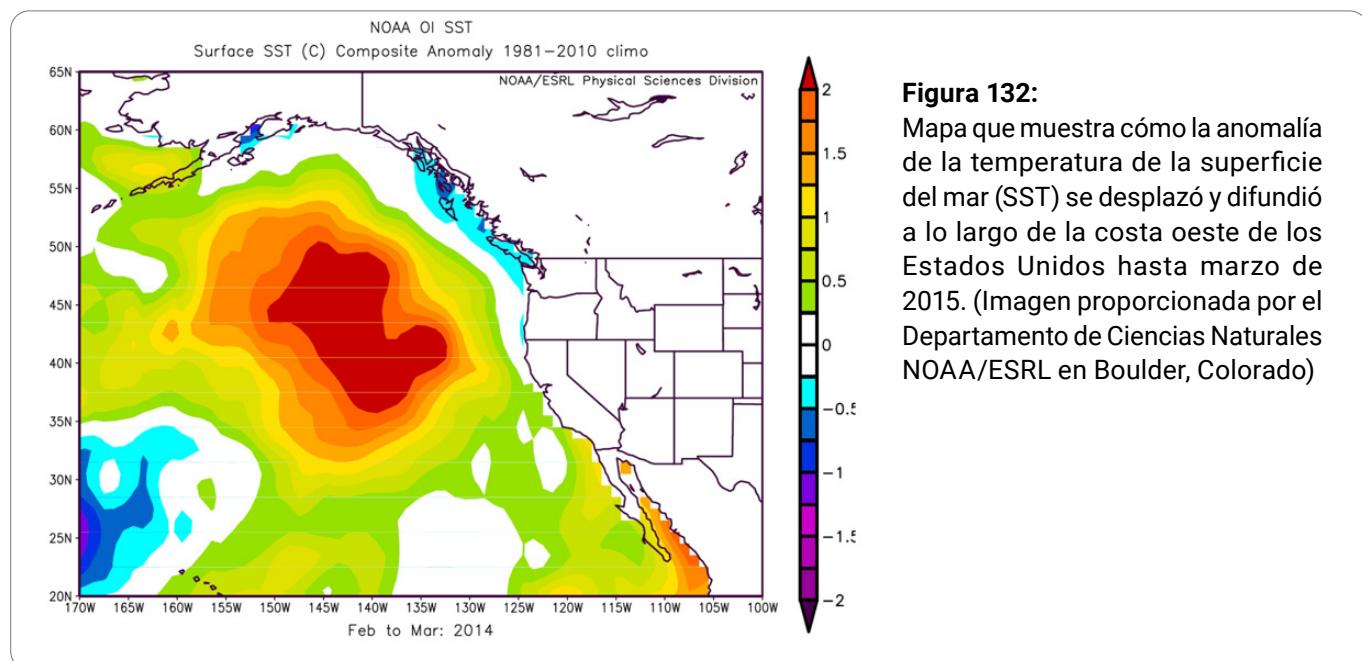
<sup>347</sup>Science News Explores. Seafloor hosts surprising number of deep-sea vents. (2016)

<https://www.sciencedaily.com/article/seafloor-hosts-surprising-number-deep-sea-vents> (Acceso: 10 de mayo 2025).

<sup>348</sup>Laufkötter, C., Zscheischler, J. & Frölicher, T. L. High-impact marine heatwaves attributable to human-induced global warming. *Science* 369, 1621–1625 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aba0690>

Uno de los blobs marinos más conocidos y extensos se formó en el Golfo de Alaska en 2013 y se extendió rápidamente a través del Océano Pacífico. Su superficie superó los 4 000 000 km<sup>2</sup> (más que toda la India), y en algunos puntos la temperatura del agua superó en 5–6 °C la media climatológica (Fig. 132). El blob se desplazó a lo largo del océano, desde Alaska hasta México, durante un período de tres años, hasta 2016. Este fenómeno tuvo un impacto negativo en los ecosistemas marinos y en el clima regional.

La causa de la formación de este blob probablemente esté vinculada al vulcanismo activo a lo largo de la costa de Alaska y a la pluma magnética Cobb<sup>349</sup>, que calentó el agua en el fondo oceánico, impulsándola hacia la superficie en grandes cantidades.

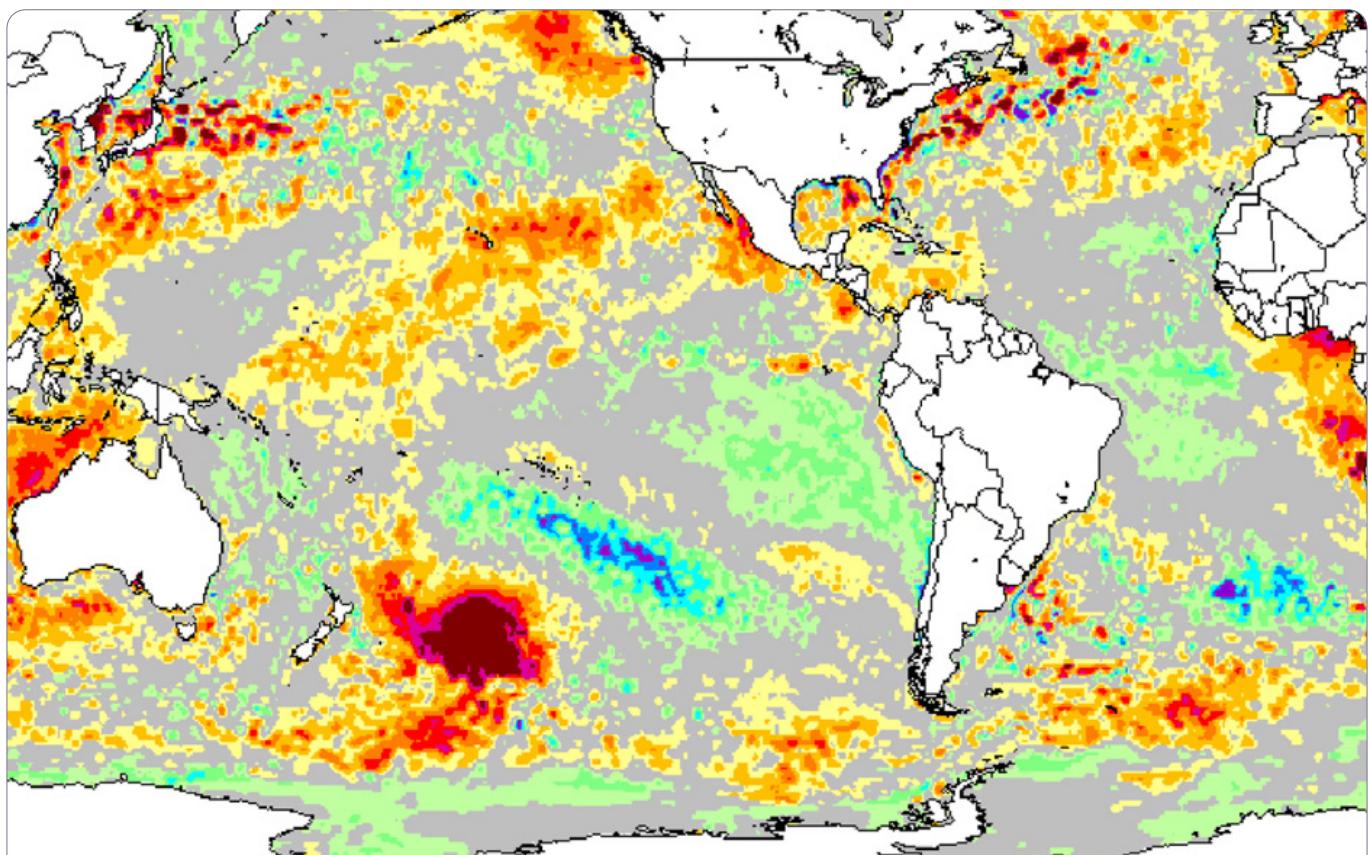


Al este de Nueva Zelanda, en la parte sur del Océano Pacífico, en diciembre de 2019 se formó un blob marino con temperaturas que en algunos días superaron en 6 °C la media. Este blob alcanzó una superficie de más de 1 000 000 km<sup>2</sup>, lo que equivale a 1,5 veces el tamaño de Texas o a 4 veces el de Nueva Zelanda (Fig. 133). En el momento de su aparición, fue reportado como el blob oceánico más grande a nivel mundial. Además, se trató del segundo evento más extenso jamás registrado en la región.

<sup>349</sup>Chadwick, J., Keller, R., Kamenov, G., Yogodzinski, G. & Lupton, J. The Cobb hot spot: HIMU-DMM mixing and melting controlled by a progressively thinning lithospheric lid. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 15, 3107–3122 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014gc005334>

66

James Renwick, profesor de geografía, ecología y ciencias de la Tierra en la Universidad Victoria de Wellington, declaró: *"Es la zona de calentamiento anómalo más grande del planeta. Normalmente, la temperatura del agua en esa zona es de alrededor de 15 °C, mientras que ahora ronda los 20 °C"*<sup>350</sup>.



**Figura 133:** Anomalía de la temperatura de la superficie del mar en la parte sur del Océano Pacífico el 25 de diciembre de 2019.

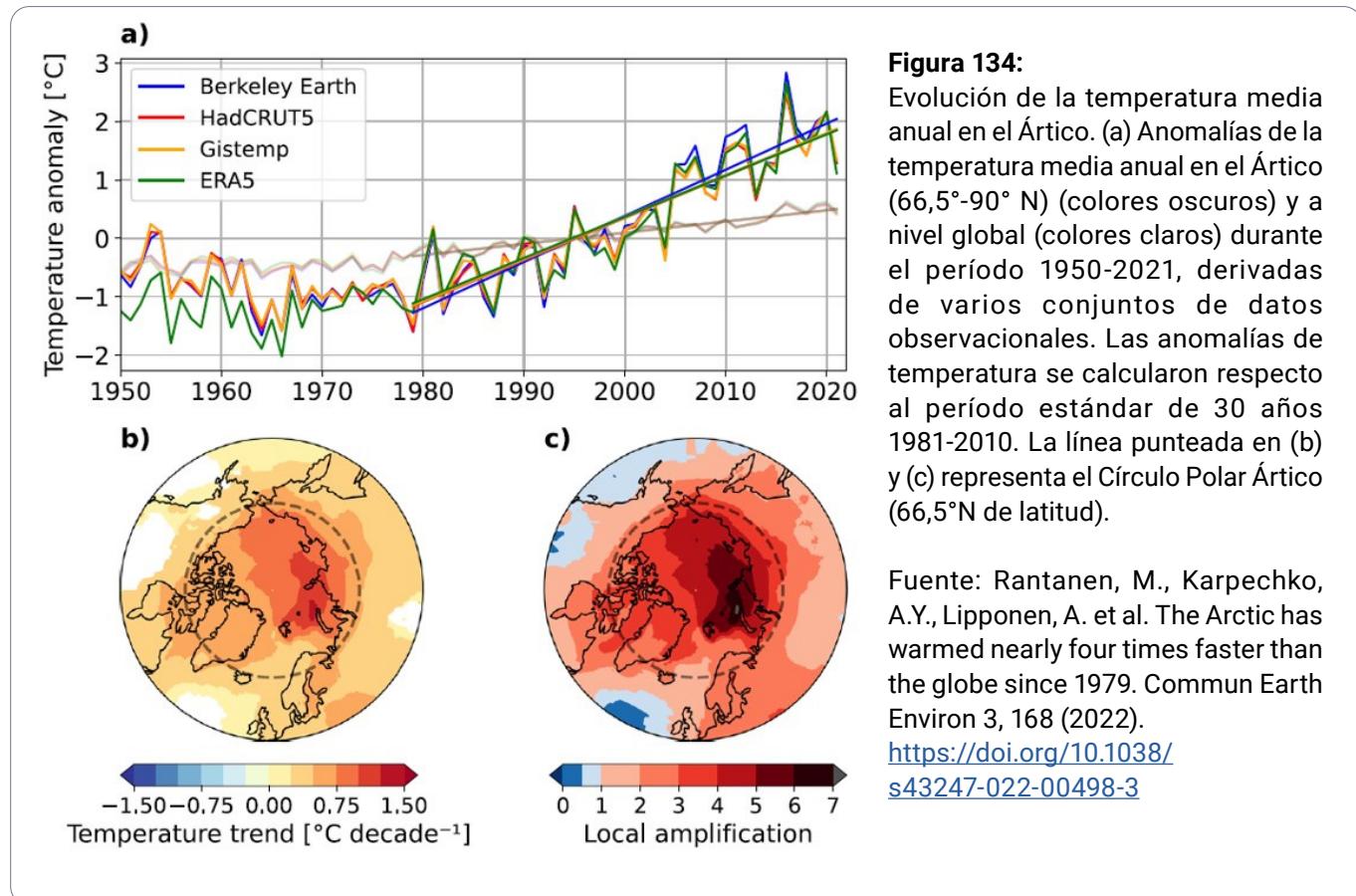
Fuente: The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists. (2019) <https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists> (acceso: 11 de mayo de 2025).

La probabilidad de que la formación de este blob esté vinculada a la actividad del antiguo altiplano volcánico frente a la costa de Nueva Zelanda es alta<sup>351</sup>.

<sup>350</sup>The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists. (2019) <https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists> (Accesso: 10 de mayo 2025).

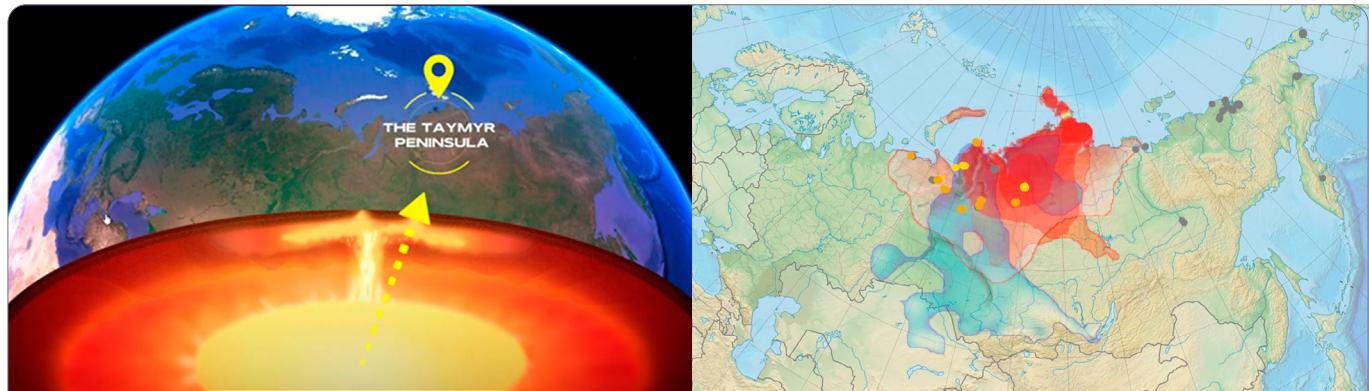
<sup>351</sup>Gase, A. et al. Subducting volcaniclastic-rich upper crust supplies fluids for shallow megathrust and slow slip. Sci. Adv. 9, eadh0150 (2023). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh0150>

Otro ejemplo significativo del impacto del calor geotérmico derivado de procesos magmáticos en el calentamiento oceánico son las anomalías térmicas registradas en los mares árticos a lo largo de la costa siberiana. Un estudio de 2022 revela que el Ártico Siberiano se está calentando casi cuatro veces más rápido que el promedio global, un ritmo considerablemente mayor al previsto por los modelos climáticos anteriores, sorprendiendo a numerosos científicos<sup>352</sup> (Fig.134).



Justo en esta región del planeta, en la zona de la península de Taymyr, los científicos han observado la reactivación de la pluma magmática Siberiana que ahora está ascendiendo rápidamente en la misma área donde, hace aproximadamente 250 millones de años, erupcionaron los enormes Traps Siberianos. Todos los indicios apuntan a que hoy la cabeza de la pluma está erosionando activamente el cráter de Siberia Oriental, y que el magma se está difundiendo bajo toda su superficie (Fig.135). Según estimaciones preliminares, el área de difusión de los flujos magmáticos bajo Siberia podría alcanzar un diámetro de 2500–3000 km, equivalente a la superficie de Australia.

<sup>352</sup>Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lippinen, A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. Commun Earth Environ 3, 168 (2022).  
<https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>



**Figura 135:** Localización de la pluma magmática basada en los resultados de diversos estudios.

Es importante subrayar que el calentamiento tan intenso de los mares árticos ocurre precisamente en la zona de la península de Taimyr. Esta anomalía en la zona acuática de Siberia puede explicarse por el hecho de que la corteza oceánica es más delgada y conduce el calor más rápidamente, mientras que el agua tiene una capacidad térmica mayor que la atmósfera. Por esta razón, es el agua oceánica la que acumula y retiene intensamente el calor proveniente de la pluma magmática ascendente, a pesar de que este ascenso ocurre bajo la corteza continental y a cierta distancia de la costa.



Para profundizar en la información sobre la pluma magmática Siberiana, su impacto en el sistema climático, los riesgos asociados a esta estructura geológica y las posibles soluciones, se remite al documento:

**"SOBRE LA AMENAZA DE UNA ERUPCIÓN  
DE LA PLUMA MAGMÁTICA EN SIBERIA Y  
ESTRATEGIAS PARA ABORDAR EL PROBLEMA"**

El conjunto de todos estos datos indica que los procesos geológicos en el fondo oceánico representan un factor significativo para el calentamiento global. El aumento de la actividad sísmica y volcánica en el fondo del océano, correlacionado con el crecimiento de las temperaturas globales, sugiere una posible relación causal. Las erupciones submarinas, especialmente las explosivas, pueden generar potentes impulsos térmicos que alteran el equilibrio térmico tanto a nivel local como global.

Los sistemas hidrotermales y los procesos volcánicos crean anomalías a gran escala, como los llamados blobs, que influyen notablemente en los ecosistemas oceánicos y el clima, mientras que los procesos magmáticos son responsables de un calentamiento anómalo de los mares árticos. Por lo tanto, el océano se calienta no solo desde arriba, bajo la influencia de la atmósfera, sino también desde abajo, debido a los procesos dinámicos que ocurren en las profundidades terrestres. Esto exige una revisión de los modelos climáticos actuales y un estudio más profundo de la actividad geológica submarina como componente importante del equilibrio térmico global del planeta.

Sin embargo, queda abierta una pregunta de fundamental importancia: ¿por qué es en este periodo histórico cuando se intensifican los procesos magmáticos y tectónicos en la Tierra?

