

Efecto de los microplásticos de poliestireno sobre el citoesqueleto de células humanas

Noemí Iraís Pat-Vázquez^a, Rocío Tirado-Mendoza^{b,‡}, José Manuel Cervantes-Uc^{a,§}, Rosa María Leal-Bautista^{c,¶}, Gilberto Acosta-González^{c,d,¶}, Nayeli Rodríguez-Fuentes^{a,d,e,*}



Resumen

El plástico se ha vuelto muy popular en los últimos años gracias a su durabilidad y propiedades. A pesar de sus múltiples ventajas, la humanidad ha desarrollado cierta dependencia hacia este material, lo que ha propiciado un incremento en su uso y, a su vez, en la generación de desechos ante el escaso hábito de reúso.

Uno de los polímeros plásticos más usados es el poliestireno (PS), ya que este se usa en una amplia gama de aplicaciones gracias a su bajo costo y fácil producción. Sin embargo, pasado el tiempo de vida útil de este plástico, es conside-

rado como desecho. El PS al estar expuesto a condiciones atmosféricas como la radiación UV, se fragmenta dando como resultado la creación de microplásticos (MP), mismos que son pequeñas partículas que no sobrepasan los 5 mm, lo que representa una amenaza al medio ambiente pues, al degradarse, las propiedades decaen, se genera un cambio dimensional y, además, pueden ser fácilmente transportadas no solo al medio ambiente, sino también a los organismos.

Este artículo de revisión se enfoca en evidenciar las principales rutas que siguen los MP al interactuar con los seres humanos y los efectos potenciales de los PS-MP en el citoesqueleto, así como en resaltar la necesidad de más estudios al respecto.

Palabras clave: Célula; célula-plástico; contaminantes emergentes; polímeros, microplásticos.

Effect of Polystyrene Microplastics on the Cytoskeleton of Human Cells

Abstract

Plastic has become very popular in recent years due to its durability and properties. Despite its many advantages, humanity has developed a certain dependence on this material, which represents an increase in its use and in turn, in waste.

One of the most widely used plastic polymers is the polystyrene (PS), as is used in a wide range of applications due to its low cost and easy production, although after the useful

^a Unidad de Materiales. Laboratorio de Biomateriales. Centro de Investigación Científica de Yucatán, Mérida, Yucatán, México.

^b Facultad de Medicina, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.

^c Unidad de Ciencias del Agua, Centro de Investigación Científica de Yucatán, Cancún, Quintana Roo, C.P. 77500

^d Conahcyt-Centro de Investigación Científica de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.

ORCID ID:

[‡] <https://orcid.org/0000-0001-9443-7665>

[§] <https://orcid.org/0000-0001-5979-0017>

[¶] <https://orcid.org/0000-0002-7242-4836>

[¶] <https://orcid.org/0000-0002-8683-7156>

^e <https://orcid.org/0000-0001-7475-9886>

* Autor para correspondencia: Nayeli Rodríguez Fuentes.

Correo electrónico: nayeli.rodriguez@cicy.mx

Recibido 30-noviembre-2024. Aceptado: 01-abril-2024.



Foto: IA

life of the plastic, it is considered as waste. When plastic is exposure to atmospheric conditions such as UV radiation, it degrades and fragments giving rise to microplastics (MPs), which are defined as small particles that do not exceed 5 mm, representing a threat to the environment because when they degrade the properties decay, a dimensional change is generated and they can also be easily transported not only to the environment but also to organisms.

This review article focuses on highlighting the main pathways that MPs follow when interacting with humans and the

potential effects of PS-MPs on the cytoskeleton, as well as highlighting the need for more studies in this regard.

Key words: *Cells; cell-plastic contact; emerging pollutants; polymers; microplastics.*

INTRODUCCIÓN

La humanidad se ha hecho cada vez más dependiente de los plásticos, esto, gracias a las ventajas que ofrecen este tipo de polímeros, tales como su



Foto: Freepik

Gran parte del plástico puede fragmentarse y generar micropartículas por procesos como la radiación UV, viento, oleaje y bacterias, dando origen a los MP. Los plásticos que generalmente producen más MP son: polipropileno, poliestireno y polietileno, cuyas partículas poseen diámetros de 1 a 5 μm . El poliestireno es uno de los plásticos más abundantes debido a que frecuentemente se emplea en productos de un solo uso, gracias a su versatilidad, durabilidad, rigidez, estabilidad térmica y resistencia a soluciones ácidas.

bajo precio, durabilidad y accesibilidad¹. Derivado de ello, el plástico ha repuntado en múltiples aplicaciones, desplazando en algunas ocasiones a otro tipo de materiales como los cerámicos y metales; sin embargo, al terminar su tiempo de vida útil, los plásticos son desechados y no son sujetos de procesos de reciclaje con frecuencia, por lo que generan contaminación ambiental. El escaso reciclaje de este tipo de polímeros radica en que los

plásticos reciclados no pueden competir con los bajos precios y la alta disponibilidad de los plásticos vírgenes, por lo que cada vez más plásticos vírgenes o nuevos se introducen en la sociedad, mientras que los plásticos en desuso se acumulan en tiraderos². Gran parte del plástico acumulado en tiraderos o esparcido en los ecosistemas, puede fragmentarse y generar micropartículas por ciertos procesos como la radiación UV, viento, oleaje y bacterias, dando origen a los microplásticos (MP)³. Los plásticos que generalmente producen más MP son: polipropileno (PP), poliestireno (PS) y polietileno (PE), cuyas partículas poseen diámetros de 1 a 5 μm . El PS es uno de los plásticos más abundantes debido a que frecuentemente se emplea en productos de un solo uso, gracias a su versatilidad y durabilidad, además de propiedades como rigidez, estabilidad térmica y resistencia a soluciones ácidas⁴.

