

Bioacumulación de PS-NPs en cuerpo humano: pensamiento espontáneo estudiantil y el diseño de secuencias didácticas

Caroline Mariae Pereira 

Programa de Pós-Graduação em Química. Universidade Federal de Alfenas. Alfenas. Brasil.
caroline.pereira@sou.unifal-mg.edu.br

Keila Bossolani-Kiill 

Instituto de Química. Universidade Federal de Alfenas. Alfenas. Brasil.
keila.kiill@unifal-mg.edu.br

Ángel Daniel López y Mota 

Educación en Ciencias. Universidad Pedagógica Nacional - Ajusco. Ciudad de México.
alopezm@upn.mx

[Recibido: 15 abril 2025; Revisado: 04 diciembre 2025; Aceptado: 14 diciembre 2025]

Resumen: Actualmente, los plásticos se utilizan ampliamente debido a sus múltiples propiedades. Sin embargo, a pesar de sus ventajas, la utilización ha aumentado la generación de residuos sólidos desechados al medio ambiente. En este contexto, el objetivo de esta investigación –con fines más amplios– fue describir las características del pensamiento espontáneo de estudiantes sobre el fenómeno natural de interés científico y valor educativo de la bioacumulación de nano-plásticos de poliestireno (PS-NPs) en el cuerpo humano, para su utilización en el diseño de secuencias didácticas. Participaron 30 estudiantes de tercer año de bachillerato y la recolección y análisis de datos siguió varias etapas hasta lograr un Modelo Estudiantil Inicial a ser considerado. En términos ontológicos, no se presentan expresiones de entidades que –con propiedades bien definidas, sobre todo las biológicas– establezcan relaciones entre ellas y causen un efecto y expliquen el fenómeno con pertinencia y especificidad. Así, las inferencias son genéricas y contribuyen poco a justificar lo que podría suceder después de varios años.

Palabras clave: didáctica de la química, bioacumulación, pensamiento espontáneo, modelos y modelización.

Bioaccumulation of PS-NPs in the human body: students' spontaneous thinking for structuring an Initial Student Model

Abstract: Currently, plastics are widely used due to their numerous and useful properties. However, despite these advantages, increased plastic use has led to a surge in solid waste polluting the environment. This research aimed to describe the characteristics of high school students' spontaneous thinking regarding the scientifically and educationally relevant natural phenomenon of polystyrene nanoplastic bioaccumulation in the human body, and to use it for the design of solid and effective didactic sequences. Thirty third-year high school students participated, and data collection and analysis followed various stages up to describing an Initial Student Model. Ontologically, students' responses lacked descriptions of entities with well-defined properties—particularly biological ones—that establish relationships, cause effects, and explain the phenomenon with relevance and specificity. Consequently, their inferences were generic and offered little justification for potential long-term effects.

Keywords: Didactics of chemistry, bioaccumulation, nanoplastics, spontaneous reasoning, initial student model.

Para citar este artículo: Pereira, C. M.; Bossolani-Kiill, K. y López-Mota, A. D. (2026). Bioacumulación de PS-NPs en cuerpo humano: pensamiento espontáneo estudiantil y el diseño de secuencias didácticas. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 23(1), 1106.
https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2026.v23.i1.1106

Introducción

Actualmente, los polímeros plásticos de poliestireno son utilizados ampliamente debido a su versatilidad, durabilidad, rentabilidad, higiene, etc. Sin embargo, a pesar de sus ventajas, el consumo de plásticos ha aumentado la generación de residuos sólidos desechados en el medio ambiente. Como consecuencia la contaminación por desechos de materiales plásticos es un desafío para diferentes sociedades, una vez que se requiere una acción inmediata de gobiernos y población debido a la persistencia ambiental de ellos y sus efectos en ecosistemas y en la salud humana (Cottom et al., 2024).

La cantidad de plástico acumulado en los océanos, ríos, lagos y aguas subterráneas ha aumentado exponencialmente, provocando numerosos impactos sobre la biodiversidad debido a su degradación en micro y nanoplásticos, además de su presencia en suelos y en la atmósfera (Jeong et al., 2024; Santos y Souza, 2023). Muchos de estos residuos provienen de envases y botellas de alimentos fabricados con polímeros como polipropileno, tereftalato de polietileno (PET) y poliestireno.

Se ha detectado la presencia de micro y nanoplásticos de estos mismos polímeros en alimentos y bebidas, que tienen la misma constitución polimérica de las botellas y envases que los contienen, aunque difieren en tamaño (Cella et al., 2022; Luo et al., 2022; Gambino et al., 2022). Investigaciones emergentes comenzaron a detectar su presencia en varias partes del cuerpo humano (Kadac-Czapska et al., 2023), especialmente en tejidos y órganos asociados con los sistemas digestivo y respiratorio, incluidos los pulmones, la sangre, las heces y la orina, entre otros (Roslan et al., 2024).

Cuando son ingeridos o inhalados los PS-NPs, pueden atravesar la membrana plasmática debido a su diminuto tamaño y a la mayor hidrofiliencia adquirida durante su degradación, facilitando su internalización y posterior acumulación en mitocondrias y vesículas. Estos procesos pueden generar estrés oxidativo, citotoxicidad e inducir respuestas inflamatorias (Cortés-Ross y Juárez-Moreno, 2023; Shi et al., 2021). Mediante endocitosis, las PS-NPs forman vesículas endocíticas que se desintegran dentro de las células, liberándose y acumulándose en distintos órganos.

Este fenómeno constituye un fenómeno natural de relevancia científica y educativa, ya que puede describirse mediante principios de las Ciencias Naturales y posee implicaciones directas para la vida cotidiana de los estudiantes, especialmente por los riesgos ambientales y sanitarios asociados a la contaminación por micro y nanoplásticos. La relevancia de la bioacumulación de PS-NPs se sustenta en cuatro criterios articulados entre sí: (1) *contextual*, porque forma parte de la vida diaria de los estudiantes; (2) *cognitivo*, ya que se trata de un proceso complejo y de múltiples facetas, que requiere un conocimiento que trasciende lo disciplinar; (3) *científico*, dado que su comprensión requieren explicaciones sustentados en principios de las Ciencias Naturales; y (4) *social*, porque constituye una cuestión que afecta los ecosistemas y la salud humana. En este marco, los estudiantes deberían comprender y explicar el fenómeno con apoyo de conocimientos científicos emergentes que orienten decisiones con conciencia sustentable.

Así, pretendemos describir las características del pensamiento espontáneo de los estudiantes, a partir de la construcción de un modelo estudiantil inicial y ofrecer posibles vinculaciones con el diseño de una secuencia didáctica. De este modo, la pregunta que guió este estudio fue: ¿qué características presenta el pensamiento espontáneo de los estudiantes sobre el fenómeno de la bioacumulación de PS-NPs en el cuerpo humano? Con lo cual contaremos con elementos para establecer un modelo de referencia a ser alcanzado y planear la enseñanza.