## Breve descripción del modelo geodinámico de los cambios climáticos en la Tierra en el período actual

En los últimos 30 años, la Tierra ha experimentado un crecimiento sin precedentes no solo en los cambios climáticos, sino también en las anomalías en todas las capas del planeta y en sus parámetros geofísicos. Este crecimiento se está desarrollando de manera exponencial. Un análisis exhaustivo de los datos científicos muestra que la causa principal de estos cambios son los ciclos astronómicos que se repiten cada 12.000 años.

La hipótesis de la influencia de factores cósmicos está respaldada por cambios similares observados en otros planetas del Sistema Solar y en sus satélites, que ocurren simultáneamente con los procesos en la Tierra. Por ejemplo, en Urano<sup>353</sup>, Júpiter<sup>354</sup> y Venus<sup>355</sup> se registra un aumento en la velocidad de los vientos y una expansión de las zonas de huracanes. En Marte se observa el derretimiento de las capas polares<sup>356</sup>, mientras que la actividad volcánica en Venus<sup>357</sup> y Marte continúa aumentando<sup>358</sup>. Además, en Marte, un planeta considerado inactivo, se registra una intensificación de los "martemotos"<sup>359</sup>, indicando una actividad sísmica interna anómala.

Los cambios críticos en el sistema terrestre comenzaron a manifestarse a partir de 1995, año en que se detectaron importantes anomalías geofísicas, como la aceleración repentina de la rotación terrestre, el desplazamiento de su eje y el inicio de la deriva del Polo Norte magnético (Fig. 136).

<sup>353</sup>de Pater, I. et al. Record-breaking storm activity on Uranus in 2014. *Icarus* 252, 121-128 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.01.008>

<sup>354</sup>Wong, M. H. et al. Evolution of the Horizontal Winds in Jupiter's Great Red Spot From One Jovian Year of HST/WFC3 Maps. *Geophysical Research Letters* 48, e2021GL093982 (2021). <https://doi.org/10.1029/2021GL093982>

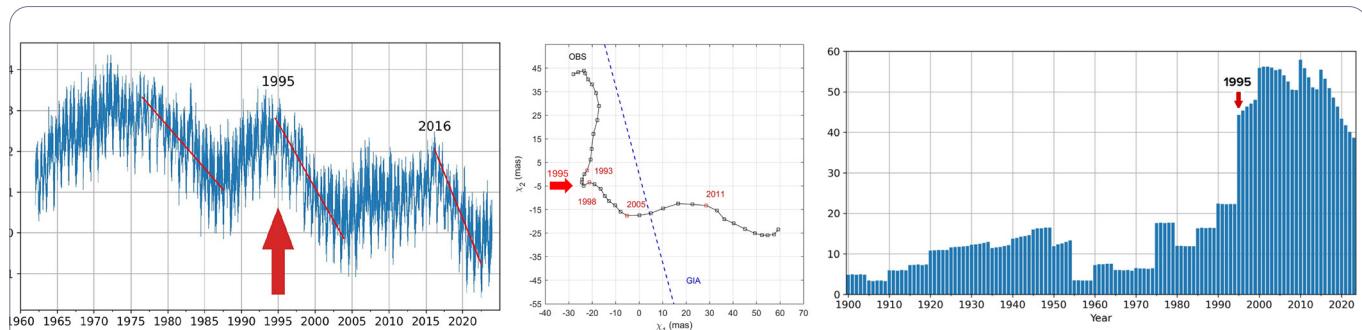
<sup>355</sup>Khatuntsev, I. V. et al. Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging. *Icarus* 226, 140–158 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.018>

<sup>356</sup>Sori, M. M. & Bramson, A. M. Water on Mars, With a Grain of Salt: Local Heat Anomalies Are Required for Basal Melting of Ice at the South Pole Today. *Geophysical Research Letters* 46, 1222–1231 (2019). <https://doi.org/10.1029/2018GL080985>

<sup>357</sup>Encrenaz, T. et al. HDO and SO<sub>2</sub> thermal mapping on Venus - IV. Statistical analysis of the SO<sub>2</sub> plumes. *A&A* 623, A70 (2019). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/20183511>

<sup>358</sup>Broquet, A. & Andrews-Hanna, J. C. Geophysical evidence for an active mantle plume underneath Elysium Planitia on Mars. *Nat Astron* (2022). doi:10.1038/s41550-022-01836-3 <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3>

<sup>359</sup>Fernando, B. et al. A Tectonic Origin for the Largest Marsquake Observed by InSight. *Geophysical Research Letters* 50, e2023GL103619 (2023). <https://doi.org/10.1029/2023GL103619>



Aceleración repentina y brusca de la rotación del planeta, registrada por el Centro de Orientación Terrestre del Observatorio de París.

Fuente: IERS IERS Earth Orientation Center of the Paris Observatory Day length – Earth orientation parameters: [https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plot-name=EOPC04\\_14\\_62-NOW\\_IAU1980-LOD&id=223](https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plot-name=EOPC04_14_62-NOW_IAU1980-LOD&id=223)

Cambios anómalos en el eje de rotación terrestre: la dirección de su desplazamiento ha cambiado bruscamente y la velocidad del movimiento ha aumentado 17 veces.

Fuente: Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes. Geophysical Research Letters, 48, e2020GL092114 (2021). <https://doi.org/10.1029/2020GL092114>

El movimiento del Polo Norte magnético, que anteriormente se desplazaba a una velocidad de 10 km/año, ha aumentado repentinamente su velocidad a 55 km/año y ha cambiado su trayectoria hacia la Península de Taymyr en Siberia.

Fuente: NOAA data on the position of the North Magnetic Pole <https://www.ncei.noaa.gov/products/wandering-geomagnetic-poles>

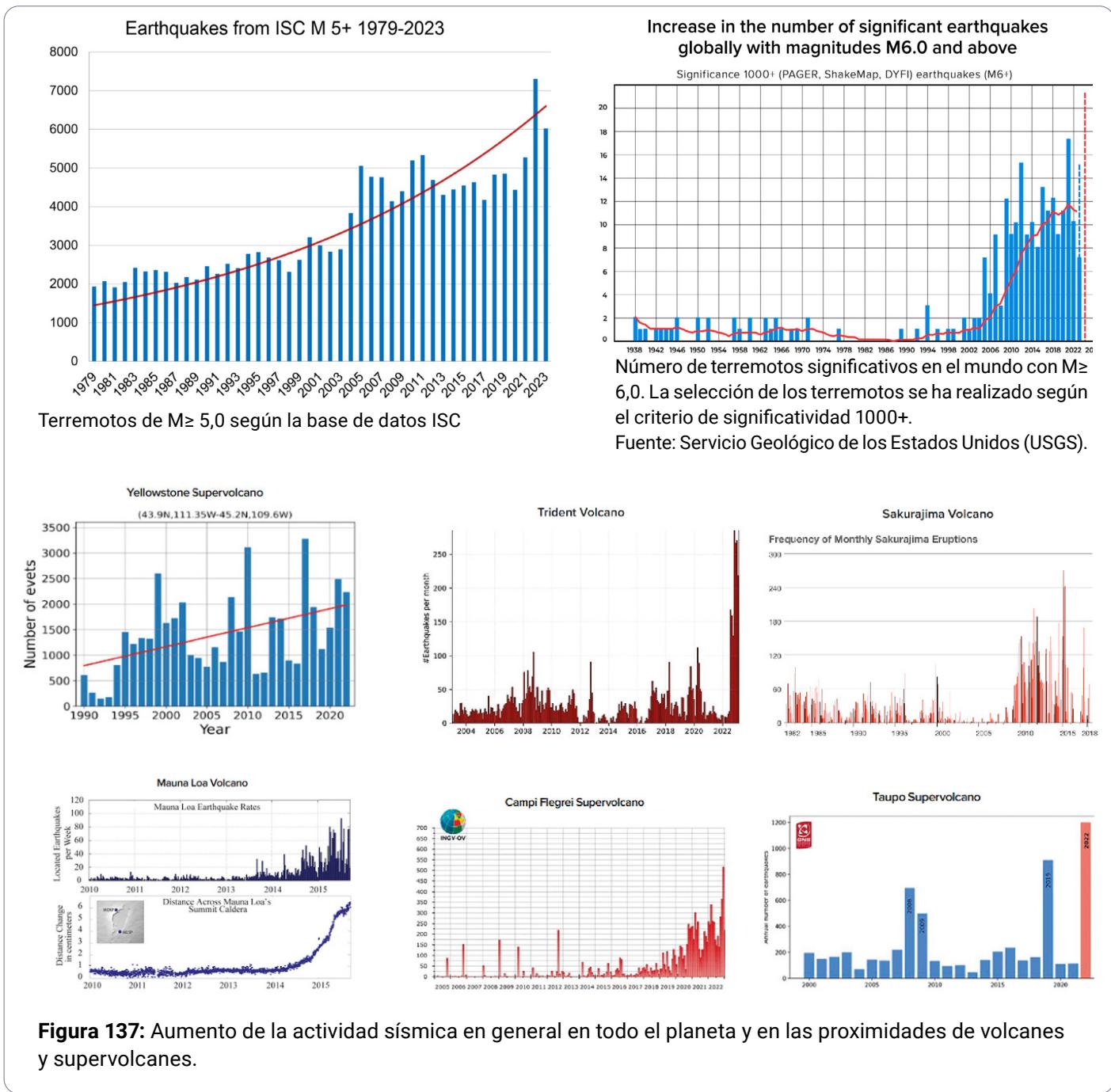
**Figura 136:** Cambios en los parámetros geofísicos de la Tierra en 1995.

Estas anomalías indican cambios profundos en el núcleo terrestre, que requieren una energía cuatrillones de veces superior a la producida por la humanidad durante toda su historia. La causa de estos cambios debe atribuirse a una influencia cósmica externa que actúa no solo sobre el núcleo de la Tierra, sino también sobre los de los otros planetas del Sistema Solar. Esta influencia externa intensifica la fusión del manto, provocando el ascenso de material fundido hacia la superficie. Como consecuencia, se desencadena una reacción en cadena: aumenta la actividad volcánica y sísmica, crece la cantidad de energía térmica interna de la Tierra y, en consecuencia, aumentan el número y la intensidad de los cataclismos naturales en todo el mundo.

Desde 1995 se observa un aumento significativo de la actividad sísmica, caracterizada por una mayor frecuencia, intensidad y energía de los terremotos. Esta tendencia es evidente tanto en tierra firme como en los océanos, incluidos los territorios que anteriormente se consideraban de baja sismicidad. Todo esto indica un cambio a escala global. Es importante destacar que el aumento del número de terremotos con una magnitud superior a 5,0 no está relacionado con la expansión de la red de detección ni con la mayor sensibilidad de los instrumentos, sino que refleja efectivamente cambios en la geodinámica terrestre. Según los datos generales del Centro Sismológico Internacional, el número de estos terremotos ha aumentado notablemente en los últimos 25 años y continúa creciendo (Fig. 137).

Además, se registra un aumento de la actividad sísmica cerca de los volcanes, incluidos supervolcanes como Yellowstone en los Estados Unidos, los Campos Flegreos en Italia<sup>360</sup> y Taupo en Nueva Zelanda<sup>361</sup>, así como otros volcanes que han erupcionado durante los ciclos anteriores de 12 000 años (Fig. 137).

Se registra un número cada vez mayor de días al año con erupciones volcánicas, y la lava expulsada presenta a menudo características anómalas: está sobrecalentada y tiene una composición química inusual, típica del magma proveniente de las capas profundas del manto terrestre.

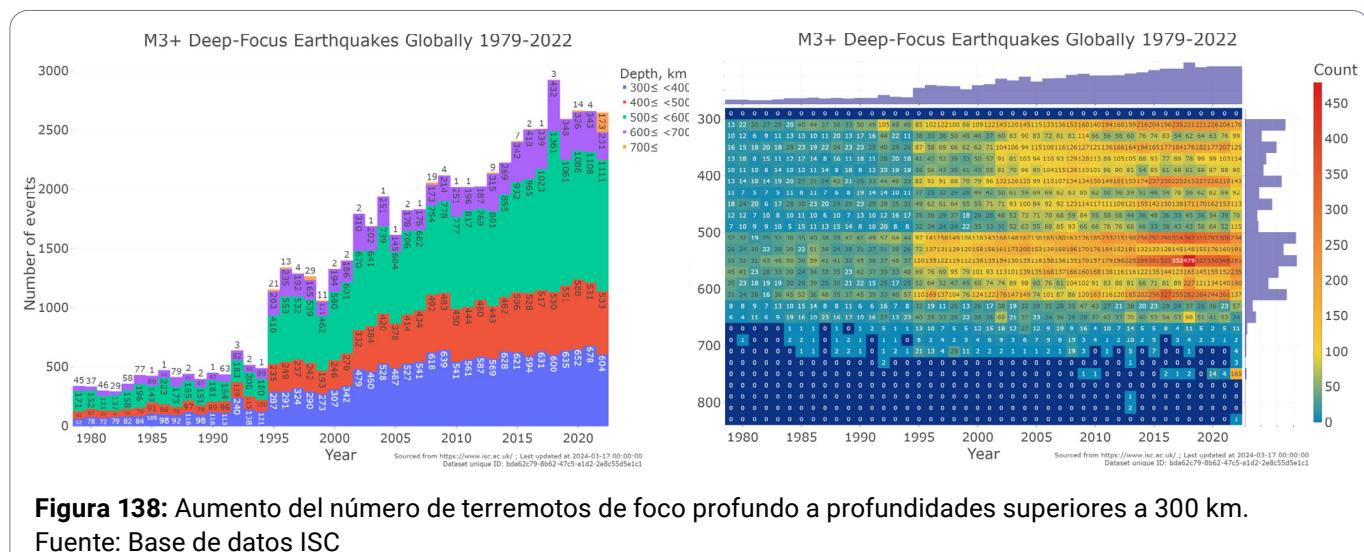


<sup>360</sup>Fanpage.it. At Campi Flegrei 675 earthquakes in April 2023: it is the month with the most tremors in the last 20 years. (2023) <https://www.fanpage.it/napoli/campi-flegrei-675-terremoti-aprile-2023> (Acceso: 1 de mayo 2025).

<sup>361</sup>GeoNet. Strong M5.6 earthquake consistent with continued minor volcanic unrest at Taupō. Volcanic Alert Level remains at Level 1. (2022) <https://www.geonet.org.nz/vabs/7tu66IDztDnlaYDG0LYSgl> (Acceso: 1 de mayo 2025).

Particular atención merece el aumento de los terremotos de foco profundo, que ocurren a profundidades superiores a los 300 kilómetros, llegando en ocasiones incluso a los 750 kilómetros bajo la superficie terrestre. Estos eventos no se producen en la corteza terrestre, sino en el manto, donde el material normalmente tiende a deformarse de manera plástica en lugar de fracturarse, lo que hace que la naturaleza de estos terremotos sea inusual. Dado que estos terremotos se producen en condiciones de presiones extremas y altas temperaturas, se puede concluir que se trata de potentes explosiones en el manto, comparables en energía a la detonación simultánea de numerosas bombas atómicas dentro del manto terrestre.

Además, los terremotos profundos a menudo desencadenan fuertes terremotos en la corteza terrestre, amplificando su impacto destructivo. Desde 1995 se observa un rápido aumento del número de estos eventos sísmicos profundos, en coincidencia con otras anomalías geodinámicas iniciadas en el mismo período (Fig. 138). El aumento de estas explosiones internas en el manto indica un incremento de la energía en las profundidades del planeta y una fusión intensificada del manto, que podría conducir a erupciones volcánicas a gran escala.



**Figura 138:** Aumento del número de terremotos de foco profundo a profundidades superiores a 300 km.  
Fuente: Base de datos ISC

Bajo la influencia de fuerzas centrífugas, el magma fundido del manto asciende activamente hacia la superficie terrestre desde 1995, erosionando y calentando la litosfera desde su interior con más intensidad de lo normal. Este ascenso del magma provoca un aumento del flujo geotérmico desde las profundidades del planeta y activa plumas magmáticas bajo los glaciares de la Antártida occidental, Groenlandia central y Siberia. Como resultado, los glaciares y el permafrost comienzan a derretirse rápidamente desde abajo<sup>362,363,364</sup>.

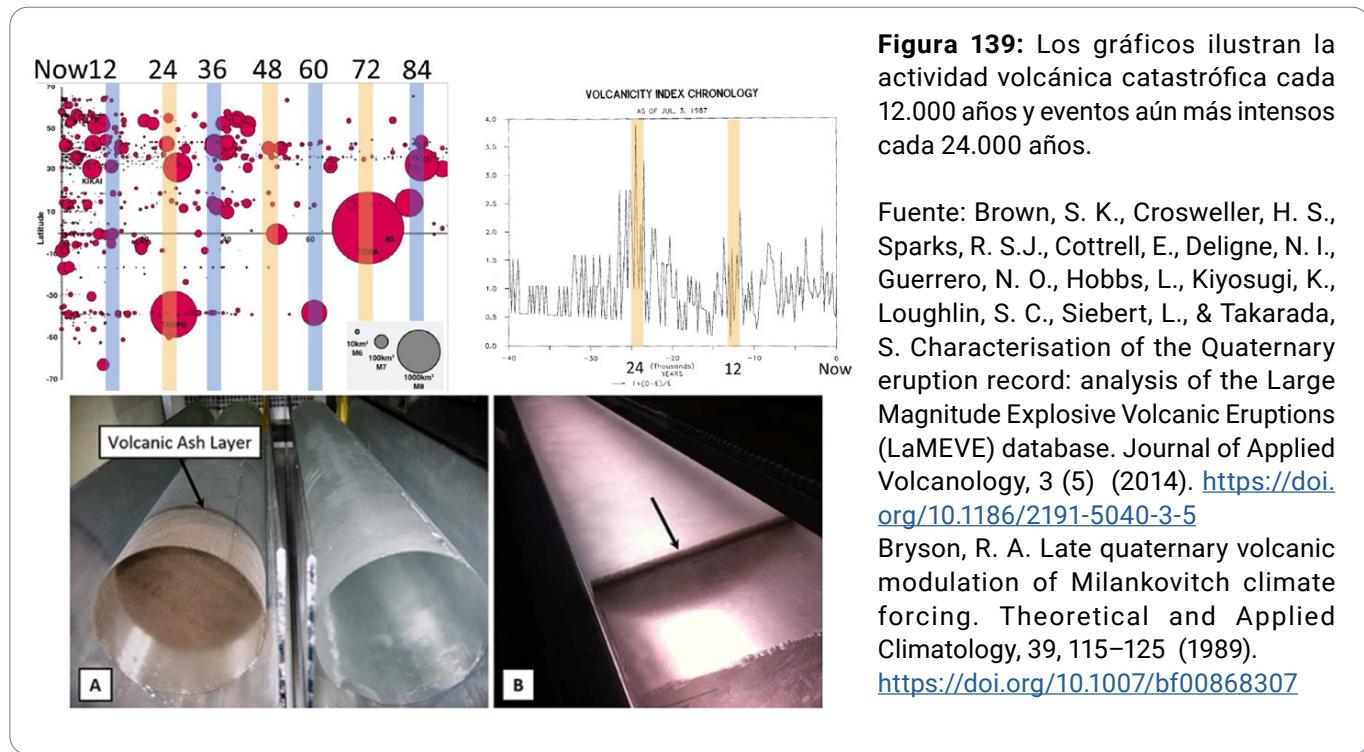
Así pues, la causa del calentamiento de los océanos es el magma ascendente, que calienta con especial intensidad la corteza oceánica, más delgada y vulnerable que la continental.