En este sentido, se ha documentado que los efectos negativos de los MP derivan de sus propiedades físicas, como su tamaño, topografía y forma; también debido a sus propiedades químicas, a los aditivos tóxicos y colorantes que contienen. Estas propiedades de los MP han favorecido que diversas especies los ingieran y/o inhalen, incluso favorecen



Figura 1. Vías de acceso de los MP al ser humano. El esquema muestra el origen de los MP, su distribución en el suelo, agua y aire que tiene como consecuencia su impacto en el humano y en los seres vivos por tres vías principales: el contacto dérmico, la ingestión y la inhalación.

que diversos microorganismos residentes del medio ambiente se depositen sobre estas partículas, participando como transportadores de microbiota y partículas a nivel nanométrico, por lo que pueden repercutir en la salud de los organismos y de la población humana que coexisten en dichos ecosistemas^{5,6}.

La interacción de los MP con los humanos se da a través de tres vías principales: ingesta, contacto dérmico o directo, e inhalación; de todas ellas, la primera es la más estudiada debido a que estas partículas también son ingeridas por animales de consumo humano, principalmente marinos, como es el caso de los mariscos o peces, aunque también se ha demostrado que el agua y otros productos de consumo humano contienen MP⁷ (**figura 1**). Sin embargo, existen escasos reportes en humanos.

Esta interacción MP-humano, puede potencialmente causar daños físicos y afectar la salud, ya que, gracias a su tamaño, pueden introducirse fácilmente a los órganos, tejidos e incluso ocasionar daños citotóxicos a nivel celular⁸.

En las células, la estructura capaz de mediar los aspectos dinámicos y mecánicos es el citoesqueleto, una red compleja compuesta principalmente de proteínas, capaz de brindar soporte y morfología a la célula, pues es considerado el esqueleto de la misma. De esta forma, el citoesqueleto puede reaccionar

ante cualquier estímulo externo, reorganizando su estructura y promoviendo respuestas celulares específicas⁹; por lo que esta red podría estar involucrada en la respuesta celular hacia los MP, ya que se ha demostrado que estas micropartículas establecen contacto con las células y tienen la capacidad de internalizarse o adherirse a ellas causando daño tóxico y un reordenamiento de los componentes del citoesqueleto^{8,9}.

MICROPLÁSTICOS (MP)

Definición

Los MP son partículas cuya medida no sobrepasa los 5 mm; se originan a causa de la fragmentación degradación que sufre el plástico mayor (MP secundarios), o bien son fabricados de ese tamaño desde origen (MP primarios), debido a esto, se encuentran presentes en el agua, aire y suelo⁵, siendo el primero el entorno ambiental, considerado como el acercamiento inicial con el humano.

Clasificación y características

Los MP pueden clasificarse, según su origen, en primarios o secundarios; los primarios son fabricados específicamente para ser de tamaño micro y para formar parte de productos de uso personal como pastas de dientes, exfoliantes, cosméticos, entre otros, mientras que los MP secundarios se

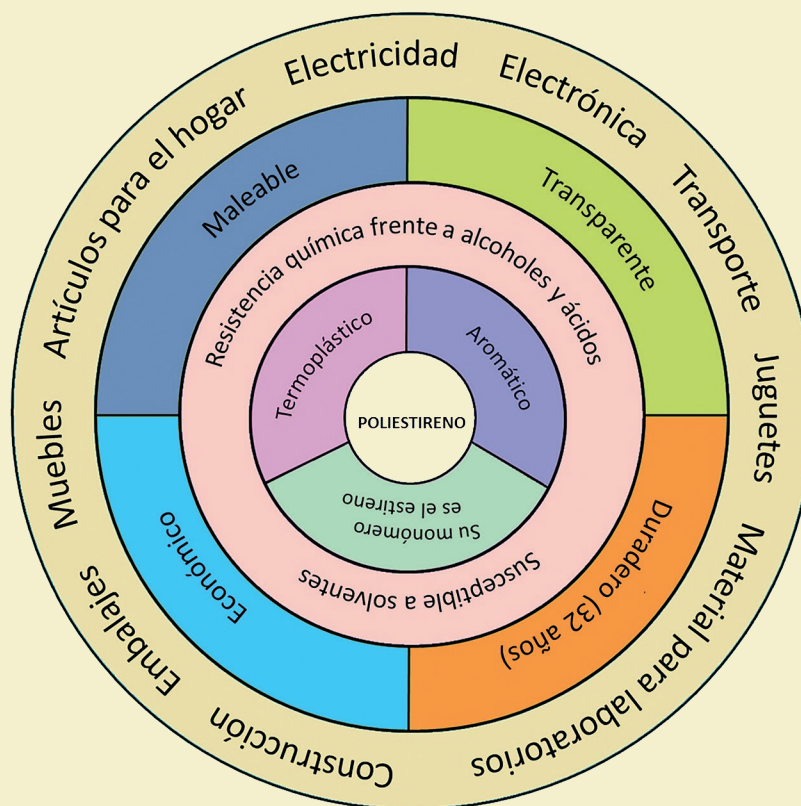


Figura 2. Aplicaciones del PS. El diagrama muestra del centro a la periferia, las propiedades del PS (termoplástico aromático; su monómero es el estireno), su resistencia química (resistencia frente a ácidos y alcoholes, susceptible a disolventes), las características que le han permitido posicionarse dentro de los 3 polímeros más usados (económico, duradero hasta 32 años, maleable y transparente), y en la parte externa del diagrama, las aplicaciones del PS (Industria de la construcción, materiales de laboratorio, embalajes, muebles, artículos para el hogar, electricidad, electrónica, transporte, juguetes).