Fundamento teórico

Modelo Científico Escolar de Arribo (MCEA)

Para la planificación de una secuencia didáctica utilizamos como directriz el concepto de modelo de referencia a ser alcanzado en la enseñanza, es decir el MCEA. Este dispositivo teórico metodológico es elaborado a partir de los modelos Científico, Curricular y Estudiantil Inicial. El Modelo Científico Escolar de Arribo también posibilita validar la secuencia didáctica mediante los logros alcanzados, por comparación de los modelos logrados en clase frente a la hipótesis directriz establecida (López-Mota, 2019). Permite saber a dónde y cómo se quiere llegar con los estudiantes en términos de construcción de conocimiento y su implementación está basada en modelos y modelización (Moreno-Arcuri, 2021; López-Mota y Moreno-Arcuri, 2014).

Modelo Estudiantil Inicial (MEI)

El Modelo Estudiantil Inicial presenta evidencias del pensamiento espontáneo de los estudiantes sobre el fenómeno, evocado como modelos mentales empatados con una noción de modelo científico, a través de técnicas específicas (López-Mota, 2019). Las representaciones de los estudiantes, desde hace mucho tiempo, se utilizan como parámetro de referencia para planificar el diseño y validación de secuencia didáctica, por ejemplo, están los casos de: «Reconstrucción Educativa» (Duit, 2006, 2007; Duit et al., 2012), «Demanda Cognitiva» (Virri y Savinainen, 2008), «Ingeniería Didáctica» (Artigue, 1995, 2002), «Hipótesis de Aprendizaje» (Couso, 2011) y «Investigación del Desarrollo» (Juuti y Lavonen, 2006).

Se trata de un modelo constituido por dimensiones ontológicas y epistemológicas. En la dimensión ontológica se incluyen las entidades involucradas en la explicación de un fenómeno con interés educativo y las propiedades que las caracterizan. En las dimensiones epistemológicas, se establecen las relaciones causales que permiten explicar el comportamiento del fenómeno (los efectos) y, además predecir el comportamiento del fenómeno después de años (las inferencias) (Aliberas et al. 2021). Gutiérrez (2007, 2014) concibe los modelos como representaciones compuestas por entidades y sus propiedades, las cuales se articulan en proposiciones que describen y determinan el comportamiento de dichas entidades.

Fenómeno natural de interés científico y valor educativo (FNVE)

El poliestireno es uno de los plásticos más utilizados en la actualidad (Han et al., 2024). Cuando se exponen a la radiación ultravioleta, pueden degradarse y cambiar sus propiedades formando radicales poliméricos que, a través de la reticulación y la división de cadenas, dan como resultado cetonas y olefinas. Estos productos de la degradación tienen propiedades diferentes que hacen que el material sea más quebradizo, formando micro y nanoplásticos (Gewert et al., 2015).

Los PS-NPs son partículas menores a 1000 nm (nanómetros) y, debido a la presencia de grupos carbonilo, presentan hidro-afinidad y pueden interactuar con células y tejidos como, por ejemplo, del tracto intestinal donde sufren bioacumulación. La degradación es una condición para que ocurra la bioacumulación de PS-NPs en el cuerpo humano ya que, según Han et al. (2024), estas partículas al dispersarse en el ambiente pueden ser inhaladas, ingeridas o estar en contacto con la piel de los humanos. Cuando los PS-NPs ingresan en la célula por endocitosis debido a su tamaño (Han et al., 2024) pueden acumularse induciendo problemas respiratorios, respuestas inflamatorias, estrés oxidativo que contribuye a la citotoxicidad, causar neurotoxicidad, entre otros efectos (Cortés-Ross y Juárez-Moreno, 2023; Shi et al., 2021).

Metodología de la investigación

Contexto y participantes

Participaron 30 estudiantes de tercer año de bachillerato (16-18 años) de una escuela pública de la Ciudad de México, quienes respondieron voluntariamente dos preguntas. La recolección de las informaciones ocurrió en el período de una clase de 50 minutos donde el docente presenta sintéticamente el asunto en cuestión y solicita responder las preguntas. Las respuestas fueron recuperadas mediante un cuestionario Google Forms y un dibujo elaborado en hoja de papel.

Las informaciones fueron recolectadas en una asignatura obligatoria cuando ellos estaban abordando contenidos de reacciones químicas orgánicas. La bioacumulación de nanoplastico no era una temática que estaba siendo trabajada en las aulas de química donde las informaciones fueron recolectadas, aunque sea adecuada e interesante para trasponerla cuando se discuten las transformaciones químicas.

Obtención de datos

Para el análisis de las informaciones se desarrolló la construcción de los datos a partir de la elaboración del MEI, que siguió las siguientes etapas:

- 1) Validación del instrumento y análisis sobre la identificación del fenómeno por los estudiantes;
- 2) Construcción de una tabla con las respuestas literales y sus respectivas interpretaciones;
- 3) Identificación de relaciones causa-efecto y entidades utilizadas en las respuestas para explicar el fenómeno, independientemente de si son correctas o no;
- 4) Elaboración de una tabla con las relaciones causa-efecto según la estructura: Si Entidad 1- ¿Qué relación con? -Entidad 2- entonces ¿Qué efecto? Así, ¿Qué relación causa-efecto?
- 5) Identificación de las inferencias establecidas para el fenómeno después de años de ingesta regular de polímeros;
- 6) Identificación de las propiedades y sistematización del conjunto de entidades, sus relaciones causa-efecto e inferencias.
- 7) Elaboración del Modelo Estudiantil Inicial.

Análisis de datos

Para el procedimiento de análisis fueron elaboradas categorías *a posteriori* (Minayo, 2010). Inicialmente se estudiaron las interpretaciones de las respuestas y se identificaron patrones a partir de los procesos que explican el fenómeno. Después se realizó una codificación en cuanto a los procesos y, las respuestas semejantes fueron agrupadas en categorías más amplias dependiendo del número de procesos descritos. Así, fueron realizados ajustes y se establecieron las categorías: adecuado, parcialmente adecuado y poco adecuado.

