

UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y AMBIENTALES



Contaminación por microplásticos, efectos en la microalga
Chlorella sp. Beijerinck e implicaciones en el medio natural: Una
revisión sistemática

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL

AUTORA

Kathia Lucia Lindo Samar

ASESOR

José Víctor Ruíz Ccancece

Lima, Perú

2025

METADATOS COMPLEMENTARIOS

Datos del autor

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

Datos del asesor

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (obligatorio)	

Datos del Jurado

Datos del presidente del jurado

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

Datos del segundo miembro

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

Datos del tercer miembro

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

Datos de la obra

Materia*	
Campo del conocimiento OCDE Consultar el listado:	
Idioma (Normal ISO 639-3)	
Tipo de trabajo de investigación	
País de publicación	
Recurso del cual forma parte (opcional)	
Nombre del grado	
Grado académico o título profesional	
Nombre del programa	
Código del programa Consultar el listado:	

*Ingresar las palabras clave o términos del lenguaje natural (no controladas por un vocabulario o tesoro).



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

ACTA N° 019-2025/UCSS/FCAA-DI

Siendo las 08:00 a. m. del 22 de marzo de 2025 a través de la plataforma virtual zoom de la Universidad Católica Sedes Sapientiae, el Jurado de Tesis integrado por:

- | | |
|------------------------------------|-----------------|
| 1. Elvira Teófila Castañeda Chirre | presidente |
| 2. Omar Eduardo Benites Alfaro | primer miembro |
| 3. Oswaldo Clever Villena Carpio | segundo miembro |
| 4. José Víctor Ruiz Ccancce | asesor(a) |

Se reunieron para la sustentación virtual de la tesis titulada:

Contaminación por microplásticos, efectos en la microalga *Chlorella* sp. Beijerinck e implicaciones en el medio natural: Una revisión sistemática

Que presenta la bachiller en **Ciencias Ambientales**:

Kathia Lucia Lindo Samar

Cumpliendo así con los requerimientos exigidos por el reglamento para la modalidad de titulación; la presentación y sustentación de un trabajo de investigación original, para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Ambiental**.

Terminada la sustentación y luego de deliberar, el jurado acuerda:

APROBAR	X
DESAPROBAR	...

La tesis, con el calificativo de **MUY BUENA** y eleva la presente acta al decanato de la **Facultad de Ciencias Agrarias y Ambientales**, a fin de que se declare EXPEDITA para conferir el TÍTULO de **INGENIERO AMBIENTAL**.

Lima, 22 de marzo de 2025.

Elvira Teófila Castañeda Chirre
Presidente

Omar Eduardo Benites Alfaro
1° miembro

Oswaldo Clever Villena Carpio
miembro

José Víctor Ruiz Ccancce 2°
Asesor(a)

Anexo 2**CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR(A) DE TESIS / INFORME ACADÉMICO/ TRABAJO DE INVESTIGACIÓN/ TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL CON INFORME DE EVALUACIÓN DEL SOFTWARE ANTIPLAGIO**

Lima, 21 de marzo de 2025

Señor(a),
Wilfredo Mendoza Caballero
Jefe del Departamento de Investigación
Facultad de Ciencias Agrarias y Ambientales

Reciba un cordial saludo.

Sirva el presente para informar que **la tesis** / informe académico/ trabajo de investigación/ trabajo de suficiencia profesional, bajo mi asesoría, con **título:** Contaminación por microplásticos, efectos en la microalga *Chlorella* sp. Beijerinck e implicaciones en el medio natural: Una revisión sistemática, presentado por Kathia Lucia Lindo Samar (2015200108 y 48233898) para optar el **título profesional**/grado académico de Ingeniero Ambiental ha sido revisado en su totalidad por mi persona y **CONSIDERO** que el mismo se encuentra **APTO** para ser sustentado ante el Jurado Evaluador.

Asimismo, para garantizar la originalidad del documento en mención, se le ha sometido a los mecanismos de control y procedimientos antiplagio previstos en la normativa interna de la Universidad, **cuyo resultado alcanzó un porcentaje de similitud de 15 % (poner el valor del porcentaje)**. Por tanto, en mi condición de asesor(a), firmo la presente carta en señal de conformidad y adjunto el informe de similitud del Sistema Antiplagio Turnitin, como evidencia de lo informado.

Sin otro particular, me despido de usted. Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'José Víctor Ruíz Ccance', is written over a horizontal line.

Firma

José Víctor Ruíz Ccance

DNI N°: 10150044

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2804-6233>

Facultad de Ciencias Agrarias y Ambientales - UCSS

* De conformidad con el artículo 8°, del Capítulo 3 del Reglamento de Control Antiplagio e Integridad Académica para trabajos para optar grados y títulos, aplicación del software antiplagio en la UCSS, se establece lo siguiente:

Artículo 8°. Criterios de evaluación de originalidad de los trabajos y aplicación de filtros

El porcentaje de similitud aceptado en el informe del software antiplagio para trabajos para optar grados académicos y títulos profesionales, será máximo de veinte por ciento (20%) de su contenido, siempre y cuando no implique copia o indicio de copia.

DEDICATORIA

*A Dios padre todo poderoso, por darme sabiduría,
fortaleza y perseverancia necesaria para seguir
y mejorar día a día.*

*A mi madre Leoncia Macedonia Samar
Huaman por su amor incondicional, apoyo y
respaldo.*

*A mis hermanos Julio, José, Juan y Rocío por
sus consejos y motivación.*

*A mi esposo Juan Monroy por su amor
y paciencia, sobre todo por acogerme
con mucho cariño en tiempos difíciles
y colaborar siempre con mis metas
que son tuyas.*

*A mi padre Román Luis Aurelio
Lindo Solano en el cielo.*

AGRADECIMIENTOS

De manera especial, agradecer a mi alma mater la Universidad Católica Sedes Sapientiae por haber permitido lograr unas de mis metas, estudiar una carrera profesional.

Agradezco también a mi asesor, el Ing. José Ruiz, por brindarme la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico, así también por su tiempo para guiarme durante este proceso.

A mis profesores, que desde los primeros ciclos fueron grandes referentes para mi formación profesional, gracias por sus enseñanzas, sabios consejos y amistad.

De igual manera, agradezco a todos los que fueron mis compañeros de clase en el transcurso de los ciclos, puesto que con entusiasmo, compañerismo y amistad aportaron en gran porcentaje mis ganas de seguir adelante.

Además, con total aprecio a la Ing. Mónica Beaumont Valdez y la Lic. Luz Blas Montenegro por el tiempo y apoyo invertido en la revisión de los artículos seleccionados para este trabajo de investigación.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	6
AGRADECIMIENTOS	7
ÍNDICE GENERAL	8
ÍNDICE DE TABLAS	10
ÍNDICE DE APÉNDICES	12
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVOS	18
Objetivo general	18
Objetivos específicos	18
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	19
1.1. Antecedentes	19
1.1.1. Internacionales	19
1.2. Bases teóricas especializadas	25
1.2.1. Origen del plástico	25
1.2.2. Producción de plásticos en el Perú	26
1.2.3. Definición y tipos de plásticos	30
1.2.4. Contaminantes emergentes	33
1.2.5. Los microplásticos	34
1.2.6. Plástico común entre las investigaciones: poliestireno usos y efectos	39
1.2.7. Función ambiental y servicios ecosistémicos de las microalgas	39
1.2.8. Microalgas: indicadores de la calidad del agua	40
1.2.9. <i>Chlorella</i> sp.	40
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS	50
2.1. Diseño de la investigación	50
2.2. Lugar y fecha	50
2.3. Técnicas e instrumentos	50
2.4. Descripción de la investigación	51
2.5. Identificación de variables y su mensuración	57
2.7. Análisis estadístico de los datos	58
CAPÍTULO III: RESULTADOS	61

3.1. Representatividad geográfica y calidad de las revistas que publicaron los artículos incluidos en la revisión.....	61
3.2. Efectos que generan los microplásticos en el crecimiento de <i>Chlorella</i> sp.....	65
3.3. Influencia de los microplásticos en la concentración de clorofila total de <i>Chlorella</i> sp.	71
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN	75
4.1. Sobre la evaluación de la representatividad geográfica y calidad de las revistas que publicaron los artículos incluidos en la revisión sistemática	75
4.2. Sobre los efectos que generan los microplásticos (plásticos en polvo, poliamida, poliacrilonitrilo, polietileno, polipropileno, poliestireno y policloruro de vinilo) en el crecimiento de <i>Chlorella</i> sp.	76
4.3. Sobre la influencia de los microplásticos en la concentración de clorofila total de <i>Chlorella</i> sp.	79
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES	81
REFERENCIAS	84
APÉNDICES	109

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. <i>Cronología de invención de algunos polímeros</i>	25
Tabla 2. <i>Bienes intermedios plásticos producidos en Perú</i>	29
Tabla 3. <i>Cantidad de desechos plásticos generados por tipo</i>	30
Tabla 4. <i>Compuestos aditivos utilizados en el procesamiento de plásticos</i>	31
Tabla 5. <i>Principales tipos de polímeros y sus usos</i>	32
Tabla 6. <i>Tipos de microplásticos</i>	35
Tabla 7. <i>Clasificación taxonómica</i>	41
Tabla 8. <i>Distribución geográfica de Chlorella sp. en hábitats marinos y salobres</i>	44
Tabla 9. <i>Contenido de vitaminas de Chlorella sp. (100 g)</i>	45
Tabla 10. <i>Composición bioquímica de Chlorella sp. (50 g)</i>	45
Tabla 11. <i>Condiciones óptimas de cultivo para Chlorella sp</i>	46
Tabla 12. <i>Aplicación de metabolitos derivados de Chlorella sp</i>	49
Tabla 13. <i>Composición de minerales vitales para el funcionamiento del cuerpo humano presentes en Chlorella sp (100 g)</i>	49
Tabla 14. <i>Descripción de etapas</i>	51
Tabla 15. <i>Bases de datos electrónicas utilizadas para la revisión sistemática</i>	52
Tabla 16. <i>Criterios de inclusión</i>	53
Tabla 17. <i>Criterios de exclusión</i>	54
Tabla 18. <i>Descripción de las variables</i>	57
Tabla 19. <i>Criterios de interpretación: valores del coeficiente de correlación de Pearson</i>	59
Tabla 20. <i>Ecuaciones que describen la relación entre la concentración de microplásticos y la tasa de inhibición durante las primeras 24 horas</i>	66
Tabla 21. <i>Ecuaciones que describen la relación entre la concentración de microplásticos y la tasa de inhibición – período 96 horas</i>	68
Tabla 22. <i>Ecuaciones que describen la relación entre la concentración de microplásticos y la tasa de inhibición durante las primeras 144 horas</i>	70
Tabla 23. <i>Tipos de microplásticos según el tiempo de exposición</i>	71

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. <i>Estructura de costos de la industria de plásticos</i>	27
Figura 2. <i>Importaciones de materia prima 2017 (974 392 t)</i>	27
Figura 3. <i>Principales sectores productivos demandantes de productos plásticos</i>	28
Figura 4. <i>Producción industrial de productos plásticos 2013-2019</i>	28
Figura 5. <i>Consumo Per Cápita de plásticos en Latinoamérica</i>	29
Figura 6. <i>Definición por el tamaño de desecho plástico según algunos informes y literatura científica</i>	34
Figura 7. <i>Contaminación global y distribución de microplásticos</i>	37
Figura 8. <i>Potencial efecto en la salud humana resultado de la bioacumulación y biomagnificación de microplásticos</i>	38
Figura 9. <i>Proceso de autoesporulación Chlorella sp.</i>	42
Figura 10. <i>Relaciones filogenéticas de Chlorella sp. y algas similares</i>	43
Figura 11. <i>Aplicación potencial y usos de Chlorella sp. en la acuicultura</i>	48
Figura 12. <i>Diagrama de flujo PRISMA que resume el proceso de la revisión sistemática</i>	60
Figura 13. <i>Distribución de artículos por revista según el factor de impacto (5 años) y categoría cuartil</i>	61
Figura 14. <i>Número de artículos según el país de afiliación</i>	62
Figura 15. <i>Mapa de interconexiones: palabras clave de los artículos incluidos en la revisión sistemática</i>	63
Figura 16. <i>Efectos en el crecimiento de Chlorella sp. según el tipo y la concentración de microplásticos durante 24 horas</i>	65
Figura 17. <i>Efectos en el crecimiento de Chlorella sp. según el tipo y la concentración de microplásticos durante 96 horas</i>	67
Figura 18. <i>Efectos en el crecimiento de Chlorella sp. según el tipo y la concentración de microplásticos durante 144 horas</i>	69
Figura 19. <i>Biplot del análisis de componentes principales respecto a la influencia de la concentración de MP en el contenido de Chl total - 24, 96 y 144 horas</i>	73

ÍNDICE DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice 1. <i>Matriz de artículos seleccionados para la revisión sistemática</i>	107

RESUMEN

Esta investigación analizó los efectos de la contaminación por microplásticos en *Chlorella* sp. La metodología consistió en una revisión sistemática según protocolo PRISMA 2009. Se identificaron 165 artículos y se incluyeron solo 25. Los resultados principales mostraron a las 24 h, que concentraciones menores a 250 mg/l de poliacrilonitrilo (PAN), polietileno (PE), poliestireno (PS) y plásticos en polvo (POLV) inhibieron el crecimiento en promedio 46,7 %, sólo 200 mg/l de polipropileno (PP) promovió su crecimiento en 24 %. No obstante, a las 96 h, POLV inhibió el crecimiento hasta en 72 %, en cambio, policloruro de vinilo (PVC) y PP lo promovieron en 14 y 20 %, respectivamente. A las 144 h, 100 mg/l de PEvirgen inhibió el crecimiento en 17,5; 35 y 42,5 %. El contenido de clorofila sufrió cambios a las 96 h estimulado por POLV, sin embargo, a las 144 h evidenció estado similar a 24 h (valores similares a la inhibición de crecimiento). En resumen, los microplásticos muestran efecto mixto, inhibición y promoción en el crecimiento y contenido de clorofila dependiendo de su concentración en el medio. Algunos de los mecanismos son: el sombreado y formación de heterogregados. Además, los aditivos químicos de los microplásticos contribuirían con la oxidación de lípidos.

Palabras claves: *Chlorella*, *clorofila*, *crecimiento*, *inhibición*, *microplásticos*, *PRISMA 2009*

ABSTRACT

This research analyzed the effects of microplastic contamination on *Chlorella* sp. The methodology consisted of a systematic review according to PRISMA 2009 protocol. We identified 165 articles and included only 25. The main results showed at 24 h that concentrations of less than 250 mg/l of polyacrylonitrile (PAN), polyethylene (PE), polystyrene (PS) and powdered plastics (POLV) inhibited growth by an average of 46.7 %, only 200 mg/l of polypropylene (PP) promoted growth by 24 %. However, at 96 h, POLV inhibited growth by up to 72%, while polyvinyl chloride (PVC) and PP promoted it by 14% and 20%, respectively. At 144 h, 100 mg/l of virgin PE inhibited growth in 17.5; 35 and 42.5%. The chlorophyll content underwent changes at 96 h stimulated by POLV, however, at 144 h it showed a state like 24 h (values similar to growth inhibition). In summary, microplastics show mixed effect, inhibition and promotion in the growth and content of chlorophyll depending on their concentration in the medium. Some of the mechanisms are shading and the formation of heteroaggregated. In addition, chemical additives in microplastics would contribute to lipid oxidation.

Keywords: *Chlorella, chlorophyll, growth, inhibition, microplastics, PRISMA 2009*

INTRODUCCIÓN

La cantidad de residuos plásticos en el entorno natural alcanzó los 6 300 millones de toneladas a nivel mundial y estiman que se podría duplicar, alcanzando los 12 000 millones de toneladas para 2050 (Chen *et al.*, 2023), este tipo de desechos proliferan en el ambiente y cada vez son de mayor perturbación debido al tamaño que adquieren por fragmentación. Las partículas plásticas de tamaño inferior a 5 mm, conocidas como microplásticos (MP) son considerados contaminantes ubicuos por su presencia en el aire, suelo y fuentes de agua, incluso en la Antártida, Ártico y fondo oceánico (Mammo *et al.*, 2020; Sridharan *et al.*, 2021). La contaminación plástica es latente y las investigaciones evalúan el riesgo potencial que deriva de su interacción o posible acumulación en las especies de los distintos niveles tróficos incluidos los productores primarios (Parsai *et al.*, 2022).

Las investigaciones de los impactos de los MP realizadas en fuentes de agua dulce aún son limitadas, y menos del 4 % se enfocan en estas (Caixeta *et al.*, 2018; Nava y Leoni, 2021; Zhang *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2017). No obstante, González-Pleiter *et al.* (2020) estimaron la concentración promedio de microplásticos en los reservorios de agua en el Ártico, a partir de muestras de sedimento fangoso alcanzando cifras de $1\ 680 \pm 440$ micropartículas/m². Cabe resaltar la inquietud por el impacto de las micropartículas de plástico en la biota acuática; puesto que, perjudicaría el equilibrio del ecosistema y, por ende, la salud humana. Esto resulta especialmente preocupante en especies clave, como las microalgas que desempeñan un rol vital en el mantenimiento de la estabilidad de ecosistemas (Liao *et al.*, 2020). Sin embargo, los estudios se enfocan en analizar el impacto en los consumidores y, son mínimos aquellos que dirigen su atención hacia el efecto en los productores, quienes pueden transferirlos (Wan *et al.*, 2019).

En tanto, las microalgas son reconocidas por su valor ecosistémico en la captura de carbono; dado que, a nivel mundial la fotosíntesis consume diez veces más CO₂ que las emisiones netas de origen antropogénico y, aproximadamente la mitad de este consumo es realizado por dichos microorganismos (Burlacot *et al.*, 2022). En especial *Chlorella vulgaris* Beijerinck destaca por su alta capacidad fotosintética, según Politaeva *et al.* (2023) puede absorber hasta 0,412 g de CO₂ por litro. Además, por su contenido en proteínas, ácidos grasos

poliinsaturados, almidón y polisacáridos extracelulares, carotenoides (betacaroteno, luteína y zeaxantina), vitaminas y minerales se considera alimento potencial en la dieta diaria, por ello cuenta con aprobación de uso para la nutrición humana (Ścieszka *et al.*, 2021). Según El-Sheekh *et al.* (2019) es una de las primeras microalgas para cultivos a gran escala de producción comercial por su crecimiento acelerado y su versatilidad abarca diversos campos como energía, alimentación y biotecnología para la producción de biocombustible.

Dada la importancia ecológica de las microalgas, es relevante abordar el problema toxicológico que enfrentan estas debido a la presencia de estos, contaminantes emergentes, plásticos. Según Cunha *et al.* (2020), aproximadamente 13 millones de toneladas de estos polímeros sintéticos, se introdujeron en ambientes acuáticos por eliminación inadecuada; cabe destacar que las micropartículas de plástico son consideradas nocivas por su baja degradabilidad, en cambio por su resistencia son llamadas contaminantes de largo plazo. A diferencia de los materiales orgánicos naturales, los plásticos se degradan lentamente y para ello es necesario décadas o siglos, así como las condiciones necesarias (Kedzierski *et al.*, 2020).

Entre los principales efectos, Bouwmeester *et al.* (2015) informaron que, los organismos marinos contienen partículas de plástico como el poliestireno, las cuales retienen un 4 % de aditivos, como: plastificantes, bacterias, sustancias químicas, entre otros. Estos productos químicos pueden liberarse una vez ingeridos y bioacumularse en el organismo (Chae *et al.*, 2018; Giraldez Alvarez *et al.*, 2020; Gambardella *et al.*, 2018). Asimismo, Bergami *et al.* (2017) afirmaron que, dichas nanopartículas plásticas cargadas negativamente se adsorben en la microalga *Dunaliella tertiolecta* Butcher y se acumulan en el camarón *Artemia franciscana* Kellogg “camaroncito de salmuera”, lo que sugiere una transferencia trófica de presa a depredador (biomagnificación).

Al respecto, los impactos que producen los microplásticos en la población vulnerable de microalgas, según diversos autores (Davarpanah y Guilhermino, 2019; Feng *et al.*, 2020; Giraldez Alvarez *et al.*, 2020; Guzzetti *et al.*, 2018; Reichelt y Gorokhova, 2020; Sjollema *et al.*, 2016) apunta a impulsar y a seguir buscando respuestas para proponer soluciones

relacionadas al problema. Para ello, es necesario generar información que sirva como antecedente ante eventos futuros sobre la contaminación por microplásticos. Es decir, esta investigación aporta el conocimiento científico relevante a este campo de la ciencia peruana a través de una revisión sistemática.

Ante la evidente importancia, ecosistémica y productiva, de estos microorganismos, el estudio plantea como objetivos analizar los efectos de la contaminación por microplásticos en el crecimiento y concentración de clorofila en la microalga *Chlorella* sp. Para ello, se analizaron diferentes investigaciones que determinaron experimentalmente, los efectos de las micropartículas plásticas sobre dicha especie en comparación a las que no presentaron efectos, asimismo, se utilizó una metodología de planificación, identificación y desarrollo basada en el protocolo Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA). Este manuscrito científico se distribuye en seis capítulos, en principio analiza el marco teórico, desarrolla una metodología sistemática y análisis descriptivo, continúa con los resultados, discusión y finalmente se generan conclusiones, además de las recomendaciones producto de esta investigación.

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar los efectos de la contaminación por microplásticos en la microalga *Chlorella* sp.

Objetivos específicos

- Evaluar la representatividad geográfica y calidad de las revistas que publicaron los artículos incluidos en la revisión sistemática sobre los efectos de los microplásticos en *Chlorella* sp.
- Interpretar los efectos que generan los microplásticos (plásticos en polvo, poliamida, poliacrilonitrilo, polietileno, polipropileno, poliestireno y policloruro de vinilo) en el crecimiento de *Chlorella* sp.
- Establecer la influencia de los tipos de microplásticos (plásticos en polvo, poliacrilonitrilo, polietileno, tereftalato de polietileno, polipropileno, poliestireno y policloruro de vinilo) en la concentración de clorofila total de *Chlorella* sp.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

1.1.1. Internacionales

Ansari *et al.* (2021) en el trabajo de investigación realizado en la Universidad Tecnológica de Durban, Sudáfrica, determinaron el efecto de diferentes concentraciones de microplásticos (MP) sobre el crecimiento, fotosíntesis y composición bioquímica de *Acutodesmus obliquus* (Hegewald y Hanagata). El diseño fue experimental y adquirieron, polvo de plásticos: polietileno de alta densidad [HDPE], polipropileno [PP], policloruro de vinilo [PVC]. Estos fueron filtrados en tamices de poro fino (250 y 100 μm). Las concentraciones (0; 5; 10; 15; 25; 100; 150; 200 y 250 mg/l) de partículas irregulares fueron añadidas al medio de cultivo estándar BG11. Cada matraz (500 ml) con contenido de la misma microalga fueron suplementados con 3 tipos y 9 concentraciones de MP por separado, adicionalmente el tratamiento control y 3 réplicas por conjunto de experimentación. La exposición duró 21 días, con agitación manual (4 veces/día). La tasa de inhibición del crecimiento (IR %) fue calculada a partir de mediciones de densidad celular. Entre los resultados, el MP HDPE alcanzó la IR más alta (42,7 %), seguido del PVC (41,6 %) y PP (37,7 %) a la concentración más alta (250 mg/l). También, observaron disminución de la actividad fotosintética en todos los tratamientos suplementados con MP superiores a 100 mg/l. Concluyeron que las concentraciones más altas de los tres tipos de MP impactaron negativamente en el crecimiento y fotosíntesis de la microalga. Después de las 144 horas de exposición mostraron adaptación ante el estrés, el crecimiento y otros parámetros evaluados fueron similares al tratamiento control.