originan a través de la fragmentación de materiales plásticos de dimensiones mayores, debido a ciertos procesos como la radiación UV y el viento³. Ambos tipos de MP (primarios y secundarios) representan una importante fuente de contaminación en los ecosistemas aéreos, terrestres y acuáticos, provocando efectos negativos en las especies que habitan en dichos ambientes⁶.

POLIESTIRENO (PS)

El PS es un polímero termoplástico aromático que resulta de la polimerización del monómero estireno; es relativamente frágil a menos que sea modificado

químicamente¹⁰. Es uno de los plásticos más económicos, resistentes y fáciles de fabricar, además de tener múltiples aplicaciones. Es transparente, duro y presenta resistencia al calor hasta una temperatura de 70 °C; además, cuenta con la característica de ser fácilmente coloreado. Se trabaja con facilidad, es resistente a los alcoholes y estable a los ácidos, sin embargo, no presenta resistencia a los disolventes; se emplea principalmente en artículos de uso común como vasos y platos desechables, en la industria de embalaje, construcción, muebles, artículos para el hogar, electricidad, electrónica y transporte; en la **figura 2** se muestran algunas de estas aplicaciones^{11,12}.

El PS se trabaja con facilidad, es resistente a los alcoholes y estable a los ácidos, pero no es resistente a los disolventes; se emplea principalmente en artículos de uso común como platos desechables, en la industria de embalaje, construcción, muebles, artículos para el hogar, electricidad, electrónica y transporte.

La literatura menciona que dentro de los polímeros plásticos que más generan MP primarios, esféricos y que miden menos de 5 mm de diámetro, se encuentra el PS⁴.

Propiedades

El PS presenta aplicaciones eléctricas las cuales no se afectan por la humedad del medio ambiente; asimismo, sus propiedades ópticas lo hacen ventajoso para componentes ópticos, ya que este polímero se caracteriza por su claridad reluciente¹⁰.

Puede ser rígido o espumado, por lo que sus propiedades son variadas. De manera general, tiene una buena estabilidad dimensional. Gracias a sus propiedades de aislamiento eléctrico y propiedades mecánicas, es posible encontrarlo en aplicaciones de industrias como la electrónica y de embalaje.

Degradación

El PS es un termoplástico hidrofóbico, por lo que generalmente se considera no biodegradable, ya que es un material muy duradero, se ha demostrado que puede perdurar hasta 32 años sin mostrar signos de degradación; sin embargo, existe evidencia de que la biodegradación del PS ocurre, pero a un ritmo muy lento, en un proceso en el que participan diversas bacterias y hongos¹³.

CITOESQUELETO

El citoesqueleto es un complejo de proteínas en forma de red que cumple funciones específicas en las células; su objetivo es proveer soporte a la célula, siendo el esqueleto de las células animales y participa en procesos celulares como la división celular, transmisión de fuerzas, así como la adaptación, diferenciación y muerte celular¹⁴.



Foto: Brian Marco/Unsplash

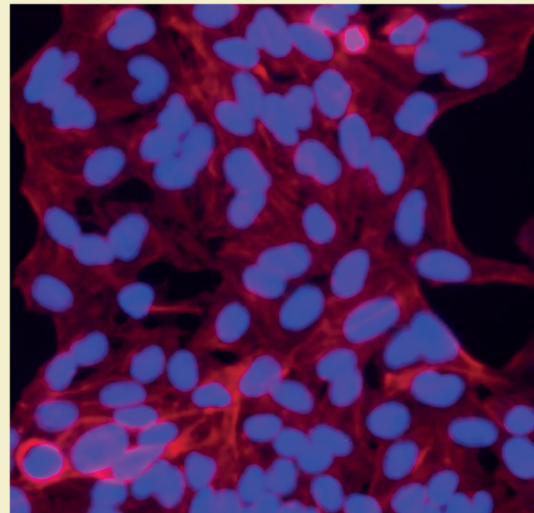
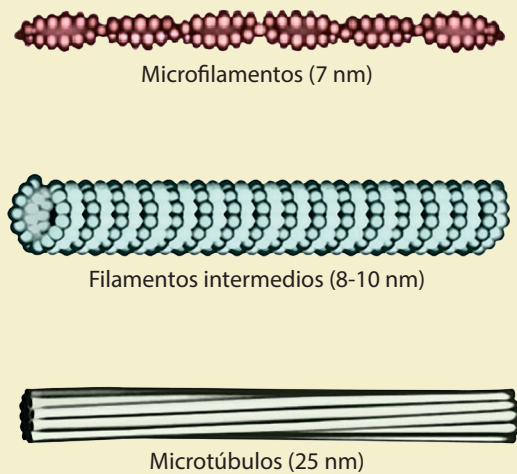


Figura 3. Citoesqueleto. Se muestran los componentes del citoesqueleto (microfilamentos, filamentos intermedios y microtúbulos), del lado derecho de la imagen se muestra una micrografía confocal que muestra células alveolares humanas A549 teñidas con faloidina-rodamina (rojo) y diamidino-2-fenilindol (azul), para detección de actina y DNA respectivamente.