Resultados y discusión

El fenómeno de bioacumulación de PS-NPs en el cuerpo humano depende de algunos factores como la ingestión o la inhalación de estas nanopartículas. El proceso de degradación es una condición para la bioacumulación. En un primer análisis (Figura 1) identificamos el tipo de material que los estudiantes consideran sufre degradación, ya que esta información nos permite evaluar si entienden que el material en contexto de la investigación es o no el polímero plástico de poliestireno

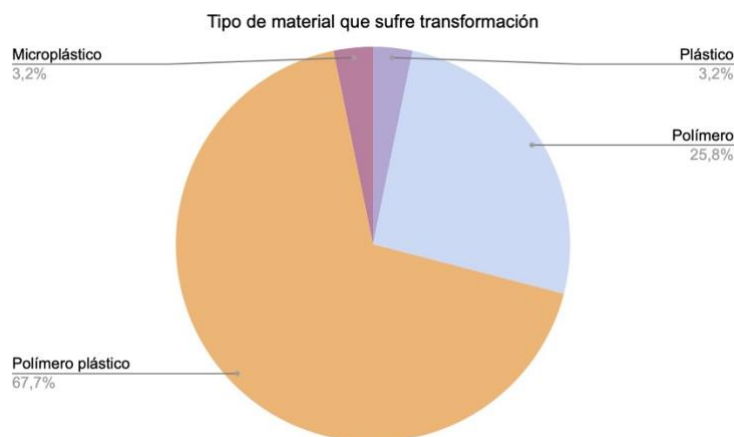


Figura 1. Materiales descritos por los estudiantes.

Los materiales considerados por ellos fueron plástico (3,2%), polímero (25,8%), polímero plástico (67,7%) y microplástico (3,2%). Los plásticos son materiales sintéticos formados por polímeros y, los polímeros son macromoléculas orgánicas sintéticas o no. Un polímero plástico puede ser, como PET y poliestireno, o natural como las fibras y el caucho. Microplásticos son partículas de plástico muy pequeñas que se forman de la fragmentación de plásticos más grandes, pero diferentes en escala de los nanoplásticos. En el caso del fenómeno representado en la pregunta 1, el contexto es la acumulación de polímeros plásticos de poliestireno en cuerpos de agua y su exposición prolongada al clima, bajo la acción principal de la radiación ultravioleta. El escenario muestra envases compuestos principalmente por poliestireno desechados en el medio ambiente (Figura 2).

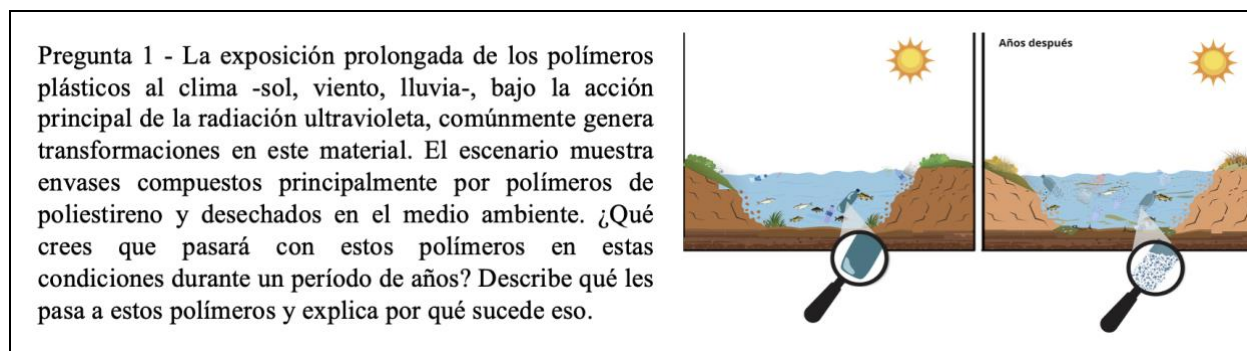


Figura 2. Pregunta 1 del cuestionario para colecta de informaciones.

La mayoría de los estudiantes (21/30) considera al polímero plástico como el material que sufre la transformación, por lo tanto, empezaron con un pensamiento pertinente con el fenómeno. Pero, parece que no quedó claro que, para el escenario del fenómeno, es el polímero plástico de poliestireno, formado por el monómero estireno y no plástico o polímero en general. Entonces, parte de los estudiantes (9/30), inferimos, pensaron que la especificidad del polímero plástico en cuestión no es un atributo a considerar para explicarlo.

Para cada material, diferentes procesos de transformación fueron indicados por los estudiantes en sus respuestas. En el caso del plástico piensan que ocurre una disolución que sería, por ejemplo, una separación por un solvente. Ahora bien, para los polímeros hay evidencia de un gradiente de especificidad en el pensamiento de los estudiantes porque hay quienes consideran la no acumulación y otros la degradación. No se presentará un análisis más profundo para el polímero porque nuestro interés es cómo los estudiantes piensan la transformación de los polímeros plásticos, ya que es la condición para comprender el fenómeno de interés.

La Figura 3 evidencia los procesos que los estudiantes consideraron para cada material. En el caso del polímero plástico, se piensa que sufre fragmentación, liberación de sustancias químicas, deterioro y degradación. Si la mitad (15/30) considera que la degradación es el proceso que ocurre con el polímero plástico en el escenario de la pregunta 1, entonces es probable que consideren que ocurre una transformación química y física, según una perspectiva interdisciplinaria. Pero, también hay estudiantes donde prevalece un pensamiento de la ocurrencia de una transformación, por ejemplo, la física, porque consideran la fragmentación.

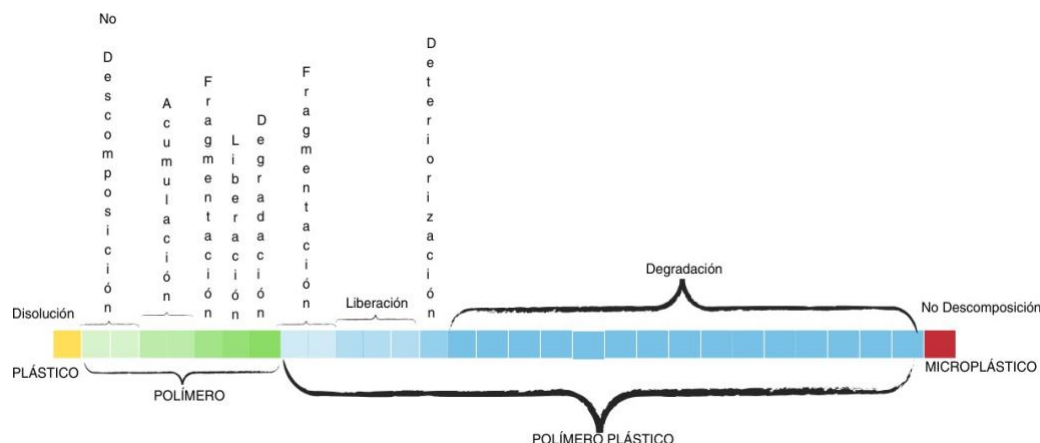


Figura 3. Procesos de transformación citados por los estudiantes para cada material.

La exposición prolongada de los polímeros plásticos de PS bajo la acción de la radiación ultravioleta lleva a la degradación de la cadena polimérica (Gewert et al., 2015). Debido a su tamaño y sus propiedades químicas, los PS-NPs pueden traspasar la barrera gastrointestinal, bioacumulándose en vesículas y mitocondrias (Shi et al., 2021; Valente et al., 2021). En la pregunta 2 (Figura 4), los estudiantes consideran que una de las consecuencias de la ingesta habitual de estos PS-NPs por seres humanos es la acumulación (23,3%), intoxicación (13,3%), absorción (6,7%), contaminación (3,3%), obstrucción (3,3%) e irritación (3,3%).