Zheng *et al.* (2021) realizaron un estudio en China, para evaluar los efectos de diferentes MP sobre el crecimiento y producción de la microalga *Microcystis aeruginosa* Lemmermann. El diseño fue experimental. Para ello, adquirieron MP (PVC, PS y PE) de igual tamaño (3 μm), las microalgas fueron cultivadas en medio BG-11 (500 ml) en incubadoras de iluminación. Luego, añadieron los tres tipos de MP a cada cultivo por separado, los tratamientos fueron 10, 25, 50, 100 y 200 mg/l, más un control (0 mg/l). Realizaron tres réplicas por tratamiento. El tiempo de exposición fue de 96 horas. Para el análisis de clorofila “a” utilizaron un

espectrofotómetro, previo a la centrifugación y extracción. En los resultados, la clorofila “a” fue utilizada como indicador de crecimiento porque evidenciaron interferencia en el conteo de algas por el tamaño de MP. La clorofila disminuyó después de 72 y 96 horas en todas las concentraciones y tipos de MP. Al igual que la conversión de energía luminosa y parámetros de fluorescencia (fotosíntesis). La tasa de inhibición de crecimiento fue máxima (54,4 %) en presencia de MP PS (96 h – 200 mg/l). Sin embargo, la tasa máxima de inhibición del crecimiento de PVC (50 mg/l) y PE (25 mg/l) después de 96 h fue 44,4 y el 51,0 %, respectivamente. El orden por efecto de inhibición fue PS > PE > PVC. Concluyeron que, los tres tipos de MP promovieron la inhibición del crecimiento dentro de un estado de estrés oxidativo y alteración de la membrana celular.

Hazeem *et al.* (2020) realizaron una investigación en Turquía, estudiaron los efectos de los MP de poliestireno en la microalga *Chlorella vulgaris* (tamaño y química superficial). El diseño fue experimental. Para ello, al tratamiento control añadieron células de *Chlorella vulgaris*, y para los demás fueron añadidas partículas de carboxilo (PS-COOH) y PS no funcionalizado de diferentes tamaños (20, 50 y 500 nm) con una concentración única de 250 mg/l (concentración inicial de células $3,63 \times 10^6$ células/ml). Cada tratamiento fue triplicado y la medición de células fue realizada con el analizador de células MuseTM. En los resultados, el tratamiento de NP PS (20 nm) redujo más del 10 % de las células (día 3). En los tratamientos NP PS-COOH (20 y 50 nm) y NP PS (20 y 50 nm) los porcentajes de las células presentaron tendencia a la reducción en 10 %. El tratamiento MP PS (500 nm) no influyó sobre el porcentaje de células porque fue similar al de control, sin embargo, el PS-COOH (500 nm) mostró comportamiento ligeramente diferente al de las muestras control, pero no fue significativo. Durante la fase exponencial, los tratamientos PS (20, 50 y 500 nm) indujeron aumento, pero solo del 50 % de la concentración de la clorofila “a” respecto al control. Concluyeron que, el porcentaje de células viables y la concentración de la clorofila evaluada sufrieron reducción general, y los efectos más notorios surgieron después de un largo período de exposición y dependieron del tamaño.

Zhao *et al.* (2020) realizaron un estudio en la Universidad Oceánica de China, evaluaron si el PS con diferentes tamaños de diámetro (65 y 100 nm; y 1 μ m) y diferentes concentraciones de tratamiento (0; 1 y 10 mg/l) influenciarían en el crecimiento de la microalga *Karenia*

mikimotoi (Miyake & Kominami ex Oda) Gert Hansen & Moestrup, 2000, incluyeron parámetros fisiológicos a una exposición de PS de tres y 13 días. Plantearon un diseño experimental y enfoque cuantitativo. Los experimentos de exposición tuvieron tres réplicas. Las suspensiones de nano/micro-PS fueron añadidas al medio de cultivo f/2 Guillard (300 ml). Además, la fase de crecimiento exponencial de la microalga fue $2,3 \times 10^4$ células/ml y la densidad de células fue medida cada dos días usando cámaras de recuento para hallar la tasa inhibitoria (IR). También, analizaron parámetros fisiológicos como la densidad celular, la actividad enzimática antioxidante, el contenido de malondialdehído (MDA) y el nivel de especies reactivas de oxígeno (ROS). Entre los resultados, la IR obtenida a 1 mg/l para los diámetros 65 nm fue 31 %, 100 nm el 7 % y para 1 μm 16 %, en cambio a 10 mg/l alcanzaron el 100 % para 65 nm, 91 % a 100 nm y 18 % para 1 μm , ambas a los 13 días. Concluyeron que los MP de menor tamaño y a concentración más alta causaron afectación citotóxica en la densidad y período de crecimiento de la microalga, también afectó la microestructura celular y el estrés oxidativo fue en aumento.

Cunha *et al.* (2020) realizaron su investigación en Portugal, determinaron el efecto del agua contaminada con concentraciones bajas y altas de poliestireno (PS) y polimetil metacrilato (PMMA) sobre el crecimiento y pigmentos fotosintéticos de *Phaeodactylum tricornutum*. Aplicaron un diseño experimental con enfoque cuantitativo. La concentración inicial fue de $1,6 \times 10^5$ células/ml, para el control de crecimiento usaron un espectrofotómetro de doble haz UV-6300PC (durante 27 días), consideraron la abundancia celular para determinar efectos según la variación. Los dos tipos de plásticos comerciales fueron fragmentados con una fresadora, las fracciones fueron irregulares, PS de 70 – 80 μm y PMMA de 40 – 60 μm . Fueron siete grupos experimentales y tres repeticiones. Grupo de control (libre de MPs), cuatro tratamientos de 0,5 y 50 mg/l de PS y PMMA respectivamente; dos tratamientos de 0,25 y 25 mg/l de PS y PMMA juntos. Para determinar la producción de pigmentos, utilizaron un espectrofotómetro de doble luz. Los resultados muestran hasta el día tres que el crecimiento estuvo retrasado, luego hasta el noveno día, los tratamientos de PS (0,5 mg/l) y PS + PMMA (0,5 mg/l) incrementaron su abundancia de células, posterior al día 13 mostraron ralentización en su crecimiento. La clorofila “a” aumentó significativamente el día 6 para PS (0,5 mg/l) y PS + PMMA (0,5 mg/l) y luego disminuyó ante la presencia de PS y PMMA (50 mg/l) en los días restantes. Concluyeron que, existió respuesta adaptativa

hasta la fase estacionaria. Sin embargo, el rendimiento de biomasa tuvo una disminución severa.

Chen *et al.* (2020) en la Escuela de Ciencias Ecológicas y Ambientales de la Universidad Normal del Este de China, determinaron si los MP fueron absorbidos dentro de las células de dos especies de microalgas, además, el umbral de tamaño, crecimiento de algas y eficiencia fotosintética luego de la absorción. El diseño planteado fue experimental y el enfoque cuantitativo. Las microalgas fueron expuestas a 10 mg/l de MP poliestireno. Para la experimentación toxicológica utilizaron tamaños de 1 y 2 μm . Realizaron tres réplicas para cada grupo, la duración de exposición fue 96 horas; para la medición de la densidad celular utilizaron cámaras de conteo. Para el ensayo de la eficiencia fotosintética obtuvieron muestras de 3 ml de solución e indicadores y utilizaron un sistema de monitorización de fluorescencia. Los resultados, mostraron que para la microalga *Platymonas helgolandica* var. *tsingtaoensis* C.K.Tseng & T.J.Chang del tratamiento expuesto no hubo diferencias significativas a las 24 horas. Con efectos inhibitorios similares la microalga *S. quadricauda* con una reducción media de 39 %. Además, *P. tsingtaoensis* presentó efecto de reducción en su eficiencia fotosintética. Los investigadores concluyeron que, la internalización celular de MP en las dos microalgas depende del tamaño y el umbral fue 2 μm . Finalmente, observaron reducción de la densidad y fotosíntesis, influenciado por la adhesión y agregación celular de MP.

González-Fernández *et al.* (2020) realizaron una investigación en la Universidad de Murcia, España. Su objetivo fue identificar el impacto de las nanopartículas de poliestireno (NP) funcionalizadas con amina (PS-NH₂), tamaño 50 nm, en la composición de microalgas *Chaetoceros neogracilis* VanLandingham en dos etapas de crecimiento. Su diseño fue experimental con enfoque cuantitativo. Luego, para cada cultivo tenían inicialmente 4×10^5 células/ml, realizaron tres tratamientos experimentales por triplicado para cada fase: control (sin NP), baja concentración (0,05 $\mu\text{g/ml}$) y alta concentración (5 $\mu\text{g/ml}$). Antes del vertimiento, la solución de NP fue homogenizada y agitada en vórtex. Las microalgas fueron expuestas durante 96 h. Para sus análisis extrajeron en etanol los pigmentos y luego pasaron por el método de cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). En los resultados identificaron 11 pigmentos entre clorofilas y β -caroteno, para la clorofila “a” observaron

diferencias significativas en todos los tratamientos. La fase exponencial alcanzó una disminución del 70 % de todos los pigmentos. La clorofila “a” que es el compuesto más lábil recibió un drástico efecto, su reducción fue significativa. Los investigadores concluyeron que, la maquinaria fotosintética fue deteriorada por la exposición a NP funcionalizados, debido a la fuerte reducción de pigmentos y vulnerabilidad. Además, para evaluar impactos asociados a NP propusieron como nuevos indicadores, la composición de lípidos de reserva y de membrana.

Wang *et al.* (2020) en China, investigaron el efecto de los MPs de cloruro de polivinilo (PVC) sobre la tasa de crecimiento de las microalgas y la actividad enzimática. El diseño fue experimental y el enfoque cuantitativo. Para ello las perlas (50 a 100 μm) de v-PVC (cloruro de polivinilo virgen) fueron secadas hasta formar polvo, al igual que a-PVC (cloruro de polivinilo envejecido), las cuales fueron envejecidas por irradiación con lámparas UV (50 W/m^2 – 600 h). *Chlamydomonas reinhardtii* Dangeard, 1899 fueron cultivadas en matraces, en medio WC (100 ml) en incubadora oscilante a condiciones estériles y su densidad inicial fue 10^6 células/ml. Las concentraciones de MP (v-PVC y a-PVC) fueron 10, 20, 50, 100 y 200 mg/l para cada tratamiento con tres réplicas más el control, la exposición duró 96 h. Utilizaron un hemocitómetro y microscopio invertido para la medición de la densidad celular y para la clorofila “a” un espectrofotómetro ultravioleta a cuatro longitudes de onda (750; 663; 645; y 630 nm). Entre los resultados, la tasa de inhibición del crecimiento (GIR) fue 51,8 % (200 mg/l – 24 h) para v-PVC y 88,1 % (200 mg/l – >24 h) para a-PVC. Respecto al contenido de clorofila “a”, cuando el tiempo se extendió de 24 a 96 h, disminuyó de 18,6 a 10,3 % (200 mg/l de a-PVC), en cambio, en las mismas condiciones de v-PVC, disminuyó de 15,6 a 8,5 %. Los investigadores concluyeron que, los MP vírgenes y envejecidos afectan la tasa de crecimiento y clorofila “a” de las microalgas, también que, a mayor concentración de MP y tiempo de exposición la toxicidad aumentó. Además, que a-PVC puede ser más dañino.

Xiao *et al.* (2020) realizaron una investigación en China, el objetivo fue explorar los efectos tóxicos de los MP de PS de diferentes tamaños en *Euglena gracilis* Klebs. Aplicaron un diseño experimental y enfoque cuantitativo. Para ello utilizaron MP de PS de 0,1 y 5 μm de tamaño. Las microalgas fueron cultivadas en medio Checcuci utilizando un agitador

rotatorio, la densidad inicial fue de 10^5 células/ml. Luego, fueron añadidas partículas de PS en las siguientes concentraciones 0; 0,5; 1; 10; y 50 mg/l por triplicado y tiempo de exposición 96 horas. La medición de la densidad celular fue realizada por espectroscopía Multiscan (INFINITE M200), asimismo, analizaron el contenido de pigmentos, posterior a la extracción de 1 ml del cultivo. Los resultados mostraron que la tasa de inhibición de MP fue más significativa para PS (0,1 μm – 50 mg) con 35,5 % después de 96 horas. Los MP de PS (5 μm) tuvieron efectos adversos sobre la reducción del contenido de clorofila (a y b). Los autores concluyeron que, las microalgas mostraron adaptación biológica, pero perturbación intracelular (aumento de vacuolas, deformación de cloroplastos, etc.) frente a la exposición de MP poliestireno de 5 μm . En cambio, sufrieron inhibición de crecimiento significativa durante su exposición a PS de 0,1 y 5 μm de forma dependiente a la concentración.

Prata (2016), en la Universidad de Porto, Portugal, realizó un estudio con el objetivo de evaluar la toxicidad de dos grupos de contaminantes ambientales emergentes, medicamentos y microplásticos en *Tetraselmis chuii* Butcher. Cuyo diseño fue experimental y enfoque cuantitativo. Para ello, realizó tres bioensayos y tres réplicas en matraces Erlenmeyer de 500 ml, usó el medio enriquecido Guillard F/2 (400 ml) para el cultivo de la microalga, conectados a un filtro (Millex-GS) para la aireación. Añadió agua de mar, solución vitamínica e inició con 10^4 células/ml, la exposición duró 96 horas. La autora realizó conteo celular diario y utilizó el hemacitómetro Neubauer mejorado. La doxiciclina tuvo una concentración de 4 a 128 mg/l, los MP fueron de polietileno (1 – 5 μm) de 1,5 mg/l. En los resultados observó que, la doxiciclina inhibió el crecimiento de microalgas con una concentración efectiva media (CE_{50}) de 19,52 mg/l, los microplásticos en las concentraciones probadas (0,75 a 48 mg/l), no mostraron inhibición significativa de microalgas, y para la doxiciclina en presencia de microplásticos alcanzó una CE_{50} de 11,90 mg/l. Concluyó que, los microplásticos actúan como vectores toxicológicos de ciertos antibióticos, generando riesgos ambientales y efectos sobre la salud humana desconocidos, por ende, será necesario profundizar las investigaciones en la asociación de contaminantes y MP.

1.2. Bases teóricas especializadas

1.2.1. Origen del plástico

El desarrollo de la tecnología del caucho en el siglo XIX trajo consigo el principal uso de los materiales plásticos, a partir del descubrimiento que realizó Charles Goodyear respecto a la vulcanización del caucho natural (Lambert y Wagner, 2018). Asimismo, en años sucesivos a 1800 se realizaron múltiples intentos para fabricar polímeros, como el poliestireno y cloruro de polivinilo, pero fueron fallidos porque estos aún no lograban mantener su forma necesaria (Lambert, 2013). Por otro lado, en 1907 la baquelita, una resina de fenol-formaldehído, se convertía en el primer polímero sintetizado, iniciando así la Era del Plástico y posteriormente en 1938 el nailon, otro tipo de polímero, ya era patentado (Castañeta *et al.*, 2020; Vázquez-Rodríguez, 2019). La Tabla 1 especifica información relevante de los tipos y materiales plásticos que se han desarrollado en el transcurso de la historia dentro de esta industria.

Tabla 1

Cronología de invención de algunos polímeros

Año	Polímero	Acrónimo	Origen	Inventor
1839	Látex de caucho	-	Natural	Charles Goodyear
1862	Parkesina	-	Semisintético	Alexander Parkes
1863	Celuloide	-	Semisintético	John Wesley Hyatt
1894	Rayón	-	Semisintético	Charles Frederick Cross
1907	Baquelita	BK	Sintético	Leo Hendrik Baekeland
1926	Vinilo	PVC	Sintético	Walter Semon
1935	Polietileno de baja densidad	LDPE	Sintético	Reginald Gibson y Eric Fawcett
1938	Poliestireno	PS	Sintético	
1941	Tereftalato de Polietileno	PET	Sintético	John Whinfield y James Dickson
1942	Poliéster insaturado	UP	Sintético	John Whinfield y James Dickson
1951	Polipropileno	PP	Sintético	Paul Hogan y Robert Banks
1951	Polietileno de alta densidad	HDPE	Sintético	Paul Hogan y Robert Banks
1954	Poliestireno extruido	XPS	Sintético	Ray McIntire

Nota. Adaptado de Lambert y Wagner (2018). Microplastics Are Contaminants of Emerging Concern in Freshwater Environments: An Overview. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61615-5_1; y Castañeta *et al.* (2020). Microplásticos: un contaminante que crece en todas las esferas ambientales, sus características y posibles riesgos para la salud pública por exposición. <https://doi.org/10.34098/2078-3949.37.3.4>

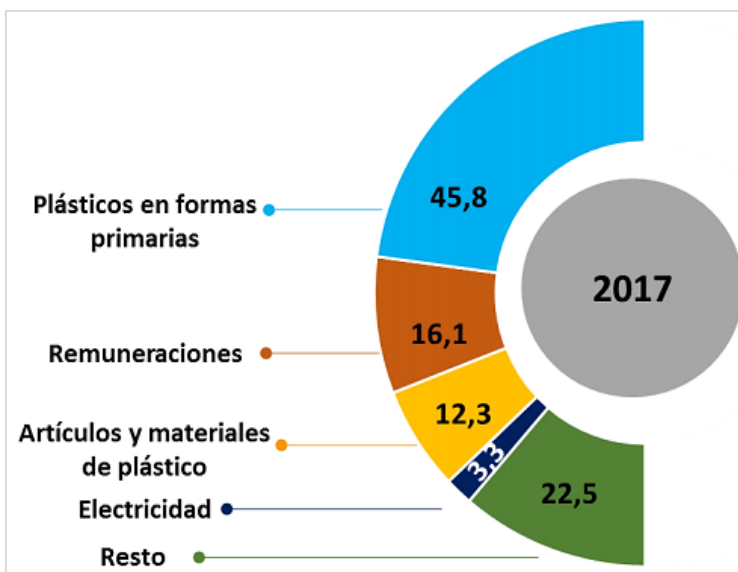
1.2.2. Producción de plásticos en el Perú

La Sociedad Nacional de Industrias, conocida por sus siglas SNI es una institución peruana sin ánimo de lucro que impulsa el crecimiento de la industria manufacturera, incitando a la economía de mercado y difundiendo su progreso desde una perspectiva tributaria, laboral y económica respaldada en la aplicación de técnicas sectoriales. Está constituida por comités gremiales, entre ellos textil, metalmecánica, plásticos, industria vinícola, agroquímica, pequeña industria COPEI, entre otros (Sociedad Nacional de Industrias [SNI], 2021). Asimismo, el Comité de Plástico de la SNI y la Asociación Peruana de la Industria del Plástico, APIPLAST, son entidades que desarrollan actividades de promoción, representación y protección del sector frente a las autoridades de gobierno en todo el país (Asociación Peruana de la Industria del Plástico [APIPLAST], 2018). Esta última asociación representa a esta industria a nivel internacional participando como miembro de la Asociación Latinoamericana de la Industria Plástica (ALIPLAST).

Respecto a la industria petroquímica peruana, esta se encuentra limitada y en vías de desarrollo por ello no abastece su producción en materia prima necesaria para la fabricación de plásticos. En consecuencia, según el Reporte Sectorial N° 04-2019 de la SNI, la industria plástica destina mayor proporción de sus recursos a la adquisición de dichos insumos a comparación de otros (Figura 1). Por ejemplo, para las importaciones del año 2017 destinaron 45,8 % de sus costos solo para la adquisición de plásticos en formas primarias.

Figura 1

Estructura de costos de la industria de plásticos

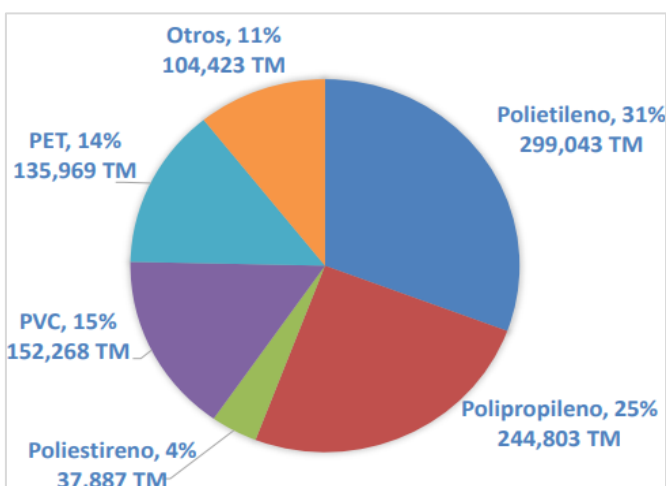


Nota. Diagrama tomado de Reporte Sectorial N° 04 – 2019 del Instituto de Estudios Económicos y Sociales [IEES] – Sociedad Nacional de Industrias [SNI]. https://www.sni.org.pe/wp-content/uploads/2019/07/Reporte-Sectorial-Pl%C3%A1sticos_2019.pdf

En la Figura 2 se aprecian las importaciones de materia prima que efectuó la industria plástica peruana durante el año 2017 y la Figura 3 muestra los principales sectores productivos con mayor demanda de productos plásticos. Donde destaca el sector construcción con el 22 %.

Figura 2

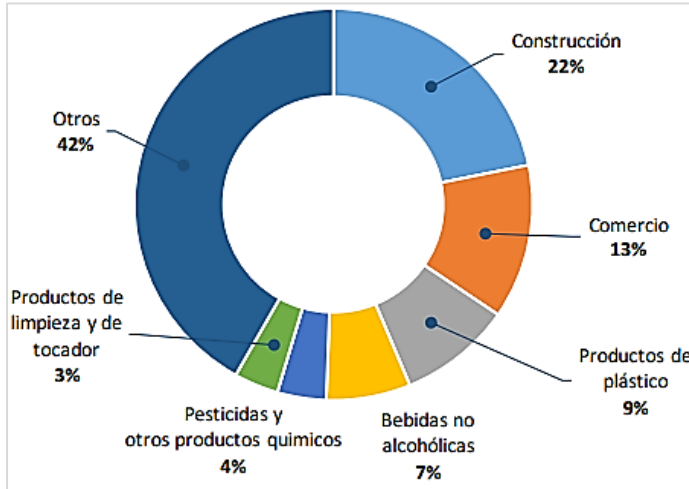
Importaciones de materia prima 2017 (974 392 t)



Nota. Diagrama tomado del Comité de plástico – SNI. (2018). Percepción frente a los proyectos de ley sobre el plástico de un solo uso. [https://www.congreso.gob.pe/Docs/comisiones2018/Produccion/files/ppt/4ta_\(2\)sesion_presentaci%C3%B3n_ing._salazar_congreso_02-10-18.pdf](https://www.congreso.gob.pe/Docs/comisiones2018/Produccion/files/ppt/4ta_(2)sesion_presentaci%C3%B3n_ing._salazar_congreso_02-10-18.pdf)

Figura 3

Principales sectores productivos demandantes de productos plásticos

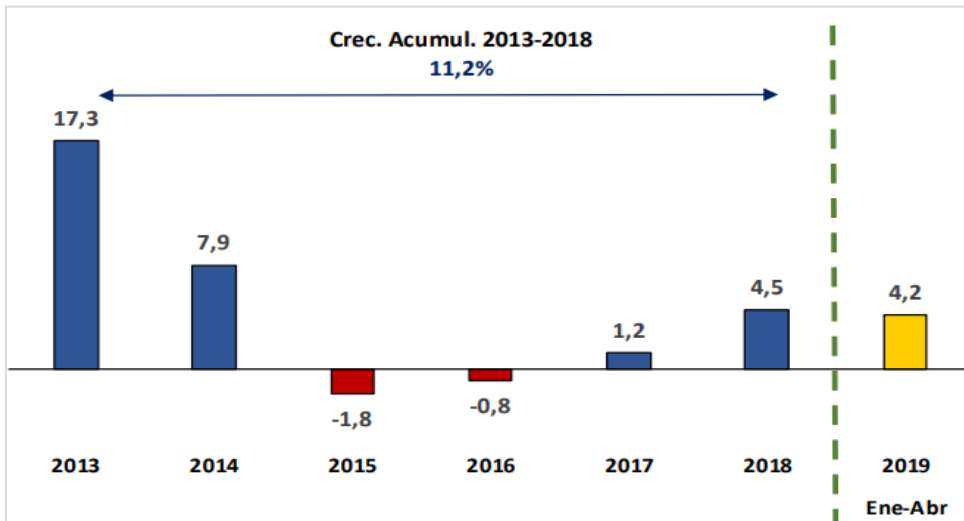


Nota. Diagrama de Reporte Sectorial N° 04 – 2019 del IEES - SNI. https://www.sni.org.pe/wp-content/uploads/2019/07/Reporte-Sectorial-PI%C3%A1sticos_2019.pdf

En cuanto al año 2018, la fabricación industrial de productos plásticos (Figura 4) aumentó en 4,5 %. Esta tasa de crecimiento fue la más alta después del año 2014, en concordancia la creciente demanda se basó en el aumento del uso de productos plásticos en los sectores de construcción, transporte, así como en la elaboración de envases y embalajes. De modo similar, para los cuatro primeros meses del año 2019 la producción plástica de tubos, placas láminas y cintas aumentó la tasa de crecimiento a 4,2 % (IEES - SNI, 2019).