Se han reportado diversas fuentes de contacto entre los MP y los seres vivos, ya que la exposición se da a través de la ingestión, exposición dérmica o contacto directo, y la inhalación, debido a que están distribuidos en todos los ecosistemas, particularmente en el medio acuático y tienen efectos toxicológicos en diferentes organismos.

Estructura

El citoesqueleto está constituido por estructuras fibrosas de proteínas, microfilamentos, filamentos intermedios y microtúbulos. Las principales proteínas presentes en este complejo de red son la actina, tubulina, vimentina, queratina y desmina, cada una con función y estructura diferente¹⁴ (figura 3).

Microfilamentos

Son fibras delgadas y flexibles que se encuentran compuestas por muchos monómeros que están unidos a la proteína principal de actina; los microfila-

mentos son capaces de producir fibras de estrés que generan una fuerza adicional de la célula a movimientos de cizallamiento. La función principal es proveer fuerza a la célula para mejorar su movimiento localizado; además participa en la adhesión y el cambio de forma de la propia célula, por lo que se les atribuye la acción de un trabajo más activo en la dinámica celular^{9,15-17}.

Filamentos intermedios

Tienen composición fibrosa y entrelazada, ya que se encuentran compuestos de muchas cadenas de proteínas. La longitud de estos filamentos es de aproximadamente 10 nm y tienen un papel mayormente estructural en la célula, ya que son permanentes, a diferencia de los filamentos de actina, y tienen la capacidad de crecer y desenvolverse más rápido. La función principal de los filamentos intermedios es resistir la tensión de la célula. Una de las principales proteínas de la que está compuesto es la queratina^{9,16-18}.

Las proteínas que contienen los filamentos intermedios se encuentran clasificadas, de acuerdo

Tabla 1. Tipos de exposición de MP y sus efectos

Tipo de exposición	Medio de ingreso al organismo	Efectos	Referencias
Ingestión	<ul style="list-style-type: none"> • Ingesta de alimentos • Consumo de agua 	<ul style="list-style-type: none"> • Afecta principalmente el sistema gastrointestinal 	7, 27, 28, 29, 30, 31, 38
Exposición dérmica	<ul style="list-style-type: none"> • Productos de higiene personal: jabones, cremas con exfoliantes 	<ul style="list-style-type: none"> • Envejecimiento de la piel • Manchas oscuras 	38
Inhalación	<ul style="list-style-type: none"> • La principal vía es a través de las fosas nasales • Erosión del suelo que contienen MP 	<ul style="list-style-type: none"> • Afecciones principalmente en pulmones • Epitelio respiratorio • Efecto directo de las vías respiratorias superiores 	8, 9, 38

a su estructura, en cinco grupos. Lo grupos I y II son considerados filamentos citoplasmáticos, ya que están compuestos de queratinas ácidas y básicas mezcladas, que se expresan según el tipo celular en el que estén presentes. El grupo III son homopolímeros compuestos por vimentina, desmina, periferina o proteína ácida glial. Los filamentos del grupo IV son expresados principalmente en el sistema nervioso. Finalmente, el grupo V forma paquetes, redes o estructuras no filamentosas¹⁶⁻¹⁸.

Microtúbulos

Los microtúbulos son estructuras huecas que no están ramificadas y tienen un diámetro aproximado de 25 nm. Es la estructura que tiene una mayor dimensión en comparación con los microfilamentos y los filamentos intermedios. La proteína principal de la cual están compuestos los microtúbulos es la tubulina, presente en cilios y flagelos, los cuales son responsables de la función mecánica, por lo que también se consideran estructuras dinámicas. También participan en la progresión del ciclo celular, teniendo un papel activo durante la reorganización de los cromosomas durante la mitosis^{9,16-18}.

EFFECTO DE LOS MICROPLÁSTICOS EN LOS SERES VIVOS

Se han reportado diversas fuentes de contacto entre los MP y los seres vivos, ya que la exposición se da a través de la ingestión, exposición dérmica o contacto directo, y la inhalación, como se muestra en la **figura 1**, debido a que los MP están distribuidos en todos los ecosistemas⁸. Los tipos de exposición,

así como sus consecuencias en los seres vivos, se presentan en la **tabla 1**.

Los seres vivos están en constante exposición a los MP debido a su ubicuidad en el medio ambiente, particularmente en el medio acuático^{19,20}. En años recientes, varios estudios han demostrado que los MP tienen efectos toxicológicos en diferentes organismos²¹. Estudios realizados en pez cebra y ratón, han sugerido que la exposición a MP de polipropileno (PP) podría alterar la composición de la microbiota del intestino, ocasionando inflamación, desorden metabólico y disfunción en la barrera intestinal²¹⁻²⁴. También existen reportes que han demostrado efectos negativos de los MP en organismos acuáticos, como efectos en el comportamiento, estrés oxidativo, neurotoxicidad, genotoxicidad, incapacidad reproductiva, daño hepático y la muerte^{25,26}. En contraste con las investigaciones de los MP y su interacción con especies acuáticas, actualmente existe un importante vacío en la evaluación de la interacción de MP con mamíferos, sus mecanismos de acción y posibles efectos en la salud humana. Aunado a esto, es importante señalar que se han detectado MP en productos de consumo humano como, por ejemplo: mariscos²⁷, azúcar²⁸, sal de mesa²⁹, cerveza³⁰, y agua del grifo³¹.