Pregunta 2A - Los polímeros en el medio ambiente se modifican y no se eliminan fácilmente. Una de las consecuencias de ello puede ser la ingestión regular de estos polímeros por los seres humanos.

Una vez en el cuerpo dime ¿Qué sucede con ellos? Dibuja lo que pasó.

Pregunta 2B - Explica lo ocurrido con tus palabras.

Figura 4. Pregunta 2 del cuestionario para colecta de informaciones.

Aunque la mitad (15/30) de los participantes consideraron la degradación de los polímeros plásticos como una condición para lograr la ingesta, solamente 7/30 consideran la bioacumulación como un efecto de ingesta. En el total de respuestas, 46,7% demostró no saber qué pasaba al no ofrecer respuesta a la pregunta (Figura 5). Este dato sugiere que la condición de degradación de los polímeros plásticos puede estar establecida en el pensamiento de los estudiantes, pero sin considerar lo que pasa cuando ingeridas o inhaladas por los seres humanos. Esto podría indicar que se trata de un fenómeno poco conocido y comprendido por los estudiantes, aunque resulta muy divulgado y de gran interés para la ciencia y sociedad actuales.

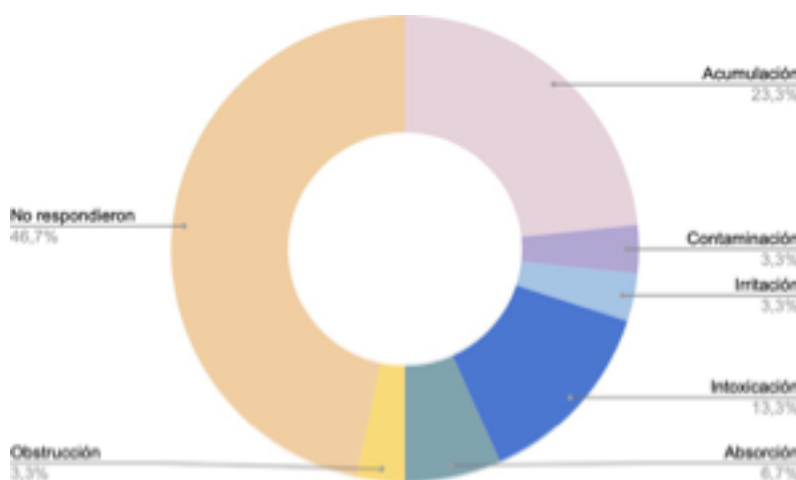


Figura 5. Procesos debido a la ingesta de PS-NPs.

En la siguiente etapa, las respuestas fueron categorizadas de acuerdo con Minayo (2010), para agrupar características compartidas del pensamiento espontáneo de estudiantes y, así, conocer posteriormente qué tan parecidos son los modelos de pensamiento espontáneo de los estudiantes de los modelos científicos y poder diseñar una secuencia didáctica. El fenómeno es considerado complejo porque no hay una solución sencilla, debido a diversos factores de los que depende la bioacumulación de PS-NPs. Otra razón que justifica la complejidad es que la comprensión de la bioacumulación de PS-NPs en el cuerpo humano depende también de la articulación de conocimientos relativos a las transformaciones química (degradación) y física (formación de nanoplástico) y de conocimientos de biología (endocitosis) requeridos para explicar el fenómeno. Así, el modelo que explica este fenómeno es interdisciplinario. Entonces, caracterizar qué modelos de pensamiento espontáneos tienen los estudiantes es una etapa necesaria para el establecimiento de los criterios para la elaboración de una secuencia didáctica que implica una enseñanza a partir de una perspectiva interdisciplinar.

Los estudiantes explicaron en sus términos lo que puede ocurrir con los polímeros plásticos expuestos al clima y con las nanopartículas en el cuerpo humano, si hay inhalación o ingesta (Tabla 1). Por lo tanto, lo esperado era que tuviesen una explicación específica para degradación y fragmentación del polímero plástico de poliestireno –por conocimientos fisicoquímicos previos– y para el proceso de endocitosis en la célula humana –por conocimientos biológicos–; pero seguramente tales conocimientos están dispersos y son de carácter general.

Tabla 1. Categorías de modelos de pensamientos espontáneos de estudiantes.

Modelo	Categoría	Descripción	Ejemplo	Alumno (X/30)
Pensamiento estudiantil	Adecuado	Modelo de pensamiento que evidencia transformaciones fisicoquímicas y proceso biológico, sí explicación científica	<i>Pues se van a hacer (polímero plástico) muy pequeñas y tan diminutas que va a hacer imposible que desaparezcan ya que van a ser microplásticos. Se quedan en los tejidos y eso afecta el sistema circulatorio lo cual supongo que es dañino para nosotros y soporten (E4)</i>	2/30
	Parcialmente adecuado	Modelo de pensamiento que evidencia transformación física o química y proceso biológico, sí explicación científica	<i>Liberarán sustancias tóxicas dañinas que no solo afectan a los seres que viven directamente en el agua (seres marinos), también llegan a nuestros platos de comida y llega a nuestras células. No sé, siendo sincero (E9)</i>	9/30
	Poco adecuado	Modelo de pensamiento que evidencia transformación física o química o proceso biológico, sí explicación científica	<i>Se irán desintegrando poco a poco, hasta eventualmente volverse contaminantes y deteriorar al medio ambiente. Pueden afectar a nuestro sistema digestivo, respiratorio y excretor, también ocasionar enfermedades por intoxicación (E25)</i>	16/30
	Poco adecuado	modelo de pensamiento que evidencia transformación física o química o proceso biológico, con indicios de explicación científica	<i>(polímero plástico) al estar constantemente a la exposición solar, libera químicos que afectan directamente al ecosistema y contamina cuerpos de agua, tierra y aire. Afecta directamente a tu salud, sistema digestivo, inmunológico y respiratorio (E3)</i>	2/30
	Respuesta no adecuada	Sí evidencia	<i>Los polímeros tienen una resistencia prolongada a la descomposición, siendo un problema constante para los organismos que viven dentro o subsistan al ingerir dicha agua. (E18)</i>	1/30

Se consideró como *adecuada* la respuesta cuando había indicios de las transformaciones químicas (degradación) y físicas (fragmentación) y los conocimientos biológicos de la acumulación. Una caracterización a tener en cuenta es que en las respuestas hay registros de estos procesos: degradación o acumulación. Un ejemplo es el modelo estudiantil 4, el cual describe que se forman microplásticos y que son partículas de menor tamaño. Y todavía menciona que los microplásticos se quedan en los tejidos, lo que indica la posibilidad de la acumulación de las micropartículas en el cuerpo humano.