Figura 4

Producción industrial de productos plásticos 2013-2019



Nota. Diagrama de Reporte Sectorial N° 04 – 2019 del IEES - SNI. https://www.sni.org.pe/wp-content/uploads/2019/07/Reporte-Sectorial-PI%C3%A1sticos_2019.pdf

En la Tabla 2 se aprecian los bienes intermedios plásticos que se produjeron en Perú durante el año 2019.

Tabla 2

Bienes intermedios plásticos producidos en Perú

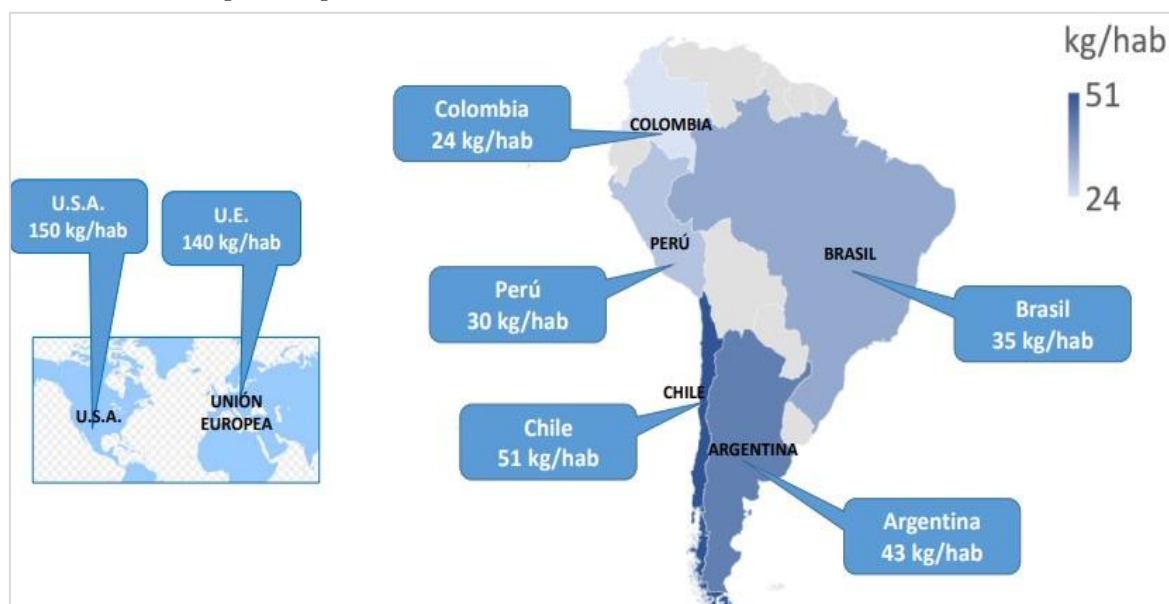
Forma Primaria	Productos Finales
Polietileno	Bolsas de plástico en general
Poliestireno	Plástico duro y flexible (juguetes, menaje doméstico)
Polipropileno	Sacos de harina de pescado, mantas sintéticas, etc.
PET	Envases plásticos
PVC	Tubos de construcción, manguera, etc.

Nota. Adaptado de Reporte Sectorial N° 04 – 2019 del IEES - SNI. https://www.sni.org.pe/wp-content/uploads/2019/07/Reporte-Sectorial-PI%C3%A1sticos_2019.pdf

Por otro lado, en la Figura 5 muestra el consumo Per Cápita de plásticos en Latinoamérica en 2017. Siendo Argentina el país con mayor consumo de plástico por habitante, alcanzando los 43 kg.

Figura 5

Consumo Per Cápita de plásticos en Latinoamérica



Nota. Diagrama tomado del Comité de plástico – SNI. (2018). Percepción frente a los proyectos de ley sobre el plástico de un solo uso. [https://www.congreso.gob.pe/Docs/comisiones2018/Produccion/files/ppt/4ta_\(2\)sesion_presentaci%C3%B3n_ing._salazar_congreso_02-10-18.pdf](https://www.congreso.gob.pe/Docs/comisiones2018/Produccion/files/ppt/4ta_(2)sesion_presentaci%C3%B3n_ing._salazar_congreso_02-10-18.pdf)

Además, la Tabla 3 presenta los datos en toneladas de residuos plásticos generados en Perú durante el 2022.

Tabla 3

Cantidad de desechos plásticos generados por tipo

Tipo de plástico	Cantidad (t)
Tereftalato de polietileno – PET	230 629,87
Polietileno de alta densidad – HDPE	131 141,47
Polietileno de baja densidad – LDPE	98 184,65
Polipropileno – PP	67 148,06
Poliestireno – PS	49 638,91
Policloruro de vinilo – PVC	21 417,65
Bolsas plásticas	339 459,77
Tecnopor – PS expandido	65 521,66
Total	1 003 142,04

Nota. Adaptado de Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos [SIGERSOL] municipal. (2023). Estadísticas de Residuos Sólidos de Plásticos. <https://site2.minam.gob.pe/#h.f0gvkxi4kpg>

1.2.3. Definición y tipos de plásticos

Los plásticos, polímeros orgánicos sintéticos o semisintéticos, se pueden definir como el producto resultante de la polimerización de monómeros obtenidos del petróleo o gas. Estos son procesados con aditivos químicos (Tabla 4) para transformarlos en materiales adecuados que cumplan con su funcionalidad prevista (Cole *et al.*, 2011; Lambert y Wagner, 2018; Li *et al.*, 2016). Las técnicas de fabricación de plásticos después de 1940 se han optimizado mejorando sus características, ahora pueden ser más ligeros, resistentes, duraderos e inertes; es por ello, que son utilizados en todo tipo de aplicaciones generando su uso excesivo (Andrady, 2011).

Tabla 4*Compuestos aditivos utilizados en el procesamiento de plásticos*








Compuestos aditivos	Función
Plastificantes	Permite que el material sea flexible
Retardantes de llama	Reduce la inflamabilidad
Aditivos reticulantes	Une cadenas de polímeros
Antioxidantes y otros estabilizantes	Aumenta la durabilidad de los plásticos al reducir la velocidad a la que el oxígeno, el calor y la luz degradan el material
Sensibilizantes (complejos prooxidantes de metales de transición)	Brinda propiedades de degradación acelerada
Tensioactivos	Permite modificar las propiedades de la superficie para la emulsión de sustancias normalmente incompatibles
Cargas inorgánicas	Permite reforzar el material para mejorar la resistencia al impacto
Pigmentos	Proporciona el color

Nota. Adaptado de Lambert y Wagner (2018). Microplastics Are Contaminants of Emerging Concern in Freshwater Environments: An Overview. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61615-5_1

Según Lapeña y Sánchez (2019), los plásticos se pueden clasificar de acuerdo a su naturaleza: sintéticos y naturales; también, según su estructura interna pueden ser: termoplásticos, termoestables o elastómeros, etc. Además, existe la clasificación internacional del Código de Identificación de Plásticos (CIP), creado en 1988 por la Sociedad de la Industria Plástica, que simboliza e identifica el polímero y su capacidad para ser reciclado (Tabla 5).

Tabla 5

Principales tipos de polímeros y sus usos

Clasificación según estructura interna	Tipo de polímero	CIP	Usos	Estructura
Termoplásticos	Poliétileno (PE)		Baja densidad: botellas exprimibles, juguetes, bolsas de transporte, aislamiento de alta frecuencia, revestimientos de tanques de productos químicos, sacos resistentes, embalaje general, tuberías de gas y agua.	$\left(\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right)_n$
			Alta densidad: bidones de productos químicos, juguetes, artículos de picnic, artículos para el hogar y la cocina, aislamiento de cables, bolsas de transporte y material para envolver alimentos.	
	Polipropileno (PP)		Envases de alimentos, bandejas de comida aptas para microondas y en la industria automotriz.	$\left(\begin{array}{c} \text{CH}-\text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array} \right)_n$
	Policloruro de vinilo (PVC)		Aplicaciones de construcción, transporte, embalaje, eléctricas / electrónicas y sanitarias	$\left(\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & =\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{Cl} \end{array} \right)_n$
	Tereftalato de polietileno (PET)		Botellas de bebidas, forro de cables de bandejas de comida para horno.	$\left(\begin{array}{c} \text{O} & & \text{O} \\ & & \\ -\text{C} & -\text{C}_6\text{H}_4 & -\text{C}-\text{O}-\text{CH}_2- \end{array} \right)_n$
	Poliestireno (PS)		Envases de alimentos, cajas para llevar, vasos expendedores, cubiertos de plástico, envases protectores y cajas de CD.	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH} \\ \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} \right]_n$
Termoendurecido	Poliuretano (PUR)		Rodillos de impresión, neumáticos macizos, ruedas, tacones de zapatos, parachoques de automóviles, como espumas en colchones, asientos de automóviles, y en aplicaciones biomédicas.	$\left[\begin{array}{c} \text{O} & & \text{O} \\ & & \\ -\text{C} & -\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}_3 & -\text{C}-\text{NH}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{NH}-\text{C}-\text{O}-(\text{CH}_2)_2-\text{O}- \end{array} \right]_n$

Nota. Adapdo de Simul Bhuyan *et al.* (2021). Plastics in marine ecosystem: A review of their sources and pollution conduits. <https://doi.org/10.1016/J.RSMA.2020.101539> y; PlasticsEurope. (2020). <https://www.greengrowthknowledge.org/research/plastics-facts-2020>

1.2.4. Contaminantes emergentes

Se denominan así a los agentes desconocidos y no regulados que aparecen progresivamente en el tiempo. Tras investigaciones posteriores se definen sus efectos en la salud y el ambiente, lo que permite su regulación teniendo en cuenta su proceso de aparición y caracterización (Carbery *et al.*, 2018). En este contexto, los residuos sólidos costeros dispersados en el mar, cada vez más abundantes, han sido identificados como elementos nocivos para la biodiversidad, salud y las actividades humanas. En un registro a nivel mundial, lograron registrar que el 75 % de estos correspondían exclusivamente a plásticos (Barboza *et al.*, 2018; Eerkes-Medrano *et al.*, 2015; Waller *et al.*, 2017). Asimismo, según Avio *et al.* (2017) existen evidencias de los diversos riesgos que representan los plásticos para el medio, por ello el Programa de Desechos Marinos de la Administración Nacional Oceanográfica y Atmosférica de Estados Unidos de Norteamérica (NOAA) afirmó que los residuos plásticos son una forma de contaminación emergente.

Cabe señalar, que los desechos plásticos no son los únicos catalogados como contaminantes emergentes, las investigaciones refieren que los fármacos (Mezzelani *et al.*, 2018), artículos de cuidado personal (Bebianno y Gonzalez-Rey, 2015), nanopartículas de plata (Kusi *et al.*, 2020), entre otros, forman parte de esta categoría. Por consiguiente, al ser liberados al medio marino es predecible la interacción con la biota nativa, lo que conlleva a riesgos ecotoxicológicos-ecológicos. Asimismo, la contingencia sanitaria mundial por la enfermedad COVID-19, virus SarCov-2, trajo consigo el uso indiscriminado de máscaras faciales, mascarillas quirúrgicas, otros equipos de protección personal (EPP) y la eliminación incorrecta de los desechos médicos y plásticos, poco degradables, en espacios abiertos (Patrício Silva *et al.*, 2021; Wurm *et al.*, 2020). Según Peng *et al.*, (2021) durante la pandemia se generaron aproximadamente 8 millones de toneladas de EPP; asimismo, solo en el primer año, se depositaron en vertederos alrededor de 3,5 millones de t de mascarillas y unas 25 000 t de EPP tuvieron como destino final los océanos.

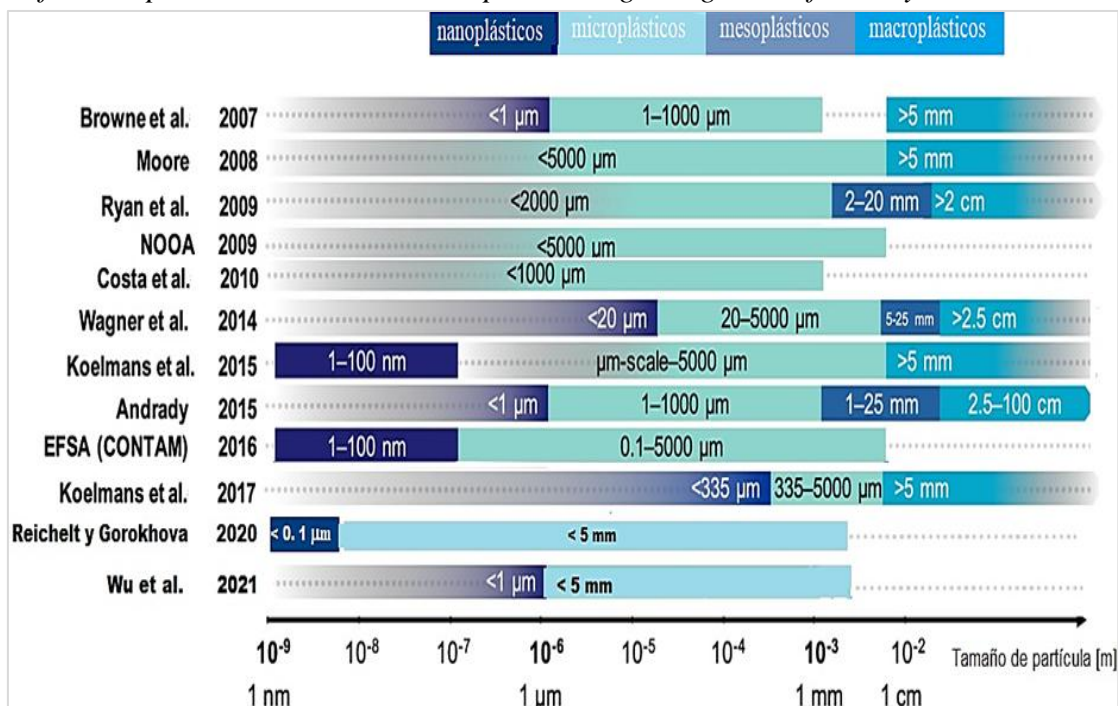
1.2.5. Los microplásticos

Definición de microplásticos

En el 2003 se acuñaron términos que antecedieron a la palabra microplástico, estas fueron microlitro, mesolitro, macrolitro y megalitro, las cuales describían fracciones finas de residuos plásticos con tamaños de 63 a 500 μm , <5 a 10 nm, <10 a 15 cm y en decímetros respectivamente. En cambio, el término microplástico en el 2004 describía plásticos fragmentados de 20 μm aproximadamente, aún continuaba con una definición inexacta. En una reunión organizada por la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica – NOAA, en Estados Unidos, expertos propusieron que la denominación microplásticos hacía referencia a toda partícula plástica menor a 5 mm (diámetro más largo). Esta definición actualmente es la más reconocida; pero, también es controversial y ambigua (Figura 6) (Blettler *et al.*, 2018; Hartmann *et al.*, 2019).

Figura 6

Definición por el tamaño de desecho plástico según algunos informes y literatura científica



Nota. Diagrama adaptado a partir de Hartmann *et al.* (2019). Are We Speaking the Same Language? Recommendations for a Definition and Categorization Framework for Plastic Debris. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.8B05297>; Reichelt y Gorokhova (2020). Micro- and Nanoplastic Exposure Effects in Microalgae: A Meta-Analysis of Standard Growth Inhibition Tests. <https://doi.org/10.3389/FENV.2020.00131> y Wu *et al.* (2021). Plastics and the Environment—Current Status and Challenges in Germany and Australia. <https://doi.org/10.1002/MARC.202000351>

Tipos de microplásticos

Los tipos de microplásticos (Tabla 6) según su origen mencionados recurrentemente en las investigaciones son los primarios y secundarios (Anderson *et al.*, 2016; Barboza *et al.*, 2019; Lebreton *et al.*, 2019; Thompson, 2015; Waller *et al.*, 2017). Los denominados primarios se caracterizan por ser lipofílicos, en su mayoría se encuentran los polietilenos, polipropilenos, poliestirenos y partículas de poliolefinas, además, sobre la superficie de estos se ha detectado la presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), diclorodifeniltricloroetano (DDT) y los bifenilos policlorados (PCB) (Pirsaheb *et al.*, 2020). Por el lado de los secundarios, la fragmentación es consecuencia de diferentes procesos como: la meteorización química, donde las playas son escenarios perfectos por la mayor disposición de oxígeno; la fotodegradación, por radiación ultravioleta que afecta la matriz del polímero y rompe enlaces químicos; y la combinación de fuerzas mecánicas como la abrasión, acción de olas y turbulencia (Li *et al.*, 2016).

Para Ugwu *et al.* (2021) existen los microplásticos terciarios (pellets), aquellos que se utilizan para la preproducción de plásticos y llegan al ambiente con la misma forma que fueron elaborados.

Tabla 6

Tipos de microplásticos

Tipos de microplásticos	Definición	Productos
Primarios	Fragmentos de plásticos microscópicos, subproductos de emisiones de partículas de producción industrial y doméstico, materia prima elástica intermedia, polvo, microperlas, gránulos de resinas.	Cosméticos, productos de cuidado personal y limpieza, protectores solares, productos farmacéuticos, tecnología de chorro de aire, pinturas.
Secundarios	Fragmentos pequeños producidos a partir de plásticos grandes, fibras sintéticas, fibrillas.	Baldes, botellas, vasos, tapas, mesas, sillas, redes de pesca, textiles, neumáticos.

Nota. Adaptado de Pirsaheb *et al.* (2020). Review of microplastic occurrence and toxicological effects in marine environment: Experimental evidence of inflammation. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2020.05.050>

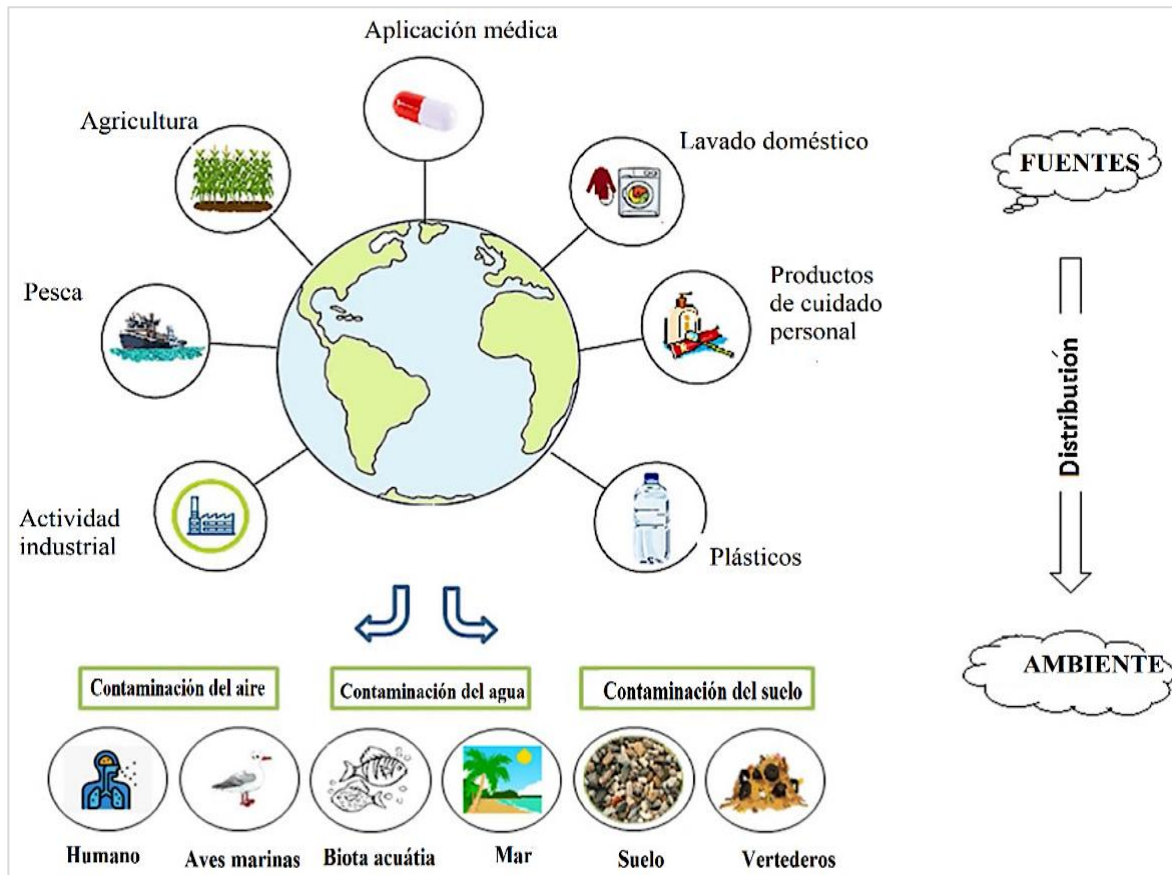
Contaminación por microplásticos

Los microplásticos están ampliamente distribuidos en todo el mundo (Figura 7), alcanzan difusión mediante alcantarillado y botaderos cercanos a las costas, la mayoría de los entornos en donde se encuentran flotando o depositados son los océanos y las fuentes de agua continental, pocas investigaciones detallan la presencia de estos en ecosistemas terrestres (Geyer *et al.*, 2017).

Una de las amenazas más graves para los océanos y la biodiversidad son los residuos plásticos, que por su abundancia y persistencia producen un impacto ambiental masivo, aunque se desconocen los factores de bioacumulación en organismos superiores y los impactos en las redes tróficas marinas son predecibles los efectos adversos en la salud humana (Carbery *et al.*, 2018). En tal sentido, la interacción entre partículas plásticas grandes y la biota se ha explorado con mayor ahínco años atrás, por ello actualmente se deben centrar investigaciones en los efectos de las pequeñas partículas sobre los organismos bentónicos, planctónicos y especies superiores de los ecosistemas acuáticos (Rocha-Santos y Duarte, 2017). Según Choy *et al.* (2019) para entender la distribución e impactos ecológicos de los microplásticos son necesarias evaluaciones en agua profundas, áreas ecológicamente importantes, y en especies representativas respecto a sus comunidades.