La contaminación con MP es un problema de escala mundial, en donde ningún país, ninguna ciudad, ninguna población está excluida de sus posibles efectos, que pueden ir desde provocar obstrucción tisular, estrés oxidativo, afectar el metabolismo energético, hasta producir efectos neurotoxicológicos²⁴, ya que recientemente se ha develado que los MP pueden atravesar la barrera hematoencefálica³¹. Los

Tabla 2. Principales efectos biológicos derivados del contacto con microplásticos

Organismo de estudio	MP analizado	Hallazgo	Referencias
Microbiota de ratón (mamífero)	• Poliestireno <5 µm	• Desorden metabólico • Disbiosis	39
Artemia partenogenética	• Poliestireno 10 µm	• Afectaciones en la microvellosidad intestinal	40
Erizo de mar	• Policloruro de vinilo • <250 µm • ≤20 µm	• Bloqueo en el desarrollo de la larva	41
Pez cebra	• Poliestireno • 5 µm • 50 µm	• Alteraciones en el microbioma de la larva • Alteraciones genéticas en el metabolismo energético	42
Artrópodo terrestre	• Polietileno <500 µm	• Desequilibrio en microbiota	43
Pez	• MP marinos (polietileno de baja y alta densidad, polipropileno, poliestireno)	• Citotoxicidad	44
Ser humano	• Polietileno y poliestireno	• Inducción de estrés oxidativo	45
Ratón	• Poliestireno • 0.2, 2 y 10 µm	• Acumulación de MP de PS	31
Ser humano	• Polipropileno	• Presencia de MP en las placentas humanas	46
Ratón	• Poliestireno de 2 µm	• MP en citoplasma en células oculares y pérdida de viabilidad (<i>in vitro</i>) • Ojo seco e inflamación ocular (<i>in vivo</i>)	47

La contaminación con MP es un problema de escala mundial, en donde nadie está excluido de sus posibles efectos, que pueden ir desde provocar obstrucción tisular, estrés oxidativo, afectar el metabolismo energético, hasta producir efectos neurotoxicológicos, ya que se ha develado que los MP pueden atravesar la barrera hematoencefálica.

hallazgos principales de los efectos de los MP sobre los seres vivos se resumen en la **tabla 2**.

MP DE PS Y SU IMPACTO EN EL CITOESQUELETO

El efecto que tienen los MP sobre las células puede estudiarse a nivel celular a través del citoesqueleto; el interés de este soporte celular se debe a su estruc-

tura y a las funciones que desempeña, ya que este complejo además de proveer sostén y soporte a la célula, reacciona ante diversos estímulos físicos y químicos a los que las células son expuestas; funge como medio de transporte de sustancias y participa en procesos como la proliferación, adhesión, tráfico de sustancias y biomoléculas, así como en la muerte celular. En este sentido, el citoesqueleto tiene la capacidad de mediar el dinamismo de los organismos gracias a su reorganización constante ante la exposición a diferentes estímulos, como por ejemplo a los MP³²⁻³⁵.

Una de las interrogantes importantes es saber si los MP pueden ingresar internamente a la célula o simplemente se adhieren al exterior de esta. En este sentido, trabajos realizados por Stock y cols.³⁵, en los cuales usaron MP-PS fluorescentes de diversos tamaños (1, 4 y 10 µm) y cultivos de celulares de cáncer de colon humano, demostraron que MP de 1



Foto: iA

y $4\text{ }\mu\text{m}$ logran internalizarse en las células, mientras que los MP de $10\text{ }\mu\text{m}$ se acumularon en el espacio extracelular³⁵.

El efecto de los MP también ha sido evaluado a nivel tisular; investigaciones realizadas por Hesler et al.³⁴ demostraron la capacidad de los MP ($5\text{ }\mu\text{m}$) de internalizarse en las células de placenta y de tracto gastrointestinal y promover un reordenamiento de los filamentos de actina. Una hipótesis importante generada a partir de este trabajo fue la posibilidad

de que después de la internalización primaria de los MP a las células intestinales, estos pueden transferirse a otros órganos y tejidos del organismo³⁵.

Es importante mencionar que además de los factores físicos, como la forma y el tamaño de los MP, también existen factores químicos que determinan el grado del efecto que los MP tendrán sobre las células o tejidos. En este sentido, estudios realizados en modelos *in vitro* con células inmunes, fibroblastos y células cancerosas, demostraron que los MP



liberan ciertos componentes durante su degradación mediante lixiviación de subproductos, aditivos o químicos residuales de su proceso de producción, promoviendo daño en las membranas celulares y eventualmente la muerte³⁵.

Los efectos celulares y tisulares de los MP también trascienden a nivel organismo; estudios realizados por Haddadi et al.³⁶ evidenciaron el efecto negativo de estas micropartículas en la función ovárica de ratas, así como su bioacumulación en diversos órganos y tejidos del roedor. Para ello, expusieron al modelo animal a MP-PS de 5 μm por vía oral durante cuatro ciclos estrogénicos y encontraron la bioacumulación de MP-PS en el duodeno y en diferentes partes del tejido ovárico, así como alteraciones en la formación de folículos (foliculogénesis), incremento de enzimas relacionadas con el estrés oxidativo como la superóxido dismutasa (SOD) y catalasa (CAT). Adicionalmente, este trabajo demostró que la presencia de MP-PS no solo afecta el rearrreglo de componentes del citoesqueleto, sino

que, además, disminuye la expresión génica de los mismos, particularmente de α -tubulina en los tejidos expuestos a los MP en contraste con los tejidos no expuestos a estas micropartículas.