Los modelos de *adecuación parcial* fueron aquellos que se refieren a uno de los tipos de transformación (física o química) y consideran el conocimiento biológico. El modelo estudiantil 9 presenta evidencia de una transformación química, pues considera que hay una liberación de sustancias tóxicas de los polímeros plásticos (probablemente por la ocurrencia de una reacción química) y que estas sustancias llegan a las células. Pero no hay indicios de una explicación específica que justifique su respuesta.

Se consideró la *adecuación baja* a modelos de pensamiento estudiantil que describieron uno de los eventos (degradación o fragmentación o acumulación). Por ejemplo, el estudiante 25 considera que el polímero plástico se desintegra y contamina. En esta respuesta se consideró que hay evidencia de una transformación química, pero no explica por qué y cómo ocurre esta desintegración. Por otro lado, en la respuesta del estudiante 3 hay una explicación, pues menciona que la liberación de químicos se debe a la exposición solar del polímero plástico de PS.

De manera general, los participantes piensan que los polímeros plásticos contaminan agua, suelo, tierra y ecosistemas y afectan a seres humanos, células humanas y medio ambiente, pero no ofrecen una explicación plausible de cómo es que aquello sucede. La investigación de Souza et al. (2022) corrobora este resultado al señalar el desarrollo del pensamiento sobre la contaminación plástica de los océanos. Los estudiantes también consideran que los polímeros plásticos de poliestireno liberan sustancias químicas que son contaminantes al medio ambiente, además de pensar que los polímeros se disuelven en agua. La percepción de que las partículas plásticas (como los micro y nanoplásticos de poliestireno) pueden liberar o transportar sustancias tóxicas ya ha sido reportada en estudios de percepción de riesgo, los cuales muestran que la gran mayoría de los participantes considera estas partículas como tóxicas o capaces de portar materiales tóxicos (Ojinnaka, 2020). Hay otros estudiantes que mencionan que los polímeros plásticos se desintegran, se descomponen, se degradan y se deterioran, pero no explican cómo es que ocurren estos procesos.

Si bien algunos de los estudiantes reconocen la condición de degradación de los polímeros plásticos de poliestireno, no saben explicar cómo ocurre este proceso, ni tienen una comprensión de los efectos de este proceso de degradación para el ambiente y salud humana. Sus respuestas son muy generales, como por ejemplo cuando responden que «se irán desintegrando poco a poco, hasta eventualmente volverse contaminantes y deteriorar al medio ambiente» [Estudiante 25]. En esta respuesta se reconoce la condición de desintegración como una degradación, pero no se explica el significado químico de un proceso de desintegración de un polímero plástico del tipo poliestireno, ni se explica qué significa el deterioro del medio ambiente o cómo el producto de la desintegración afecta al medio ambiente.

En las respuestas a la pregunta 2 mencionan que la ingesta regular causa la acumulación en tejido, hígado, intestino y vías vitales. Se considera que los PS-NPs causan daños a los sistemas digestivo, respiratorio (si se inhala), inmunológico y circulatorio y también provocan enfermedades, infecciones, cáncer e irritación en el cuerpo humano. Diversos estudios también señalan que los micro y nanoplásticos de poliestireno (PS-NPs) pueden afectar diferentes sistemas del organismo humano. Las revisiones más recientes muestran evidencias de daños potenciales en los sistemas digestivo, respiratorio —especialmente cuando las partículas son inhaladas—, inmunológico y cardiovascular, además de efectos celulares asociados a inflamación, estrés oxidativo, disfunciones metabólicas y posibles procesos carcinogénicos. En particular, la revisión de Fontes et al. (2024) sintetiza resultados de investigaciones que reportan alteraciones en la integridad gastrointestinal, respuestas inmunitarias anómalas, inflamación pulmonar e impactos vasculares atribuibles a la exposición a micro y nanoplásticos, incluidos los derivados de poliestireno. Estos hallazgos, aunque aún en consolidación, muestran que los estudiantes no están equivocados al percibir que tales partículas pueden provocar enfermedades, infecciones, irritaciones e incluso riesgos más graves para la salud humana; pero no saben explicar cómo es que ello sucede.

Ellos indican posibles consecuencias del fenómeno de bioacumulación de PS-NPs en el cuerpo humano, pero no ofrecen una explicación específica de cómo la ingesta regular produce irritación, por ejemplo, y en qué parte del cuerpo ocurriría y por qué motivos, incluyendo una explicación sobre el proceso de endocitosis que es cómo ocurre el ingreso de PS-NPs al interior de las células. Para el estudiante 16 «el

plástico se acumula en nuestros órganos, daña nuestro tracto digestivo y puede alterar la microbiota de nuestro estómago». Por tanto, en su respuesta considera la acumulación, pero no explica el proceso biológico que conduce a eso. Después menciona que el tracto digestivo se daña, pero tampoco explica cómo se podría producir tal irritación. No hay una justificación de cómo y por qué cambia la microbiota del estómago.

Al analizar los datos de la Tabla 1, identificamos que muy pocos estudiantes tenían un pensamiento cercano a modelos científicos, sin embargo, reconocen la ocurrencia de transformaciones y la presencia de efectos para el cuerpo humano, aunque no proporcionaron razones por las cuales estas cosas han sido producidas así. Con la intención de profundizar en la comprensión del pensamiento de los estudiantes, se construyó la Tabla 2 a partir de la cual se evidencian las dimensiones ontológicas y epistemológicas que presentan los modelos estudiantiles, cómo una etapa previa a la construcción del Modelo Estudiantil Inicial.

Tabla 2. Etapas para construcción de la relación causa-efecto.

E1	Relación con	E3	Efecto	Relación causa-efecto
Polímero		Vena y arteria	Afecta órgano y glándula	Si polímero entran en contacto con vena y arteria entonces afecta órgano o glándula [E10]
		Fauna marina	Afecta cuerpo humano	Si polímero entra en contacto con fauna marina entonces afecta el cuerpo humano [E12]
Polímero plástico	En contacto con	Agua	Liberación de elemento letal	Si polímero plástico entra en contacto con agua entonces causa liberación de efecto letal [E1]
Polímero		Órgano	Daña sistemas	Si polímero plástico entra en contacto con órgano entonces causa daño a sistemas [E2]
Sustancia química		Agua, tierra y aire	Afecta ecosistema	Si sustancia química entra en contacto con agua, tierra y aire entonces afecta el ecosistema [E3]
Polímero plástico	Expuesto a	Luz solar	Liberación sustancia química	Si polímero plástico se expone a luz solar entonces causa liberación de sustancia química [E3]
		Clima	Cambia composición del agua	Si polímero plástico se expone al clima entonces causa cambio en composición del agua [E11]
Plástico		Órgano	Afecta tracto digestivo y microbiota del estómago	Si plástico interactúan con órgano entonces afecta tracto digestivo y microbiota del estómago [E16]
Polímero	Interactúa con	Agua	Afecta ecosistema	Si polímero interactúan con agua entonces afecta el ecosistema [E7]
			Afecta ecosistema marino	Si polímero interactúa con agua entonces afecta el ecosistema marino [E8]
			Afecta ser marino	Si polímero interactúa con agua entonces afecta ser marino [E18]

Tabla 2 (continuación). Etapas para construcción de la relación causa-efecto.