Figura 7

Contaminación global y distribución de microplásticos



Nota. Diagrama de Pirsahab *et al.* (2020). Review of microplastic occurrence and toxicological effects in marine environment: Experimental evidence of inflammation. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2020.05.050>

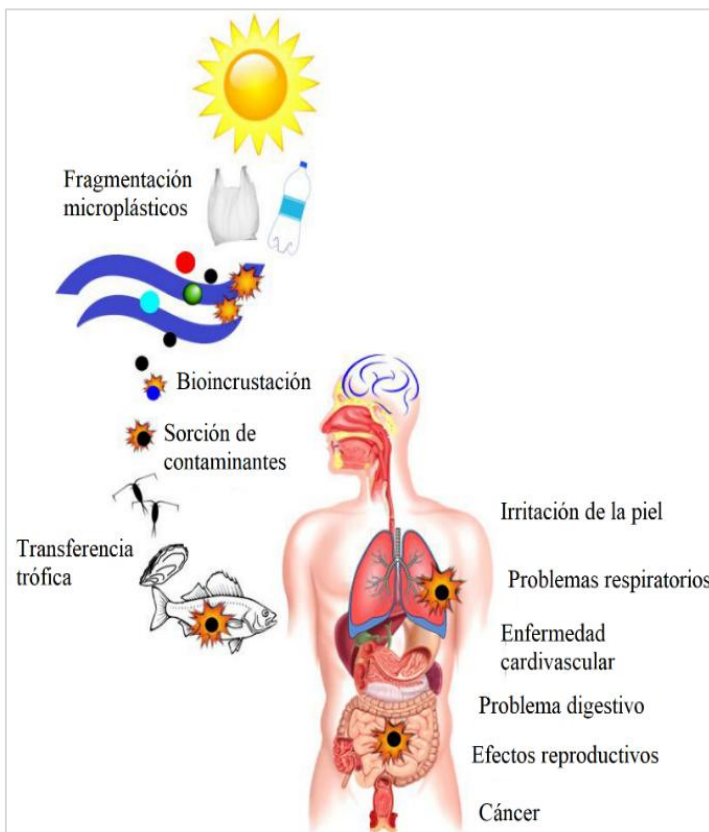
Después de considerar la contaminación microplástica como dinámica y generalizada en todos los sistemas naturales, se siguen realizando investigaciones para comprender a mayor detalle sus efectos. Según Prata *et al.* (2021) existen impactos en la salud animal; esto fue evidenciado en un estudio que incluía a 24 países donde estimaron que el 60 % de los 198 peces evaluados habían internalizado microplásticos, en cuyos casos su sistema digestivo se encontraba en malas condiciones.

Otros impactos están relacionados a la salud humana (Figura 8), mediante la exposición directa o indirecta a microplásticos. Dicha exposición, generaría la ingesta de alimentos contaminados con una estimación de 39 000 a 52 000 partículas/persona/año, además si se considera la inhalación éstas aumentarían a 74 000 y 113 000 partículas/persona/año (Cox *et al.*, 2019).

Finalmente, los impactos en la salud ambiental por la presencia excesiva de microplásticos puede ocasionar cambios sobre el flujo de nutrientes y las funciones esenciales del ecosistema. Así lo refieren Green *et al.* (2016) respecto a la disminución significativa de microalgas del sedimento, en relación con la concentración más elevada de microplásticos empleada en este análisis (2 % del peso del sedimento húmedo), además, la contaminación microplástica representa más del 3 % del peso de los sedimentos en algunas playas muy impactadas, como consecuencia se degradan los servicios ecosistémicos y la productividad primaria. Asimismo, según Kim *et al.* (2022) una serie de estudios que evaluaron la exposición a micro y nano plásticos (MNP) a través de la transferencia trófica en las cadenas alimentarias evidenciaron que estas pueden biomagnificarse en los ecosistemas acuáticos. Por lo general, comienza desde las microalgas, se extiende a pequeños crustáceos y bivalvos (etapas tempranas) y ascienden a otros niveles tróficos.

Figura 8

Potencial efecto en la salud humana resultado de la bioacumulación y biomagnificación de microplásticos



Nota. Imagen tomada y adaptada de Carbery *et al.* (2018). Trophic transfer of microplastics and mixed contaminants in the marine food web and implications for human health. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2018.03.007>

1.2.6. Plástico común entre las investigaciones: poliestireno usos y efectos

El poliestireno (PS) fue descubierto por Eduard Simon, 1839, pero recién en 1938 fue elaborado como polímero comercialmente viable. Principalmente deriva del estireno líquido incoloro, el cual se utiliza para producir espuma de poliestireno moldeada; entre sus características físicas, se sabe que es brillante, posee dureza y fragilidad, por ende, se agrieta por tensión y es utilizado como aislador térmico. Su procesamiento en combinación con aditivos, que permiten su forma idónea, además de los procesos repetitivos de reciclaje generan compuestos cancerígenos, y lo hace neurotóxico - genotóxico. Los productos fabricados a partir del poliestireno son CD, joyeros, aislantes (electrónicos, térmicos), carcasas de aparatos electrónicos, envases de alimentos y materiales de embalaje (Barboza *et al.*, 2019; Kik *et al.*, 2020; Lambert y Wagner, 2018; Simul Bhuyan *et al.*, 2021).

Respecto a sus efectos en la salud, Li *et al.* (2016) señalaron que, generan irritación a los ojos, nariz y garganta, su ingesta puede provocar mareos y pérdida del conocimiento. De la misma forma pueden migrar a los alimentos y almacenarse en la grasa corporal; en el caso de trabajadores expuestos a poliestireno durante largos períodos pueden presentar cáncer linfáticos y hematopoyéticos.

1.2.7. Función ambiental y servicios ecosistémicos de las microalgas

El rol ecológico que cumplen los microorganismos fotoautótrofos remonta a aproximadamente 4 500 millones de años atrás cuando surgió la Tierra. Donde, a través de la evolución natural, emergieron las microalgas como aquellos microorganismos fotosintéticos productores de oxígeno (O₂) y glucosa (C₆H₁₂O₆), a partir de dióxido de carbono (CO₂), agua (H₂O) y luz (Kaufman, 2014). Dentro de los ecosistemas que habitan son reconocidas por su capacidad de captación significativa de CO₂ y su responsabilidad en la generación, de al menos la mitad del O₂ en la atmósfera, pese a la variación en tamaño, abundancia, y tasa de crecimiento. Además, de su función en el reciclaje de nutrientes, también se catapultan como el eslabón crítico en la cadena alimenticia (Abbasi *et al.*, 2023).

Según Zhou *et al.* (2023) las microalgas constituyen la base energética de las redes tróficas de los organismos acuáticos que no producen su propio alimento, y se perfilan como alternativa prometedora para la captura de carbono, a comparación de las plantas forestales, agrícolas y acuáticas convencionales debido a sus simples necesidades nutricionales, condiciones ambientales y alta tasa de crecimiento.

Las microalgas son fundamentales para sustentar la vida, y su función ecológica principal radica en garantizar las condiciones necesarias para que esta se produzca. Por ejemplo, en ecosistemas frágiles, como los manglares, según el estudio de Borrego *et al.* (2023) el funcionamiento y servicios ecosistémicos que proporcionan están estrechamente ligados a la comunidad microbiana presente y sus respectivos procesos. Estos participan activamente en la restauración natural a través de la conversión y retención de nutrientes, influyen en la circulación de gases y favorecen el desarrollo de la vegetación; además, son parte del microfítobento. Esta película de microalgas se encuentra recurrentemente en la superficie de los sedimentos y actúa como medio de transferencia de CO₂, a través de los procesos de respiración y fotosíntesis. Asimismo, la biopelícula funciona como un sumidero de carbono (Chen *et al.*, 2019).

1.2.8. Microalgas: indicadores de la calidad del agua

Las microalgas son especies cruciales en los programas de monitoreo biológico para evaluar la calidad del agua debido a su rápida reproducción, ciclo de vida corto y sensibilidad a cambios en la química del agua. Además, actúan como indicadores de alteraciones ambientales, y reflejan los efectos de la contaminación. Estas comunidades de fitoplancton, sensibles a los cambios en sus hábitats, proporcionan más información sobre la calidad del agua y reaccionan rápidamente a cambios en el ambiente acuático con variaciones cuantitativas y cualitativas (Gökce, 2016).

1.2.9. *Chlorella* sp.

El nombre del género *Chlorella* deriva de dos términos, *chloros*: verde; *ella*: diminutivo, su presencia en la tierra data de hace 2 500 millones de años y su integridad genética se mantiene en el tiempo (Phukan *et al.*, 2011; Safi *et al.*, 2014). La Tabla 7 muestra su

clasificación taxonómica.

Tabla 7

Clasificación taxonómica

Elemento	Especificación
Reino	Pantae
Clase	Trebouxiophyceae
Orden	Chlorellales
Familia	Oocystaceae
Género	<i>Chlorella</i>
Especie	<i>Chlorella</i> sp

Nota. Adaptado a partir de Integrated Taxonomic Information System [ITIS]. (2021). <https://www.itis.gov/>

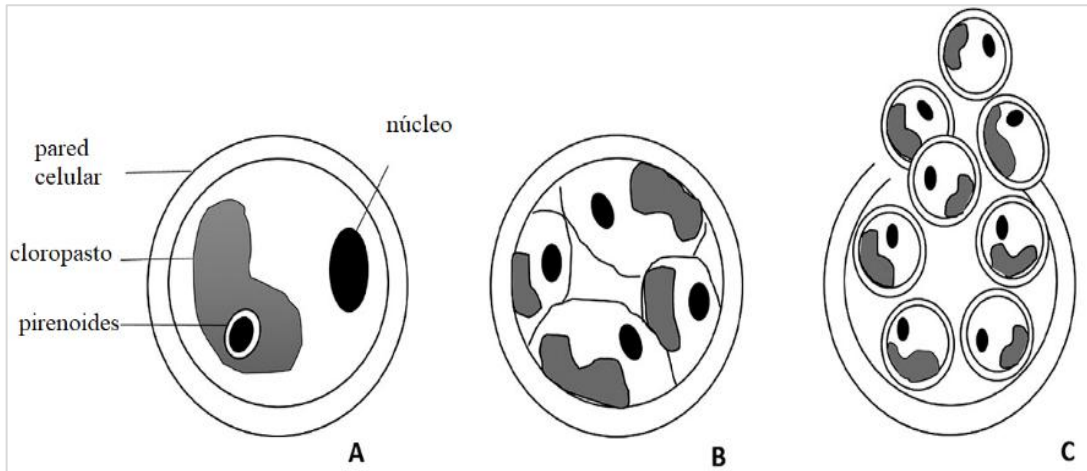
Características morfológicas

La microalga eucariota, unicelular, inmóvil (sin flagelos) y verdosa *Chlorella* sp. fue descrita por primera vez por el microbiólogo holandés Martinus Willem Beijerinck en 1890. Generalmente presenta forma esférica o elipsoidal, con un diámetro que varía entre 2 y 15 μm (Champenois *et al.*, 2014; Liu y Chen, 2014). Dentro de la célula son visibles las siguientes estructuras: núcleo, mitocondrias, vacuola, almidón, cuerpos lipídicos, cloroplasto con o sin presencia de pirenoides, entre otras. Este último, presenta forma de copa y se ubica en las periferias del citoplasma, asimismo, las mitocondrias están asociadas al cloroplasto y el núcleo se ubica seguido a la membrana citoplasmática.

La rigidez y grosor de la pared celular difieren según las especies, y a condiciones de estrés por falta de nitrógeno pueden ser de textura espesa acompañada de cloroplastos en etapa de proplastidos y disminución de tilacoides (Gerken *et al.*, 2012; Goncalves *et al.*, 2013; Safi *et al.*, 2014). Esta microalga se caracteriza por su alta capacidad fotosintética y de crecimiento rápido bajo diferentes condiciones: heterótrofas, autótrofas, mixotróficas, capaces de permanecer solitarias o en colonias con máximo 64 células. Su reproducción es por autoesporas asexuales (Figura 9) (Coronado *et al.*, 2020; Ru *et al.*, 2020).

Figura 9

Proceso de autoesporulación *Chlorella vulgaris*



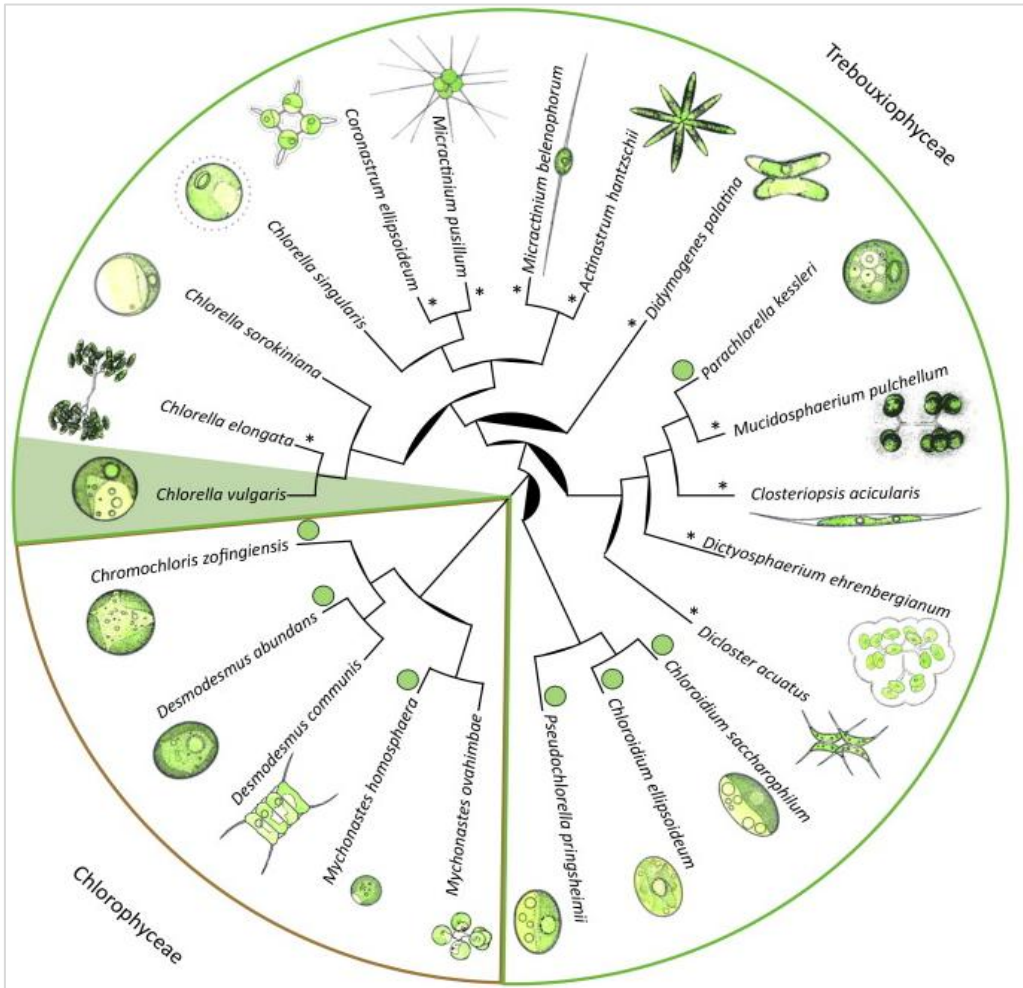
Nota. Tomado de Ru *et al.* (2020). *Chlorella vulgaris*: a perspective on its potential for combining high biomass with high value bioproducts. <https://doi.org/10.1080/26388081.2020.1715256>

Especies, distribución y hábitat

De este género existe amplia variedad filogenética (Figura 10) asociada a otros organismos de común morfología (Figura 10), después de su primera descripción se determinó en 1999 una nueva clasificación de enfoque integrador para las especies de *Chlorella*, las dos grandes clases son Trebouxiophyceae y Chlorophyceae, en lo sucesivo se aislaron más de cien especies, pero actualmente solo se han caracterizado más de veinte con cien cepas descritas presentes en ambientes terrestres y acuáticos (Champenois *et al.*, 2014; Lizzul *et al.*, 2018; Sharif *et al.*, 2017).

Figura 10

Relaciones filogenéticas de *Chlorella* sp. y algas similares



Nota. Imagen tomada de Krienitz *et al.* (2015). *Chlorella*: 125 years of the green survivalist. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.11.005>

Esta microalga es conocida como ubicua porque está presente en diferentes tipos de hábitats como estanques y acequias de agua dulce, espacios húmedos (suelos, superficie de troncos de árboles, macetas y paredes) incluso en simbiosis con las células de *Paramecium*, *Hydra*, líquenes y otros organismos (Krienitz *et al.*, 2015; Safi *et al.*, 2014).

Según Bito *et al.* (2020), el género *Chlorella* cuenta con tres variedades de especies: *C. vulgaris*, *C. lobophora* y *C. sorokiniana*, todas de agua dulce. Por otro lado, se ha identificado la cepa marina *C. minutissima*; sin embargo, en la India las especies más comunes son *C. vulgaris*, *C. conductrix*, *C. gonglomerata* y *C. parasitica*; no obstante, la descripción de múltiples cepas de *Chlorella* sp. registradas por los investigadores no es suficiente, debido a que no se ha logrado establecer caracteres morfológicos que permitan

su adecuada clasificación (Liu y Chen, 2014; Phukan *et al.*, 2011). La Tabla 8 muestra la distribución de *Chlorella* en diferentes países.

Tabla 8

Distribución geográfica de Chlorella sp. en hábitats marinos y salobres

País	Localización	Especie
Estados Unidos	vías navegables interiores, Sarasota	<i>C. capsulata</i>
Reino Unido	Port Erin	<i>C. marina</i>
Italia	Mar Adriático Septentrional	<i>C. nana</i>
Noruega	Trozo de madera en agua de mar	<i>C. nordstedtii</i>
Reino Unido	río Crouch, Essex	<i>C. ovalis</i>
Bélgica	Westende	<i>C. salina</i>
Perú	laguna Santa Cruz de las Salinas, Lima	<i>C. peruviana</i>

Nota. Adaptado de Darienko *et al.* (2019). Are there any true marine *Chlorella* species? Molecular phylogenetic assessment and ecology of marine *Chlorella*-like organisms, including a description of *Droopiella* gen. nov. <https://doi.org/10.1080/14772000.2019.1690597>

Características bioquímicas

El valor del género *Chlorella* radica potencialmente en la cantidad de clorofila, aminoácidos esenciales, proteínas, vitaminas (Tabla 9) hidrosolubles, minerales y polisacáridos, en promedio su composición de proteína puede alcanzar de 42 a 58 % del peso seco respecto a la biomasa obtenida. Entre los aminoácidos esenciales posee histidina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina, treonina y valina siendo los de mayor proporción el ácido glutámico y aspártico, por ello fue reconocida por la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) de los Estados Unidos con la certificación Generalmente Reconocido como Seguro (GRAS) que permite su uso confiable como nutraceutico (Coronado *et al.*, 2020; Guccione *et al.*, 2014; Kent *et al.*, 2015; Prabakaran *et al.*, 2018).

Tabla 9*Contenido de vitaminas de Chlorella vulgaris (100g)*

Vitaminas	Contenido (mg)
A (retinol)	2,08
K (fitomenadiona)	11,21
B ₁ (tiamina)	0,62
B ₂ (riboflavina)	4,1
B ₃ (niacina)	13,3
B ₆ (pidoxina)	1,4
B ₁₂ (cobalamina)	0,21

Nota. Adaptación a partir de Prabakaran *et al.* (2018). Evaluation of Chemical Composition and In Vitro Antiinflammatory Effect of Marine Microalgae Chlorella vulgaris. <https://doi.org/10.1007/S12649-018-0370-2>

Asimismo, los tipos de ácidos grasos identificados en el género *Chlorella* son: saturados (70,18 %), monoinsaturados (16,85 %) y poliinsaturados (8,72 %); por esto, es considerada una de las mejores materias primas para la producción de biocombustible y entre sus potenciales resaltan su alta tasa de crecimiento y contenido de carbohidratos (Bhattacharya *et al.*, 2016; Shanmugam *et al.*, 2020) que atraen la atención de numerosos científicos. La Tabla 10 muestra su composición bioquímica.

Tabla 10*Composición bioquímica de Chlorella sp. (50 g)*

Composición	Contenido (mg)
Proteína	45,23
Lípidos totales	18,12
Carbohidratos	23,43
Calcio	16,52
Zinc	2,72
Magnesio	18,65
Manganeso	5,66
Cobre	0,93
Hierro	15,94

Nota. Adaptación a partir de Alagawany *et al.* (2021). Nutritional applications of species of Spirulina and Chlorella in farmed fish: A review. <https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2021.736841>

Cultivo de microalga *Chlorella* sp.

El crecimiento de *Chlorella* sp. en ambientes acuáticos, sean estanques al aire libre o fotobiorreactores, debe ser controlado por varios factores ambientales y para su cultivo son necesarias las condiciones adecuadas (Tabla 11) de pH, nutrientes (N, P, CO₂, etc.), luz y temperatura (Coronado *et al.*, 2020). La producción de esta microalga tiene un enfoque comercial energético, farmacéutico y nutricional de alto valor por la calidad de la biomasa seca obtenida.

Tabla 11

Condiciones óptimas de cultivo para Chlorella vulgaris

Parámetros	Preferencias
Fuente de nitrógeno	Amonio (autótrofo)
	Urea (mixotrófico)
Fuente de carbono	1,2 g/l de NaHCO ₃
	8 % CO ₂
	10 % de CO ₂ , suministro de luz 24 h
Intensidad y calidad de la luz	1 % p/v de glucosa (mixotrófica)
	4 758 ppm de CO ₂ , 75 mg/l de NaHCO ₃ (producción de lípidos)
	100 a 200 μmol fotones/m ² s
	Luz amarilla, roja y blanca (fase de registro más rápido)
pH	Luz verde
	Luz roja (producción de clorofila)
	En oscuridad (ácidos grasos poliinsaturados)
	7,5 y 8,0
Temperatura	10,0 y 10,5
	0,222
	30 °C (producción de biomasa)
Salinidad	25 °C (producción de lípidos)
	38 °C (aumento de ácido oleico)
Condición de cultivo	Por debajo de 0,5 M de cloruro de sodio (NaCl)
	0,5 M de NaCl (producción de lípidos)
Condición de cultivo	Agitación a 250 rpm (producción de clorofila)
	Aireación 200 ml/min (producción de lípidos)

Nota. Adaptación a partir de Ru *et al.* (2020). *Chlorella vulgaris*: a perspective on its potential for combining high biomass with high value bioproducts. <https://doi.org/10.1080/26388081.2020.1715256>

Los requisitos para un adecuado crecimiento de *Chlorella* sp. pueden ser comparables a los que usualmente tienen las plantas terrestres, la diferencia recae en la utilización de estos elementos; puesto que, las microalgas lo realizan de manera eficiente para aumentar su biomasa utilizando menor cantidad de agua (Guccione *et al.*, 2014). Los factores climáticos, como la temperatura, influyen en la tasa de crecimiento, asimismo se relacionan directamente con la fotosíntesis (tasa de fijación de CO₂/producción de O₂) y la respiración. Otro factor determinante es la luz, cuya exposición será acorde al propósito del cultivo; por ejemplo, la luz roja mejora la producción de clorofila (Fu *et al.*, 2012; Khoeyi *et al.*, 2012).