Por su parte, Wei et al.³⁷ analizaron los efectos de la administración de MP-PS de 4 μm y 10 μm sobre la integridad de la barrera hematotesticular en ratas machos que fueron administradas (20 y 40 mg/kg) vía sonda durante 28 días. Este estudio aportó evidencia del impacto negativo que tienen los MP-PS sobre la cantidad y calidad del esperma, así como de la integridad de la barrera hematotesticular, ya que la administración de los MP indujeron un incremento en especies reactivas de oxígeno, lo cual desencadenó un desequilibrio del mTORC1 (del inglés, *mammalian target of rapamycin complex 1*), un complejo proteico que funciona como un sensor de nutrientes/energía/redox y controla la síntesis de proteínas; y del mTORC2, un complejo proteico que regula la proliferación, la supervivencia y la migración celular, y que además participa en la

remodelación del citoesqueleto. Este desequilibrio promovió alteraciones en el perfil de expresión de proteínas de unión a actina, lo que resultó en la desorganización de la actina F (fibrilar) y la reducción de la expresión de proteínas de unión a la barrera hematotesticular, lo que finalmente impactó de manera negativa en la espermatogénesis.

CONCLUSIONES Y REFLEXIÓN FINAL

El efecto de los MP sobre los seres vivos y particularmente sobre el citoesqueleto celular humano, todavía tiene una gran brecha por investigar, pues conocer los diversos efectos que provocan, a nivel celular, una vez ingresados los MP al cuerpo humano resulta interesante; hasta hoy en día, se han reportado pocos estudios al respecto, específicamente en el ser humano. A la fecha existe evidencia de que el ingreso de MP de 5 μm , o menor, promueven un reordenamiento de los componentes del citoesqueleto, como la actina y la tubulina, proteínas claves del citoesqueleto involucradas en procesos de división celular. Estas afectaciones no se limitan a un reordenamiento espacial de los componentes del citoesqueleto, ya que también se ha observado una disminución a nivel proteómico y genético de los mismos componentes, afectando el dinamismo celular, con la consecuente afectación a los tejidos, órganos y al organismo en general. Sin embargo, las vías de señalización que se afectan tras este reordenamiento del citoesqueleto provocado por los MP-PS requieren de una investigación más profunda, con la finalidad de conocer si la presencia de los MP en los seres vivos, particularmente en el ser humano, tiene consecuencias a largo plazo que no se han detectado hasta ahora y responder a múltiples interrogantes como: ¿existe una tolerancia inmunológica hacia la presencia de los MP? ¿La presencia de MP en los organismos, detona una inflamación crónica?

Se ha reportado que estos pueden ingresar y bioacumularse en los seres vivos y sus tejidos, y prácticamente pasar desapercibidos; así, se han encontrado MP en heces humanas, lo que implica su movilidad a través de diversos órganos, tejidos y sistemas en el organismo, sorteando barreras primarias de protección (moco, vellosidades, etc.). En esta “tolerancia”,

La exposición a MP de polipropileno podría alterar la composición de la microbiota del intestino, ocasionando inflamación, desorden metabólico y disfunción en la barrera intestinal. Es importante señalar que se han detectado MP en productos de consumo humano como, por ejemplo: mariscos, azúcar, sal de mesa, cerveza, y agua del grifo.

¿qué ocurre con el citoesqueleto? Si este está involucrado en prácticamente todos los procesos celulares, ¿cuál es la concentración máxima de MP que puede tolerar la célula en su interior? Si el citoesqueleto participa en la división celular, ¿la presencia de MP puede derivar en un arresto celular u apoptosis? ¿Qué ocurre con las proteínas motoras del citoesqueleto cuando están presentes los MP? El tráfico de vesículas y biomoléculas, por ejemplo, neurotransmisores, ¿se verá afectado ante la presencia de MP? ¿Los componentes fibrilares del citoesqueleto, modificarán sus propiedades mecánicas para soportar la tensión ejercida por la bioacumulación de los MP? Y, además de la actina y tubulina, ¿otros componentes del citoesqueleto serán afectados? Para resolver estas y otras interrogantes, sin duda se requiere de un equipo multidisciplinario para abordar desde diferentes perspectivas el impacto potencial que tienen estas micropartículas en la salud del ser humano y de todos los seres vivos que cohabitamos en este planeta. Bajo este panorama, la presente revisión muestra las evidencias existentes sobre la interacción de los MP con el citoesqueleto humano y algunas teorías sobre sus potenciales efectos en la salud de los seres vivos, esperamos que esto promueva el debate en este tema, y que detone el surgimiento de equipos multidisciplinarios en donde la clínica y la investigación básica se conjuntan en beneficio de la salud humana. ●

REFERENCIAS

1. Raja K, Sharma H, Samal B, Bhattacharya J, Ranjan V, Dubey B, et al. Challenges and strategies for effective plastic waste management during and post COVID-19 pandemic.