<sup>362</sup>Rogozhina, I. et al. Melting at the base of the Greenland ice sheet explained by Iceland hotspot history. *Nature Geosci* 9, 366–369 (2016). <https://doi.org/10.1038/ngeo2689>

<sup>363</sup>Van Der Veen, C. J., Leftwich, T., Von Frese, R., Csatho, B. M. & Li, J. Subglacial topography and geothermal heat flux: Potential interactions with drainage of the Greenland ice sheet. *Geophysical Research Letters* 34, 2007GL030046 (2007). <https://doi.org/10.1029/2007GL030046>

<sup>364</sup>Dziadek, R., Ferraccioli, F. & Gohl, K. High geothermal heat flow beneath Thwaites Glacier in West Antarctica inferred from aeromagnetic data. *Commun Earth Environ* 2, 162 (2021). <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00242-3>

Los datos históricos procedentes de núcleos geológicos y de hielo indican que la Tierra se ha enfrentado a ciclos catastróficos similares cada 12 000 años. Cada segundo ciclo, es decir, cada 24 000 años, las catástrofes planetarias son aún más intensas (Fig.139).



La Tierra está entrando actualmente en una de estas fases cíclicas. Sin embargo, esta vez, debido a la contaminación antropogénica de los océanos por micro y nanoplásticos, se ha intensificado el desequilibrio térmico en el manto, lo que provoca un aumento del número de terremotos de foco profundo, la formación de nuevos focos magnmáticos y una inestabilidad general del planeta. Precisamente por ello, las catástrofes están aumentando mucho más rápido e intensamente que en ciclos anteriores. De hecho, la contaminación de los océanos se ha convertido en la principal causa por la que la Tierra podría no superar este ciclo. Es importante darse cuenta de que resolver el problema de la contaminación de los océanos por microplásticos y nanoplásticos puede ralentizar considerablemente el desarrollo de los cataclismos, pero no los detendrá del todo.



Para más información sobre la actual activación geodinámica de las profundidades de la Tierra, el ciclo catastrófico de 12 000 años y las posibles soluciones a este problema, consulte el informe

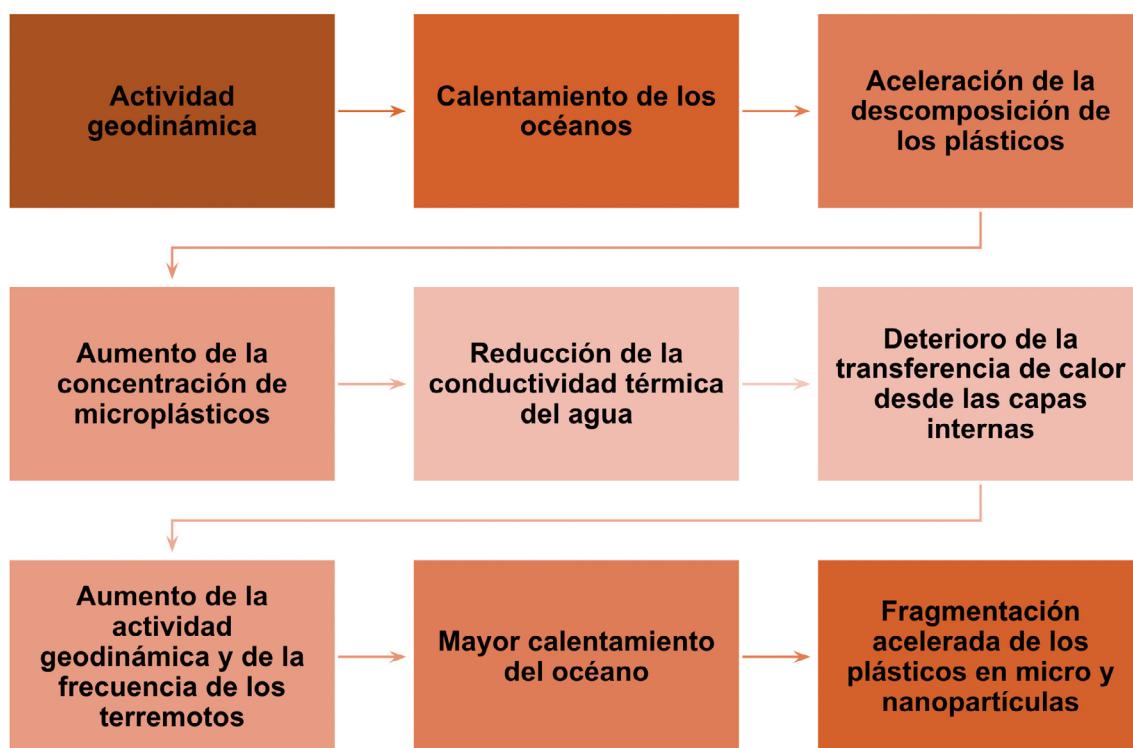
**“SOBRE LA PROGRESIÓN DE LOS DESASTRES CLIMÁTICOS EN LA TIERRA Y SUS CONSECUENCIAS CATASTRÓFICAS”**

Como han demostrado años de investigación interdisciplinaria sobre los cambios geodinámicos a lo largo de un ciclo de 12 000 años, la causa principal del calentamiento de los océanos es el ascenso del magma, que golpea con especial dureza la corteza oceánica, más delgada y vulnerable que la continental. La contaminación de los océanos por plásticos y la acumulación de partículas de los micro y nanoplásticos es un factor crítico que altera las propiedades termofísicas del océano. La presencia de estas partículas sintéticas en las aguas oceánicas reduce significativamente la capacidad del agua para conducir el calor, perturbando los procesos naturales de intercambio térmico entre las capas profundas del océano y la superficie. Para empeorar las cosas, la pérdida de calor de las placas litosféricas se ve perjudicada. Durante un ciclo de creciente actividad geodinámica, como el de 12 000 años, la alteración crítica de la función conductora del agua oceánica no sólo aumenta el calentamiento del océano y la atmósfera, sino también el de las profundidades de la Tierra. Esto conduce a un aumento de la fusión del manto y, en consecuencia, a una intensificación de la actividad geodinámica.

Esto hace que el exceso de energía se acumule en las profundidades de la Tierra, lo que provoca un aumento del número de terremotos de foco profundo y una formación acelerada de nuevos focos magmáticos. Estos procesos, a su vez, agravan aún más la inestabilidad del planeta y aceleran el calentamiento de los océanos.

Se forma un peligroso círculo vicioso:

la actividad geodinámica calienta el océano → el calentamiento acelera la descomposición de los plásticos → el aumento de la concentración de microplásticos reduce la conductividad térmica del agua → se dificulta la liberación de calor de las profundidades → se intensifican la actividad geodinámica y la frecuencia de los terremotos → el océano se calienta aún más, lo que acelera aún más la fragmentación de los plásticos en micro y nanopartículas.



Esto contribuye al aumento de la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos y las catástrofes naturales: inundaciones, huracanes y ciclones tropicales, que se producen en el presente como nunca antes.

La contaminación de los océanos con microplásticos y nanoplasticos no sólo tiene un impacto destructivo sobre el organismo humano, los ecosistemas, la biosfera y el sistema climático al intensificar el calentamiento de los océanos, sino que también es un factor que amplifica las catástrofes, ya de por sí poderosas, del ciclo de 24 000 años en el que ha entrado la Tierra. Esto crea riesgos sin precedentes no sólo para la supervivencia de la humanidad, sino también para la del propio planeta Tierra.

La solución a la crisis ecológica, climática y geodinámica mundial requiere la cooperación internacional de científicos de distintas disciplinas para desarrollar y aplicar urgentemente soluciones complejas, que incluyan no sólo la limpieza del océano de la contaminación por microplásticos y nanoplasticos y la reducción del impacto negativo de estas partículas en la salud humana, sino también soluciones fundamentales en respuesta a las amenazas geodinámicas. Las soluciones propuestas están disponibles en los informes correspondientes:



INFORME

**"SOBRE LA PROGRESIÓN DE LOS DESASTRES CLIMÁTICOS EN LA TIERRA Y SUS CONSECUENCIAS CATASTRÓFICAS"**



INFORME

**"SOBRE LA AMENAZA DE UNA ERUPCIÓN DE LA PLUMA MAGMÁTICA EN SIBERIA Y ESTRATEGIAS PARA ABORDAR EL PROBLEMA"**

## CONCLUSIONES. LOS NANOPLÁSTICOS SON UN RETO INELUDIBLE

El problema de la contaminación por plásticos, especialmente en forma de microplásticos y nanoplásticos (MNP), hace tiempo que trascendió la circunscripción localizada de sus consecuencias ecológicas y se ha convertido en una amenaza global y polifacética. La investigación moderna confirma los efectos directos e indirectos de los MNP sobre el sistema climático, la resistencia de los ecosistemas y la salud humana. Las partículas microplásticas son capaces de penetrar en los organismos vivos, provocando reacciones inflamatorias, alterando el equilibrio hormonal y las funciones de los sistemas inmunitario y reproductivo, y modificando las propiedades físicas y químicas del entorno, desde el agua de mar hasta la atmósfera.

Hace más de diez años, representantes de la comunidad científica internacional ALLATRA plantearon la hipótesis de la creciente influencia de la contaminación por plásticos en las anomalías climáticas y el empeoramiento de los problemas de salud pública. Hoy en día, estas hipótesis se ven confirmadas por investigaciones independientes llevadas a cabo por destacadas instituciones científicas. La rápida acumulación de datos sobre los efectos ecológicos y biológicos de los MNP abre nuevos horizontes de análisis, como la transformación de los modelos climáticos, los cambios en la hidrosfera y el aumento de los riesgos sistémicos para el desarrollo sostenible. Preocupa especialmente el hecho de que incluso concentraciones microscópicas de nanoplásticos puedan desencadenar efectos en cascada en la biosfera y el clima. El plástico ha dejado de ser un simple residuo sólido: se está convirtiendo en un agente activo de transformación del medio ambiente y del organismo humano. Las consecuencias de su propagación ya son visibles. El problema de los MNP no sólo afecta a la ecología y la medicina, sino que también requiere una reflexión en el contexto de la seguridad nacional, la macroeconomía y las relaciones internacionales.

Como parte de la estrategia para contrarrestar esta amenaza, el movimiento ALLATRA ha propuesto dos direcciones clave, que tienen tanto aplicación como potencial predictivo. La primera de ellas es la introducción a gran escala de tecnologías generadoras de agua atmosférica (GAA), capaces de resolver simultáneamente el problema de la escasez de agua dulce y de ayudar a limpiar la atmósfera y los océanos de partículas microplásticas. Sin embargo, la implementación de las tecnologías GAA exige tener en cuenta posibles riesgos, en particular, el aumento de las concentraciones de MNP en el aire y, en consecuencia, la intensificación del impacto por inhalación en los seres humanos. Esto impone la necesidad de desarrollar paralelamente sistemas de filtración y protección altamente eficaces.

La segunda dirección estratégica, también propuesta por ALLATRA, se refiere al desarrollo de métodos para neutralizar o aislar la carga electrostática de los nanoplásticos, un factor importante de su patogenicidad una vez que se acumulan en el cuerpo humano. Las partículas de los nanoplásticos cargadas interactúan activamente con las membranas celulares, las proteínas y el material genético, formando enlaces moleculares estables.

Estas partículas penetran las barreras biológicas, incluida la barrera hematoencefálica, se acumulan en los tejidos y desencadenan una cascada de daños celulares, desde el estrés oxidativo hasta la apoptosis. Reducir la actividad electrostática de los microplásticos y nanoplásticos podría reducir significativamente su nocividad y frenar su acumulación en el organismo.

Los autores del informe estiman que aplacar o neutralizar la carga electrostática podría reducir el peligro potencial de los MNP en al menos un 50 %, lo que hace que esta dirección de la investigación sea extremadamente importante. Esto crearía el margen de tiempo necesario para desarrollar estrategias más complejas de diagnóstico, prevención y eliminación de los MNP del cuerpo humano y de limpieza de la biosfera. En este contexto, son especialmente importantes los estudios en los campos de la biofísica, la nanotecnología y la toxicología molecular.

Por lo tanto, una respuesta eficaz a la amenaza de los MNP no requiere medidas aisladas, sino un enfoque global e interdisciplinario. Es necesario coordinar los esfuerzos en investigación científica, soluciones tecnológicas, regulación normativa y cooperación internacional. La contaminación por plásticos no debe considerarse un problema ecológico limitado, sino un reto sistémico que afecta a la salud, la seguridad, la disponibilidad de recursos y la resistencia de las infraestructuras sociales.

La singularidad de este informe radica en el complejo enfoque interdisciplinario que combina datos de física, química, biología y medicina. Esta síntesis permite considerar el problema de los MNP como un desafío civil que requiere soluciones a varios niveles. Actualmente, la comunidad mundial está tomando conciencia poco a poco de las verdaderas dimensiones de esta amenaza. A pesar de la ausencia de una solución universal, son la investigación y el desarrollo de la cooperación científica los que pueden determinar el camino para superar la crisis. El principal reto no es la ausencia de una solución, sino la capacidad de encontrarla antes de que se alcance el punto crítico de no retorno.

---

## Referencias

Agence France-Presse. Japan's famous Nara deer dying from eating plastic bags [Los famosos ciervos de Nara en Japón mueren por ingerir bolsas de plástico]. The Guardian. <https://www.theguardian.com/world/2019/jul/10/japans-famous-nara-deer-dying-from-eating-plastic-bags> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Ahern, T. P. et al. Medication-Associated Phthalate Exposure and Childhood Cancer Incidence [Exposición a ftalatos asociados a medicamentos e incidencia de cáncer infantil]. JNCI: Journal of the National Cancer Institute 114, 885–894 (2022). <https://doi.org/10.1093/jnci/djac045>

Al Malki, J. S., Hussien, N. A., Tantawy, E. M., Khattab, Y. & Mohammadein, A. Terrestrial Biota as Bioindicators for Microplastics and Potentially Toxic Elements [Biota terrestre como bioindicadores de microplásticos y elementos potencialmente tóxicos]. Coatings 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11101152>

Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research. Micro- and nanoplastic from the atmosphere is polluting the ocean [Los micro y nanoplásticos procedentes de la atmósfera están contaminando el océano]. <https://www.awi.de/en/about-us/service/press/single-view/mikro-und-nanoplastik-aus-der-atmosphaere-belastet-meere.html> (acceso: 1 de mayo de 2025)

Alijagic, A. et al. The triple exposure nexus of microplastic particles, plastic-associated chemicals, and environmental pollutants from a human health perspective [El nexo triple de exposición a partículas de microplásticos, sustancias químicas asociadas al plástico y contaminantes ambientales desde la perspectiva de la salud humana]. Environment International 188, 108736 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108736>

AllatRa TV. Factor antropogénico en la muerte de los océanos: Documental de divulgación científica. Tiempo 55:00, (2025). <https://allatra.tv/en/video/anthropogenic-factor-in-the-oceans-demise-popular-science-film> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Allen, S. et al. Examination of the ocean as a source for atmospheric microplastics [Examen del océano como fuente de microplásticos atmosféricos]. PLoS ONE 15, e0232746 (2020). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232746>

Alqahtani, S., Alqahtani, S., Saquib, Q. & Mohiddin, F. Toxicological impact of microplastics and nanoplastics on humans: understanding the mechanistic aspect of the interaction [Impacto toxicológico de los microplásticos y nanoplásticos en los humanos: comprensión del aspecto mecanicista de la interacción]. Front. Toxicol. 5, 1193386 (2023). <https://doi.org/10.3389/ftox.2023.1193386>

Amato-Lourenço, L. F. et al. Microplastics in the Olfactory Bulb of the Human Brain [Microplásticos en el bulbo olfatorio del cerebro humano]. JAMA Netw Open 7, e2440018 (2024). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.40018>

Amato-Lourenço, L. F. et al. Presence of airborne microplastics in human lung tissue [Presencia de microplásticos en suspensión en el tejido pulmonar humano]. Journal of Hazardous Materials 416, 126124 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126124>

American College of Cardiology. New evidence links microplastics with chronic disease [Nuevas evidencias vinculan los microplásticos con enfermedades crónicas]. (2025) <https://www.acc.org/About-ACC/Press-Releases/2025/03/25/10/19/New-Evidence-Links-Microplastics-with-Chronic-Disease> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Animal Survival International. Sri Lankan Elephants Die After Eating Plastic From Rubbish Dumps [Elefantes de Sri Lanka mueren tras ingerir plástico de los vertederos de basura]. (2020) <https://animalsurvival.org/habitat-loss/sri-lankan-elephants-die-after-eating-plastic-from-rubbish-dumps> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Argo Program. 'Mission' [Misión]. (n.d.) <https://argo.ucsd.edu/about/mission/> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Arrigo, F., Impellitteri, F., Piccione, G. & Faggio, C. Phthalates and their effects on human health: Focus on erythrocytes and the reproductive system [Ftalatos y sus efectos en la salud humana: Enfoque en los eritrocitos y el sistema reproductor]. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology 270, 109645 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2023.109645>

Ask a Scientist Blog. If molecules in colder things get denser, why does ice float? [Si las moléculas en las cosas frías se vuelven más densas, ¿por qué flota el hielo?] WordPress. <https://askascientistblog.wordpress.com/2015/11/04/if-molecules-in-colder-things-get-denser-why-does-ice-float> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Auta, H. S. et al. Enhanced microbial degradation of PET and PS microplastics under natural conditions in mangrove environment [Mejora de la degradación microbiana de microplásticos PET y PS en condiciones naturales en un entorno de manglares]. Journal of Environmental Management 304, 114273 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114273>

Auta, H. S., Emenike, C. U., Jayanthi, B. & Fauziah, S. H. Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by *Bacillus* sp. and *Rhodococcus* sp. isolated from mangrove sediment [Crecimiento cinético y biodeterioro de microplásticos de polipropileno por *Bacillus* sp. y *Rhodococcus* sp. aislados de sedimentos de manglares]. Marine Pollution Bulletin 127, 15–21 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.036>

Autism Parenting Magazine. Autism Statistics You Need To Know in 2024 [Estadísticas sobre el autismo que se debe conocer en 2024]. (2025) <https://www.autismparentingmagazine.com/autism-statistics> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Avio, C. G., Gorbi, S. & Regoli, F. Experimental development of a new protocol for extraction and characterization of microplastics in fish tissues: First observations in commercial species from Adriatic Sea [Desarrollo experimental de un nuevo protocolo de extracción y caracterización de microplásticos en tejidos de peces: Primeras observaciones en especies comerciales del Mar Adriático]. Marine Environmental Research 111, 18–26 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.06.014>

Aykut, B., Pushalkar, S., Chen, R. et al. The fungal mycobiome promotes pancreatic oncogenesis via activation of MBL [El microbioma fúngico promueve la oncogénesis pancreática a través de la activación de MBL]. Nature 574, 264–267 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1608-2>

Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review [Absorción y Acumulación de Nano/Micoplásticos en Plantas: Una Revisión Crítica]. Nanomaterials 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

Azim Premji University. The Biology of Electricity: How electricity is critical to the functioning of the human body [La Biología de la Electricidad: Cómo la electricidad es fundamental para el funcionamiento del cuerpo humano]. (2022) <https://azimpremjiuniversity.edu.in/news/2022/the-biology-of-electricity> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Baker, B. H. et al. Ultra-processed and fast food consumption, exposure to phthalates during pregnancy, and socioeconomic disparities in phthalate exposures [Consumo de alimentos ultraprocesados y comida rápida, exposición a ftalatos durante el embarazo y disparidades socioeconómicas en la exposición a ftalatos]. *Environment International* 183, 108427 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108427>

Baker, E. T. & German, C. R. On the Global Distribution of Hydrothermal Vent Fields [Sobre la distribución global de los campos de fuentes hidrotermales]. in *Mid-Ocean Ridges: Hydrothermal Interactions Between the Lithosphere and Oceans* (eds German, C. R., Lin, J. & Parson, L. M.) 245–266 (American Geophysical Union, 2004).