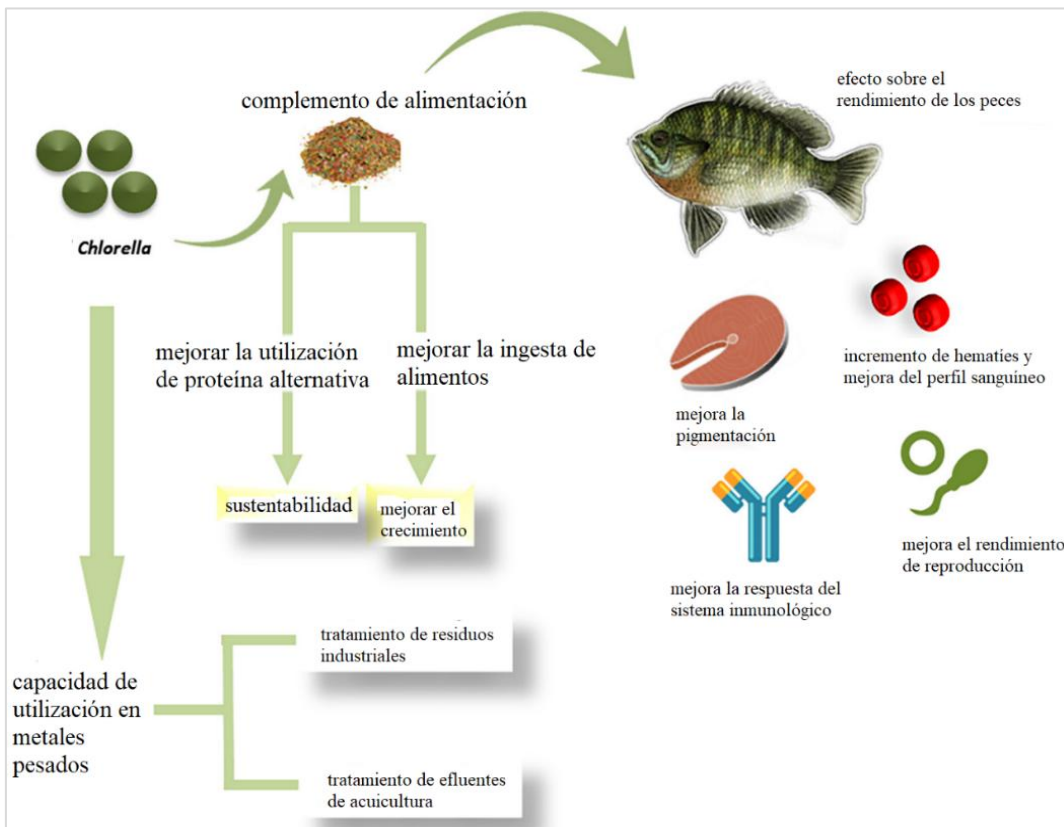
Por otro lado, el agua de cultivo debe estar limpia y filtrada para evitar el crecimiento de otros microorganismos o la presencia de contaminantes; respecto al pH debe tomar en cuenta los valores óptimos (10 a 10,5). Para una producción alta de clorofila y lípido, aproximadamente, debe agitarse a 250 rpm con aireación de 200 ml/min en intensidad (Daliry *et al.*, 2017; De Morais *et al.*, 2015; Mujtaba *et al.*, 2012).

Producción y usos de *Chlorella* sp.

Este género tiene aplicación potencial para la fabricación de productos farmacéuticos, complementos alimenticios, piensos y biocombustibles. Entre las especies más estudiadas y comerciales se encuentran *C. vulgaris* y *C. pyrenoidosa* (Abd El-Hack *et al.*, 2019). Respecto a su producción industrial en el mundo, son más de 70 empresas que se dedican a su cultivo, generando al año entre 2 000 y 4 000 t de biomasa aproximadamente, orientadas al uso dietético, cosmético y acuícola (Figura 11). La compañía Taiwan *Chlorella Manufacturing*, reconocida como el mayor productor mundial; seguida de la producción en sistemas cerrados de cultivo comercial, para la producción autótrofa en fotobiorreactores tubulares (700 m³) correspondientes a la empresa alemana *Roquette Klötze GmbH & Co. KG*, la cual produce al año 100 toneladas de peso seco. No obstante, esta industria fue creciendo y a fines de 1940 otros países, Japón y EE.UU, llevaban a cabo cultivos masivos al aire libre con fines alimentarios (De Morais *et al.*, 2015; Gómez *et al.*, 2022; Guccione *et al.*, 2014; Prabakaran *et al.*, 2018).

Figura 11

Aplicación potencial y usos de Chlorella sp. en la acuicultura



Nota. Diagrama adaptado de Alagawany *et al.* (2021). Nutritional applications of species of Spirulina and Chlorella in farmed fish: A review. <https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2021.736841>

Los principales componentes de valor en *Chlorella* sp. y sus respectivas aplicaciones en los diferentes rubros comerciales se resumen en la Tabla 12. Esta microalga es utilizada en la industria farmacéutica y terapéutica para el tratamiento de enfermedades (hipertensión, colitis ulcerosa, diabetes, alergias, prevención de enfermedades cardiovasculares), además de sus efectos inmunomoduladores, antioxidantes y antiinflamatorios. La industria alimentaria, en cambio la emplea para la elaboración de emulsionantes y suplementos alimenticios que refuerzan la cantidad de proteínas, vitaminas y minerales (Tabla 13) que necesita el organismo humano (Bito *et al.*, 2020; Coronado *et al.*, 2020; Yuan *et al.*, 2020).

Tabla 12*Aplicación de metabolitos derivados de Chlorella vulgaris*

Categoría	Componente	Aplicación
Lípidos	Triglicéridos, fosfolípidos, glicolípidos	Biodiésel, alimentación animal, antibióticos
Proteínas	Aminoácidos	Complemento alimenticio, alimentación animal, productos farmacéuticos, biofertilizantes, aditivos alimentarios, emulsionante
Carbohidratos	Almidón, celulosa, β -1-3-glucanos, polisacáridos sulfonados	Aditivos alimentarios, productos farmacéuticos, piensos para acuicultura
Pigmentos	β -caroteno, astaxantina, cantaxantina, luteína, clorofila	Productos farmacéuticos, nutracéuticos, complementos alimenticios, tintes y pinturas, cosméticos, piensos para acuicultura
Vitaminas y minerales	Microelementos, macroelementos, vitamina A, B, C, E	Antioxidantes, ayudas en el metabolismo

Nota. Adaptación a partir de Ru *et al.* (2020). *Chlorella vulgaris*: a perspective on its potential for combining high biomass with high value bioproducts. <https://doi.org/10.1080/26388081.2020.1715256>

Tabla 13*Composición de minerales vitales para el funcionamiento del cuerpo humano presentes en Chlorella vulgaris (100g)*

Mineral	Contenido
Calcio (Ca) (mg)	1 425 \pm 10,3
Magnesio (Mg) (mg)	851 \pm 9,4
Zinc (Zn) (mg)	293 \pm 4,5
Sodio (Na) (mg)	101 \pm 2,8
Potasio (K) (mg)	1 197 \pm 17
Cobre (Cu) (mg)	48,4 \pm 27,9
Hierro (Fe) (mg)	82,2 \pm 37,6

Nota. Adaptación a partir de Ru *et al.* (2020). *Chlorella vulgaris*: a perspective on its potential for combining high biomass with high value bioproducts. <https://doi.org/10.1080/26388081.2020.1715256>

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación fue no experimental, es decir no implicó manipulación de las variables, ni intervención deliberada (Hernández *et al.*, 2014). Esta revisión sistemática se centró en la extracción y recopilación de datos, específicamente sobre la tasa de inhibición y la concentración de clorofila total, a partir de una evaluación exhaustiva de 25 estudios. Además, tuvo alcance correlacional-explicativo porque buscó asociar variables mediante un patrón predecible, relacionando posibles efectos de un contaminante sobre un microorganismo (Ramos, 2020). A partir de la extracción de datos se analizaron los efectos en el crecimiento y contenido de clorofila de *Chlorella* sp. que produjeron diferentes concentraciones y tipos de microplásticos con la intención de establecer el motivo de los sucesos. Finalmente, este estudio adoptó un enfoque cuantitativo debido a que se recopilaban datos numéricos expresados en porcentajes y concentraciones (% y mg/l).

2.2. Lugar y fecha

El trabajo de investigación tuvo una duración de 10 meses, inició en marzo y concluyó en diciembre del 2023. Su ejecución se llevó a cabo en la ciudad de Lima, uno de los 24 departamentos del Perú, que limita por el norte y sur con los departamentos de Áncash e Ica respectivamente, por el oeste con la Provincia Constitucional del Callao y por el este con Junín y Pasco.

2.3. Técnicas e instrumentos

La Tabla 14 resume las etapas que fueron desarrolladas en esta investigación.

Tabla 14*Descripción de etapas*

Etapas	Técnicas	Instrumentos	Resultados
Gabinete	Revisión exploratoria Observación	Base de datos académicos, Plataforma Mendeley Microsoft Word, Excel Fichas bibliográficas	Redacción del informe de tesis
Interpretación y análisis	Revisión sistemática Análisis de las metodologías y recopilación de los resultados obtenidos a partir de los artículos científicos escogidos.	Protocolo PRISMA (Moher <i>et al.</i> , 2009) Guías de análisis y escritura, diagrama de flujo, Check List Consolidados	Procesamiento de información y datos, identificados Elaboración de matriz en Excel (versión inicial y final)

2.4. Descripción de la investigación

La presente revisión sistemática, siguió el procedimiento descrito por Siddaway *et al.* (2019), que consistió en formular claramente la pregunta de investigación y emplear un enfoque sistemático y explícito que permitiera identificar, seleccionar y evaluar críticamente los estudios incluidos en la revisión, para ello se aplicó el protocolo PRISMA cuyo objetivo principal fue recopilar y analizar datos de manera exhaustiva. Su aplicación inició con la búsqueda principal de literatura (exploratoria) en el mes de marzo de 2021. Posteriormente, se sometió a la actualización de la información (agosto-octubre 2021). Además, considerando la relevancia de este tipo de búsqueda de literatura se utilizaron tres bases de datos de publicaciones en línea: *Scopus*, *PubMed* y *Web of Science* (Tabla 15).

Tabla 15*Bases de datos electrónicas utilizadas para la revisión sistemática*

Base de datos electrónica	Descripción
<i>Web of Science</i>	Compila información científica desde 1 900 e incluye referencias bibliográficas y citas
<i>Scopus</i>	Base de datos bibliográfica que combina datos de citas y resúmenes con una cobertura amplia. De carácter riguroso, revisada por expertos, dotada de recursos científicos variados clasificados por su especialidad o disciplina
<i>PubMed</i>	Brinda el acceso a una base de datos de MEDLINE, contiene citas y resúmenes de artículos de investigación biomédica

Respecto a la metodología de ejecución para el proceso de selección de artículos, se aplicó el protocolo PRISMA (Moher *et al.*, 2009), luego de la búsqueda exhaustiva. Este consistió en la identificación y evaluación cuidadosa de estudios según criterios de inclusión y exclusión predefinidos que determinaron su relevancia y calidad, para ello se utilizó el flujo PRISMA, cuyas fases son identificación, cribado (eliminar duplicados), elegibilidad (lectura de texto completo), inclusión. Después de este cribado y durante la elegibilidad de artículos, se realizó la exploración respectiva de sus listas de referencias con el propósito de identificar estudios potencialmente relevantes que no pudieron ser encontrados en la primera búsqueda específica a partir del *script* (cadena de búsqueda) avanzado.

2.4.1. Pasos a seguir según el flujo Prisma

Búsqueda sistematizada

Para la primera determinación e identificación de artículos, junto a la obtención de resultados pertinentes, se aplicó los siguientes términos de búsqueda: *microplastic*, *microalgae*, *chlorella*. En la segunda etapa, de mayor precisión, los términos a utilizar fueron combinados utilizando los operadores booleanos *and* y *or*, también, se adicionó un asterisco (*), el cual

fungía como un comodín que representaba a otro grupo de caracteres, sin necesidad de incluirlos. Por último, con el apoyo del asesor se construyó la siguiente cadena de búsqueda avanzada:

(chlorella) AND (microplast) AND (growth OR toxicit* OR stres* OR biomas* OR photosynthe*)*

Esta búsqueda minuciosa no tuvo restricciones de idioma y tiempo, puesto que la intención era obtener todos los artículos publicados relacionados con el objetivo general de estudio, el cual se centró en los efectos de la contaminación por microplásticos en la microalga *Chlorella* sp.

Proceso de selección

La literatura, que fue hallada durante la segunda etapa de búsqueda, se evaluó bajo una primera lectura de títulos y resúmenes. Luego, se eliminaron los estudios duplicados. A partir de los resultados únicos obtenidos de las tres bases de datos consultadas, de manera independiente y adicional, dos revisores examinaron el título y el resumen de cada artículo para verificar si cumplían con los criterios de inclusión (Tabla 16) y exclusión (Tabla 17), con la finalidad de reducir el sesgo.

Los artículos que cumplieron con todos los criterios de inclusión fueron clasificados como incluidos, mientras que, aquellos que no cumplían con estos fueron excluidos. Lo anterior, fue consensuado en atención al juicio crítico de ambos revisores y tesista; en caso de discrepancias por algún criterio, intervenía un tercer revisor para definir la aceptación o rechazo del artículo en función de un criterio final. Además, los artículos de las listas de referencias fueron considerados potencialmente relevantes. Por ello, para determinar su inclusión se aplicaron los criterios y se leyeron completamente, sin embargo, ninguno fue incluido.

Tabla 19*Criterios de inclusión*

N° criterio	Descripción
Primero	Estudios en <i>Chlorella</i> sp.
Segundo	Efectos de los microplásticos (PS, PVC, PP, PE, entre otros) como agente contaminante
Tercero	Artículos que identificaron efectos vs los que no identificaron efectos
Cuarto	Métodos e instrumentos: directrices de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD), espectrofotometría, recuento celular (cámara de Neubauer o hemocitómetro)

Nota. Los criterios de inclusión fueron aplicados secuencialmente.

Tabla 17*Criterios de exclusión*

N° criterio	Descripción
Primero	Artículos de revisión
Segundo	Libros o capítulos de libros
Tercero	Protocolos, resúmenes y comentarios
Cuarto	Otras metodologías diferentes a las mencionadas en el cuarto criterio de inclusión

Nota. Los criterios de exclusión fueron aplicados secuencialmente; en otras palabras, si un artículo no cumplía con el primero, se excluía sin necesidad de aplicar los criterios siguientes.

Extracción y presentación de datos

La información y datos fueron extraídos de 25 artículos recopilados en una matriz inicial (Apéndice 1), posteriormente se recopilaron en una segunda matriz elaborada en el programa Excel y estuvo estructurada con los siguientes *ítems*: base de datos, título, *abstract*, año de publicación, *journal*, autores, país, especie microalga, fase de crecimiento, medio de cultivo, tipo de microplástico, fuente de origen, tamaño, concentración de microplástico, tiempo de exposición, porcentaje de inhibición, instrumento, concentración de clorofila, período, entre otros.

Durante esta etapa, similar a la anterior, los dos revisores realizaron la extracción de los datos de manera independiente (en la matriz proporcionada) y ante cualquier discrepancia se

recurría a la discusión. Cuando no se lograba consenso, se incluyó la opinión e intervención del tercer revisor. Esta colaboración entre los revisores, también, contribuyó a reducir el sesgo en la recopilación de los datos.

Estandarización de datos: tasa de inhibición

En la mayoría de los artículos revisados, para expresar el efecto de exposición a microplásticos en el crecimiento de la microalga evaluada, utilizaron la tasa de inhibición en porcentaje (IR %); sin embargo, en otros (10) las unidades de medida expresadas fueron densidad celular (cell/ml) y densidad óptica (OD). Estas unidades fueron estandarizadas a partir de las siguientes fórmulas.

Ecuación para determinar la tasa de inhibición (% IR) a partir de la concentración de células viables, Unidad Formadora de Colonias [UFC] en cell/ml, según Miloloža *et al.* (2021).

$$INH = \frac{\log_{UFC\ control} - \log_{UFC\ t}}{\log_{UFC\ control}} \times 100$$

Donde

INH: tasa de inhibición

UFCcontrol: concentración de células viables del control (sin presencia de MP)

UFCT: concentración de células viables de los tratamientos (presencia de MP)

Específicamente, cuando la densidad celular fue expresada en valores de densidad óptica (OD), determinado mediante espectrofotómetro y su respectiva longitud de onda, estos estudios incluían la relación lineal establecida entre OD_x y densidad celular. Con ello, se logró realizar la conversión y obtener porcentajes de inhibición. Por ejemplo, según Yang *et al.* (2020).

Relación lineal

$$Densidad\ celular\ (x\ 10^6\ cell/ml) = 33,9 \times OD_{680} - 2,8 \quad ; \quad R^2 = 99,2\ %$$

Ecuación para la tasa de inhibición

$$\% I = \frac{C_0 - C_t}{C_0}$$

Donde

% I: tasa de inhibición

C₀: densidad celular del control (sin presencia de MP)

C_t: densidad celular de los tratamientos (presencia de MP)

La estandarización de los datos numéricos a una unidad de medida común tuvo como objetivo facilitar su comparación. Respecto a la concentración de clorofila, la unidad de medida frecuente fue mg/l. No hubo necesidad de estandarización.

Finalmente, en el apartado de resultados se resumieron y presentaron los datos extraídos y las figuras obtenidas, según los análisis realizados. Para el análisis editorial, se utilizaron los *ítems*: número de artículos, *journal*, adicionalmente se ejecutó la búsqueda de la categoría cuartil y el factor de impacto por revista. Dicha métrica es actualizada y proporcionada por las bases de datos consultadas. Asimismo, se profundizó en el análisis bibliométrico de las palabras clave de los artículos obtenidos. En atención, a los objetivos específicos propuestos, efectos de los microplásticos (plásticos en polvo, poliacrilonitrilo, polietileno, tereftalato de polietileno, prolipopileno, poliestireno y policloruro de vinilo) en el crecimiento y la concentración de la clorofila de la microalga *Chlorella* sp., se evidenciaron vacíos de conocimiento a consecuencia de esta propuesta. Por último, la discusión se basó en el análisis de los efectos en relación con estudios comparables. Además, se procedió a redactar las recomendaciones sobre las observaciones y mejoras que deberían aplicarse en las prácticas experimentales y de revisión.

2.5. Identificación de variables y su mensuración

- Variable independiente

Contaminación por microplásticos.

- Variable dependiente

Efectos en la microalga *Chlorella* sp. Beijerinck.

Tabla 18

Descripción de las variables

Variables	Dimensiones	Indicadores	Metodología
Contaminación por microplásticos	Microcontaminantes emergente y críticos	Concentración (mg/l)	Revisión exploratoria y sistemática en tres bases de datos internacionales: revistas especializadas e indexadas, artículos de investigación (Q ₁ , Q ₂ , Q ₃)
	Clasificación, tipo y tamaño de plástico.	Tamaño (µm)	
Efectos en la microalga <i>Chlorella</i> sp. Beijerinck	Efectos en el crecimiento de la microalga.	Densidad celular (cell/ml)	Análisis de artículos de investigación a partir del protocolo PRISMA (Moher <i>et al.</i> , 2009)
		Densidad óptica (DO)	
	Efectos sobre el contenido de clorofila	Relación porcentual de la tasa inhibitoria (% IR)	Extracción de datos en una matriz: tasa de inhibición y contenido de clorofila
		Concentración de clorofila (mg/l)	Análisis de los resultados extraídos de los artículos elegidos.

2.7. Análisis estadístico de los datos

Para la evaluación de la calidad de las revistas, primer objetivo específico, se generó un gráfico de barras sobre la distribución de artículos por revista, que incluyó información sobre su calidad: factor de impacto (5 años) y categoría cuartil. Adicionalmente, para evaluar la representatividad geográfica se elaboró un mapa que señala el número de artículos según el país de afiliación. Ambos, fueron creados en Microsoft Excel versión 2405.

También, se utilizó el programa *VOSviewer* versión 1.6.18, concebido por investigadores en *scientometrics* como Van Eck *et al.* (2010). Este *software* se basa en un algoritmo de movimiento local que detecta las conexiones dentro de las complejas redes de publicaciones científicas, así como sus citas, autorías, coautorías, palabras clave (*keywords*) asociadas, entre otros. Para esta investigación, se realizó el análisis de los *keywords* identificados en los 25 artículos, la herramienta generó un mapa que representó la variedad de redes y la fuerte o débil relación entre *keywords* (nodos) definidas según el grosor, color, tamaño y cercanía. Cabe mencionar que, el tamaño de los nodos fue proporcional a la cantidad de veces que se repetía la palabra clave asociada a los artículos.

Por otro lado, según Moreno *et al.* (2018), la información obtenida y generada como resultado de una revisión sistemática puede compararse y resumirse a través de metaanálisis. Este corresponde a un análisis de los resultados de estudios independientes con la finalidad de producir un estimador único del efecto de la intervención evaluada. Para determinar su aplicación fue necesario considerar el tipo y calidad de datos recopilados finalizada la revisión, puesto que no siempre es conveniente realizarlo. Para este estudio, no fue efectuado por la falta de paridad en la metodología que cada autor empleó en su experimentación. Cabe señalar que, las investigaciones sobre este tema son recientes y carecen de protocolos estandarizados para su realización. Ante ello, se consideró oportuno el procesamiento de datos a partir de estadística descriptiva.

Para el segundo objetivo específico, se realizaron gráficos de dispersión, regresión lineal simple y se obtuvo el coeficiente de correlación lineal de Pearson (r), que expresa la fuerza

(Tabla 19) y dirección de la relación, a partir del coeficiente de determinación (R^2) que mide la proporción de varianza explicada. Lo anterior, fue realizado en *Microsoft Excel* versión 2409, lo que permitió la interpretación de los efectos que generan los microplásticos identificados en el crecimiento de la microalga *Chlorella* sp. Cabe señalar que, para este objetivo se utilizaron solo 20 artículos del total.

Tabla 19

Criterios de interpretación: valores del coeficiente de correlación de Pearson

Coefficiente r de Pearson	Descripción
-1,00	correlación negativa perfecta. (“A mayor X, menor Y”, de manera proporcional. Es decir, cada vez que X aumenta una unidad, Y disminuye siempre una cantidad constante.) Esto también se aplica “a menor X, mayor Y”
-0,90	Correlación negativa muy fuerte
-0,75	Correlación negativa considerable
-0,50	Correlación negativa media
-0,25	Correlación negativa débil
-0,10	Correlación negativa muy débil
0,00	No existe correlación alguna entre las variables
+0,10	Correlación positiva muy débil
+0,25	Correlación positiva débil
+0,50	Correlación positiva media
+0,75	Correlación positiva considerable
+0,90	Correlación positiva muy fuerte.
+1.00	Correlación positiva perfecta. (“A mayor X, mayor Y” o “a menor X, menor Y”, de manera proporcional. Cada vez que X aumenta, Y aumenta siempre una cantidad constante.)

Nota. Adaptado de Hernández R., Fernández C., y Baptista P. (2014). Metodología de la investigación. Online Learning Center., 1–600. <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>

En el tercer objetivo, sobre la influencia de los tipos de microplásticos (plásticos en polvo, poliacrilonitrilo, polietileno, tereftalato de polietileno, prolipopileno, poliestireno y policloruro de vinilo) en la concentración de clorofila total de la microalga *Chlorella* sp. se llevó a cabo el análisis de componentes principales (PCA), el cual permitió simplificar la complejidad de la información (Suoza *et al.*, 2024) utilizando el *software RStudio* versión

4.4.2 y generando 1 *biplot* que compila los tres tiempos de exposición a microplásticos (24, 96 y 144 horas). Para ello, se analizaron 13 artículos del total. Previo al uso de programa, los datos numéricos procesados en *Microsoft Excel* fueron promediados y normalizados multiplicando por cien y dividiendo entre el promedio total de la concentración según el tipo de microplástico.