- The Science of the total environment. 2021;750(1):7-28. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141514>
2. Prata J. Controlling land-based sources as a measure to reduce (micro)plastic contamination in coastal environments. 2018. *Frontiers in Marine Science*.
3. Hale R, Seeley M, La Guardia M, Mai L, Zeng E. A Global Perspective on Microplastics. *JGR Oceans*. 2020;125 (1):1-40. <https://doi.org/10.1029/2018JC014719>
4. Hwang J, Choi D, Han S, Yong S, Choi J, Hong J. Potential toxicity of polystyrene microplastics particles. *Scientific Reports*. 2020;10(1):1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64464-9>
5. Rist S, Carney Almroth B, Hartmann N, Karlsson T. A critical perspective on early communications concerning human health aspects of microplastics. *The Science of the total environment*. 2018;626(2018):720-726. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.092>
6. Blackburn K, Green D. The potential effects of microplastics on human health: What is known and what is unknown. *Ambio*. 2021;51(3):518-530. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01589-9>
7. Brachner A, Fragouli D, Duarte L, Farias P, Dembski S, Ghosh M, Barisic I, Zdziebko D, Vanoirbeek J, Schwabl P, Neuhaus W. Assessment of Human Health Risks Posed by Nano-and Microplastics Is Currently Not Feasible. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;17(23):8832. <https://doi.org/10.3390/ijerph17238832>
8. Pironi C, Ricciardi M, Motta O, Miele Y, Proto A, Montano L. Microplastics in the Environment: Intake through the Food Web, Human Exposure and Toxicological Effects. *Toxics*. 2021;9(224):1-29. <https://doi.org/10.3390/toxics9090224>
9. Moujaber O, Stochaj U. The Cytoskeleton as Regulator of Cell Signaling Pathways. *Trends in Biochemical Sciences*. 2020;45(2):96-107. <https://doi.org/10.1016/j.tibs.2019.11.003>
10. Kinga K. et al. Polystyrene nanoparticles: Sources, occurrence in the environment, distribution in tissues, accumulation and toxicity to various organisms. *Environmental Pollution*. 2020;262(114297): <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114297>
11. Nutsch W. La tecnología de la madera y del mueble. 1er ed. España. REVERTÉ. 2005;(1)536.
12. Amato-Lourenço, L, Dos Santos L, de Weger L, Hiemstra P, Vijver M, Mauad T. An emerging class of air pollutants: Potential effects of microplastics to respiratory human health? *Science of the Total Environment*. 2020;749(1):2-7. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141676>
13. Ho B, Roberts T, Lucas S. An overview on biodegradation of polystyrene and modified polystyrene: the microbial approach. *Critical reviews in biotechnology*. 2017;38(2):1-12. <https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1355293>
14. Hohmann T, Dehghani F. The Cytoskeleton. A Complex Interacting Meshwork. *Cells*. 2019;362(8):1-55. <https://doi.org/10.3390/cells8040362>
15. Frieden, B.R. & Gatenby R. A. Signal transmission through elements of the cytoskeleton form an optimized information network in eukaryotic cells. *Scientific Reports*. 2019;6110. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42343-2>
16. Jiang X, Qin Y, Kun L, Zhou Y. The Significant Role of the Microfilament System in Tumors. *Sec. Molecular and Cellular Oncology*. 2021;11(2021). <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.620390>
17. Duan, L, Chen H, Gao J. The Cytoskeleton of the System. *EnPress Journals*. 2018;1(1):17-22. [consultado 15 diciembre 2023]. Disponible en: <https://systems.enpress-publisher.com/index.php/LCBT/article/viewFile/331/239>
18. Randell SH, Dang H, Broers JLV. The Use of Keratins as Lung Cell Differentiation Markers and as a Diagnostic Tool in Lung Cancer. In *Encyclopedia of Respiratory Medicine*, Second Edition Elsevier. 2022;(1):694-70: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102723-3.00194-3>
19. Tan Y, Dai J, Wu X, Zhang J. Characteristics, occurrence and fate of non-point source microplastic pollution in aquatic environments. *Journal of Cleaner Production*. 2022;20(341). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130766>
20. Merlin, I. y Kandasubramanian, B. Effect of microplastics in water and aquatic systems. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;28:19544-19562. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13184-2>
21. Lu L, Luo T, Zhao Y, Fu Z, Jin Y, et al. Interaction between microplastics and microorganism as well as gut microbiota: A consideration on environmental animal and human health. *Science of the Total Environment*. 2019;667:94-100. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.353>
22. Ding J, Zhang S, Razanajatovo R, Zou H, Zhu W. Accumulation, tissue distribution, and biochemical effects of polystyrene microplastics in the freshwater fish red tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Environmental Pollution*. 2018;238:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.03.001>
23. Jin Y, Lu L, Tu W, Luo T, Fu Z. Impacts of polystyrene microplastics on the gut barrier, microbiota and metabolism of mice. *Science of the Total Environment*. 2019;649:308-317. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.353>
24. Sana S, Dogiparthi L, Gangadhar L, Chakravorty A, Abhishek N. Effects of microplastics and nanoplastics on marine environment and human health. *Environmental science and pollution research international*. 2020;27:44743-44756. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10573-x>
25. De Sá L, Oliveira M, Ribeiro F, Rocha T, Futter M. Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: What do we know and where should we focus our efforts in the future? *Science of the Total Environment*. 2018;(645):1029-1039. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.207>
26. Lambert S, Wagner M. Freshwater Environments. *Emerging Environmental Contaminants? The Handbook of En-*