Baker, E. T. et al. How many vent fields? New estimates of vent field populations on ocean ridges from precise mapping of hydrothermal discharge locations [¿Cuántos campos hidrotermales hay? Nuevas estimaciones de la población de campos hidrotermales en las dorsales oceánicas a partir de un mapeo preciso de las ubicaciones de descarga hidrotermal]. *Earth Planet. Sci. Lett.* 449, 186–196 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.05.031>

Bandmann, V., Müller, J. D., Köhler, T. & Homann, U. Uptake of fluorescent nano beads into BY2-cells involves clathrin-dependent and clathrin-independent endocytosis [Incorporación de nanocuentas fluorescentes en células BY2 mediante endocitosis dependiente e independiente de clatrina]. *FEBS Letters* 586, 3626–3632 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2012.08.008>

Baribo, L. E., Avens, J. S. & O'Neill, R. D. Effect of Electrostatic Charge on the Contamination of Plastic Food Containers by Airborne Bacterial Spores [Efecto de la carga electrostática en la contaminación de envases plásticos para alimentos por esporas bacterianas transportadas por el aire]. *Applied Microbiology* 14, 905–913 (1966). <https://doi.org/10.1128/am.14.6.905-913.1966>

Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments [Acumulación y fragmentación de residuos plásticos en entornos globales]. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

Basaran, B. et al. Microplastics in honey from Türkiye: Occurrence, characteristic, human exposure, and risk assessment [Microplásticos en miel de Turquía: presencia, características, exposición humana y evaluación de riesgos]. *Journal of Food Composition and Analysis* 135, 106646 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106646>

Behrenfeld et al. 2009 Robert Simmon <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Bell, Katherine L. C., et al. How Little We've Seen: A Visual Coverage Estimate of the Deep Seafloor [Lo poco que hemos visto: Una estimación visual de la cobertura de los fondos marinos]. *Science Advances*, vol. 11, no. 19, 2025, eadp8602. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adp8602>.

Bengalli, R. et al. Characterization of microparticles derived from waste plastics and their bio-interaction with human lung A549 cells [Caracterización de micropartículas derivadas de residuos plásticos y su biointeracción con células pulmonares humanas A549]. *Journal of Applied Toxicology* 42, 2030–2044 (2022). <https://doi.org/10.1002/jat.4372>

Berger Bioucas, F. E. et al. Effective Thermal Conductivity of Nanofluids: Measurement and Prediction [Conductividad térmica efectiva de nanofluidos: Medición y predicción]. *Int J Thermophys* 41, 55 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10765-020-2621-2>

Beriot, N., Peek, J., Zornoza, R., Geissen, V. & Huerta Lwanga, E. Low density-microplastics detected in sheep faeces and soil: A case study from the intensive vegetable farming in Southeast Spain [Detección de microplásticos de baja densidad en heces de ovino y en el suelo: Un estudio de caso en el cultivo intensivo de hortalizas en el sureste de España]. *Science of The Total Environment* 755, 142653 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142653>

Bhuiyan, M. M. U. et al. Oxygen declination in the coastal ocean over the twenty-first century: Driving forces, trends, and impacts [Disminución del oxígeno en el océano costero a lo largo del siglo XXI: Fuerzas motrices, tendencias e impactos]. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 9, 100621 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100621>

Bopp, L. et al. Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models [Múltiples factores de estrés de los ecosistemas oceánicos en el siglo XXI: proyecciones con modelos CMIP5]. *Biogeosciences* 10, 6225–6245 (2013). <https://doi.org/10.5194/bg-10-6225-2013>

Borreani, G. & Tabacco, E. 9 - Plastics in Animal Production [Plásticos en la producción animal]. in *A Guide to the Manufacture, Performance, and Potential of Plastics in Agriculture* (ed. Orzolek, M. D.) 145–185 (Elsevier, 2017). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102170-5.00009-9>

Bosker, T., Bouwman, L. J., Brun, N. R., Behrens, P. & Vijver, M. G. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum* [Los microplásticos se acumulan en los poros de la cápsula de la semilla y retrasan la germinación y el crecimiento de la raíz de la planta vascular terrestre *Lepidium sativum*]. *Chemosphere* 226, 774–781 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>

Boyce, D. G., Lewis, M. R. & Worm, B. Global phytoplankton decline over the past century [Disminución mundial del fitoplancton en el último siglo]. *Nature* 466, 591–596 (2010). <https://doi.org/10.1038/nature09268>

Brahney, J., Hallerud, M., Heim, E., Hahnenberger, M. & Sukumaran, S. Plastic rain in protected areas of the United States [Lluvia de plástico en zonas protegidas de Estados Unidos]. *Science* 368, 1257–1260 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aaz5819>

Brennecke, D., Duarte, B., Paiva, F., Caçador, I. & Canning-Clode, J. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment [Microplásticos como vector de contaminación por metales pesados del medio marino]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 178, 189–195 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.003>

Breton, J. L. Visitation patterns of African elephants (*Loxodonta africana*) to a rubbish dumpsite in Victoria Falls, Zimbabwe [Patrones de visita de elefantes africanos (*Loxodonta africana*) a un vertedero en Victoria Falls, Zimbabwe]. *Pachyderm* 60, 45–54 (2019). <https://doi.org/10.69649/pachyderm.v60i.30>

Broquet, A. & Andrews-Hanna, J. C. Geophysical evidence for an active mantle plume underneath Elysium Planitia on Mars [Evidencia geofísica de una pluma del manto activa bajo Elysium Planitia en Marte]. *Nat Astron* (2022). <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3>

Broszeit, S., Hattam, C. & Beaumont, N. Bioremediation of waste under ocean acidification: Reviewing the role of *Mytilus edulis* [Biorremediación de residuos bajo acidificación oceánica: Revisión del papel de *Mytilus edulis*]. *Marine Pollution Bulletin* 103, 5–14 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.040>

Brown, S. K., Crosweller, H. S., Sparks, R. S.J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., Hobbs, L., Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Siebert, L., & Takarada, S. Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions [Caracterización del registro de erupciones del Cuaternario: análisis de las erupciones volcánicas explosivas de gran magnitud] (LaMEVE) database. *Journal of Applied Volcanology*, 3 (5) (2014). <https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5>

Brynzak-Schreiber, E. et al. Microplastics role in cell migration and distribution during cancer cell division [Rol de los microplásticos en la migración y distribución celular durante la división de las células cancerosas]. *Chemosphere* 353, 141463 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141463>

Bryson, R. A.. Late quaternary volcanic modulation of Milankovitch climate forcing [Modulación volcánica del forzamiento climático de Milankovitch en el Cuaternario tardío]. *Theoretical and Applied Climatology*, 39, 115–125 (1989). <https://doi.org/10.1007/bf00868307>

Busse, H. L., Ariyasena, D. D., Orris, J. & Freedman, M. A. Pristine and Aged Microplastics Can Nucleate Ice through Immersion Freezing [Microplásticos vírgenes y envejecidos pueden formar hielo por congelación por inmersión]. *ACS EST Air* 1, 1579–1588 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsestaair.4c00146>

Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V. & Uricchio, V. F. A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health [Estudio detallado sobre los posibles efectos de los microplásticos y los aditivos preocupantes en la salud humana]. *IJERPH* 17, 1212 (2020). <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>

Casella, C. & Ballaz, S. J. Genotoxic and neurotoxic potential of intracellular nanoplastics: A review [Potencial genotóxico y neurotóxico de los nanoplásticos intracelulares: Una revisión]. *Journal of Applied Toxicology* 44, 1657–1678 (2024). <https://doi.org/10.1002/jat.4598>

Centers for Disease Control and Prevention. Autism Prevalence Higher, According to Data from 11 ADDM Communities [Mayor prevalencia del autismo, según datos de 11 comunidades ADDM]. <https://www.cdc.gov/media/releases/2023/p0323-autism.html> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Chadwick, J., Keller, R., Kamenov, G., Yogodzinski, G. & Lupton, J. The Cobb hot spot: HIMU-DMM mixing and melting controlled by a progressively thinning lithospheric lid [El punto caliente de Cobb: Mezcla y fusión HIMU-DMM controladas por una tapa litosférica que se adelgaza progresivamente]. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 15, 3107–3122 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014gc005334>

Chen, M. J., Karaviti, L. P., Roth, D. R. & Schlotmer, B. J. Birth prevalence of hypospadias and hypospadias risk factors in newborn males in the United States from 1997 to 2012 [Prevalencia al nacer de hipospadias y factores de riesgo de hipospadias en varones recién nacidos en Estados Unidos de 1997 a 2012]. *Journal of Pediatric Urology* 14, 425.e1-425.e7 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jpurol.2018.08.024>

Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water [Los electrolitos inducen un orden de orientación de largo alcance y cambios de energía libre en la red de enlaces H del agua en masa]. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>

Cheng, L. et al. Another Year of Record Heat for the Oceans [Un año más de calor récord en los océanos]. *Adv. Atmos. Sci.* 40, 963–974 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00376-023-2385-2>

Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J. et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019 [El calentamiento récord de los océanos continúa en 2019]. *Adv. Atmos. Sci.* 37, 137–142 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

Chew, T., Daik, R. & Hamid, M. Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Dodecylbenzenesulfonic Acid-Doped Polyaniline Particles–Water Based Nanofluid [Conductividad térmica y capacidad calorífica específica de un nanofluido a base de agua y de partículas de polianilina dopadas con ácido dodecilbenzenosulfónico]. *Polymers* 7, 1221–1231 (2015). <https://doi.org/10.3390/polym7071221>

China Environment News. Microplastics "secretly attack" the human body, how much damage can they cause? [Los microplásticos «atacan en secreto» al cuerpo humano, ¿cuánto daño pueden causar?] (2025) <https://cenews.com.cn/news.html?aid=1205048> (acceso: 1 de mayo de 2025).

[Climate.gov](#). The role of the ocean in tempering global warming [El papel de los océanos para atenuar el calentamiento global]. (2014) <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/role-ocean-tempering-global-warming> (acceso: 1 de mayo de 2025).

[ClimateReanalyzer.org](#), Climate Change Institute, University of Maine, Dataset. NOAA OISST. [https://climatereanalyzer.org/clim/sst\\_daily/?dm\\_id=world2](https://climatereanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2) (acceso: 1 de mayo de 2025).

Columbia Climate School. Is Global Heating Hiding Out in the Oceans? [¿Se esconde el calentamiento global en los océanos?] (2013) <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Corinaldesi, C., Canensi, S., Dell'Anno, A. et al. Multiple impacts of microplastics can threaten marine habitat-forming species [Múltiples impactos de los microplásticos pueden amenazar a las especies formadoras de hábitats marinos]. *Commun Biol* 4, 431 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01961-1>

Crisp, J. A. Rates of magma emplacement and volcanic output [Tasas de desplazamiento del magma y de producción volcánica]. *J. Volc. Geotherm. Res.* 20, 177–211 (1984). [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(84\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90039-8)

Da Costa Filho, P. A. et al. Detection and characterization of small-sized microplastics ( $\geq 5 \mu\text{m}$ ) in milk products [Detección y caracterización de microplásticos de pequeño tamaño ( $\geq 5 \mu\text{m}$ ) en productos lácteos]. *Sci Rep* 11, 24046 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03458-7>

Dante, S. et al. Selective Targeting of Neurons with Inorganic Nanoparticles: Revealing the Crucial Role of Nanoparticle Surface Charge [Selección de neuronas con nanopartículas inorgánicas: Revelación del papel crucial de la carga superficial de las nanopartículas]. *ACS Nano* 11, 6630–6640 (2017). <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b00397>

Dawson, A. L. et al. Turning microplastics into nanoplastics through digestive fragmentation by Antarctic krill [Transformación de microplásticos en nanoplasticos mediante fragmentación digestiva por el krill antártico]. *Nat Commun* 9, 1001 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03465-9>

De Falco, F., Di Pace, E., Cocca, M. & Avella, M. The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution [Contribución de los procesos de lavado de ropa sintética a la contaminación por microplásticos]. *Sci Rep* 9, 6633 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43023-x>

De Jersey, A. M. et al. Seabirds in crisis: Plastic ingestion induces proteomic signatures of multiorgan failure and neurodegeneration [Aves marinas en crisis: La ingestión de plásticos induce firmas proteómicas de fallo multiorgánico y neurodegeneración]. *Sci. Adv.* 11, eads0834 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.ads0834>

De Pater, I. et al. Record-breaking storm activity on Uranus in 2014 [Récord de actividad tormentosa en Urano en 2014]. *Icarus* 252, 121-128 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.01.008>

De Souza Machado, A. A. et al. Impacts of Microplastics on the Soil Biophysical Environment [Impactos de los microplásticos en el medio biofísico del suelo]. *Environ. Sci. Technol.* 52, 9656–9665 (2018). <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>

De Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S. & Rillig, M. C. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems [Los microplásticos, una amenaza emergente para los ecosistemas terrestres]. *Global Change Biology* 24, 1405–1416 (2018). <https://doi.org/10.1111/gcb.14020>

Deike, L., Reichl, B. G. & Paulot, F. A Mechanistic Sea Spray Generation Function Based on the Sea State and the Physics of Bubble Bursting [Función mecanicista de generación de rocío marino basada en el estado del mar y la física del estallido de burbujas]. *AGU Advances* 3, e2022AV000750 (2022). <https://doi.org/10.1029/2022AV000750>

Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes [La deriva polar de los años 90 se explica por los cambios en el almacenamiento de agua terrestre]. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL092114 (2021). <https://doi.org/10.1029/2020gl092114>

Derraik, J. G. B. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review [La contaminación del medio marino por los desechos plásticos: una revisión]. *Marine Pollution Bulletin* 44, 842–852 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5)

Dick, L. et al. The adsorption of drugs on nanoplastics has severe biological impact [La adsorción de fármacos en nanoplásticos tiene graves repercusiones biológicas]. *Sci Rep* 14, 25853 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75785-4>

Dohlman, A. B. et al. A pan-cancer mycobiome analysis reveals fungal involvement in gastrointestinal and lung tumors [Un análisis pancánceroso del microbioma revela la implicación fúngica en tumores gastrointestinales y pulmonares]. *Cell* 185, 3807-3822.e12 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cell.2022.09.015>

Dris, R. et al. A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments [Primera visión general de las fibras textiles, incluidos los microplásticos, en ambientes interiores y exteriores]. *Environmental Pollution* 221, 453–458 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>

Dugershaw-Kurzer, B. et al. Nanoparticles Dysregulate the Human Placental Secretome with Consequences on Angiogenesis and Vascularization [Nanopartículas desregulan el secretoma placentario humano con consecuencias sobre la angiogénesis y la vascularización]. *Advanced Science* 11, 2401060 (2024). <https://doi.org/10.1002/advs.202401060>

Duncan, E. M. et al. Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles [Ingestión de microplásticos omnipresente en tortugas marinas]. *Global Change Biology* 25, 744–752 (2019). <https://doi.org/10.1111/gcb.14519>

Dürig, T., White, J.D.L., Murch, A.P. et al. Deep-sea eruptions boosted by induced fuel-coolant explosions [Las erupciones en aguas profundas, potenciadas por las explosiones inducidas del refrigerante del combustible]. *Nat. Geosci.* 13, 498–503 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0603-4>

EarthDay.org. Babies vs. Plastics Report. (2023) <https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Encrenaz, T. et al. HDO and SO<sub>2</sub> thermal mapping on Venus - IV. Statistical analysis of the SO<sub>2</sub> plumes [Análisis estadístico de las plumas de SO<sub>2</sub>]. *A&A* 623, A70 (2019). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833511>

Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025) <https://www.britannica.com/science/neuron> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Enders, K., Lenz, R., Stedmon, C. A. & Nielsen, T. G. Abundance, size and polymer composition of marine microplastics ≥ 10 µm in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution [Abundancia, tamaño y composición polimérica de microplásticos marinos ≥ 10 µm en el océano Atlántico y su distribución vertical modelizada]. *Marine Pollution Bulletin* 100, 70–81 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.027>

Eriksen, M. et al. A growing plastic smog, now estimated to be over 170 trillion plastic particles afloat in the world's oceans—Urgent solutions required [Se calcula que hay más de 170 billones de partículas de plástico a la deriva en los océanos del mundo, lo que requiere soluciones urgentes]. *PLoS ONE* 18, e0281596 (2023). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281596>

Eriksen, M. et al. Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea [Contaminación por plásticos en los océanos del mundo: Más de 5 billones de trozos de plástico que pesan más de 250 000 toneladas a flote en el mar]. *PLoS ONE* 9, e111913 (2014). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>

Eriksen, M., Lusher, A., Nixon, M. & Wernery, U. The plight of camels eating plastic waste [La difícil situación de los camellos que comen residuos plásticos]. *Journal of Arid Environments* 185, 104374 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374>

Eunomia. Plastics in the Marine Environment [Plásticos en el medio marino]. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment> (acceso: 1 de mayo de 2025)