E1	Relación con	E3	Efecto	Relación causa-efecto
Polímero	Interactúa con	Sistema inmune	Causa enfermedad	Si polímero interactúa con sistema inmunológico entonces causa enfermedad [E20]
		Sistemas digestivo, respiratorio y excretor		Si polímero interactúa con sistemas digestivo, respiratorio y excretor entonces causa enfermedad [E25]
		Organismo	Afecta célula del cuerpo humano	Si polímero interactúa con organismo entonces afecta célula del cuerpo humano [E7]
		Cuerpo humano	Causa intoxicación	Si polímero interactúa con cuerpo humano entonces causa intoxicación [E19]
		Sistema	Causa reacción	Si polímero interactúa con sistema entonces causa reacción [E26]
		Estómago	Afecta sistemas inmunológico y circulatorio	Si polímero interactúa con estómago entonces afecta al sistemas inmunológico y circulatorio [E30]
Microplástico		Tejido	Afecta sistema circulatorio	Si microplástico interactúa con tejido entonces afecta el sistema circulatorio [E4]
		Organismo	Afecta célula humana	Si microplástico interactúa con organismo entonces afecta célula humana [E8]
		Cuerpo humano	Afecta sangre	Si microplástico interactúa con cuerpo humano entonces afecta sangre [E15]
Sustancia química			Causa infección	Si sustancia química interactúa con cuerpo humano entonces causa infección [E13]

Se observa que algunos estudiantes (11/30) no presentan en sus respuestas entidades para establecer relaciones de causa-efecto y otros presentan más de una posibilidad, como el caso del estudiante 7. En general, ellos utilizaran -polímero, polímero plástico, sustancias química y tóxica, plástico, microplástico- en interacción -con vena y arteria, fauna marina, agua, órgano, tierra, aire, ser marino, luz solar, clima, organismo, cuerpo humano, tejido, estómago, sistemas, sistemas circulatorio, digestivo, respiratorio, inmunológico y excretor. Los efectos de estas interacciones fueron en órgano, glándula, cuerpo humano, ecosistema, célula humana, sangre, sistemas y ser marino. Consideran que estas interacciones causan infección, reacción, enfermedad, intoxicación, cambio, liberación de sustancia química, daño en sistemas y efectos letales. Pero no existe explicación que intente dar razones o decir por qué estas interacciones son posibles, ni tampoco justifican con una explicación específica los efectos y causas de las relaciones.

Lo que se percibe de los pensamientos espontáneos de los estudiantes basado en las relaciones causa-efecto que establecieron, es una confirmación de que sus modelos presentan una interpretación de los escenarios propuestos en las preguntas. Cuando la pregunta requiere una explicación del fenómeno, no hay evidencias ontológicas que permitan la construcción de relaciones causa-efecto donde los conceptos puedan ser asociados con ciertos atributos científicos o los conceptos den cuenta de los procesos y estados involucrados (Concari, 2001).

En síntesis, no hay un pensamiento espontáneo con una especificidad cercana a relaciones causales científicas y sí, entes generales cómo órganos pero sin especificar cuáles, y tampoco cómo y por qué es afectado o causa infección. En caso de la causalidad por infección, por ejemplo, no se identifica una propiedad ni un mecanismo que justifique la vinculación entre procesos

fisicoquímicos y biológicos. Para nosotros, explicar el fenómeno significa presentar una comprensión de qué entidades y sus propiedades hacen posibles relaciones que causen algún efecto. Entonces, podría pensarse que, si el efecto se mantiene regular por algún tiempo, puede tener consecuencias para la salud humana.

Al analizar los datos de la Tabla 3, percibimos que los elementos ontológicos y epistemológicos de los modelos de pensamiento espontáneo de los estudiantes pueden ser considerados de parcial o poca correspondencia con respecto a modelos considerados científicos. Por ejemplo, cuando inferimos que consideran que, con el pasar del tiempo, la acumulación de microplásticos en células humanas causa cáncer, los atributos presentes en las respuestas no nos permiten establecer relaciones causa-efecto sobre cómo se forman los microplásticos a partir de los polímeros plásticos de poliestireno; ni se evidencian relaciones donde el efecto es la formación de partículas menores que microplástico –como el caso de los PS-NPs– que pueden acumularse en células humanas. Y también no se explica la bioacumulación como una interacción entre PS-NPs y la membrana celular o vesícula endocítica por la endocitosis. De esta manera, el Modelo Estudiantil Inicial pudiera resumirse de la siguiente manera (Tabla 3).

Tabla 3. MEI para el fenómeno de bioacumulación de PS-NPs en el cuerpo humano.

Dimensión ontológica		Dimensión epistemológica	
Entidad	Propiedad	Relación causa-efecto	Inferencia
Polímero	Fragmentos muy pequeños y diminutos que no degradan con tiempo y acumulan en peces y animales	Si <i>polímero</i> entra en contacto con <i>vena y arteria</i> entonces afecta órgano o glándula	Las infecciones en cuerpo humano llevan a enfermedades
Vena		Si <i>polímero</i> entra en contacto con <i>fauna marina</i> entonces afecta el cuerpo humano	Acumulación de microplásticos en células causa cáncer
Arteria		Si <i>polímero plástico</i> entra en contacto con <i>agua</i> entonces causa liberación de efecto letal	La acumulación de microplásticos en sistemas afecta salud y causa daños al cuerpo humano
Polímero Plástico	Desintegra y forman partículas microscópicas, contamina medio ambiente y cuerpo humano (afectando la célula) y acumula en tejido	Si <i>polímero plástico</i> entra en contacto con <i>órgano</i> entonces causa daño a sistemas	
Fauna marina		Si <i>sustancia química</i> entra en contacto con <i>agua, tierra y aire</i> entonces afecta el ecosistema	
Agua	Vital para una sana subsistencia de la vida	Si <i>sustancia tóxica</i> entra en contacto con <i>ser marino</i> entonces afecta célula humana	
Órgano		Si <i>polímero plástico</i> se expone a <i>luz solar</i> entonces causa liberación de sustancia química	

Tabla 3 (continuación). MEI para el fenómeno de bioacumulación de PS-NPs en el cuerpo humano.