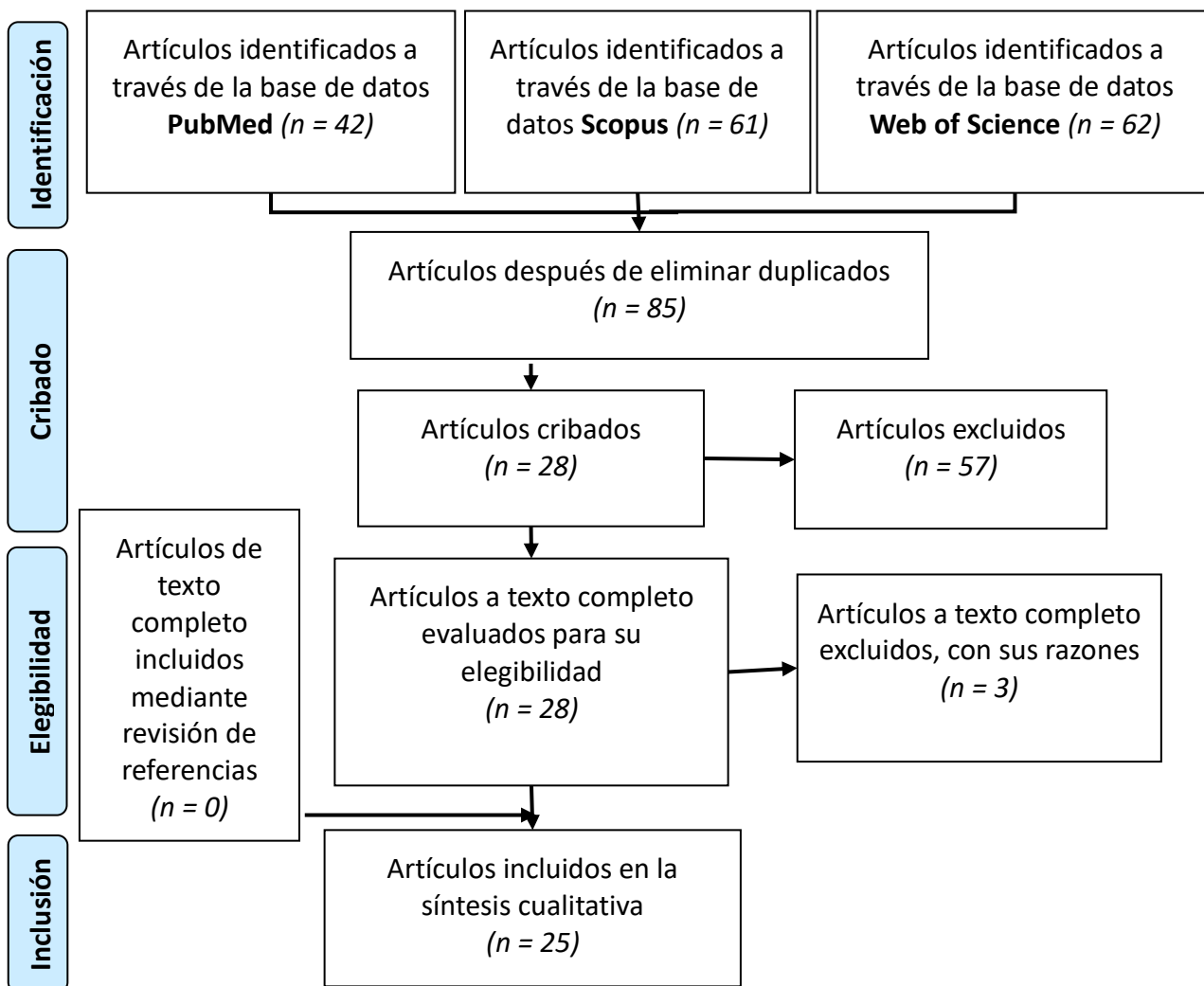
CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1. Representatividad geográfica y calidad de las revistas que publicaron los artículos incluidos en la revisión

En total, se obtuvieron 165 artículos de las bases de datos consultadas a través de la cadena de búsqueda avanzada establecida para la revisión sistemática. Respecto al total, 80 artículos se encontraron duplicados en al menos dos bases de datos. Luego, 85 artículos restantes (sin duplicidad) fueron evaluados a partir de la lectura de sus títulos y resúmenes. Finalmente, quedaron 25 artículos para revisión completa de su contenido (Figura 12). Un documento fue descartado por falta de información específica: densidad óptica (DO) y la relación lineal entre OD y densidad celular.

Figura 12

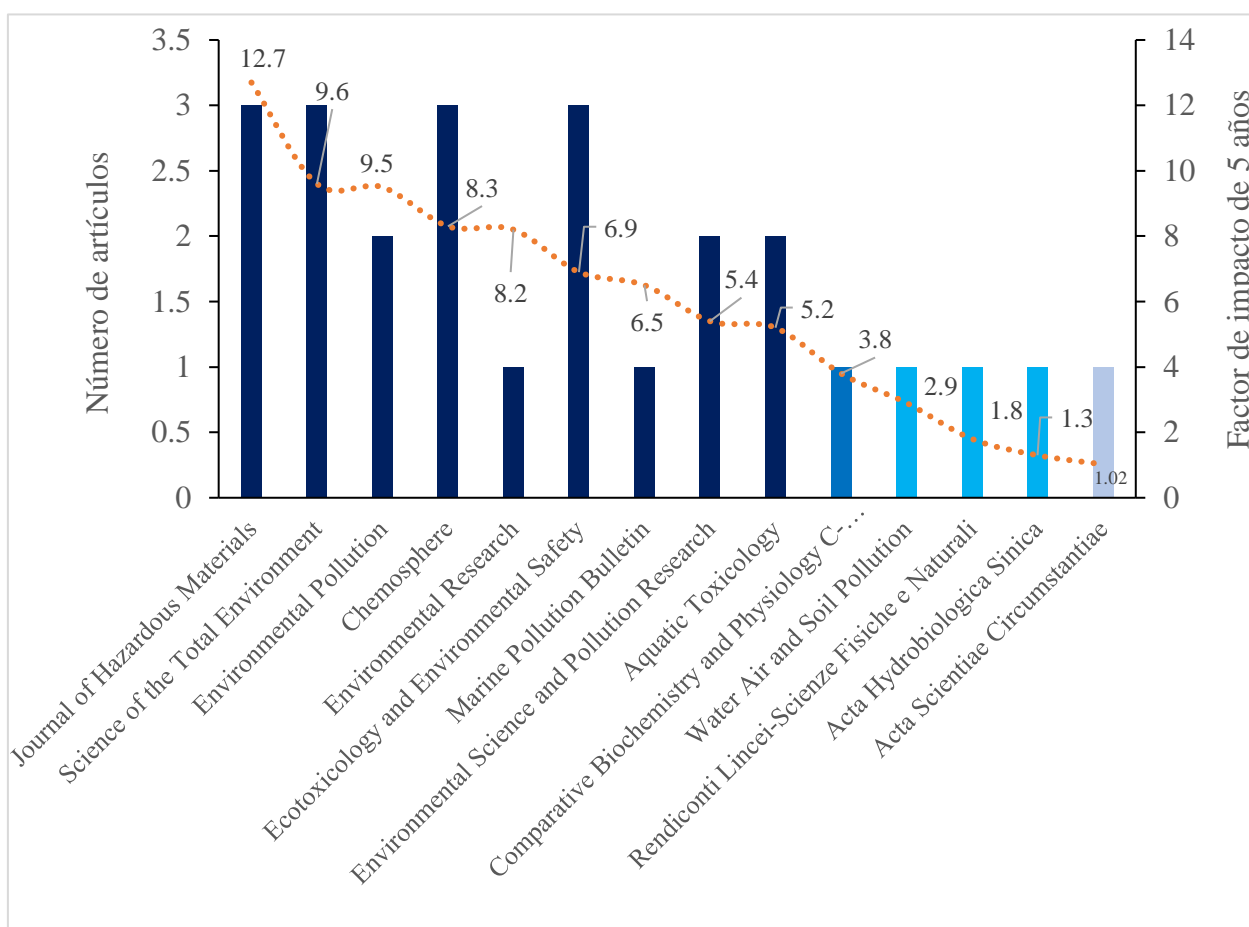
Diagrama de flujo PRISMA que resume el proceso de la revisión sistemática



Respecto a la calidad de la revista, en total fueron 14 aquellas que difundieron la problemática, evidenciando el creciente nivel de interés. Asimismo, *Journal of Hazardous Materials* (3), *Science of the Total Environment* (3), *Chemosphere* (3) y *Ecotoxicology and Environmental Safety* (3) fueron las revistas con mayor e igual número de artículos publicados (Figura 13). Es relevante mencionar que, el 80 % de los artículos fueron publicados en revistas que ocupan el primer cuartil (Q1), las cuales pertenecen al primer 25 % respecto a su importancia relativa dentro del total en el área especializada. Asimismo, se evidenció que el factor de impacto 5 años fue superior en las 3 primeras revistas: *Journal of Hazardous Materials* (12.7), *Science of the Total Environment* (9.6) y *Environmental pollution* (9.5) que contienen al menos 8 estudios.

Figura 13

Distribución de artículos por revista según el factor de impacto (5 años) y categoría cuartil

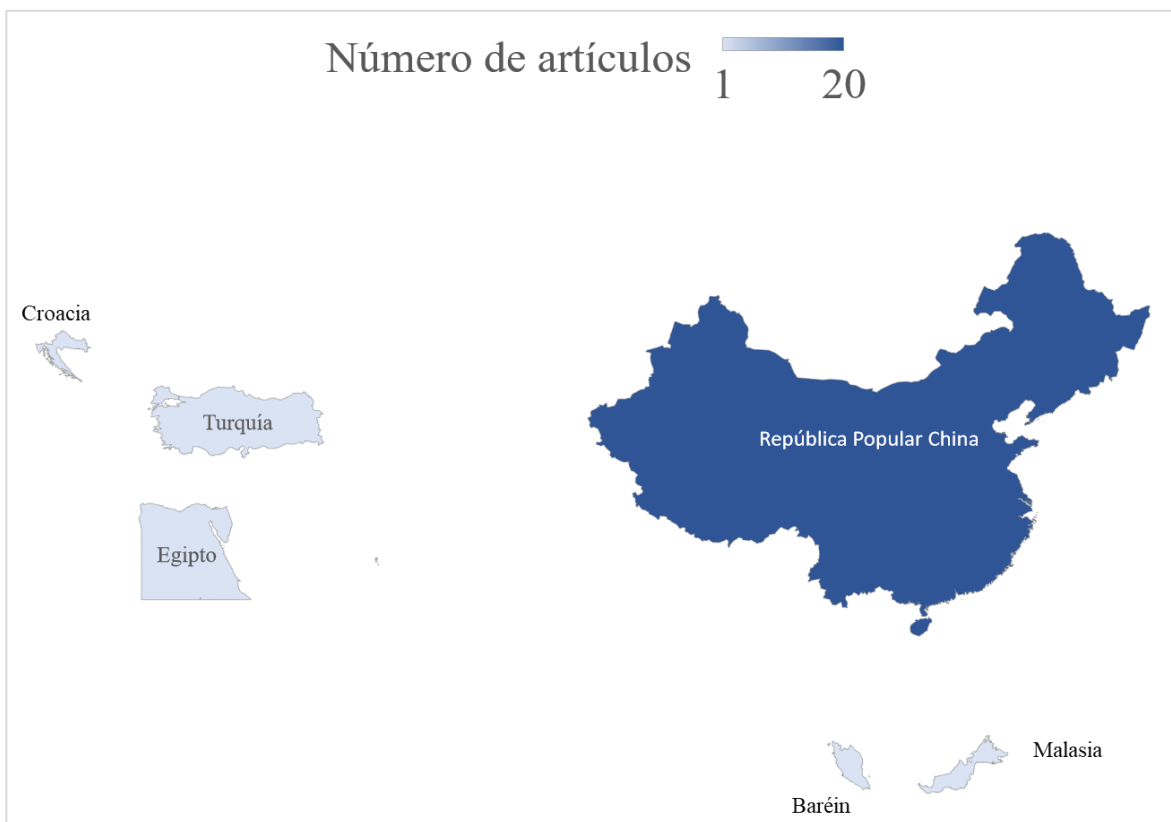


Nota. Barra azul oscuro del primer cuartil (Q1); barra azul claro del segundo cuartil (Q2); barra celeste del tercer cuartil (Q3) y barra celeste muy claro del cuarto cuartil (Q4). Línea punteada naranja: factor de impacto de 5 años por revista obtenido de *Journal Citation Report*. (2022).

Referente a la representatividad geográfica, solo el 20 % del total de artículos, contó con afiliación en países como: Turquía, Croacia, Egipto, Malasia y Baréin; en cambio, el 80 % tuvo afiliación exclusiva en China (Figura 14).

Figura 14

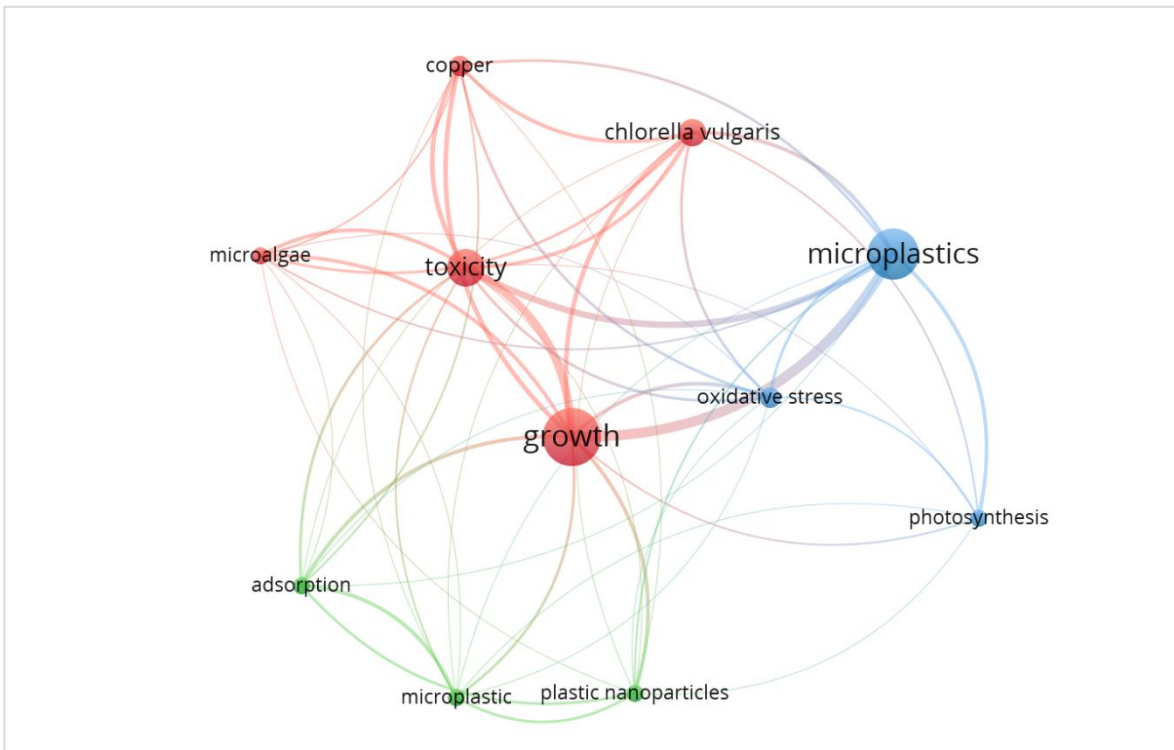
Número de artículos según el país de afiliación



Los datos presentados en la Figura 15, muestran un nodo dentro de una red conectado con otros nodos a través de un conjunto específico de relaciones. El programa *VOSviewer* utilizó un enfoque bidimensional cuyo algoritmo asignó dichos nodos a clústeres (grupos de nodos altamente interconectados), cuya asignación unívoca a un clúster permitió la creación de representaciones visuales coherentes y significativas de estructura subyacente a la red, facilitando la comprensión de las relaciones y tendencias presentes en los datos bibliométricos.

Figura 15

Mapa de interconexiones: palabras clave de los artículos incluidos en la revisión sistemática



Nota. primer clúster color rojo, agrupa la mayor cantidad de keywords (*microalgae*, *cooper*, *chlorella vulgaris*, *toxicity* y *growth*); el segundo, de color verde incluye tres keywords (*adsorption*, *microplastic* y *plastic nanoparticles*) y el tercer clúster, de color azul incluye tres keywords (*oxidative stress*, *microplastics* y *photosynthesis*).

En este análisis de las redes de concurrencia se examinó la red y los clústeres de palabras clave incluidos en los artículos, respecto el script: (*chlorella*) AND (*microplast**) AND (*growth or toxicit* or stres* or biomas* or photosynthe**), y se estableció el criterio de repetición mínima de cinco veces y conexiones significativas entre las palabras. El resultado reveló una centralidad enfocada en 11 palabras, agrupadas en tres clústeres principales.

El primer clúster (identificado en rojo) consta de cinco palabras clave: dos de mayor tamaño, por la cantidad de veces que se repetía en los artículos revisados, *growth* y *toxicity*, seguida de *Chlorella vulgaris*, *cooper* y *microalgae*. Las investigaciones en este clúster se enfocaron en el crecimiento de las microalgas, particularmente aquellas relacionadas con *Chlorella vulgaris* considerando efectos tóxicos provocados por el cobre.

El segundo clúster (marcado en verde) comprende 3 palabras claves: *adsorption*, *microplastic* y *plastic nanoparticles*. Este conjunto de estudios muestra que, los microplásticos y las nanopartículas plásticas (diferentes por su tamaño) pueden adsorber otros componentes.

El tercer clúster (resaltado en azul) también consta de 3 palabras clave: una de mayor tamaño *microplastics*, seguida de *oxidative stress* y *photosynthesis*. Cuyos artículos investigaron los efectos fisiológicos ocasionados por los microplásticos, e incluyeron el estrés oxidativo y la fotosíntesis.

3.2. Efectos que generan los microplásticos en el crecimiento de *Chlorella* sp.

El resultado de la extracción de datos permitió identificar siete tipos de plásticos: poliamida (PA), poliacrilonitrilo (PAN), polietileno (PE), polipropileno (PP), plásticos en polvo (POLV), poliestireno (PS), policloruro de vinilo (PVC), estos dos últimos en dos formas: estado envejecido (utilizado) y virgen (sin uso o de fábrica). El tamaño osciló de 0,02 a 600 μm . Además, las concentraciones de microplásticos se encontraban entre 0,5 y 1 000 mg/l.

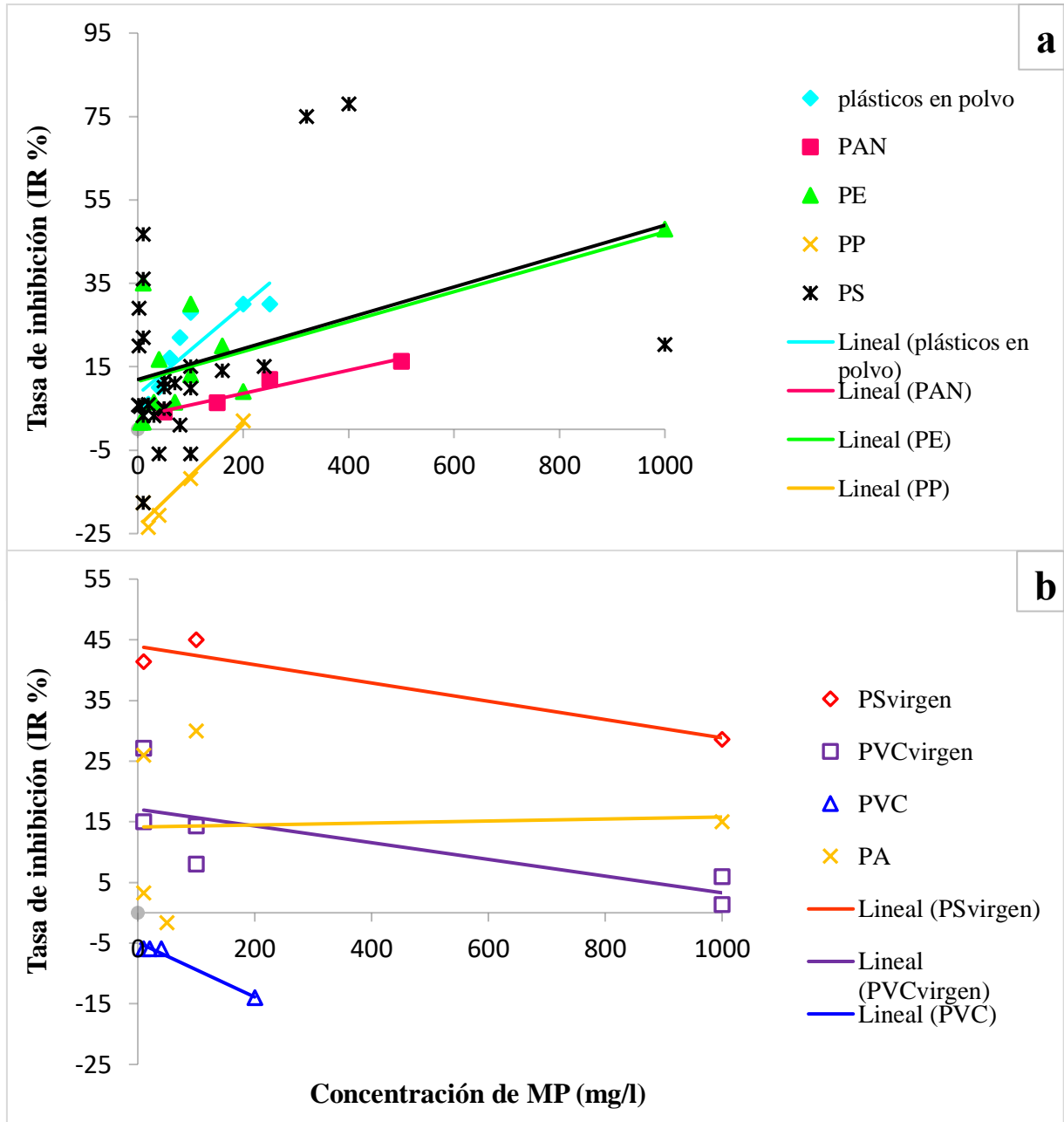
Las Figuras 16, 17 y 18 se dividen en a y b, y presentan gráficos de dispersión que muestran la relación entre la concentración de microplásticos (MPs) (eje X) y la tasa de inhibición (IR %) (eje Y) de la microalga, cuyos datos provienen de 20 estudios revisados. Cada punto representó un dato sobre la medición de la tasa de inhibición para determinada concentración de un tipo específico de MP. Además, se ajustaron líneas de tendencia para visualizar la relación entre las dos variables.