European Severe Storms Laboratory. Granizadas de 2024 <https://www.essl.org/cms/hailstorms-of-2024> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Fanpage.it. At Campi Flegrei 675 earthquakes in April 2023: it is the month with the most tremors in the last 20 years [En Campi Flegrei se registraron 675 sismos en abril de 2023: el mes con mayor actividad sísmica en los últimos 20 años]. (2023) <https://www.fanpage.it/napoli/campi-flegrei-675-terremoti-aprile-2023> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Federal Office of Public Health. Impact of pollution on embryonic development - Nanoparticles: Risk for babies in the womb [Impacto de la contaminación en el desarrollo embrionario - Nanopartículas: Riesgo para los bebés en el útero]. FOPH. (2024) <https://www.bit.admin.ch/en/nsb?id=101285> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Feldkamp, M. L. et al. Gastrostomies prevalence patterns in 27 surveillance programs from 24 countries, International Clearinghouse for Birth Defects Surveillance and Research [Patrones de prevalencia de gastosquisis en 27 programas de vigilancia de 24 países, International Clearinghouse for Birth Defects Surveillance and Research], 1980–2017. Birth Defects Research 116, e2306 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2306>

Fernando, B. et al. A Tectonic Origin for the Largest Marsquake Observed by InSight [Un origen tectónico para el mayor terremoto de Marte observado por InSight]. Geophysical Research Letters 50, e2023GL103619 (2023). <https://doi.org/10.1029/2023GL103619>

Financial Times. Have humans passed peak brain power? [¿Ha superado el ser humano su punto álgido de capacidad cerebral?] <https://www.ft.com/content/a8016c64-63b7-458b-a371-e0e1c54a13fc> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Frazier, T. W., Georgiades, S., Bishop, S. L. & Hardan, A. Y. Behavioral and Cognitive Characteristics of Females and Males With Autism in the Simons Simplex Collection [Características conductuales y cognitivas de las mujeres y los hombres con autismo de la colección Simons Simplex]. Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry 53, 329–340.e3 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2013.12.004>

Galyon, H. et al. Long-term in situ ruminal degradation of biodegradable polymers in Holstein dairy cattle [Degradación ruminal in situ a largo plazo de polímeros biodegradables en ganado lechero Holstein]. JDS Communications 4, 70–74 (2023). <https://doi.org/10.3168/jdsc.2022-0319>

Gao, Y., Fang, H. & Ni, K. A hierarchical clustering method of hydrogen bond networks in liquid water undergoing shear flow [Método de agrupación jerárquica de redes de enlaces de hidrógeno en agua líquida sometida a flujo cortante]. Sci Rep 11, 9542 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88810-7>

Gao, Y., Fang, H., Ni, K. & Feng, Y. Water clusters and density fluctuations in liquid water based on extended hierarchical clustering methods [Agrupaciones de agua y fluctuaciones de densidad en agua líquida basadas en métodos de agrupación jerárquica ampliada]. Sci Rep 12, 8036 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11947-6>

Manchas de basura. Programa de Basuras Marinas. NOAA <https://marinedebris.noaa.gov/discover-marine-debris/garbage-patches> (acceso: 1 de mayo de 2025)

Gase, A. et al. Subducting volcanoclastic-rich upper crust supplies fluids for shallow megathrust and slow slip [La corteza superior, rica en volcanoclastos, en zonas de subducción suministra fluidos que favorecen el megacabalgamiento poco profundo y el deslizamiento lento]. Sci. Adv. 9, eadh0150 (2023). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh0150>

GeoNet. Strong M5.6 earthquake consistent with continued minor volcanic unrest at Taupō [Fuerte terremoto de M5,6 consistente con la continuación de disturbios volcánicos menores en Taupō]. Volcanic Alert Level remains at Level 1. (2022) <https://www.geonet.org.nz/vabs/7tu66IDztDnlaYDG0LYSgl> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Geueke, B. et al. Evidence for widespread human exposure to food contact chemicals [Pruebas de la exposición humana generalizada a sustancias químicas en contacto con alimentos]. J Expo Sci Environ Epidemiol 1–12 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41370-024-00718-2>

Geyer, R., Jambeck, J. R. & Law, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made [Producción, uso y destino de todos los plásticos jamás fabricados]. *Sci. Adv.* 3, e1700782 (2017). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

Gigault, J. et al. Current opinion: What is a nanoplastic? [Opinión actual: ¿Qué son los nanoplásticos?] *Environmental Pollution* 235, 1030–1034 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024>

✉ Glausiusz, J. Toxicology: The plastics puzzle [El rompecabezas de los plásticos]. *Nature* 508, 306–308 (2014). <https://doi.org/10.1038/508306a>

Glorio Patrucco, S., Rivoira, L., Bruzzoniti, M. C., Barbera, S. & Tassone, S. Development and application of a novel extraction protocol for the monitoring of microplastic contamination in widely consumed ruminant feeds [Desarrollo y aplicación de un novedoso protocolo de extracción para el seguimiento de la contaminación por microplásticos en piensos de amplio consumo para rumiantes]. *Science of The Total Environment* 947, 174493 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174493>

Gou, Z., Wu, H., Li, S., Liu, Z. & Zhang, Y. Airborne micro- and nanoplastics: emerging causes of respiratory diseases [Microplásticos y nanoplásticos transportados por el aire: causas emergentes de enfermedades respiratorias]. *Particle and Fibre Toxicology* 21, 50 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00613-6>

Grechi, N. et al. Microplastics are present in women's and cows' follicular fluid and polystyrene microplastics compromise bovine oocyte function in vitro [Microplásticos están presentes en el fluido folicular de mujeres y vacas y los microplásticos de poliestireno comprometen la función de los ovocitos bovinos in vitro]. *eLife* 12, (2023). <https://doi.org/10.7554/eLife.86791.1>

Guo, X. et al. Discovery and analysis of microplastics in human bone marrow [Descubrimiento y análisis de microplásticos en la médula ósea humana]. *Journal of Hazardous Materials* 477, 135266 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135266>

Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L. & Zeng, E. Y. A Global Perspective on Microplastics [Perspectiva mundial sobre los microplásticos]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 125, e2018JC014719 (2020). <https://doi.org/10.1029/2018JC014719>

Hall-Spencer, J. M. & Harvey, B. P. Ocean acidification impacts on coastal ecosystem services due to habitat degradation [Impacto de la acidificación oceánica en los servicios de los ecosistemas costeros debido a la degradación del hábitat]. *Emerging Topics in Life Sciences* 3, 197–206 (2019). <https://doi.org/10.1042/ETLS20180117>

Harrison, R. G. Atmospheric electricity and cloud microphysics [Electricidad atmosférica y microfísica de las nubes] <https://cds.cern.ch/record/557170/files/p75.pdf> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Hasan, M. M. et al. Impact of microplastics on terrestrial ecosystems: A plant-centric perspective [Impacto de los microplásticos en los ecosistemas terrestres: Una perspectiva centrada en las plantas]. *Environmental Pollution and Management* 1, 223–234 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.epm.2024.11.002>

Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ. Environmental Impacts of Plastics: Moving beyond the perspective on waste [Impactos medioambientales de los plásticos: Más allá de la perspectiva de los residuos]. [https://www.ufz.de/index.php?en=36336&webc\\_pm=44/2024](https://www.ufz.de/index.php?en=36336&webc_pm=44/2024) (acceso: 1 de mayo de 2025)

Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems [Comportamiento de sorción, especiación y toxicidad del cromo ligado a microplásticos en sistemas multisoluto]. Environ. Sci. Technol. Lett. 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems [Comportamiento de sorción, especiación y toxicidad del cromo ligado a microplásticos en sistemas multisoluto]. Environ. Sci. Technol. Lett. 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

Hoffman, M. J. & Hittinger, E. Inventory and transport of plastic debris in the Laurentian Great Lakes [Inventario y transporte de residuos plásticos en los Grandes Lagos Laurentinos]. Marine Pollution Bulletin 115, 273–281 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.061>

Hofstede, L. T., Vasse, G. F. & Melgert, B. N. Microplastics: A threat for developing and repairing organs? [Microplásticos: ¿Una amenaza para el desarrollo y la reparación de órganos?] Cambridge Prisms: Plastics 1, e19 (2023). <https://doi.org/10.1017/plc.2023.19>

How Much of the World's Plastic Waste Actually Gets Recycled? [¿Qué porcentaje de los residuos plásticos del mundo se recicla realmente?] <https://www.visualcapitalist.com/how-much-plastic-gets-recycled> (acceso: 1 de mayo de 2025)

Huang, H. et al. Microplastics in the bloodstream can induce cerebral thrombosis by causing cell obstruction and lead to neurobehavioral abnormalities [Microplásticos en el torrente sanguíneo pueden inducir trombosis cerebral al causar obstrucción celular y provocar anomalías neuroconductuales] Sci. Adv. 11, eadr8243 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adr8243>

Huang, S. et al. Detection and Analysis of Microplastics in Human Sputum [Detección y análisis de microplásticos en esputo humano]. Environ. Sci. Technol. 56, 2476–2486 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03859>

Huang, S. et al. Plastic Waste Management Strategies and Their Environmental Aspects: A Scientometric Analysis and Comprehensive Review [Estrategias de gestión de residuos plásticos y sus aspectos medioambientales: Un análisis cienciométrico y una revisión exhaustiva]. IJERPH 19, 4556 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijerph19084556>

IERS Earth Orientation Center of the Paris Observatory. Duración del día - Parámetros de orientación de la Tierra: [https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plotname=EOPC04\\_14\\_62-NOW\\_IAU1980-LOD&id=223](https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plotname=EOPC04_14_62-NOW_IAU1980-LOD&id=223) (acceso: 1 de mayo de 2025).

Iizuka, T. et al. Mono-(2-ethyl-5-hydroxyhexyl) phthalate promotes uterine leiomyoma cell survival through tryptophan-kynurenine-AHR pathway activation [El ftalato de mono-(2-ethyl-5-hidroxihexilo) promueve la supervivencia de las células de leiomioma uterino a través de la activación de la vía triptófano-quinurenina-AHR]. Proceedings of the National Academy of Sciences 119, e2208886119 (2022). <https://doi.org/10.1073/pnas.2208886119>

Institute of Marine Sciences (ICM-CSIC). La degradación del plástico en el océano contribuye a su acidificación. <https://www.icm.csic.es/es/noticia/la-degradacion-del-plastico-en-el-oceano-contribuye-su-acidificacion> (acceso: 1 de mayo de 2025).

IPCC. Global Warming of 1.5°C [Calentamiento global de 1,5 °C]. (Cambridge University Press, 2022). <https://doi.org/10.1017/9781009157940> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Irigoién, X. et al. Large mesopelagic fishes biomass and trophic efficiency in the open ocean [Biomasa de grandes peces mesopelágicos y eficiencia trófica en mar abierto]. Nat Commun 5, 3271 (2014). <https://doi.org/10.1038/ncomms4271>

Islam, W., Zeng, F., Alotaibi, M. O. & Khan, K. A. Unlocking the potential of soil microbes for sustainable desertification management. Earth-Science Reviews 252, 104738 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104738>

Ivar Do Sul, J. A. & Costa, M. F. The present and future of microplastic pollution in the marine environment [Presente y futuro de la contaminación por microplásticos en el medio marino]. Environmental Pollution 185, 352–364 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.036>

Ivleva, N. P. Chemical Analysis of Microplastics and Nanoplastics: Challenges, Advanced Methods, and Perspectives [Análisis químico de microplásticos y nanoplasticos: Retos, métodos avanzados y perspectivas]. Chem. Rev. 121, 11886–11936 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00178>

James P. Barry, Stephen Widdicombe, and Jason M. Hall-Spencer. Effects of ocean acidification on marine biodiversity and ecosystem function [Efectos de la acidificación de los océanos en la biodiversidad marina y la función de los ecosistemas]. Ocean acidification, edited by Jean-Pierre Gattuso, Lina Hansson. Oxford, Oxford University Press, 2011. <https://books.google.com.ua/books?id=8yjNFxkALjLC&pg=PA192>

Jamieson, D. T. & Tudhope, J. S. Physical properties of sea water solutions: thermal conductivity [Propiedades físicas de las soluciones de agua de mar: conductividad térmica]. Desalination 8, 393–401 (1970). [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)80240-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)80240-4)

Jeffrey, G. A. An Introduction to Hydrogen Bonding [Introducción al enlace de hidrógeno] (Oxford University Press, New York, 1997). <https://books.google.com/books?vid=ISBN0195095499>

Jenna R. Jambeck et al., Plastic waste inputs from land into the ocean [Entradas de residuos plásticos desde tierra al océano]. Science 347, 768-771 (2015). <https://doi.org/10.1126/science.1260352>

Jeong, B. et al. Maternal exposure to polystyrene nanoplastics causes brain abnormalities in progeny [La exposición materna a nanoplasticos de poliestireno provoca anomalías cerebrales en la progenie]. Journal of Hazardous Materials 426, 127815 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127815>

Jiefang Daily. Intestine is the second brain? It can also communicate with multiple organs in both directions [¿El intestino es el segundo cerebro? También puede comunicarse con múltiples órganos en ambas direcciones] | New People - Health News. (2025) <https://www.jfdaily.com/staticsg/res/html/web/newsDetail.html?id=866347> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Jochum, M. et al. Elevated Micro- and Nanoplastics Detected in Preterm Human Placentae [Se detectan microplásticos y nanoplasticos elevados en placenta humanas pretérmino]. Preprint (2025). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5903715/v1>

Johnson, Gregory C., et al. Argo-Two Decades: Global Oceanography, Revolutionized [Argo-Dos décadas: La oceanografía mundial, revolucionada]. Annual Review of Marine Science, vol. 14, 2022, pp. 379–403. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-022521-102008>

Kahane-Rapport, S. R. et al. Field measurements reveal exposure risk to microplastic ingestion by filter-feeding megafauna [Las mediciones de campo revelan el riesgo de exposición a la ingestión de microplásticos por la megafauna filtradora]. *Nat Commun* 13, 6327 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33334-5>

Karim, A. et al. Interfacial Interactions between Nanoplastics and Biological Systems: toward an Atomic and Molecular Understanding of Plastics-Driven Biological Dyshomeostasis [Interacciones interfaciales entre nanoplásticos y sistemas biológicos: hacia una comprensión atómica y molecular de la dishomeostasis biológica provocada por los plásticos]. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 16, 25740–25756 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsami.4c03008>

Karlsruhe Institute of Technology. Blind spots in the monitoring of plastic waste [Puntos ciegos en el control de los residuos plásticos] [https://www.kit.edu/kit/english/pi\\_2022\\_097\\_blind-spots-in-the-monitoring-of-plastic-waste.php](https://www.kit.edu/kit/english/pi_2022_097_blind-spots-in-the-monitoring-of-plastic-waste.php) (acceso: 1 de mayo de 2025)

Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain [El nano/microplástico, una amenaza invisible que entra en el cerebro]. *Chemosphere* 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>

Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts [Conocimientos recientes sobre la absorción, toxicidad y dianas moleculares de microplásticos y nanoplasticos relevantes para la salud humana]. *iScience* 26, 106061 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

Khatuntsev, I. V. et al. Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging [Vientos a nivel de nubes desde las imágenes de la Cámara de Seguimiento de Venus Express]. *Icarus* 226, 140–158 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.018>

Khutorskoy, M. D., & Polyak, B. G. (2014). Reflection of contrasting geodynamic settings in the thermal field [Reflejo de contrastes geodinámicos en el campo térmico]. *Georesources*, (2), 24–43.

Kim, D. Y. et al. Effects of Microplastic Accumulation on Neuronal Death After Global Cerebral Ischemia [Efectos de la acumulación de microplásticos en la muerte neuronal tras una isquemia cerebral global]. *Cells* 14, 241 (2025). <https://doi.org/10.3390/cells14040241>

Kim, N.-H., Choo, H.-I. & Lee, Y.-A. Effect of nanoplastic intake on the dopamine system during the development of male mice [Efecto de la ingesta de nanoplasticos en el sistema dopaminérgico durante el desarrollo de ratones macho]. *Neuroscience* 555, 11–22 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2024.07.018>

Kiyama, Y., Miyahara, K. & Ohshima, Y. Active uptake of artificial particles in the nematode *Caenorhabditis elegans* [Captación activa de partículas artificiales en el nematodo *Caenorhabditis elegans*]. *Journal of Experimental Biology* 215, 1178–1183 (2012). <https://doi.org/10.1242/jeb.067199>

Kopatz, V. et al. Micro- and Nanoplastics Breach the Blood–Brain Barrier (BBB): Biomolecular Corona’s Role Revealed [Los microplásticos y nanoplasticos rompen la barrera hematoencefálica (BHE): Se revela el papel de la corona biomolecular]. *Nanomaterials* 13, 1404 (2023). <https://doi.org/10.3390/nano13081404>

Kopp, G. & Lean, J. L. A New, Lower Value of Total Solar Irradiance: Evidence and Climate Significance [Menor valor de la irradiancia solar total: Pruebas e importancia para el clima]. *Geophysical Research Letters* 38, L01706 (2011). <https://doi.org/10.1029/2010GL045777>

Kosuth, M., Mason, S. A. & Wattenberg, E. V. Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt [Contaminación antropogénica del agua del grifo, la cerveza y la sal marina]. *PLoS ONE* 13, e0194970 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194970>

Laage, D., Elsaesser, T. & Hynes, J. T. Water Dynamics in the Hydration Shells of Biomolecules [Dinámica del agua en los caparazones de hidratación de las biomoléculas]. *Chem. Rev.* 117, 10694–10725 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00765>

LaFemina, P. C. Plate Tectonics and Volcanism. in *The Encyclopedia of Volcanoes* [Placas tectónicas y vulcanismo. en *La enciclopedia de los volcanes*] (ed. Sigurdsson, H.) 65–92 (Academic Press, 2015). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00003-1>

Lamb, J. B. et al. Plastic waste associated with disease on coral reefs [Los residuos plásticos se asocian a enfermedades en los arrecifes de coral]. *Science* 359, 460–462 (2018). <https://doi.org/10.1126/science.aar3320>

Laufkötter, C., Zscheischler, J. & Frölicher, T. L. High-impact marine heatwaves attributable to human-induced global warming [Olas de calor marinas de gran impacto atribuibles al calentamiento global inducido por el hombre]. *Science* 369, 1621–1625 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aba0690>

Lax, J. Y., Price, C. & Saaroni, H. On the Spontaneous Build-Up of Voltage between Dissimilar Metals Under High Relative Humidity Conditions [Sobre la acumulación espontánea de tensión entre metales diferentes en condiciones de alta humedad relativa]. *Sci Rep* 10, 7642 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64409-2>