Dimensión ontológica		Dimensión epistemológica	
Entidad	Propiedad	Relación causa-efecto	Inferencia
Sustancia Tóxica		Si <i>polímero plástico</i> se expone al <i>clima</i> entonces causa cambio en composición del agua	
Ser marino		Si <i>plástico</i> interactúa con <i>órgano</i> entonces afecta tracto digestivo y microbiota del estómago	
Luz solar		Si <i>polímero</i> interactúa con <i>agua</i> entonces afecta ecosistema	
Clima		Si <i>polímero</i> interactúa con <i>agua</i> entonces afecta ecosistema marino	
Plástico	Materiales que disuelven en agua del mar, acumula en órganos y cambia microbiota del estómago	Si <i>polímero</i> interactúa con <i>agua</i> entonces afecta ser marino	
Organismo		Si <i>polímero</i> interactúa con <i>organismo</i> entonces afecta célula del cuerpo humano	
Cuerpo humano		Si <i>polímero</i> interactúa con <i>cuerpo humano</i> entonces causa intoxicación	
Sistema inmune		Si <i>polímero</i> interactúa con <i>sistema inmunológico</i> entonces causa enfermedad	
Sistema digestivo		Si <i>polímero</i> interactúa con <i>sistemas digestivo, respiratorio y excretor</i> entonces causa enfermedad	
Sistema respiratorio		Si <i>polímero</i> interactúan con <i>sistemas</i> entonces causa reacción	
Sistema excretor		Si <i>polímero</i> interactúan con <i>estómago</i> entonces afecta sistemas inmunológico y circulatorio	
Sistemas		Si <i>microplástico</i> interactúa con <i>tejido</i> entonces afecta sistema circulatorio	
Estómago	Absorbe polímeros	Si <i>microplástico</i> interactúa con <i>organismo</i> entonces afecta célula humana	
Micro plástico		Si <i>microplástico</i> interactúa con <i>cuerpo humano</i> entonces afecta sangre	
Tejido		Si <i>sustancia química</i> interactúa con <i>cuerpo humano</i> entonces causa infección	
Sustancia Química			

Por lo tanto, la construcción del Modelo Estudiantil Inicial permitió resaltar algunos rasgos de los modelos de pensamiento espontáneo de estudiantes de bachillerato en relación con el fenómeno de bioacumulación de PS-NPs en el cuerpo humano. Y también permitió evidenciar que, en su estructura de pensamiento, hay una primera representación muy elemental de la composición del sistema, entidades muy poco específicas para el nivel de explicación que debieran mostrar. También percibimos que, debido a una explicación débil de las relaciones entre las entidades, los estudiantes no alcanzan a inferir el comportamiento prolongado del fenómeno, porque existe un

razonamiento causal de carácter general, con pocas especificidades que nos den luz sobre los mecanismos actuantes en las transformaciones fisicoquímicas y en el proceso biológico en la célula humana.

Entonces, el Modelo Estudiantil Inicial integra un sistema de pensamiento -en sus dimensiones ontológica y epistemológica- espontáneo de los estudiantes que muestra una descripción deficiente del fenómeno, una asignación de causalidad todavía inoperante para establecer mecanismos más específicos y una casi nula presencia de generalizaciones por inferencia. Con este procedimiento también podemos evaluar qué relaciones es necesario introducir en la enseñanza, además de inferir posibles dificultades en el proceso de construcción del conocimiento científico escolar que explica el fenómeno de bioacumulación; es decir, describir una lógica de explicación que ayude a los estudiantes a pasar de formas ingenuas de explicar los fenómenos de interés científico a acercarse a las explicaciones más elaboradas, haciendo que sus formas de pensar sean más pertinentes de acuerdo con cánones científicos.

Conclusión

El objetivo del estudio fue describir las características del pensamiento espontáneo de los estudiantes a partir de la construcción del Modelo Estudiantil Inicial y los resultados muestran que sus pensamientos pueden ser considerados adecuados, parcialmente adecuados o poco adecuados; prevaleciendo los dos últimos. No se presentan expresiones de entidades que, con propiedades bien definidas –sobre todo las biológicas–, establezcan relaciones, causen un efecto y expliquen el fenómeno con pertinencia y especificidad. Por tanto, las inferencias son genéricas y contribuyen poco a una justificación al que podría suceder después de varios años.

Los estudiantes no identifican el agente biológico con el que interaccionan los PS-NPs al ser ingeridos o inhalados, y ello imposibilita establecer relaciones causales que tienen que ver con el efecto sobre el cuerpo humano. La construcción de una herramienta como el Modelo Estudiantil Inicial que tenga en cuenta los modelos de pensamiento espontáneo de los estudiantes para configurar la enseñanza puede considerarse un avance para la planificación de una secuencia didáctica. Con este modelo no se considera el pensamiento de los estudiantes de forma meramente conceptual, como en la mayoría de los casos de las «ideas espontáneas», sino la comprensión de lo que el estudiante entiende al referirse a un fenómeno; al ir más allá de aspectos conceptuales e internarse en mecanismos explicativos.

Por lo tanto, el Modelo Científico Escolar de Arriba cumple la función de ser una herramienta por la cual se pueden derivar criterios para planear la enseñanza y valorar las propuestas ontológicas y epistemológicas estudiantiles evidenciadas en esta investigación a partir de un tensionamiento entre los modelos estudiantil inicial, curricular y científico, poder configurar un modelo de referencia a ser alcanzado, como lo es el Modelo Científico Escolar de Arriba.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por el apoyo financeiro (APQ-05218-23/Convocatoria Nº 09/2023) y la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Declaración de autoría

Conceptualización: K. B-K.; metodología: K. B-K, C. M. P, A. D. L. M.; validación: K. B-K., A. D. L. M.; análisis formal: K. B-K., C. M. P., A. D. L. M.; investigación: K. B-K., C. M. P.; recursos: K. B-K., C. M. P.; gestión de datos: K. B-K, C. M. P.; redacción - preparación del borrador original: K. B-K.; redacción - revisión y edición: K. B-K., C. M. P, A. D. L. M.; supervisión: K. B-K., A. D. L. M.; administración del proyecto: K. B-K.