Los datos analizados en la Figura 16a correspondieron a 5 tipos de microplásticos: PAN, PE, PP, PS y POLV durante las primeras 24 horas. En general, evidenciaron una tendencia positiva y la mayoría una correlación considerable, lo que sugeriría que a medida que aumentaba la concentración de MP, incrementó la IR %. Al respecto, concentraciones menores a 250 mg/l de 4 tipos de plásticos (PAN, PE, PS y POLV) tuvieron un efecto inhibitorio máximo de 46,7 %. La correlación de PS fue débil (Tabla 20) y mostró una

tendencia creciente similar a PE. Excepcionalmente, PP ($r = 0,958$) mostró que a concentraciones menores de 200 mg/l promueve el crecimiento de la microalga en 24 %; sin embargo, a 200 mg/l inhibió en 2 % su crecimiento (datos que corresponden a un estudio).

Figura 16

*Efectos en el crecimiento de *Chlorella sp.* según el tipo y la concentración de microplásticos durante 24 horas*



Nota. (a) Tipos de microplásticos con tendencia positiva. (b) Tipos de microplásticos con tendencia negativa. Gráficos de dispersión que muestran interacción entre *Chlorella sp.* y microplásticos (análisis de 20 artículos seleccionados para la revisión).

Tabla 20

Ecuaciones que describen la relación entre la concentración de microplásticos y la tasa de inhibición durante las primeras 24 horas

Tipo de plástico	Ecuación	R²*	r**
plásticos en polvo	$y = 0,1067x + 8,3655$	0,764	0,874
PAN	$y = 0,0278x + 3,0531$	0,945	0,972
PE	$y = 0,0359x + 11,473$	0,473	0,688
PP	$y = 0,123x - 23,403$	0,918	0,958
PS	$y = 0,037x + 11,947$	0,119	0,346
PA	$y = 0,0016x + 14,138$	0,003	0,050
PVC	$y = -0,045x - 4,8907$	0,980	-0,990
PSvirgen	$y = -0,0151x + 43,911$	0,916	-0,957
PVCvirgen	$y = -0,0138x + 17,064$	0,559	-0,747

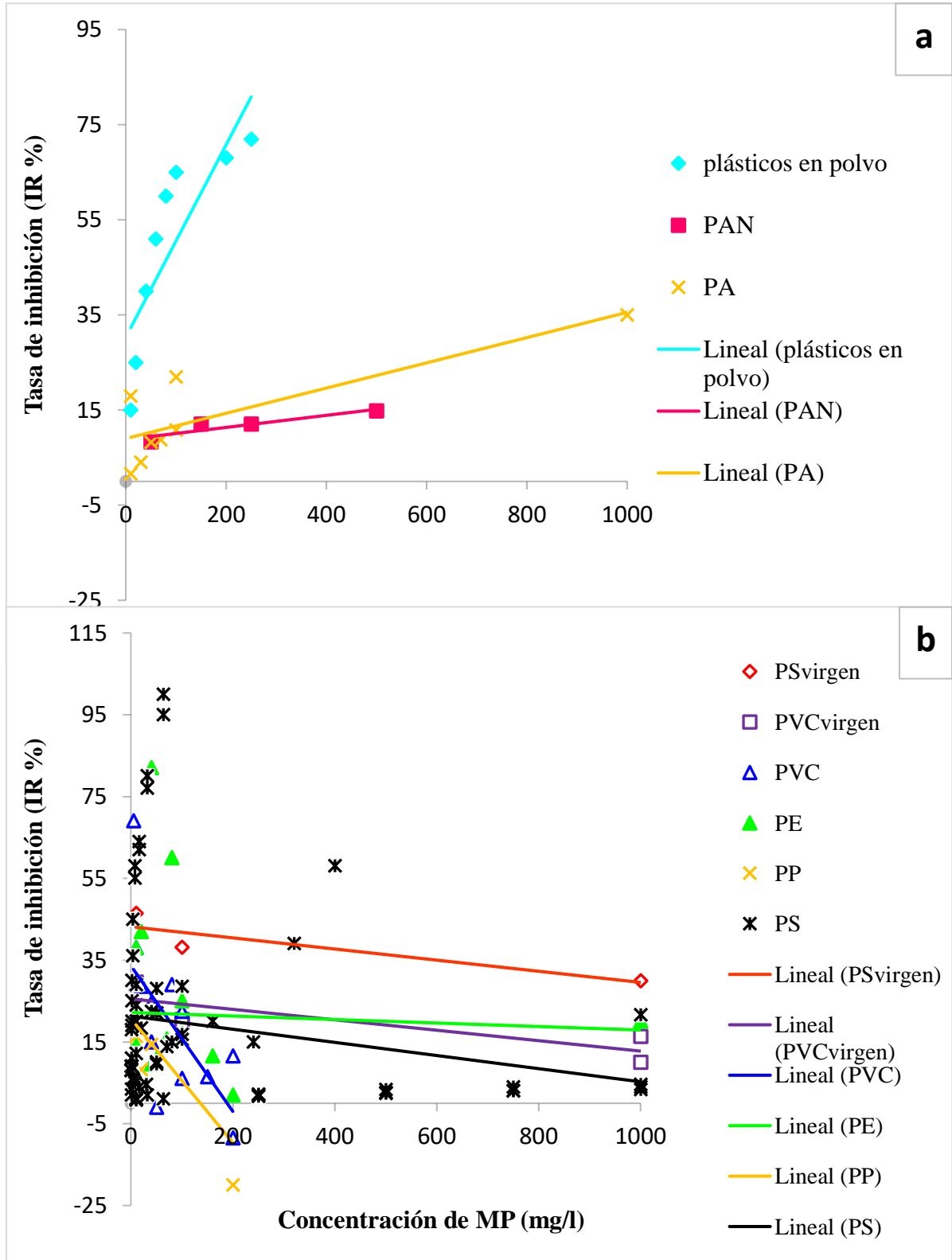
Nota. *coeficiente de determinación; **coeficiente de correlación lineal de Pearson.

La figura 16b, refleja el análisis de 3 tipos de microplásticos que en promedio describieron una tendencia negativa y correlación considerable. En el caso de PA no existe correlación entre las variables (Tabla 20). El gráfico de dispersión mostró que, en cuanto se elevaron las concentraciones de PSvirgen y PVCvirgen la tasa de inhibición disminuyó, aunque con tendencias decrecientes similares, PSvirgen alcanzó tasas de inhibición superior. Asimismo, a concentraciones menores o iguales a 100 mg/l de MPs la inhibición osciló de 8 a 45 % y a 1 000 mg/l la inhibición fue 1,4 o 28,6 %. Solo PVC ($r = 0,990$), con tasas de inhibición negativa, aumentó el crecimiento de la microalga hasta en 14 % (datos que corresponden a un estudio excepto PA).

Según la Figura 17a, a las 96 horas de exposición, POLV, PAN y PA presentaron una relación creciente y correlación positiva considerable (Tabla 21), lo que indicaría mayor inhibición de crecimiento cuando la concentración de MPs aumenta. En comparación a los otros dos tipos, los plásticos en polvo (POLV) describieron un efecto inhibitorio pronunciado del crecimiento ($r = 0,833$), a partir de 10 mg/l la inhibición incrementó de manera constante alcanzando una tasa máxima de 72 % (250 mg/l de MP). Ninguno de estos tipos de plástico tuvo efecto promotor del crecimiento en la microalga.

Figura 17

*Efectos en el crecimiento de *Chlorella sp.* según el tipo y la concentración de microplásticos durante 96 horas*



Nota. (a) Tipos de microplásticos con tendencia positiva. (b) Tipos de microplásticos con tendencia negativa. Gráficos de dispersión que muestran interacción entre *Chlorella sp.* y microplásticos (análisis de 20 artículos seleccionados para la revisión).

Tabla 21

Ecuaciones que describen la relación entre la concentración de microplásticos y la tasa de inhibición – período 96 horas

Tipo de plástico	Ecuación	R^{2*}	r^{**}
plásticos en polvo	$y = 0,2021x + 30,301$	0,694	0,833
PAN	$y = 0,0127x + 8,8078$	0,842	0,917
PA	$y = 0,0265x + 9,0075$	0,661	0,813
PSvirgen	$y = -0,0136x + 43,167$	0,814	-0,902
PE	$y = -0,0043x + 22,199$	0,002	-0,045
PVCvirgen	$y = -0,0128x + 25,522$	0,688	-0,829
PS	$y = -0,0161x + 21,32$	0,030	-0,173
PVC	$y = -0,1781x + 33,639$	0,407	-0,638
PP	$y = -0,1516x + 20,702$	0,435	-0,659

Nota. *coeficiente de determinación; **coeficiente de correlación lineal de Pearson.

La Figura 17b muestra los datos analizados de 4 tipos de microplásticos: PE, PP, PS y PVC los dos últimos en estado envejecido y virgen. Particularmente, PE (-0,045) y PS (-0,173) presentaron correlación débil, aunque PS generó inhibición a concentraciones menores de 100 mg/l. Los demás tipos de MPs presentaron tendencia negativa y correlación media (Tabla 21). Esta tendencia decreciente, fue similar para PS y PVC, ambos en estado virgen, disminuyendo la tasa inhibición final respecto a la inicial cuando la concentración fue 1 000 mg/l; asimismo presentaron tendencias similares PCV y PP, que para 200 mg/l promovieron el crecimiento de la microalga en 14 y 20 %, respectivamente.

Los datos analizados para 144 horas (Figura 18a), mostraron que existe correlación fuerte y positiva entre la concentración de los microplásticos y la tasa de inhibición para los plásticos PAN y PVC que presentaron tendencia creciente similar (Tabla 22). A diferencia de los otros dos tipos de plástico, PVC tuvo un ligero efecto promotor de crecimiento para la microalga de hasta 0,5 % cuando la concentración fue ≤ 100 mg/l. Por el contrario, PEvirgen (100 mg/l) produjeron elevadas y diferentes tasas de inhibición (17,5; 35 y 42,5 %) a comparación de los demás.

Figura 18

*Efectos en el crecimiento de *Chlorella sp.* según el tipo y la concentración de microplásticos durante 144 horas*

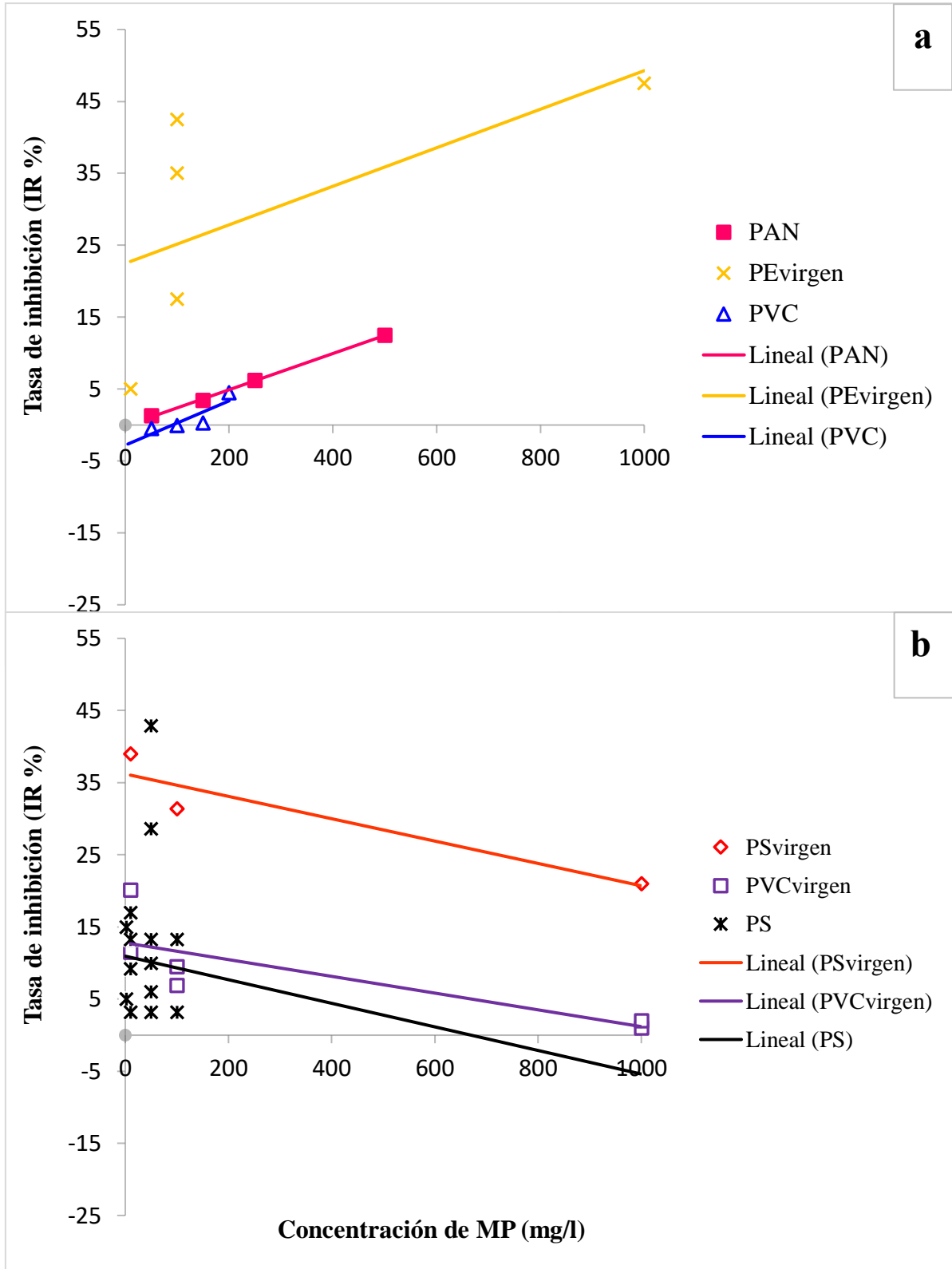


Tabla 22

Ecuaciones que describen la relación entre la concentración de microplásticos y la tasa de inhibición durante las primeras 144 horas

Tipo de plástico	Ecuación	R²*	r**
PEvirgen	$y = 0,0268x + 22,48$	0,389	0,623
PAN	$y = 0,0252x - 0,1313$	0,998	0,999
PVC	$y = 0,0308x - 2,8$	0,732	0,855
PS	$y = -0,0163x + 10,954$	0,001	-0,034
PSvirgen	$y = -0,0155x + 36,2$	0,881	-0,938
PVCvirgen	$y = -0,0116x + 12,794$	0,657	-0,810

Nota. *coeficiente de determinación; **coeficiente de correlación lineal de Pearson.

La Figura 18b, muestra la tendencia negativa considerable de PVCvirgen y PSvirgen, sugiriendo que a mayor concentración de MPs, menor inhibición de crecimiento de la microalga. En caso de PS la correlación fue inexistente ($r = 0,034$); sin embargo, se observó que los efectos inhibitorios que produjeron fueron a concentraciones menores de 100 mg/l. Por otro lado, PVC y PS ambos en estado virgen describen tendencias decrecientes similares, no obstante, los efectos inhibitorios de PSvirgen fueron superiores. En este último período, los 2 tipos de microplásticos parecen estimular el crecimiento de las microalgas.

3.3. Influencia de los microplásticos en la concentración de clorofila total de *Chlorella* sp.

La Figura 19 muestra un espacio bidimensional definido por dos componentes principales (Dim1 y DIM2) que explican la varianza total de los datos originales (promedios de la concentración de clorofila total según el tipo de MP) extraídos de 13 artículos incluidos en la revisión sistemática. Donde Dim1 corresponde al 31,7 % y Dim2 a 18,8 %. Esto refiere que las dos primeras dimensiones capturan aproximadamente el 50,5 % de la variabilidad total en los datos originales.

El *biplot* de PCA evidencia la relación entre los tipos de microplásticos (vectores azules) y los promedios de las concentraciones de clorofila total en tres tiempos de exposición 24 (h24), 96 (h96) y 144 (h144) horas. La gráfica permite identificar las principales fuentes de

variabilidad en el sistema de componentes principales y la influencia de cada tipo de microplástico.

Los tipos de microplásticos variaron según el tiempo de exposición y se resumieron en la Tabla 23.

Tabla 23

Tipos de microplásticos según el tiempo de exposición

Tiempo de exposición (h)	Tipo de plástico	C_(x̄) [mg/l]
24	PAN, PE, PET, PEvirgen, PP, PS y PVC	1 – 1 000
96	POLV, PAN, PE, PET, PP, PS y PVC	1 – 5 000
144	PEvirgin, PP, PS y PVC	1 – 1 000

3.3.1. Distribución temporal de la concentración de clorofila (mg/l)

A las 24 horas (triángulos verdes) las concentraciones se agrupan principalmente en el cuadrante izquierdo superior y se encuentran menos influenciadas por los microplásticos PE, PP y PVC (vectores largos). En 96 horas (cuadrados azules) las diferentes concentraciones se agrupan en la región superior y están más influenciada por POLV (vector más largo), lo que indica que este microplástico presentó impacto negativo significativo. A las 144 horas (círculos rojos), las concentraciones se agruparon en el cuadrante derecho inferior y presentaron mayor asociación con PP, PVC y PEvirgen, es decir tuvieron influencia notable en la disminución de la clorofila.

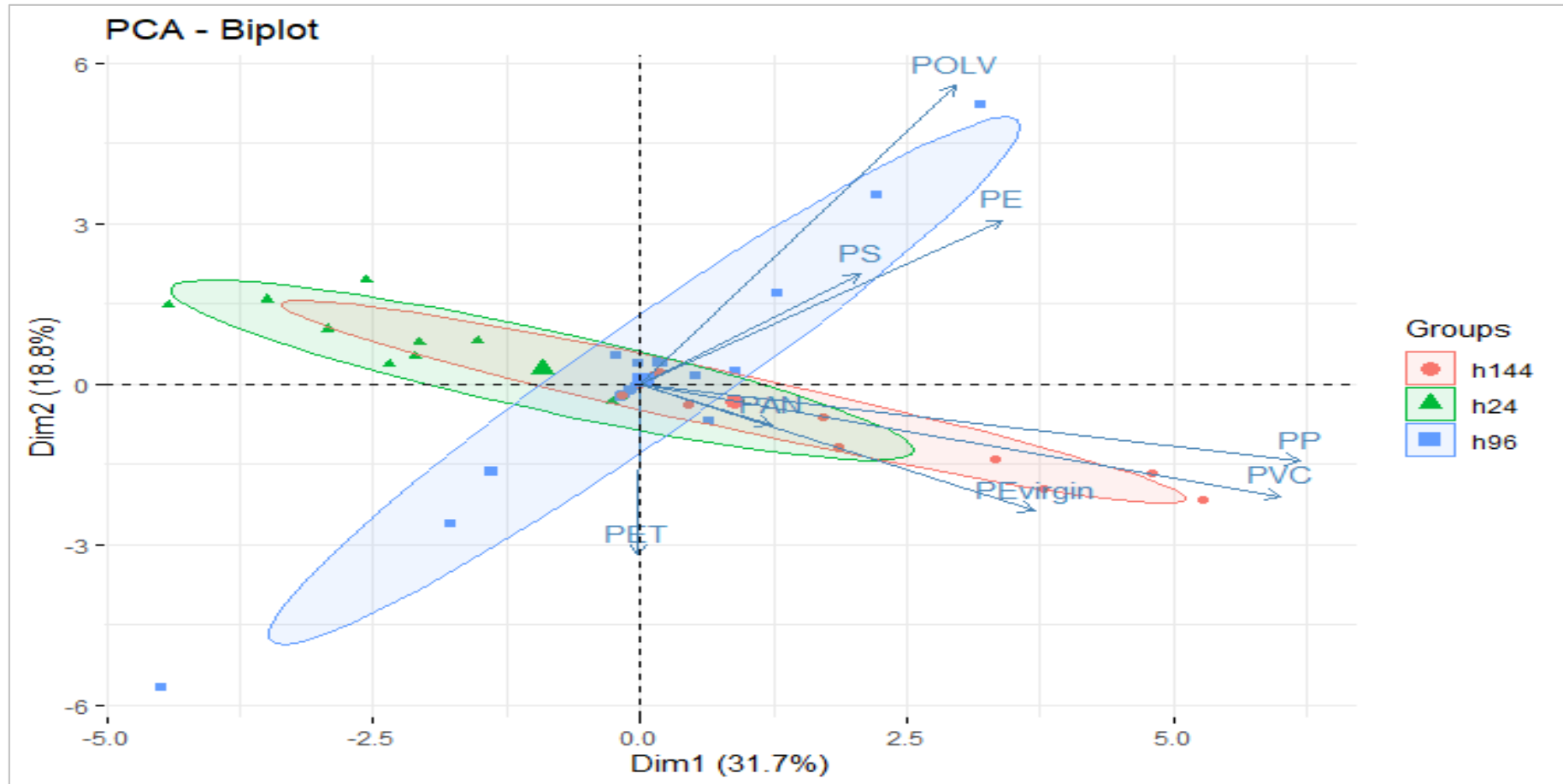
3.3.2. Tipos de microplásticos

El microplástico PAN se encuentra cercano al centro y no muestra influencia en ningún componente principal, no obstante, PET apunta hacia el cuadrante inferior izquierdo e influye en la disminución de clorofila durante las primeras 24 horas. Además, los microplásticos PP y PVC en particular se encuentran muy alineados, lo que sugiere fuerte correlación entre ellos.

Por otro lado, POLV, PE y PS se encuentran más asociados al tiempo de exposición de 96 horas, mientras que los tiempos de exposición 24 y 144 horas formaron un grupo relativamente homogéneo con influencia de los tipos PEvirgen, PVC y PP (Figura 19).

Figura 19

Biplot del análisis de componentes principales respecto a la influencia de la concentración de MP en el contenido de Chl total - 24, 96 y 144 horas



Nota. Los componentes principales Dim1 y 2, representan la mayor variabilidad de los datos extraídos (concentración de clorofila total). Los íconos azules, verdes y rojos muestran las concentraciones en mg/l de microplásticos. Los vectores en color celeste simbolizan los tipos de microplásticos evaluados (análisis de 13 artículos seleccionados para la revisión).

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN

4.1. Sobre la evaluación de la representatividad geográfica y calidad de las revistas que publicaron los artículos incluidos en la revisión sistemática

Esta revisión sistemática, que incluyó una búsqueda exhaustiva en base de datos científicas, evidenció un creciente interés en el impacto de los microplásticos en *Chlorella* sp. De un total de 165 artículos identificados en los últimos cinco años (2018-2023), sólo 25 cumplieron con los criterios estrictos de inclusión. Si bien Ferrando (2021) realizó una revisión similar en especies acuícolas de interés comercial (1 566 artículos iniciales, sólo 72 incluidos) encontrando un impacto significativo de los microplásticos, este estudio se centró específicamente en *Chlorella* sp. y en experimentos controlados en laboratorio. A diferencia de Ferrando, que incluyó libros y resúmenes de congreso. Sin embargo, los criterios de inclusión pueden variar y dependerán, exclusivamente, de los objetivos planteados que guían el proceso de investigación (Siddaway *et al.*, 2019).

La mayoría (20) de los artículos seleccionados provinieron de revistas de buena calidad, clasificadas en primer cuartil (Q₁) y factor de impacto 5 mayor a 9,5 destacando su relevancia. Revistas como *Journal of Hazardous Materials*, *Science of the Total Environment*, *Chemosphere* y *Ecotoxicology and Environmental Safety* fueron las que reflejaron mayor interés de la comunidad científica en este problema ambiental. Dicha tendencia es consistente con estudios recientes (Leng *et al.*, 2024; Lu y Wang, 2024; Xie *et al.*, 2024; Zhao *et al.*, 2024). Otro hallazgo notable fue la ubicación geográfica, pues 20 estudios estuvieron afiliados a instituciones chinas. Lo que sugiere una relación directa con la alta producción y demanda de plásticos en este país, tal como lo señala PlasticEurope (2022) sobre el incremento en 2021 de su cuota de mercado, representando casi un tercio de la producción mundial de plásticos (125 millones de toneladas aproximadamente). Además, Prabakaran *et al.* (2018) señaló que China es reconocido como un importante productor del género *Chlorella*, desbordando las 400 000 t de biomasa anual. Lo que sugiere, la evidente afinidad por la investigación del tema en cuestión.