Lear, G., Kingsbury, J.M., Franchini, S. et al. Plastics and the microbiome: impacts and solutions [Plásticos y microbioma: consecuencias y soluciones]. *Environmental Microbiome* 16, 2 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40793-020-00371-w>

Lebreton, L. et al. Seven years into the North Pacific garbage patch: legacy plastic fragments rising disproportionately faster than larger floating objects [Siete años en la mancha de basura del Pacífico Norte: los fragmentos de plástico legados aumentan desproporcionadamente más rápido que los objetos flotantes más grandes]. *Environ. Res. Lett.* 19, 124054 (2024). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad78ed>

Lebreton, L., Egger, M. & Slat, B. A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean [Balance global de la masa de macropolásticos de flotación positiva en el océano]. *Sci Rep* 9, 12922 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49413-5>

Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic [Pruebas de que la gran mancha de basura del Pacífico acumula plástico rápidamente]. *Sci Rep* 8, 4666 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>

Lépine, J.-P. & Briley, M. The increasing burden of depression [La creciente carga de la depresión]. *NDT* 7, 3–7 (2011). <https://doi.org/10.2147/NDT.S19617>

Levine, H. et al. Male reproductive health statement [Declaración sobre la salud reproductiva masculina] (XIIIth international symposium on Spermatology, may 9th–12th 2018, Stockholm, Sweden. Basic Clin. Androl. 28, 13 (2018). <https://doi.org/10.1186/s12610-018-0077-z>

Levine, H. et al. Temporal trends in sperm count: a systematic review and meta-regression analysis of samples collected globally in the 20th and 21st centuries [Tendencias temporales en el recuento de espermatozoides: revisión sistemática y análisis de metarregresión de muestras recogidas en todo el mundo en los siglos XX y XXI]. Human Reproduction Update 29, 157–176 (2023). <https://doi.org/10.1093/humupd/dmac035>

Li, D., Shi, Y., Yang, L. et al. Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation [Liberación de microplásticos por la degradación de biberones de polipropileno durante la preparación de preparados para lactantes]. Nat Food 1, 746–754 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00171-y>

Li, H. et al. Detection of microplastics in domestic and fetal pigs' lung tissue in natural environment: A preliminary study [Detección de microplásticos en tejido pulmonar de cerdos domésticos y fetos en medio natural: Un estudio preliminar]. Environmental Research 216, 114623 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114623>

Li, N. et al. Prevalence and implications of microplastic contaminants in general human seminal fluid: A Raman spectroscopic study [Prevalencia e implicaciones de los contaminantes microplásticos en el líquido seminal humano general: Un estudio espectroscópico Raman]. Science of The Total Environment 937, 173522 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173522>

Li, W. et al. Uptake and effect of carboxyl-modified polystyrene microplastics on cotton plants [Absorción y efecto de microplásticos de poliestireno modificados con carboxilo en plantas de algodón]. Journal of Hazardous Materials 466, 133581 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133581>

Li, X. et al. Mitochondrial proteins and congenital birth defect risk: a mendelian randomization study [Proteínas mitocondriales y riesgo de defectos congénitos: un estudio de aleatorización mendeliana]. BMC Pregnancy Childbirth 25, 444 (2025). <https://doi.org/10.1186/s12884-025-07562-8>

Li, Y. et al. Potential Health Impact of Microplastics: A Review of Environmental Distribution, Human Exposure, and Toxic Effects [Impacto potencial de los microplásticos en la salud: Una revisión de la distribución ambiental, la exposición humana y los efectos tóxicos]. Environ. Health 1, 249–257 (2023). <https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00052>

Lian, J. et al. Do polystyrene nanoplastics affect the toxicity of cadmium to wheat (*Triticum aestivum* L.)? [¿Afectan los nanoplásticos de poliestireno a la toxicidad del cadmio en el trigo (*Triticum aestivum* L.)?] Environmental Pollution 263, 114498 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114498>

Lide, D. R. (ed.) CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85th edn (CRC Press, 2004).

Liebezeit, G. & and Liebezeit, E. Non-pollen particulates in honey and sugar [Partículas no polínicas en la miel y el azúcar]. Food Additives & Contaminants: Part A 30, 2136–2140 (2013). <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.843025>

Liu, S. et al. Microplastics in three types of human arteries detected by pyrolysis-gas chromatography/mass

spectrometry (Py-GC/MS) [Microplásticos en tres tipos de arterias humanas detectados mediante pirólisis-cromatografía de gases/espectrometría de masas (Py-GC/MS)]. Journal of Hazardous Materials 469, 133855 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133855>

Lusher, A. (2015). Microplastics in the Marine Environment: Distribution, Interactions and Effects [Microplásticos en el medio marino: Distribución, interacciones y efectos]. In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (eds) Marine Anthropogenic Litter. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_10)

Lyons, J.J., Haney, M.M., Fee, D. et al. Infrasound from giant bubbles during explosive submarine eruptions [Infrasonidos de burbujas gigantes durante erupciones submarinas explosivas]. Nat. Geosci. 12, 952–958 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0461-0>

Maganti, S. S. & Akkina, R. C. Detection and characterisation of microplastics in animal feed [Detección y caracterización de microplásticos en la alimentación animal]. ojafr 13, 348–356 (2023). <https://doi.org/10.51227/ojafr.2023.50>

Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to 'White Pollution' [Degradación de micro y nanoplásticos por enzimas bacterianas: Una solución a la «contaminación blanca】. The Microbe 3, 100072 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072>

Manzi, F., Schlösser, P., Owczarz, A. & Wolinska, J. Polystyrene nanoplastics differentially influence the outcome of infection by two microparasites of the host *Daphnia magna* [Los nanoplasticos de poliestireno influyen de manera diferencial en el desenlace de la infección causada por dos microparásitos en el hospedador *Daphnia magna*]. Phil. Trans. R. Soc. B 378, 20220013 (2023). <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0013>

Marfella, R. et al. Microplastics and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events [Microplásticos y nanoplasticos en ateromas y eventos cardiovasculares]. N Engl J Med 390, 900–910 (2024). <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2309822>

Martin-Folgar, R. et al. Molecular effects of polystyrene nanoplastics on human neural stem cells [Efectos moleculares de los nanoplasticos de poliestireno en las células madre neurales humanas]. PLOS ONE 19, e0295816 (2024). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295816>

Medindia. Study unravels how mitochondrial dysfunction leads to premature aging [Un estudio desvela cómo la disfunción mitocondrial conduce al envejecimiento prematuro]. (2022) <https://www.medindia.net/news/study-unravels-how-mitochondrial-dysfunction-leads-to-premature-aging-208364-1.htm> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Meinen, C. S., Perez, R. C., Dong, S., Piola, A. R. & Campos, E. Observed Ocean Bottom Temperature Variability at Four Sites in the Northwestern Argentine Basin: Evidence of Decadal Deep/Abyssal Warming Amidst Hourly to Interannual Variability During 2009–2019 [Variabilidad Observada de la Temperatura del Fondo Oceánico en Cuatro Sitios de la Cuenca Noroeste Argentina: Evidencia de Calentamiento Decadal Profundo/Abisal en medio de Variabilidad Horaria a Interanual durante 2009-2019]. Geophysical Research Letters 47, e2020GL089093 (2020). <https://doi.org/10.1029/2020GL089093>

Microplastics pose risk to ocean plankton, climate, other key Earth systems [Los microplásticos amenazan el plancton oceánico, el clima y otros sistemas clave de la Tierra]. Mongabay. (2023) <https://news.mongabay.com>

[com/2023/10/microplastics-pose-risk-to-ocean-plankton-climate-other-key-earth-systems](https://doi.org/10.1039/D4EN01017E) (acceso: 1 de mayo de 2025).

Moiniafshari, K. et al. A perspective on the potential impact of microplastics and nanoplastics on the human central nervous system [Una perspectiva sobre el impacto potencial de los microplásticos y nanoplásticos en el sistema nervioso central humano]. Environmental Science: Nano 12, 1809–1820 (2025). <https://doi.org/10.1039/D4EN01017E>

Montano, L. et al. First evidence of microplastics in human ovarian follicular fluid: An emerging threat to female fertility [Primeras pruebas de la presencia de microplásticos en el líquido folicular ovárico humano: Una amenaza emergente para la fertilidad femenina]. Ecotoxicology and Environmental Safety 291, 117868 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117868>

Moore, C. J., Moore, S. L., Leecaster, M. K. & Weisberg, S. B. A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre [Comparación de plástico y plancton en el giro central del Pacífico Norte]. Marine Pollution Bulletin 42, 1297–1300 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00114-X)

Moresco, V. et al. Binding, recovery, and infectiousness of enveloped and non-enveloped viruses associated with plastic pollution in surface water [Fijación, recuperación e infecciosidad de virus con y sin envoltura asociados a la contaminación por plásticos en aguas superficiales]. Environmental Pollution 308, 119594 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119594>

Morishige, C., Donohue, M. J., Flint, E., Swenson, C. & Woolaway, C. Factors affecting marine debris deposition at French Frigate Shoals, Northwestern Hawaiian Islands Marine National Monument, 1990–2006 [Factores que afectan a la deposición de residuos marinos en French Frigate Shoals, Monumento Nacional Marino de las Islas Hawaianas Noroccidentales, 1990-2006]. Marine Pollution Bulletin 54, 1162–1169 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.04.014>

Muhonja, C. N., Makonde, H., Magoma, G. & Imbuga, M. Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya [Biodegradabilidad del polietileno por bacterias y hongos del vertedero de Dandora Nairobi-Kenia]. PLOS ONE 13, e0198446 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198446>

Murano, C., Bergami, E., Liberatori, G., Palumbo, A. & Corsi, I. Interplay Between Nanoplastics and the Immune System of the Mediterranean Sea Urchin *Paracentrotus lividus* [Interacción entre los nanoplásticos y el sistema inmunitario del erizo del Mediterráneo *Paracentrotus lividus*]. Front. Mar. Sci. 8, 647394 (2021). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.647394>

Murazzi, M. E., Pradel, A., Schefer, R. B., Gessler, A. & Mitrano, D. M. Uptake and physiological impacts of nanoplastics in trees with divergent water use strategies [Absorción e impacto fisiológico de nanoplásticos en árboles con estrategias divergentes de uso del agua]. Environ. Sci.: Nano 11, 3574–3584 (2024). <https://doi.org/10.1039/D4EN00286E>

Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward [Impactos de los microplásticos en los organismos marinos: Perspectivas actuales y camino a seguir]. Egyptian Journal of Aquatic Research 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward [Impactos de los microplásticos en los organismos marinos: Perspectivas actuales y camino a seguir]. Egyptian Journal of Aquatic Research 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

NASA. NASA Analysis Shows Unexpected Amount of Sea Level Rise in 2024 [Un análisis de la NASA revela un aumento inesperado del nivel del mar en 2024] <https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024> (acceso: 1 de mayo de 2025).

NASA. Steamy relationships: How atmospheric water vapor amplifies Earth's greenhouse effect. (2022) [Relaciones vaporosas: Cómo el vapor de agua atmosférico amplifica el efecto invernadero de la Tierra. (2022)] <https://science.nasa.gov/earth/climate-change/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifiesearths-greenhouse-effect> (acceso: 1 de mayo de 2025).

NASA. Tracking 30 Years of Sea Level Rise [30 años de aumento del nivel del mar] <https://earthobservatory.nasa.gov/images/150192/tracking-30-years-of-sea-level-rise> (acceso: 1 de mayo de 2025).

NASA. What are Phytoplankton? [¿Qué son los fitoplancton?] <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton> (acceso: 1 de mayo de 2025).

National Center for Biotechnology Information. Bisfenol A, Estructura 2D. PubChem. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1017#section=2D-Structure> (acceso: 1 de mayo de 2025).

National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. Estadísticas sobre sobrepeso y obesidad. NIDDK. (2021) <https://www.niddk.nih.gov/health-information/health-statistics/overweight-obesity> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Nava, V., Chandra, S., Aherne, J. et al. Plastic debris in lakes and reservoirs [Residuos plásticos en lagos y embalses]. Nature 619, 317–322 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06168-4>

NBC News. 12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned [12 meses de calentamiento récord del océano desconciertan y preocupan a los científicos]. (2024) <https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179> (acceso: 1 de mayo de 2025).

NBC News. Oceans hit record-hot temperatures. (2024) <https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179> (acceso: 1 de mayo de 2025).

New Atlas. Autism in boys linked to common plastic exposure in the womb [Relacionan el autismo infantil con la exposición a plásticos en el útero]. (2024) <https://newatlas.com/health-wellbeing/prenatal-bisphenol-a-bpa-autism-boys> (acceso: 1 de mayo de 2025).

News-Medical. Plasticizers can impair important brain functions in humans [Los plastificantes pueden alterar funciones cerebrales importantes en humanos]. (2021) <https://www.news-medical.net/news/20210412/Plasticizers-can-impair-important-brain-functions-in-humans.aspx> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Ng, E.-L. et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems [Panorama de la contaminación por microplásticos y nanoplásticos en los agroecosistemas]. Science of The Total Environment 627, 1377–1388 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>

Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains [Bioacumulación de microplásticos en cerebros humanos fallecidos]. Nat Med 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

[Nippon.com](#). Japan's aging society. Sakurajima, Japan's Most Active Volcano [Sakurajima, el volcán más activo de Japón]. <https://www.nippon.com/en/features/h00194> (acceso: 1 de mayo de 2025).

NOAA Ocean Exploration. Marine Life [Vida marina]. (n.d.) <https://oceanexplorer.noaa.gov/explainers/marine-life.html> (acceso: 1 de mayo de 2025).

NOAA Ocean Service. How far does light travel in the ocean? [¿Hasta dónde llega la luz en el océano?]. (n.d.) [https://oceanservice.noaa.gov/facts/light\\_travel.html](https://oceanservice.noaa.gov/facts/light_travel.html) (acceso: 1 de mayo de 2025).

NOAA. Datos sobre la posición del Polo Magnético Norte. <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/data/poles/NP.xy> (acceso: 1 de mayo de 2025).

NOAA. La Tierra vivió su año más cálido jamás registrado; el contenido de calor en la capa superior del océano fue récord, mientras que el hielo marino antártico registró un mínimo histórico.. <https://www.ncei.noaa.gov/news/global-climate-202312> (acceso: 1 de mayo de 2025).

NOAA. How much oxygen comes from the ocean? [¿Cuánto oxígeno procede del océano?] <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ocean-oxygen.html> (acceso: 1 de mayo de 2025).

NOAA. Ocean heat content [Contenido calorífico del océano]. [www.nodc.noaa.gov/OC5/3M\\_HEAT\\_CONTENT](http://www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT) (acceso: 1 de mayo de 2025).

O'Hanlon, N. J., James, N. A., Masden, E. A. & Bond, A. L. Seabirds and marine plastic debris in the northeastern Atlantic: A synthesis and recommendations for monitoring and research [Aves marinas y residuos plásticos marinos en el Atlántico nororiental: Síntesis y recomendaciones para el seguimiento y la investigación]. Environmental Pollution 231, 1291–1301 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.101>

Obbard, R. W. et al. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice [Calentamiento global libera legado microplástico congelado en el hielo del mar Ártico]. Earth's Future 2, 315–320 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014EF000240>

Ocean Blue Project. Plastic Pollution in the Ocean: How Many Animals Die from Pollution? [Contaminación por plásticos en el océano: ¿cuántos animales mueren por contaminación?] (2021) <https://oceanblueproject.org/wp-content/uploads/2023/02/how-many-animals-die-from-plastic-pollution-ocean-blue-report.pdf> (acceso: 1 de mayo de 2025).

OECD (2023) Note: Regional summary data was calculated by Our World in Data based on OECD-provided data [Nota: Los datos del resumen regional han sido calculados por Our World in Data a partir de los datos facilitados por la OCDE]. [OurWorldinData.org/plastic-pollution](https://ourworldindata.org/plastic-pollution) | CC BY <https://ourworldindata.org/grapher/share-plastic-fate?time=2019..latest> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Oliveri Conti, G. et al. Micro- and nano-plastics in edible fruit and vegetables. The first diet risks assessment for the general population [Microplásticos y nanoplásticos en frutas y hortalizas comestibles. Primera evaluación de los riesgos alimentarios para la población general]. Environmental Research 187, 109677 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109677>

Organisation for Economic Co-operation and Development. Do adults have the skills they need to thrive in a changing world? [¿Disponen los adultos de las competencias necesarias para prosperar en un mundo cambiante?] OECD Publications. (2024) [https://www.oecd.org/en/publications/do-adults-have-the-skills-they-need-to-thrive-in-a-changing-world\\_b263dc5d-en.html](https://www.oecd.org/en/publications/do-adults-have-the-skills-they-need-to-thrive-in-a-changing-world_b263dc5d-en.html) (acceso: 1 de mayo de 2025).

Oßmann, B. E. et al. Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water [Microplásticos de pequeño tamaño y partículas pigmentadas en el agua mineral embotellada]. Water Research 141, 307–316 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027>

Ostle, C. et al. The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series [El aumento de plásticos en los océanos evidenciado por una serie temporal de 60 años]. Nat Commun 10, 1622 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>

Our World in Data. Residuos plásticos anuales por método de eliminación, Mundo, 2000 to 2019. <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-fate> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Our World in Data. Muertes por tipo de cáncer, Mundo. <https://ourworldindata.org/grapher/cancer-deaths-by-type-grouped> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Our World in Data. Muertes por tipo de diabetes 1980-2021. <https://ourworldindata.org/grapher/deaths-from-diabetes-by-type> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Our World in Data. Microplásticos en el océano. <https://ourworldindata.org/grapher/microplastics-in-ocean> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Our World in Data. Número de muertes por enfermedades cardiovasculares por edad, en todo el mundo. <https://ourworldindata.org/grapher/cardiovascular-disease-deaths-by-age> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Panisi, C. & Marini, M. Dynamic and Systemic Perspective in Autism Spectrum Disorders: A Change of Gaze in Research Opens to A New Landscape of Needs and Solutions [Perspectiva dinámica y sistémica en los trastornos del espectro autista: Un cambio de mirada en la investigación abre un nuevo panorama de necesidades y soluciones]. Brain Sciences 12, 250 (2022). <https://doi.org/10.3390/brainsci12020250>

Pantos, O. Microplastics: impacts on corals and other reef organisms [Microplásticos: impacto en los corales y otros organismos del arrecife]. Emerging Topics in Life Sciences 6, 81–93 (2022). <https://doi.org/10.1042/ETLS20210236>

Park, S. Y. & Kim, C. G. Biodegradation of micro-polyethylene particles by bacterial colonization of a mixed microbial consortium isolated from a landfill site [Biodegradación de micropartículas de polietileno por colonización bacteriana de un consorcio microbiano mixto aislado de un vertedero]. Chemosphere 222, 527–533 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.159>

Pauling, L. The Nature of the Chemical Bond, 3rd edn, Chapter 12-2 (Cornell Univ. Press, 1960).