Referencias

- Aliberas, J., Gutiérrez, R. y Izquierdo, M. (2021). Identifying changes in a student's mental models and stimulating intrinsic motivation for learning during a dialogue regulated by the teachback technique: A case study. *Research in Science Education*, 51, 617–645.
<https://doi.org/10.1007/s11165-018-9810-z>
- Artigue, M. (1995). Ingeniería didáctica. En P. Gómez (Ed.), *Ingeniería didáctica en educación matemática. Un esquema para la investigación y la innovación en la enseñanza y el aprendizaje de las matemáticas* (pp. 33–59). Grupo Editorial Iberoamérica.
- Artigue, M. (2002). Ingénierie didactique: Quel rôle dans la recherche didactique aujourd'hui? *Les Dossiers des Sciences de l'Éducation*, 8(1), 59–72.
<https://doi.org/10.3406/dsedu.2002.1010>
- Cella, C., La Spina, R., Mehn, D., Fumagalli, F., Ceccone, G., Valsesia, A. y Gilliland, D. (2022). Detecting micro- and nanoplastics from food packaging: Challenges and analytical strategies. *Polymers*, 14, 1238. <https://doi.org/10.3390/polym14061238>
- Concari, S. B. (2001). Las teorías y modelos en la explicación científica: Implicancias para la enseñanza de las ciencias. *Ciência & Educação*, 7(1), 85–94.
<https://doi.org/10.1590/S1516-73132001000100006>
- Cortés-Ross, E. y Juárez-Moreno, K. O. (2023). Estudio de los efectos toxicológicos de los nanoplásticos en células de colon. *Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 16(31), 1e–20e.
<https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.31.69782>
- Cottom, J. W., Cook, E. y Velis, C. A. (2024). A local-to-global emissions inventory of macroplastic pollution. *Nature*, 633, 101–108.
- Couso, D. (2011). Las secuencias didácticas en la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias: Modelos para su diseño y validación. En A. Caamaño (Coord.), *Didáctica de la física y la química* (Vol. II, pp. 57–84). Graó.
- Duit, R. (2006). La investigación sobre enseñanza de las ciencias. Un requisito imprescindible para mejorar la práctica educativa. *Revista Mexicana de Investigación Educativa*, 11(30), 741–770.
- Duit, R. (2007). Science education research internationally: Conceptions, research, methods, domains of research. *Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, 3(1), 3–15.
- Duit, R., Gropengießer, H., Kattmann, U., Komorek, M. y Parchmann, I. (2012). The model of educational reconstruction: A framework for improving teaching and learning science. En J. Doris & D. Justin (Eds.), *Science education research and practice in Europe: Retrospective and prospective* (Vol. 5, pp. 13–37). Sense Publishers.
- Fontes, B. L. M., Souza, L. C. S., Oliveira, A. P. S. S., Fonseca, R. N., Cavalcanti Neto, M. P. y Pinheiro, C. R. (2024). The possible impacts of nano- and microplastics on human health: Lessons from experimental models across multiple organs. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 27(4), 153–187.

- Gambino, I., Bagordo, F., Grassi, T., Panico, A. y De Donno, A. (2022). Occurrence of microplastics in tap and bottled water: Current knowledge. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, 5283. <https://doi.org/10.3390/ijerph19095283>
- Gewert, B., Plassmann, M. y MacLeod, M. (2015). Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 17, 1513. <https://doi.org/10.1039/C5EM00207A>
- Gutiérrez, R. (2007). Sistemas de creencias, modelos mentales y cambio conceptual. *Boletín de Estudios e Investigación*, 573–585.
- Gutiérrez, R. (2014). Lo que los profesores de ciencia conocen y necesitan conocer acerca de los modelos: Aproximaciones y alternativas. *Bio-grafía: Escritos sobre la biología y su enseñanza*, 7(13), 37–66. <https://doi.org/10.17227/20271034.vol.7num.13bio-grafia37.66>
- Han, S.-W., Choi, J. y Ryu, K.-Y. (2024). Recent progress and future directions of the research on nanoplastic-induced neurotoxicity. *Neural Regeneration Research*, 19(2), 331–335.
- Jeong, J., Im, J. y Choi, J. (2024). Integrating aggregate exposure pathway and adverse outcome pathway for micro/nanoplastics: A review on exposure, toxicokinetics, and toxicity studies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 272, 116022. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116022>
- Juuti, K. y Lavonen, J. (2006). Design-based research in science education: One step towards methodology. *NorDiNa*, 4, 54–68.
- Kadac-Czapska, K., Knez, E., Gierszewska, M., Olewnik-Kruszkowska, E. y Grembecka, M. (2023). Microplastics derived from food packaging waste—Their origin and health risks. *Materials*, 16(2), 674. <https://doi.org/10.3390/ma16020674>
- López-Mota, A. D. (Coord.). (2019). *Modelos científicos escolares: El caso de la obesidad humana*. UPN.
- López-Mota, A. D. y Moreno-Arcuri, G. (2014). Sustentación teórica y descripción metodológica del proceso de obtención de criterios de diseño y validación para secuencias didácticas basadas en modelos: El caso del fenómeno de la fermentación. *Bio-grafía: Escritos sobre la biología y su enseñanza*, 7(13), 109–126.
- Luo, Y., Gibson, C. T., Chuah, C., Tang, Y., Naidu, R. y Fang, C. (2022). Raman imaging for the identification of teflon microplastics and nanoplastics released from non-stick cookware. *Science of the Total Environment*, 851(Pt. 2), 158293. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158293>
- Minayo, M. C. S. O. (2010). *Desafio do conhecimento: Pesquisa qualitativa em saúde* (14.^a ed.). Abrasco.
- Moreno-Arcuri, G., López-Mota, A. D. y Orrego-Cardozo, M. (2021). Uso de una herramienta teórico-metodológica para postular aprendizajes curriculares esperados: El caso de la obesidad. En *XVI Congreso Nacional de Investigación Educativa*. COMIE. <https://www.comie.org.mx/congreso/memoriaelectronica/v16/doc/2164>
- Ojinnaka, D. y Aw, M. M. (2020). Micro and nano plastics: A consumer perception study on the environment, food safety threat and control systems. *Biomedical Journal of Science & Technical Research*, 31(2). <https://doi.org/10.26717/BJSTR.2020.31.005064>

- Roslan, N. S., Lee, Y. Y., Ibrahim, Y. S., Anuar, S. T., Yusof, K. M. K. K., Lai, L. A. y Brentnall, T. (2024). Detection of microplastics in human tissues and organs: A scoping review. *Journal of Global Health*, 14, 04179. <https://doi.org/10.7189/jogh.14.04179>
- Santos, R. S. y Souza, R. R. (2023). Panorama dos impactos causados pelo descarte inadequado dos resíduos sólidos na biodiversidade. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 8(2), 62–69. <https://doi.org/10.24221/jeap.8.2.2023.5284.062-069>
- Shi, Q., Tang, J., Liu, R. y Wang, L. (2021). Toxicity in vitro reveals potential impacts of microplastics and nanoplastics on human health: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(21), 3863–3895. <https://doi.org/10.1080/10643389.2021.1951528>
- Souza, A. B., Santos, A. C. C., Santana, J. A. y Cruz, M. C. P. (2022). Plástico no mar: Polímeros à deriva! *Química Nova na Escola*, 43(3), 320–329. <https://doi.org/10.21577/0104-8899.20160284>
- Valente, J. V., Barros, R. A., Cristovão, A. C., Pastorinho, M. R. y Sousa, A. C. A. (2021). Avaliação do potencial citotóxico de microplásticos em linhas celulares intestinais, hepáticas e neuronais. *Revista Captar: Ciência e Ambiente para Todos*, 10, 4–4. <https://proa.ua.pt/index.php/captar/article/view/23950/18678>
- Virii, J. y Savinainen, A. (2008). Teaching-learning sequences: A comparison of learning demand analysis and educational reconstruction. *Latin American Journal of Physics Education*, 2(2), 80–86.