- Environmental Chemistry. Springer. Cham, Switzerland. 309 p. 2018.
27. Muhamed P, Damaris B, Thomas S, Thomson K.T. Microplastics in the edible tissues of shellfishes sold for human consumption. *Chemosphere*. 2021;264(2): <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128554>
 28. Afrin S, Rahman M, Hossain N, Uddin K, Malafaia G. Are there plastic particles in my sugar? A pioneering study on the characterization of microplastics in commercial sugars and risk assessment. *Science of The Total Environment*. 2022;837(155849): <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155849>
 29. Yang D, Shi H, Li L, Li J, Jabeen K, Kolandhasamy P. Microplastics Pollution in Table Salts from China. *Environmental Science & Technology*. 2015;49(22):13622-13627. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03163>
 30. Diaz M, Conesa J, Fullana A. Microplastics in Honey, Beer, Milk and Refreshments in Ecuador as Emerging Contaminants. *Sustainability* 2020;12(5514):1-17: <https://doi.org/10.3390/su12145514>
 31. Schymanski D, Goldbeck C, Humpf H, Fürst P. Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research*. 2018;129:154-162. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.011>
 32. Wright S, Kelly F. Plastic and Human Health: A Micro Issue? *Environmental Science & Technology*. 2017;51(12):6634-6647. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00423>
 33. Ambriz X, De Lanerolle P, Ambrosio J. The Mechanobiology of the Actin Cytoskeleton in Stem Cells during Differentiation and Interaction with Biomaterials. *Stem Cells International*. 2018;8(1):1-11. <https://doi.org/10.1155/2018/2891957>
 34. Hesler M, Aengenheister L, Ellinger B, Drexler R, Straskraba S, Jost C, et al. Multi-endpoint toxicological assessment of polystyrene nano- and microparticles in different biological models in vitro. *Toxicology in Vitro*. 2019;61(1):1-15. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2019.104610>
 35. Stock V, Böhmert L, Lisicki E, Block R, Cara-Carmona J, Pack L, et al. Uptake and effects of orally ingested polystyrene microplastic particles in vitro and in vivo. *Archives of toxicology*. 2018;93(1):1817-1833. <https://doi.org/10.1007/s00204-019-02478-7>
 36. Haddadi A, Kessabi K, Boughammoura S, Rhouma M, Mlouka R, Banni M, et al. Exposure to microplastics leads to a defective ovarian function and change in cytoskeleton protein expression in rat. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29(23):34594-34606. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18218-3>
 37. Wei Y, Zhou Y, Long C, Wu H, Hong Y, Fu Y, et al. Polystyrene microplastics disrupt the blood-testis barrier integrity through ROS-Mediated imbalance of mTORC1 and mTORC2. *Environmental pollution*. 2021;(1):289-297. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117904>
 38. Enyoh C, Shafea L, Verla A, Verla E, Qingyue W, Chowdhury T, et al. Microplastics Exposure Routes and Toxicity Studies to Ecosystems: An Overview. *Environmental Analysis Health and Toxicology*. 2020;35(1):1-10. <https://doi.org/10.5620/eah.20200004>
 39. Jin Y, Lu L, Tu W, Luo T, Fu Z. Impacts of polystyrene microplastics on the gut barrier, microbiota and metabolism of mice. *Science of the Total Environment*. 2019;649:308-317. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.353>
 40. Wang Y, Zhang D, Zhang M, Mu J, Ding G, Mao Z, et al. Effects of ingested polystyrene microplastics on brine shrimp, *Artemia parthenogenetica*. *Environmental pollution*. 2019;244:715-722. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.024>
 41. Oliviero M, Tato T, Schiavo S, Fernández V, Manzo S, Beiras R. Leachates of micronized plastic toys provoke embryotoxic effects upon sea urchin *Paracentrotus lividus*. *Environmental Pollution*. 2019;247:706-715. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.098>
 42. Wan Z, Wang C, Zhou J, Shen M, Wang X, Fu Z, et al. Effects of polystyrene microplastics on the composition of the microbiome and metabolism in larval zebrafish. *Chemosphere*. 2019;217:646-658. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.070>
 43. Ju H, Zhu D, Qiao M. Effects of polyethylene microplastics on the gut microbial community, reproduction and avoidance behaviors of the soil springtail, *Folsomia candida*. *Environmental Pollution*. 2019;247:890-897. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.097>
 44. Pannetier P, Cachot J, Clérancieu C, Faure F, Van Arkel K, De Alencastro L, et al. Toxicity assessment of pollutants sorbed on environmental sample microplastics collected on beaches: Part I-adverse effects on fish cell line. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019;248:1088-1097. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.12.091>
 45. Schirizzi G, Pérez-Pomeda I, Sanchís J, Rossini C, Farré M, Barceló D. Cytotoxic effects of commonly used nanomaterials and microplastics on cerebral and epithelial human cells. *Environmental research*. 2017;159:579-587. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.043>
 46. Ragusa A, Svelato A, Santacroce C, Catalano P, Notarstefano V, Carnevali O. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment international*. 2021;146:1-15. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>
 47. Zhou X, Wang G, An X, Wu J, Fan K, Xu L, et al. Polystyrene microplastics particles: In vivo and in vitro ocular surface toxicity assessment. *Environmental Pollution*. 2022;303:15-29. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119126>