Pegler, S.S., Ferguson, D.J. Rapid heat discharge during deep-sea eruptions generates megaplumes and disperses tephra [La rápida descarga de calor durante las erupciones en aguas profundas genera megaplumas y dispersa la tefra]. Nat Commun 12, 2292 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22439-y>

Centro de Ciencia e Ingeniería Medioambientales de la Universidad de Pekín. El equipo del profesor Yi Huang logra nuevos avances en la distribución atmosférica de microplásticos y su riesgo para la salud humana. CESE. (2022) <https://cese.pku.edu.cn/kycg/156506.htm> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean [Los microplásticos contaminan la parte más profunda del océano mundial]. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

Perini, D. A. et al. Surface-Functionalized Polystyrene Nanoparticles Alter the Transmembrane Potential via Ion-Selective Pores Maintaining Global Bilayer Integrity [Las nanopartículas de poliestireno funcionalizadas en superficie alteran el potencial transmembrana a través de poros selectivos de iones que mantienen la integridad global de la bicapa]. *Langmuir* 38, 14837–14849 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c02487>

Polyak, B. G., & Khutorskoy, M. D. (2018). Heat flow from the Earth's interior as an indicator of deep-seated processes [El flujo de calor del interior de la Tierra como indicador de procesos profundos]. *Georesources*, 20(4), Part 2, 366–376. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.366-376>

[Phys.org](#). Quantum effects in proteins: How tiny particles coordinate energy transfer inside cells [Efectos cuánticos en las proteínas: cómo unas partículas diminutas coordinan la transferencia de energía en el interior de las células]. (2025) <https://phys.org/news/2025-05-quantum-effects-proteins-tiny-particles.html> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Pinheiro, H. T. et al. Plastic pollution on the world's coral reefs [Contaminación por plásticos en los arrecifes de coral del mundo]. *Nature* 619, 311–316 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06113-5>

Plastics News. Study highlights health hazards of microplastics [Un estudio destaca los peligros para la salud de los microplásticos]. (2019) <https://www.plasticsnews.com/news/study-highlights-health-hazards-microplastics> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Pollack, H. N., Hurter, S. J. & Johnson, J. R. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set [Flujo de calor del interior de la Tierra: Análisis del conjunto global de datos]. *Rev. Geophys.* 31, 267–280 (1993). <https://doi.org/10.1029/93RG01249>

Prata, J. C. et al. Microplastics in Internal Tissues of Companion Animals from Urban Environments [Microplásticos en tejidos internos de animales de compañía de entornos urbanos]. *Animals* 12, 1979 (2022). <https://doi.org/10.3390/ani12151979>

Ragusa, A. et al. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta [Plasticenta: Primeras pruebas de microplásticos en la placenta humana]. *Environment International* 146, 106274 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>

Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk [Detección y caracterización de microplásticos en la leche materna humana mediante microespectroscopía Raman]. *Polymers* 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>

Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods [Revisión de las interacciones superficiales de los microplásticos en el agua y posibles métodos de captura]. *Water Science and Engineering* 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

Rai, P. K., Sonne, C., Brown, R. J. C., Younis, S. A. & Kim, K.-H. Adsorption of environmental contaminants on micro- and nano-scale plastic polymers and the influence of weathering processes on their adsorptive attributes [Adsorción de contaminantes ambientales en polímeros plásticos de escala micro y nanométrica e influencia de los procesos de meteorización en sus atributos adsorptivos]. *Journal of Hazardous Materials* 427, 127903 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127903>

Rajendran, D. & Chandrasekaran, N. Journey of micronanoplastics with blood components [Viaje de micronanoplásticos con componentes sanguíneos]. *RSC Adv.* 13, 31435–31459 (2023). <https://doi.org/10.1039/D3RA05620A>

Ramsperger, A. F. R. M. et al. Environmental exposure enhances the internalization of microplastic particles into cells [La exposición ambiental potencia la internalización de partículas microplásticas en las células]. *Sci. Adv.* 6, eabd1211 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1211>

Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lippinen, A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 [El Ártico se ha calentado casi cuatro veces más rápido que el globo desde 1979]. *Commun Earth Environ* 3, 168 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>

Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Responses of reef building corals to microplastic exposure [Respuestas de los corales constructores de arrecifes a la exposición a microplásticos]. *Environmental Pollution* 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>

Riazi, H. et al. Specific heat control of nanofluids: A critical review [Control del calor específico de los nanofluidos: Una revisión crítica]. *International Journal of Thermal Sciences* 107, 25–38 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.024>

Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. Younger but sicker? Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study [¿Más jóvenes pero más enfermos? Tendencias de cohorte en la acumulación de enfermedades entre adultos de mediana edad y mayores en Escocia utilizando datos vinculados a la salud del Estudio Longitudinal Escocés]. *European Journal of Public Health* 34, 696–703 (2024). <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae062>

Rillig, M. C., Ingraffia, R. & De Souza Machado, A. A. Microplastic Incorporation into Soil in Agroecosystems [Incorporación de microplásticos al suelo en los agroecosistemas]. *Front. Plant Sci.* 8, 1805 (2017). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805>

Rogers, T. The political economy of autism [Economía política del autismo]. Substack. <https://tobyrogers.substack.com/p/the-political-economy-of-autism> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Roman, L., Hardesty, B. D., Hindell, M. A. & Wilcox, C. A quantitative analysis linking seabird mortality and marine debris ingestion [Un análisis cuantitativo que relaciona la mortalidad de las aves marinas y la ingestión de desechos marinos]. *Sci Rep* 9, 3202 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36585-9>

Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification [La lixiviación abiótica de plásticos contribuye a la acidificación de los océanos]. *Science of The Total Environment* 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

Romps, D. M., Seeley, J. T., Vollaro, D. & Molinari, J. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming [Aumento previsto de los rayos en Estados Unidos debido al calentamiento global]. *Science* 346, 851–854 (2014). <https://doi.org/10.1126/science.1259100>

Rosenthal, Y. et al. Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years [Contenido de calor del océano Pacífico durante los últimos 10 000 años]. *Science* 342, 617–621 (2013). <https://doi.org/10.1126/science.1240837>

Rosenthal, Y., Linsley, B. K., & Oppo, D. W. (2013, October 31). Is Global Heating Hiding Out in the Oceans? [¿Se esconde el calentamiento global en los océanos?] <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (acceso: 1 de mayo de 2025)

Rubin, B. S. Bisphenol A: An endocrine disruptor with widespread exposure and multiple effects [Bisfenol A: un alterador endocrino con una exposición generalizada y múltiples efectos]. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology* 127, 27–34 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.jsbmb.2011.05.002>

Sajjad, M. et al. Microplastics in the soil environment: A critical review [Microplásticos en el medio del suelo: Una revisión crítica]. *Environmental Technology & Innovation* 27, 102408 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102408>

Sarkar, P., Xavier, K. A. M., Shukla, S. P. & Rathi Bhuvaneswari, G. Nanoplastic exposure inhibits growth, photosynthetic pigment synthesis and oxidative enzymes in microalgae: A new threat to primary producers in aquatic environment [La exposición a nanoplásticos inhibe el crecimiento, la síntesis de pigmentos fotosintéticos y las enzimas oxidativas en microalgas: Una nueva amenaza para los productores primarios del medio acuático]. *Journal of Hazardous Materials Advances* 17, 100613 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100613>

Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing [La ingestión de plásticos por los peces marinos es generalizada y va en aumento]. *Global Change Biology* 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

Savoca, M. S., Wohlfeil, M. E., Ebeler, S. E. & Nevitt, G. A. Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds [Los desechos plásticos marinos emiten un infoquímico clave para las aves marinas que buscan alimento por el olfato]. *Sci. Adv.* 2, e1600395 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600395>

Schmidt, C. et al. A multidisciplinary perspective on the role of plastic pollution in the triple planetary crisis [Una perspectiva multidisciplinar sobre el papel de la contaminación por plásticos en la triple crisis planetaria]. *Environment International* 193, 109059 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109059>

Schmidt, C., Krauth, T. & Wagner, S. Export of Plastic Debris by Rivers into the Sea [Exportación de residuos plásticos al mar por los ríos]. *Environ. Sci. Technol.* 51, 12246–12253 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02368>

Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U. & Fürst, P. Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water [Análisis de microplásticos en el agua mediante espectroscopía micro-Raman: Liberación de partículas de plástico de diferentes envases en el agua mineral]. *Water Research* 129, 154–162 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.011>

Science News Explores. Seafloor hosts surprising number of deep-sea vents [El fondo marino alberga un número sorprendente de respiraderos de aguas profundas]. (2016) <https://www.snewsexplores.org/article/seafloor-hosts-surprising-number-deep-sea-vents> (acceso: 1 de mayo de 2025).

ScienceDirect. Food allergy [Alergia alimentaria]. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/food-allergy> (acceso: 1 de mayo de 2025).

ScienceDirect. Inflammatory bowel disease [Enfermedad inflamatoria intestinal]. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/inflammatory-bowel-disease> (acceso: 1 de mayo de 2025).

ScienceDirect. Ingestion [Ingestión]. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/ingestion> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Scott C. Doney, D. Shallin Busch, Sarah R. Cooley and Kristy J. Kroeker. The Impacts of Ocean Acidification on Marine Ecosystems and Reliant Human Communities [Efectos de la acidificación de los océanos en los ecosistemas marinos y las comunidades humanas que dependen de ellos]. Annual Review of Environment and Resources 45, 83–112 (2020). <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083019>

Senathirajah, K. et al. Estimation of the mass of microplastics ingested – A pivotal first step towards human health risk assessment [Estimación de la masa de microplásticos ingeridos - Un primer paso fundamental hacia la evaluación del riesgo para la salud humana]. Journal of Hazardous Materials 404, 124004 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124004>

Shafea, L. et al. Microplastics in agroecosystems: A review of effects on soil biota and key soil functions [Microplásticos en agroecosistemas: Una revisión de los efectos sobre la biota del suelo y las funciones clave del suelo]. J. Plant Nutr. Soil Sci. 186, 5–22 (2023). <https://doi.org/10.1002/jpln.202200136>

Shanwei Government. Contenido sobre salud medioambiental. Microplásticos hallados por primera vez en el cuerpo humano, ¿son perjudiciales para la salud? He aquí la respuesta [https://www.shanwei.gov.cn/swbj/467/503/content/post\\_550539.html](https://www.shanwei.gov.cn/swbj/467/503/content/post_550539.html) (acceso: 1 de mayo de 2025).

Shapiro-Mendoza, C. K. et al. Sudden Unexpected Infant Deaths: 2015–2020 [Muertes súbitas inesperadas de bebés: 2015-2020]. Pediatrics 151, e2022058820 (2023). <https://doi.org/10.1542/peds.2022-058820>

Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review [Impacto de los microplásticos en el embarazo y el desarrollo fetal: Una revisión sistemática]. Cureus 16, e60712 (2024). <https://doi.org/10.7759/cureus.60712>

Sharqawy, M. H., Lienhard, J. H. & Zubair, S. M. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data [Propiedades termofísicas del agua de mar: revisión de las correlaciones y datos existentes]. Desalination and Water Treatment 16, 354–380 (2010). <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1079>

Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic [Emisión de microplásticos al océano]. PNAS Nexus 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

Smith, A. L. M., Whitehall, J. C. & Greaves, L. C. Mitochondrial DNA mutations in ageing and cancer [Mutaciones del ADN mitocondrial en el envejecimiento y el cáncer]. Molecular Oncology 16, 3276–3294 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.molonc.2022.07.012>

[doi.org/10.1002/1878-0261.13291](https://doi.org/10.1002/1878-0261.13291)

Sofield, C. E., Anderton, R. S. & Gorecki, A. M. Mind over Microplastics: Exploring Microplastic-Induced Gut Disruption and Gut-Brain-Axis Consequences [La mente sobre los microplásticos: Exploración de la alteración intestinal inducida por microplásticos y sus consecuencias en el eje intestino-cerebro]. *Current Issues in Molecular Biology* 46, 4186–4202 (2024). <https://doi.org/10.3390/cimb46050256>

Sori, M. M. & Bramson, A. M. Water on Mars, With a Grain of Salt: Local Heat Anomalies Are Required for Basal Melting of Ice at the South Pole Today [Con un grano de sal: Las anomalías térmicas locales son necesarias para el deshielo basal actual del Polo Sur]. *Geophysical Research Letters* 46, 1222–1231 (2019). <https://doi.org/10.1029/2018GL080985>

Stallings, E. B. et al. National population-based estimates for major birth defects, 2016–2020 [Estimaciones nacionales basadas en la población para los principales defectos congénitos, 2016-2020]. *Birth Defects Research* 116, e2301 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2301>

Strass, V. H., Rohardt, G., Kanzow, T., Hoppema, M. & Boebel, O. Multidecadal warming and density loss in the Deep Weddell Sea, Antarctica [Calentamiento multidecenal y pérdida de densidad en las profundidades del mar de Weddell, Antártida]. *Journal of Climate* 33, 9863–9881 (2020). <https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0271.1>

Su, M. et al. Toxicity Mechanisms of Microplastic and Its Effects on Ruminant Production: A Review [Mecanismos de toxicidad de los microplásticos y sus efectos en la producción de rumiantes: Una revisión]. *Biomolecules* 15, 462 (2025). <https://doi.org/10.3390/biom15040462>

Sun, D., Li, F., Jing, Z., Hu, S., & Zhang, B. (2023). Frequent marine heatwaves hidden below the surface of the global ocean [Frecuentes olas de calor marinas ocultas bajo la superficie del océano global]. *Nature Geoscience*, 16(12), 1099–1104. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01325-w>

Sun, Q. et al. Association of Urinary Concentrations of Bisphenol A and Phthalate Metabolites with Risk of Type 2 Diabetes: A Prospective Investigation in the Nurses [Asociación de las concentraciones urinarias de bisfenol A y metabolitos de ftalatos con el riesgo de diabetes de tipo 2. Una investigación prospectiva en enfermeras del Reino Unido: Una investigación prospectiva en enfermeras] *Health Study (NHS) and NHSII Cohorts*. *Environ Health Perspect* 122, 616–623 (2014). <https://doi.org/10.1289/ehp.1307201>

Sun, R. et al. Preliminary study on impacts of polystyrene microplastics on the hematological system and gene expression in bone marrow cells of mice [Estudio preliminar sobre el impacto de los microplásticos de poliestireno en el sistema hematológico y la expresión génica en células de médula ósea de ratones]. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 218, 112296 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112296>

Sun, XD., Yuan, XZ., Jia, Y. et al. Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in *Arabidopsis thaliana* [Los nanoplásticos con carga diferencial muestran una acumulación distinta en *Arabidopsis thaliana*]. *Nat. Nanotechnol.* 15, 755–760 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0707-4>

Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y. & Miyazaki, A. Alkaline extraction yields a higher number of microplastics in forest canopy leaves: implication for microplastic storage [La extracción alcalina produce un mayor número de microplásticos en las hojas del dosel forestal: implicación para el almacenamiento de microplásticos]. *Environ Chem Lett* 22, 1599–1606 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01725-3>

Susanti, R., Yuniautti, A. & Fibriana, F. The Evidence of Microplastic Contamination in Central Javanese Local Ducks from Intensive Animal Husbandry [Pruebas de contaminación por microplásticos en patos locales de Java Central debido a la cría intensiva de animales]. Water Air Soil Pollut 232, 178 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05142-y>

Sustainable Plastics. Scientists find microplastics in clouds above Mount Fuji [Científicos hallan microplásticos en las nubes del monte Fuji]. Sustainable Plastics. <https://www.sustainableplastics.com/news/scientists-find-microplastics-clouds-above-mount-fuji> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Symeonides, C., Vacy, K., Thomson, S. et al. Male autism spectrum disorder is linked to brain aromatase disruption by prenatal BPA in multimodal investigations and 10HDA ameliorates the related mouse phenotype [El trastorno del espectro autista masculino está relacionado con la alteración de la aromatasa cerebral por BPA prenatal en investigaciones multimodales y 10HDA mejora el fenotipo de ratón relacionado]. Nat Commun 15, 6367 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48897-8>

Taylor, R., Turnbull, D. Mitochondrial DNA mutations in human disease [Mutaciones del ADN mitocondrial en las enfermedades humanas]. Nat Rev Genet 6, 389–402 (2005). <https://doi.org/10.1038/nrg1606>

The Cool Down. 'Experts raise concerns about record-breaking phenomenon observed in Atlantic Ocean: 'It's just astonishing' [Los expertos expresan su preocupación por un fenómeno sin precedentes observado en el Océano Atlántico: "Es simplemente asombroso"] (2024) <https://www.thecoldown.com/outdoors/ocean-temperature-pollution-sudden-spike/> (acceso: 1 de mayo de 2025)

The European Space Agency (ESA). <https://www.esa.int> (acceso: 1 de mayo de 2025).

The Guardian. Autism could be diagnosed with stool sample, scientists say [El autismo podría diagnosticarse con una muestra de heces, según los científicos]. <https://www.theguardian.com/science/article/2024/jul/08/autism-could-be-diagnosed-with-stool-sample-microbes-research> (acceso: 1 de mayo de 2025).

The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists [Mancha caliente: una vasta mancha de agua caliente frente a la costa de Nueva Zelanda desconcierta a los científicos]. (2019) <https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists> (acceso: 1 de mayo de 2025).

The Guardian. Mental health overtakes cancer and obesity as Britons' biggest health worry [La salud mental supera al cáncer y la obesidad como principal preocupación sanitaria de los británicos]. (2024) <https://www.theguardian.com/society/2024/sep/20/mental-health-overtakes-cancer-and-obesity-as-britons-biggest-health-worry> (acceso: 1 de mayo de 2025).

The Guardian. Scientists unveil bionic robo-fish to remove microplastics from seas [Científicos presentan un pez-robot biónico para eliminar los microplásticos de los mares]. <https://www.theguardian.com/environment/2022/jun/22/scientists-unveil-bionic-robo-fish-to-remove-microplastics-from-seas> (acceso: 1 de mayo de 2025).

The Guardian. Shanna Swan: 'Most couples may have to use assisted reproduction by 2045' [La mayoría de las parejas tendrán que recurrir a la reproducción asistida en 2045]. (2021) <https://www.theguardian.com/society/2021/mar/28/shanna-swan-fertility-reproduction-count-down> (acceso: 1 de mayo de 2025).

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis [Cambio climático 2021: La base científica]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1> (acceso: 1 de mayo de 2025).

The International Union for Conservation of Nature (IUCN). Desoxigenación de los océanos. <https://iucn.org/resources/issues-brief/ocean-deoxygenation> (acceso: 1 de mayo de 2025).

The Ocean Foundation. Ocean conservation. La Fundación del Océano. <https://oceandfn.org> (acceso: 1 de mayo de 2025).

The Pennsylvania State University Research. Microplastics impact cloud formation, likely affecting weather and climate [Los microplásticos influyen en la formación de nubes, lo que puede afectar al tiempo y al clima]. (2024) <https://www.psu.edu/news/research/story/microplastics-impact-cloud-formation-likely-affecting-weather-and-climate> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Thompson, R. C. et al. Twenty years of microplastic pollution research—what have we learned? [Veinte años de investigación sobre la contaminación por microplásticos: ¿qué hemos aprendido?] Science 386, eadl2746 (2024). <https://doi.org/10.1126/science.adl2746>

Tikhonova, D. A., Karetnikov, S. G., Ivanova, E. V. & Shalunova, E. P. The Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column of Lake Ladoga [Distribución vertical de microplásticos en la columna de agua del lago Ladoga]. Water Resour 51, 146–153 (2024). <https://doi.org/10.1134/S009780782370063X>

Trasande, L. et al. Prenatal phthalate exposure and adverse birth outcomes in the USA: a prospective analysis of births and estimates of attributable burden and costs [Exposición prenatal a ftalatos y resultados adversos del parto en EE.UU.: un análisis prospectivo de los nacimientos y estimaciones de la carga atribuible y los costes]. The Lancet Planetary Health 8, e74–e85 (2024). [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00270-X](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00270-X)

Tsujimura, A. et al. Erectile Function and Sexual Activity Are Declining in the Younger Generation: Results from a National Survey in Japan [La función eréctil y la actividad sexual están disminuyendo en la generación más joven: Resultados de una encuesta nacional en Japón]. The World Journal of Men's Health 43, 239–248 (2025). <https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>

Tuna, A., Taş, B.M., Başaran Kankılıç, G. et al. Detection of microplastics in patients with allergic rhinitis [Detección de microplásticos en pacientes con rinitis alérgica]. Eur Arch Otorhinolaryngol 280, 5363–5367 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00405-023-08105-7>

U.S. Department Of Health And Human Services. 2022 National Healthcare Quality and Disparities Report [Informe nacional sobre calidad y disparidades de la asistencia sanitaria]. Rockville, MD: Agency for Healthcare Research and Quality. (2022) <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK587174> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Hipoxia oceánica: Zonas muertas. <https://www.undp.org/publications/issue-brief-ocean-hypoxia-dead-zones> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2021). From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution [De la contaminación a la solución: Una evaluación mundial de los desechos marinos y la contaminación por plásticos]. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution> (acceso: 1 de mayo de 2025)

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) Beat plastic pollution [Vencer la contaminación por plásticos] <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution/?lang=ES> (acceso: 1 de mayo de 2025)

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Chemicals in Plastics - A Technical Report [Sustancias químicas en los plásticos - Informe técnico] (2023). <https://www.unep.org/resources/report/chemicals-plastics-technical-report> (acceso: 1 de mayo de 2025)

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Monitoring Plastics in Rivers and Lakes: Guidelines for the Harmonization of Methodologies [Seguimiento de plásticos en ríos y lagos: Directrices para la armonización de metodologías]. (2020) <https://www.unep.org/resources/report/monitoring-plastics-rivers-and-lakes-guide-lines-harmonization-methodologies> (acceso: 1 de mayo de 2025)

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Beat plastic pollution [Vencer la contaminación por plásticos] <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution/?lang=ES> (acceso: 1 de mayo de 2025)

Naciones Unidas Malasia. Política de gestión de residuos sólidos. ONU Malasia. [https://malaysia.un.org/sites/default/files/2022-02/POLSOLSum\\_1.pdf](https://malaysia.un.org/sites/default/files/2022-02/POLSOLSum_1.pdf) (acceso: 1 de mayo de 2025).

Universidad de Newcastle. Plastic ingestion by people could be equating to a credit card a week [La ingesta de plástico podría equivaler a una tarjeta de crédito a la semana]. <https://www.newcastle.edu.au/newsroom/featured/plastic-ingestion-by-people-could-be-equating-to-a-credit-card-a-week> (acceso: 1 de mayo de 2025)

Universidad de Stirling. Hitch-hiking viruses can survive on microplastics in freshwater, new study finds [Los virus autoestopistas pueden sobrevivir en los microplásticos del agua dulce, según un nuevo estudio]. (2022) <https://www.stir.ac.uk/news/2022/june-2022-news/hitch-hiking-viruses-can-survive-on-microplastics-in-freshwater-new-study-finds> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Valero, D., Belay, B. S., Moreno-Rodenas, A., Kramer, M. & Franca, M. J. The key role of surface tension in the transport and quantification of plastic pollution in rivers [El papel clave de la tensión superficial en el transporte y la cuantificación de la contaminación por plásticos en los ríos]. Water Research 226, 119078 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119078>

Van der Veen, I., van Mourik, L.M., van Velzen, M.J.M., Groenewoud, Q.R., & Leslie, H.A. Plastic particles in livestock feed, milk, meat and blood: A pilot study [Partículas de plástico en piensos, leche, carne y sangre: Un estudio piloto]. Report EH22-01, 29 April 2022. <https://vakbladvoedingsindustrie.nl/storage/app/media/Rapporten/rapporten%202022/07-juli/VOE-2022-JUL-PLASTICSOUP.pdf> (acceso: 1 de mayo de 2025)

Van Schependom, J. & D'haeseleer, M. Advances in Neurodegenerative Diseases [Avances en enfermedades neurodegenerativas]. Journal of Clinical Medicine 12, 1709 (2023). <https://doi.org/10.3390/jcm12051709>

Van Sebille, E., England, M. H. & Froyland, G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters [Origen, dinámica y evolución de los parches de basura oceánica a partir de las derivas superficiales observadas]. Environ. Res. Lett. 7, 044040 (2012). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044040>

Vanuytsel, T., Bercik, P. & Boeckxstaens, G. Understanding neuroimmune interactions in disorders of gut–brain interaction: from functional to immune-mediated disorders [Comprensión de las interacciones neuroinmunes en los trastornos de la interacción intestino-cerebro: de los trastornos funcionales a los inmunomediados]. Gut 72, 787–798 (2023). <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2020-320633>

Vieira, F., & Hamza, V. M. Global heat flow: New estimates using digital maps and GIS techniques [Flujo mundial de calor: Nuevas estimaciones mediante mapas digitales y técnicas SIG]. Int. J. Terr. Heat Flow Appl. Geotherm. 1, 6–13 (2018).

Villarrubia-Gómez, P., Carney Almroth, B., Eriksen, M., Ryberg, M. & Cornell., S. E. Plastics pollution exacerbates the impacts of all planetary boundaries [La contaminación por plásticos agrava el impacto de todos los límites planetarios]. One Earth 7, 2119–2138 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.10.017>

Viterito, A. 1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History [1995: Un importante punto de inflexión en la historia geofísica reciente]. Int. J. Environ. Sci. Nat. Res. 29, 556271 (2022). <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2022.29.556271>

Völker, J., Ashcroft, F., Vedøy, Å., Zimmermann, L. & Wagner, M. Adipogenic Activity of Chemicals Used in Plastic Consumer Products [Actividad adipogénica de sustancias químicas utilizadas en productos de consumo de plástico]. Environ. Sci. Technol. 56, 2487–2496 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06316>

VRT NWS. Brain contains “full plastic spoonful” of microplastics [El cerebro contiene «una cucharita llena» de microplásticos]. (2025) <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2025/02/04/microplastics-in-de-hersen> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Wan, Y., Wu, C., Xue, Q. & Hui, X. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil [Efectos de la contaminación plástica en la evaporación del agua y el agrietamiento por desecación en el suelo]. Science of The Total Environment 654, 576–582 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123>

Wang, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation [Microplásticos hidrófilos transportados por el aire en el agua de las nubes a gran altitud y su papel en la formación de nubes]. Environ Chem Lett 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

Wang, Y. et al. Robust, Healable, Self-Locomotive Integrated Robots Enabled by Noncovalent Assembled Gradient Nanostructure [Robots integrados, robustos, sanables y autolocalizadores habilitados por nanoestructuras gradientes ensambladas no covalentes]. Nano Lett. 22, 5409–5419 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c01375>

Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation [Microplásticos hidrófilos transportados por el aire en el agua de las nubes a gran altitud y su papel en la formación de nubes]. Environ Chem Lett 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

Wei, W. et al. Analyzing the Trends and Causes of Birth Defects – Jinan City, Shandong Province, China, 2005–2022 [Análisis de las tendencias y causas de los defectos congénitos - Ciudad de Jinan, provincia de Shandong, China, 2005-2022]. CCDCW 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>

Welch, B. M. et al. Associations Between Prenatal Urinary Biomarkers of Phthalate Exposure and Preterm Birth: A Pooled Study of 16 US Cohorts [Asociaciones entre biomarcadores prenatales urinarios de exposición a ftalatos y parto prematuro: Un estudio conjunto de 16 cohortes estadounidenses]. *JAMA Pediatrics* 176, 895–905 (2022). <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2022.2252>

Windheim, J. et al. Micro- and Nanoplastics' Effects on Protein Folding and Amyloidosis [Efectos de los micro y nanoplásticos en el plegamiento de proteínas y la amiloidosis]. *International Journal of Molecular Sciences* 23, 10329 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijms231810329>

Winiarska, E., Jutel, M. & Zemelka-Wiacek, M. The potential impact of nano- and microplastics on human health: Understanding human health risks [El impacto potencial de los nano y microplásticos en la salud humana: Comprender los riesgos para la salud humana]. *Environmental Research* 251, 118535 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118535>

Wong, A. P. S. et al. Argo Data 1999–2019: Two Million Temperature-Salinity Profiles and Subsurface Velocity Observations From a Global Array of Profiling Floats [1999-2019: Dos millones de perfiles de temperatura-salinidad y observaciones de la velocidad subsuperficial a partir de una red mundial de boyas de perfilado]. *Front. Mar. Sci.* 7, 00700 (2020). <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00700>

Wong, M. H. et al. Evolution of the Horizontal Winds in Jupiter's Great Red Spot From One Jovian Year of HST/WFC3 Maps [Evolución de los vientos horizontales en la Gran Mancha Roja de Júpiter a partir de un año joviano de mapas HST/WFC3]. *Geophysical Research Letters* 48, e2021GL093982 (2021). <https://doi.org/10.1029/2021GL093982>

Institución Oceanográfica Woods Hole. Warming ocean [Calentamiento del océano]. WHOI Argo. <https://www2.whoi.edu/site/argo/impacts/warming-ocean> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Consejo Mundial de la Energía. World Energy Resources: Solar 2013. (2013) <https://www.worldenergy.org/publications> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Organización Mundial de la Salud. 1 in 10 babies worldwide are born early, with major impacts on health and survival [1 de cada 10 bebés en el mundo nace prematuro, con importantes repercusiones en la salud y la supervivencia]. (2023) <https://www.who.int/news/item/06-10-2023-1-in-10-babies-worldwide-are-born-early-with-major-impacts-on-health-and-survival> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Organización Mundial de la Salud. 1 in 6 people globally affected by infertility [1 de cada 6 personas sufre infertilidad en el mundo]. (2023) <https://www.who.int/news/item/04-04-2023-1-in-6-people-globally-affected-by-infertility> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Organización Mundial de la Salud. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services [Creece la carga mundial de cáncer, en medio de una creciente necesidad de servicios]. (2024) <https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing--amidst-mounting-need-for-services> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Organización Mundial de la Salud. Mental disorders [Mental disorders]. WHO Fact Sheets. (2022) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mental-disorders> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Organización Mundial de la Salud. Obesity and overweight [Obesidad y sobrepeso]. WHO Fact Sheets. (2025) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Organización Mundial de la Salud. The top 10 causes of death [Las 10 principales causas de muerte]. WHO Fact Sheets. (2024) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Organización Mundial de la Salud. WHO releases first-ever list of health-threatening fungi [La OMS publica por primera vez una lista de hongos peligrosos para la salud]. (2022) <https://www.who.int/news/item/25-10-2022-who-releases-first-ever-list-of-health-threatening-fungi> (acceso: 1 de mayo de 2025).

La Organización Meteorológica Mundial confirma que 2024 fue el año más cálido jamás registrado al superar en cerca de 1,55 °C los niveles preindustriales <https://wmo.int/es/news/media-centre/la-organizacion-meteorologica-mundial-confirma-que-2024-fue-el-ano-mas-calido-jamas-registrado-al> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Organización Meteorológica Mundial (OMM). State of the Global Climate 2024 [Estado del clima mundial 2024]. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Wu, Y. et al. Effect of microplastics exposure on the photosynthesis system of freshwater algae [Efecto de la exposición a microplásticos en el sistema fotosintético de algas de agua dulce]. Journal of Hazardous Materials 374, 219–227 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.039>

WWF-Australia. How many birds die from plastic pollution? [¿Cuántas aves mueren a causa de la contaminación por plásticos?] <https://wwf.org.au/blogs/how-many-birds-die-from-plastic-pollution> (acceso: 1 de mayo de 2025).

Xu, G., Strathearn, L., Liu, B., Yang, B. & Bao, W. Twenty-Year Trends in Diagnosed Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Among US Children and Adolescents, 1997-2016 [Tendencias de veinte años en el trastorno por déficit de atención con hiperactividad diagnosticado entre niños y adolescentes estadounidenses, 1997-2016]. JAMA Network Open 1, e181471 (2018). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.1471>

Xu, M. et al. Internalization and toxicity: A preliminary study of effects of nanoplastic particles on human lung epithelial cell [Internalización y toxicidad: Un estudio preliminar de los efectos de las partículas de los nanoplásticos en la célula epitelial pulmonar humana]. Science of The Total Environment 694, 133794 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133794>

Yadav, A., Vuković, L. & Narayan, M. An Atomic and Molecular Insight into How PFOA Reduces  $\alpha$ -Helicity, Compromises Substrate Binding, and Creates Binding Pockets in a Model Globular Protein [Una visión atómica y molecular de cómo el PFOA reduce la  $\alpha$ -helicidad, compromete la unión a sustratos y crea bolsas de unión en una proteína globular modelo]. J. Am. Chem. Soc. 146, 12766–12777 (2024). <https://doi.org/10.1021/jacs.4c02934>

Yee, M. S.-L. et al. Impact of Microplastics and Nanoplastics on Human Health [Impacto de los microplásticos y nanoplásticos en la salud humana]. Nanomaterials 11, 496 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11020496>

Yöntem, F. D. & Ahbab, M. A. Mitochondria as a target of micro- and nanoplastic toxicity [La mitocondria como diana de la toxicidad de micro y nanoplásticos]. Cambridge Prisms: Plastics 2, e6 (2024). <https://doi.org/10.1017/plc.2024.6>

Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate) [Una bacteria que degrada y asimila el poli(tereftalato de etileno)]. Science 351, 1196–1199 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

Yu, H., Zhang, Y., Tan, W. & Zhang, Z. Microplastics as an Emerging Environmental Pollutant in Agricultural Soils: Effects on Ecosystems and Human Health [Los microplásticos como contaminante ambiental emergente en suelos agrícolas: Efectos sobre los ecosistemas y la salud humana]. Front. Environ. Sci. 10, 855292 (2022). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.855292>

Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems [Contaminación por microplásticos: Amenazas e impactos en los ecosistemas marinos mundiales]. Sustainability 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

Zaheer, J. et al. Pre/post-natal exposure to microplastic as a potential risk factor for autism spectrum disorder [La exposición pre/postnatal a microplásticos como posible factor de riesgo del trastorno del espectro autista]. Environment International 161, 107121 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107121>

Zajac, M. et al. Exposure to polystyrene nanoparticles leads to changes in the zeta potential of bacterial cells [La exposición a nanopartículas de poliestireno provoca cambios en el potencial zeta de las células bacterianas]. Sci Rep 13, 9552 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36603-5>

Zeidan, J. et al. Global prevalence of autism: A systematic review update [Prevalencia mundial del autismo: Una revisión sistemática actualizada]. Autism Research 15, 778–790 (2022). <https://doi.org/10.1002/aur.2696>

Zhang, J., Wang, L., Trasande, L. & Kannan, K. Occurrence of Polyethylene Terephthalate and Polycarbonate Microplastics in Infant and Adult Feces [Presencia de microplásticos de tereftalato de polietileno y policarbonato en las heces de lactantes y adultos]. Environ. Sci. Technol. Lett. 8, 989–994 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00559>

Zhang, W. et al. The mechanism for adsorption of Cr(VI) ions by PE microplastics in ternary system of natural water environment [Mecanismo de adsorción de iones Cr(VI) por microplásticos de PE en un sistema ternario del medio acuático natural]. Environmental Pollution 257, 113440 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113440>

Zhang, Y. et al. Selective bioaccumulation of polystyrene nanoplastics in fetal rat brain and damage to myelin development [Bioacumulación selectiva de nanoplásticos de poliestireno en cerebro fetal de rata y daños en el desarrollo de la mielina]. Ecotoxicology and Environmental Safety 278, 116393 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116393>

Zhang, Y., Wang, J., Yang, H. & Guan, Y. The potential mechanisms underlying phthalate-induced hypospadias: a systematic review of rodent model studies [Los posibles mecanismos subyacentes a la hipospadias inducida por ftalatos: una revisión sistemática de los estudios con modelos de roedores]. Front. Endocrinol. 15, (2024). <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1490011>

Zhang, Y.-W. et al. Bridging relevance between microplastics, human health and bone metabolism: Emerging threats and research directions [Relación entre los microplásticos, la salud humana y el metabolismo óseo: Amenazas emergentes y líneas de investigación]. Environmental Chemistry and Ecotoxicology 6, 422–435 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.08.006>

Zhong, Y. et al. Global, regional and national burdens of bipolar disorders in adolescents and young adults: a trend analysis from 1990 to 2019 [Cargas mundiales, regionales y nacionales de los trastornos bipolares en adolescentes y adultos jóvenes: un análisis de tendencias de 1990 a 2019]. Gen Psych 37, e101255 (2024). <https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>

Zhu, R. et al. A global estimate of multiecosystem photosynthesis losses under microplastic pollution [Estimación global de las pérdidas de fotosíntesis en varios ecosistemas por contaminación con microplásticos]. Proceedings of the National Academy of Sciences 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>

Zuin, M. et al. Trends in Sudden Cardiac Death Among Adults Aged 25 to 44 Years in the United States: An Analysis of 2 Large US Databases [Tendencias de la muerte súbita cardiaca entre adultos de 25 a 44 años en Estados Unidos: Un análisis de 2 grandes bases de datos estadounidenses]. JAHA 14, e035722 (2025). <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.035722>