Asimismo, el análisis de las redes de concurrencia de *keywords* reveló tres clústeres principales cuyas palabras clave representativas fueron: (1) crecimiento y toxicidad, (2) adsorción, (3) microplásticos. Lo cual mostró que, los estudios incluidos en esta revisión guardaron relación con los objetivos planteados, además destacaron las áreas de investigación predominantes actuales. Dichos palabras sobresalen y son abordadas en recientes investigaciones, como Ansari *et al.* (2021) cuya evaluación destacó los efectos de inhibición de crecimiento por exposición a HDPE (42,7 %), PVC (41,6 %) y PP (37,7 %), con tamaños de 100 y 250 μm , a una concentración de 250 mg/l (más alta) en la microalga *Acutodesmus obliquus*; de manera similar, González-Fernández *et al.* (2020) evidenció los impactos de nanoplásticos funcionalizados (PS-NH₂), en *Chaetoceros neogracilis* con una reducción del 70 % de pigmentos (clorofila a). Este último, centró su atención en el tamaño de la partícula plástica (50 nm) y propuso como nuevo indicador la composición de lípidos para evaluar los impactos asociados a nanoplásticos.

4.2. Sobre los efectos que generan los microplásticos (plásticos en polvo, poliamida, poliacrilonitrilo, polietileno, polipropileno, poliestireno y policloruro de vinilo) en el crecimiento de *Chlorella* sp.

A partir de los datos extraídos de 20 estudios incluidos en esta revisión sistemática y la identificación de siete tipos de microplásticos se consideró como indicador de impacto la tasa de inhibición (IR %) y se recopiló la siguiente información:

24 horas. Se definieron dos tendencias, la primera fue creciente y evidenció el efecto inhibitorio máximo de 46,7 % a concentraciones inferiores de 250 mg/l para 4 microplásticos PAN, PE, PS y POLV (0,05; 0,8; 0,5; 0,065 μm); a diferencia del estudio de Chen *et al.* (2020) que, evaluaron la exposición de *P. helgolandica* var. *Tsingtaoensis* a 10 mg/l PS (1 y 2 μm) y no generaron diferencias significativas en la densidad celular. Estos resultados opuestos, se deberían a la concentración, forma y tamaño del MP, según Jalaudin Basha *et al.* (2023) algunas fibras PS demostraron efectos nocivos más fuertes que las perlas PS, y se atribuyen efectos mediados químicamente a partícula de 0,1 μm o menos, mientras que las partículas de 2 μm o más causan principalmente efectos mediados físicamente. De similar forma, Sheng *et al.* (2023) señaló que, la toxicidad de las micro y nanoplásticos para las microalgas dependen del tamaño de las partículas, donde las más pequeñas se distribuyen

ampliamente y son potencialmente dañinas en comparación con las más grandes debido a la internalización celular, la adhesión y las agregaciones entre MP y células de microalgas.

La segunda tendencia fue negativa, donde MP PS y PVC en estado virgen mostraron similar decremento de la inhibición respecto al aumento de su concentración, de allí que ≤ 100 mg/l inhibió entre 8 y 45 %, en cambio, 1 000 mg/l alcanzó tasas menores de inhibición (entre 1,8 y 28,6 %). Estos datos se distancian de los hallazgos de Wang *et al.* (2020), pues señalaron que 200 mg/l de PVCvirgen inhibieron en 51,8 % a *Chlamydomonas reinhardtii*. Lo cual podría estar asociado a las características particulares de la especie de microalga u otros mecanismos de defensa, tal como lo indicó Pencik *et al.* (2023) respecto al grosor de la pared celular de *Chlorella* sp. que varía de 100 a 200 nm, lo que la hace resistente a factores químicos, físicos y mecánicos.

96 horas. Entre POLV, PAN (0,05 – 0,8 μm) y PA (150 μm) de tendencia positiva, los plásticos en polvo (no específica el tipo) evidenciaron mayor tasa de inhibición (72 %), aun cuando la concentración de MP fue menor a 250 mg/L. En el mismo tiempo de exposición, Xiao *et al.* (2020) reportaron que MP PS de 0,1 μm inhibieron 35,5 % el crecimiento de *Euglena gracilis*. Aunque la especie de microalga y tipo de MP varían, se observa que el efecto inhibitorio es mayor en *Chlorella* sp. Esto dependería del tamaño-tipo de MP, la forma celular de la microalga y su interacción. En concordancia, Chen *et al.* (2024) sostienen que la morfología celular influye en la interacción con los MPs. Mientras que las especies con superficies porosas presentan patrones de incrustación, las especies con superficies lisas como *Chlorella vulgaris*, experimentan abolladuras (arrugas gruesas, torcidas y deformidad), resultando más destructiva para esta especie.

Por otro lado, PS y PVC en estado virgen describieron una tendencia negativa (cuando la concentración de MP aumentaba la inhibición disminuía); asimismo, PVC y PP (sin estado específico) promovieron el crecimiento en 20 %. De manera similar, después de 96 horas Song *et al.* (2023) reportaron menor inhibición del crecimiento de *Chlorella pyrenoidosa* al exponerla a poliamida envejecida con radiación ultravioleta y según Xie *et al.* (2024) en menos de 3 días (edad temprana del cultivo), los MPs polimetilmetacrilato (PMMA), PVC y PS estimularon el crecimiento de *Chlorella vulgaris*, indicando que la disponibilidad de

nutrientes y espacio superaron los posibles efectos estresantes de los MPs. Una posible explicación sería que, los MPs podrían servir potencialmente como sustratos para su crecimiento (Canniff y Hoang, 2018).

144 horas. PAN, PVC y PEvirgen conforme aumentaban sus concentraciones, también, aumentaban las tasas de inhibición afectando el crecimiento de *Chlorella* sp. Entre ellos, destacó PEvirgen (100 mg/l) cuya tasa de inhibición alcanzó 42,5 %. De forma similar Zheng *et al.* (2021) hallaron que, después de 96 horas de exposición los microplásticos PVC (50 mg/l) y PE (25 mg/l) disminuyeron el crecimiento de *Microcystis aeruginosa* en 44,4 y 51 %, respectivamente. Se presume que, la inhibición de crecimiento puede deberse al efecto sombreado causado por MPs que dificultarían la recepción de luz y el crecimiento, además, que los MPs con amplia superficie y alta capacidad de adsorción formarían heteroagregados que deforman la célula y reducen su movilidad según la especie (Senousy *et al.*, 2023).

Los microplásticos PVC y PS en estado virgen (tendencia decreciente) parecían incentivar el crecimiento de las microalgas *Chlorella* sp. conforme aumentaba su concentración. Además, PS (sin estado específico) mostró inhibición cuando la concentración fue menor a 100 mg/l. Estos hallazgos se alinean con lo señalado por Fu *et al.* (2019), sobre el PVC virgen o envejecido que a 10 mg/l mostraron inhibición significativa en *Chlorella vulgaris*, sin embargo, no observaron inhibición a 100, 1 000 mg/l (concentraciones superiores) y Liu *et al.* (2019) respecto a 1 µg/l y 1 mg/l de PS no hallaron diferencias significativas en la tasa de crecimiento de *Scenedesmus obliquus*. La estimulación observada podría ser consecuencia de un fenómeno conocido como hormesis, donde las concentraciones traza de productos químicos aditivos desconocidos, lixiviados de los MPs, inducen el crecimiento. Es decir que, las bajas concentraciones de dichas sustancias promoverían el crecimiento de la microalga (Chae *et al.*, 2019). Por otro lado, según Hadiyanto *et al.* (2025) las microalgas ante situaciones de estrés segregarían sustancias poliméricas extracelulares (EPS) capaces de adsorber MP y metales pesados reduciendo su presencia en el medio.

4.3. Sobre la influencia de los microplásticos en la concentración de clorofila total de *Chlorella* sp.

La disminución del contenido de clorofila, durante las primeras 24 horas, no fue influenciada por los microplásticos PAN, PP, PE y PVC, a diferencia de PET. Hallazgos de Xie *et al.* (2024) reportaron que PVC promovió la producción de clorofila en la etapa inicial (24 y 48 h) en *Chlorella vulgaris*, a diferencia de Cheng *et al.* (2024) quienes revelaron que PET y PP redujeron el contenido total de clorofila en *Chlorella pyrenoidosa*. Según Zheng *et al.* (2021), los diferentes efectos de los MP en las microalgas están relacionadas con sus características, como tipo de polímero, componentes aditivos químicos, duración de exposición o concentración, pero principalmente por su forma y tamaño. La forma de los MP determina su capacidad para interacción con las células de las microalgas, promoviendo la formación de heteroagregados. Este proceso incrementa la densidad del MP y facilita su hundimiento (Rani-Borges *et al.*, 2021).

Solo plásticos en polvo (POLV) mostraron mayor influencia sobre la disminución de clorofila, a las 96 horas. Esta forma particular, no revela un tipo de plástico, pero hace referencia a un tamaño extremadamente pequeño que se dispersa fácilmente. Estos pueden ser generados por fragmentación de plásticos o producción directa, como partículas finas (Thompson *et al.*, 2009). Es posible que, su influencia sobre el contenido de la clorofila esté relacionado a su tamaño diminuto, el cual interfiere en la síntesis de este pigmento verde (Cheng *et al.*, 2024), asimismo, en la interrupción del transporte de electrones y la disminución de la actividad fotosintética (Wu *et al.*, 2019). Además, la fragmentación constante del tamaño favorecería su transferencia en la cadena alimenticia (presa-depredador) (Rani-Borges *et al.*, 2021).

Por otro lado, PEvirgen, PP y PVC durante las últimas 144 horas influenciaron en la disminución de clorofila cuya similar tendencia puede estar sujeta a los componentes aditivos que poseen, estos pueden ser plastificantes, retardantes de llama, antioxidantes u otros. Según Hahladakis *et al.* (2018) PVC y PE tienen en común dos tipos de plastificantes: ftalato y adiptato los cuales mejoran la resistencia al impacto del plástico final y los dotan de mayor flexibilidad. Estos aditivos pueden migrar o liberarse en el medio a partir de la

meteorización de los plásticos y generar efectos nocivos para las diferentes formas de vida. Los datos obtenidos por Jang *et al.* (2024) sugieren que, durante el uso o eliminación de cuerdas de PVC (aparejos de pesca) se produce lixiviación de ftalatos al medio marino, pues observaron que las cuerdas nuevas presentaban concentraciones mayores a comparación de las cuerdas de desecho (diferencia de 244 ug/g). Adicionalmente, estos aditivos tóxicos tienen el potencial de inducir efectos oxidativos de lípidos (Dabrowska *et al.*, 2021).

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

1. La presente revisión contribuye al creciente cuerpo de evidencia sobre los efectos de la contaminación por microplásticos en ecosistemas acuáticos, con enfoque particular en las microalgas *Chlorella* sp. organismos fundamentales para el equilibrio de estos ecosistemas. De un amplio conjunto de estudios que reconocieron los riesgos, sólo 25 artículos cumplieron los rigurosos criterios establecidos. Siendo 80 % (20 estudios) publicados en revistas (9) de primer cuartil (Q1) y cuyos factores de impacto se encontraron entre 5,2 y 12,7. Estos artículos procedieron de instituciones chinas y destacaron la inhibición del crecimiento, toxicidad y adsorción de otros contaminantes como temas relevantes para estudio.
2. Después del análisis de los datos obtenidos de 20 artículos se infiere, que el efecto de los microplásticos en el crecimiento de *Chlorella* sp. resulta muy complejo y depende de factores como la concentración, tipo, tamaño, forma y estado del microplástico. Generalmente, concentraciones elevadas inhiben el crecimiento debido al efecto sombreado y a la formación de heteroagregados que deforman las células; sin embargo, a bajas concentraciones algunos, como el PP y PVC, pueden estimular el crecimiento, debido al efecto hormético o a la función como sustrato. Sin embargo, se debe considerar que las diferencias en los resultados de los estudios revisados puede ser consecuencia de las diversas condiciones experimentales o la capacidad de las microalgas en la segregación de EPS como floculantes para la biorremediación de estos residuos.
3. Los resultados de 13 artículos analizados muestran que los microplásticos podrían influir en el contenido de clorofila de acuerdo con el tipo de polímero, forma, tamaño y aditivos. Mientras PET reduce la clorofila de forma temprana (24 horas), POLV, PE y PS se asocian al tiempo de exposición de 96 horas influyendo sobre la clorofila en ese orden. Por otro lado, PEvirgen, PVC y PP muestran influencia similar en 24 y 144 horas. En general, se aprecia un cambio drástico en el contenido de clorofila a las 96 horas, respecto a las 24 y 144 horas, en cuyas horas la clorofila tiende a ser homogénea,

estos efectos pueden estar relacionados con la liberación de aditivos como ftalatos y adiptatos.

CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES

1. La revisión sistemática se centró en los efectos de los residuos plásticos fragmentados sobre un productor primario autótrofo. No obstante, es crucial ampliar el conocimiento respecto a sus impactos en otras especies indicadoras de calidad (diatomeas, cianobacterias, crustáceos, bivalvos, peces, musgos, líquenes, otros) en distintos ecosistemas como los frágiles de interés nacional (arrecifes, humedales, lomas, otros) con el objetivo de comprender las consecuencias ecológicas y generar información relevante que contribuya a la sensibilización de la sociedad frente a esta problemática, asimismo, el diseño de estrategias para la gestión de residuos y protección ambiental.
2. Los estudios analizados en este trabajo se basaron en experimentos de laboratorio con concentraciones de microplásticos que no reflejan la abundancia real observada en fuentes hídricas naturales. Ante ello, es necesario ahondar y considerar para futuras investigaciones experimentales concentraciones reales registradas, como en aguas superficiales que alcanzan 3,4 – 25,8 partículas/l, o en aguas subterráneas con 6,4 partículas/l. Por otro lado, para futuras revisiones considerar ampliar la muestra (> 25 artículos), a fin de generar correlaciones con mayor ajuste.
3. Los aditivos químicos de los microplásticos mostraron influencia sobre *Chlorella* sp., en esa misma línea, son imprescindibles investigaciones interdisciplinarias (experimentales o no) que aborden los efectos de los microplásticos asociados a otros contaminantes (metales, pesados, compuestos orgánicos persistentes, hidrocarburos aromáticos policíclico, entre otros). Los cuales requieren atención porque abundan en el medio y son de fácil interacción por su mala disposición. Asimismo, focalizar las investigaciones de las EPS y su función de eliminar MP de los ecosistemas acuáticos y encontrar una ruta adecuada para su disposición o aprovechamiento, considerando la biomasa algal contaminada.

REFERENCIAS

- Abbasi, S., Amiranipour, S., Karimi, J., Mohsenzadeh, S., y Turner, A. (2023). Impacts of polyethylene microplastics on the microalga, *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) [Impactos de los microplásticos de polietileno en la microalga *Spirulina* (*Arthrospira platensis*)]. *Environmental Pollution*, 327, 121611. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2023.121611>
- Abd El-Hack, M., Abdelnour, S., Alagawany, M., Abdo, M., Sakr, M., Khafaga, A., Mahgoub, S., Elnesr, S., y Gebriel, M. (2019). Microalgae in modern cancer therapy: Current knowledge [Las microalgas en la terapia moderna contra el cáncer: conocimiento actual]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 111, 42–50. <https://doi.org/10.1016/J.BIOPHA.2018.12.069>
- Alagawany, M., Taha, A., Noreldin, A., El-Tarabily, K., y Abd El-Hack, M. (2021). Nutritional applications of species of *Spirulina* and *Chlorella* in farmed fish: A review [Aplicaciones nutricionales de las especies de *Spirulina* y *Chlorella* en peces de piscifactoría: una revisión]. *Aquaculture*, 542, 736841. <https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2021.736841>
- Alfonso, M., Lindsay, D., Arias, A., Nakano, H., Jandang, S., e Isobe, A. (2023). Zooplankton as a suitable tool for microplastic research [El zooplancton como herramienta adecuada para la investigación de microplásticos]. *Science of The Total Environment*, 905, 167329. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.167329>
- Anderson, J., Park, B., y Palace, V. (2016). Microplastics in aquatic environments: Implications for Canadian ecosystems [Microplásticos en ambientes acuáticos: Implicaciones para los ecosistemas canadienses]. *Environmental Pollution*, 218, 269–280. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2016.06.074>
- Andrady, A. (2011). Microplastics in the marine environment [Microplásticos en el medio marino]. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1596–1605. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2011.05.030>
- Ansari, F., Ratha, S., Renuka, N., Ramanna, L., Gupta, S., Rawat, I., y Bux, F. (2021). Effect of microplastics on growth and biochemical composition of microalga *Acutodesmus obliquus* [Efecto de los microplásticos sobre el crecimiento y la composición bioquímica de la microalga *Acutodesmus obliquus*]. *Algal Research*, 56, 102296. <https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2021.102296>
- Arpia, A., Chen, W., Ubando, A., Naqvi, S., y Culaba, A. (2021). Microplastic degradation as a sustainable concurrent approach for producing biofuel and obliterating hazardous

environmental effects: A state-of-the-art review [Degradación de microplásticos como un enfoque simultáneo sostenible para producir biocombustibles y eliminar los efectos ambientales peligrosos: una revisión del estado del arte]. *Journal of Hazardous Materials*, 418, 126381. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2021.126381>

Asociación Peruana de la Industria del Plástico [APIPLAST] de la Sociedad Nacional de Industrias [SNI]. (2018). Reporte Sectorial N° 06 – 2018

Auta, H., Emenike, C., y Fauziah, S. (2017). Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential solutions [Distribución e importancia de los microplásticos en el medio marino: una revisión de las fuentes, el destino, los efectos y las posibles soluciones]. *Environment International*, 102, 165–176. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2017.02.013>

Avio, C., Gorbi, S., y Regoli, F. (2017). Plastics and microplastics in the oceans: From emerging pollutants to emerged threat [Plásticos y microplásticos en los océanos: de contaminantes emergentes a amenaza emergente]. *Marine Environmental Research*, 128, 2–11. <https://doi.org/10.1016/J.MARENRES.2016.05.012>

Barboza, L., Frias, J., Booth, A., Vieira, L., Masura, J., Baker, J., Foster, G., y Guilhermino, L. (2019). Microplastics Pollution in the Marine Environment [Contaminación por microplásticos en el medio marino]. *World Seas: An Environmental Evaluation Volume III: Ecological Issues and Environmental Impacts*, 329–351. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805052-1.00020-6>

Barboza, L., Dick Vethaak, A., Lavorante, B., Lundebye, A., y Guilhermino, L. (2018). Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health [Desechos microplásticos marinos: un problema emergente para la seguridad alimentaria, la inocuidad de los alimentos y la salud humana]. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 336–348. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2018.05.047>

Bebianno, M., y Gonzalez-Rey, M. (2015). Ecotoxicological Risk of Personal Care Products and Pharmaceuticals [Riesgo ecotoxicológico de los productos de cuidado personal y farmacéuticos]. *Aquatic Ecotoxicology: Advancing Tools for Dealing with Emerging Risks*, 383–416. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800949-9.00016-4>

Belachqer-El Attar, S., Morillas-España, A., Sánchez-Zurano, A., Pessôa, L., Pinna-Hernández, M., De Jesus Assis, D., López, J., y Ación, G. (2023). Influence of culture media composition on the rheology of microalgae concentrates on a large scale [Influencia de la composición de los medios de cultivo en la reología de concentrados

de microalgas a gran escala]. *New Biotechnology*, 77, 90-99.
<https://doi.org/10.1016/J.NBT.2023.07.005>

Bergami, E., Pugnali, S., Vannuccini, M., Manfra, L., Faleri, C., Savorelli, F., Dawson, K. A., y Corsi, I. (2017). Long-term toxicity of surface-charged polystyrene nanoplastics to marine planktonic species *Dunaliella tertiolecta* and *Artemia franciscana* [Toxicidad a largo plazo de los nanoplásticos de poliestireno cargados en la superficie para las especies planctónicas marinas *Dunaliella tertiolecta* y *Artemia franciscana*]. *Aquatic Toxicology*, 189, 159–169.
<https://doi.org/10.1016/J.AQUATOX.2017.06.008>

Bernardo, P. (2016). Petrochemical Industry and Membrane Operations. En E. Drioli y L. Giorno (Eds.), *Encyclopedia of Membranes* (pp. 1514-1515). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-44324-8_1624

Bhattacharya, S., Maurya, R., Mishra, S., Ghosh, T., Patidar, S., Paliwal, C., Chokshi, K., Pancha, I., Maiti, S., y Mishra, S. (2016). Solar driven mass cultivation and the extraction of lipids from *Chlorella variabilis*: A case study [Cultivo masivo impulsado por energía solar y extracción de lípidos de *Chlorella variabilis*: un estudio de caso]. *Algal Research*, 14, 137–142.
<https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2016.01.009>

Bito, T., Okumura, E., Fujishima, M., y Watanabe, F. (2020). Potential of *Chlorella* as a Dietary Supplement to Promote Human Health [Potencial de la *chlorella* como suplemento dietético para promover la salud humana]. *Nutrients*.12(9), 2524.
<https://doi.org/10.3390/NU12092524>

Blettler, M., Abrial, E., Khan, F., Sivri, N., y Espinola, L. (2018). Freshwater plastic pollution: Recognizing research biases and identifying knowledge gaps [Contaminación plástica en agua dulce: reconocer los sesgos de investigación e identificar las lagunas de conocimiento]. *Water Research*, 143, 416–424.
<https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2018.06.015>

Borrego, B., Melo, L., Gracioso, L., Cardoso, L., y Perpetuo, E. (2023). Photoautotrophic microorganisms from mangroves: a review of the ecological role and bioproducts of commercial interest [Microorganismos fotoautótrofos de manglares: una revisión del papel ecológico y bioproductos de interés comercial]. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 17(5), 1457-1477. <https://doi.org/10.1002/BBB.2515>

Bouwmeester, H., Hollman, P., y Peters, R. (2015). Potential Health Impact of Environmentally Released Micro- and Nanoplastics in the Human Food Production Chain: Experiences from Nanotoxicology [Impacto potencial en la salud de los micro y nanoplásticos liberados al medio ambiente en la cadena de producción de alimentos

humanos: experiencias de nanotoxicología]. *Environmental Science and Technology*. 49(15), 8932–8947. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.5B01090>

Burlacot, A., Dao, O., Auroy, P., Cuiné, S., Li-Beisson, Y., y Peltier, G. (2022). Alternative photosynthesis pathways drive the algal CO₂-concentrating mechanism [Las vías alternativas de fotosíntesis impulsan el mecanismo de concentración de CO₂ de las algas]. *Nature* 2022 605:7909, 605(7909), 366–371. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04662-9>

Caixeta, D., Caixeta, F., y De Menezes Filho, F. (2018). Nano e Microplásticos nos Ecosistemas: Impactos Ambientais e Efeitos sobre os Organismos [Nano y microplásticos en ecosistemas: impactos ambientales y efectos sobre los organismos]. *Enciclopédia Biosfera*, 15(27), 19. https://doi.org/10.18677/EnciBio_2018A92

Canniff, P., y Hoang, T. (2018). Microplastic ingestion by *Daphnia magna* and its enhancement on algal growth [Ingestión de microplásticos por *Daphnia magna* y su mejora sobre el crecimiento de algas]. *Science of The Total Environment*, 633, 500–507. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.03.176>

Carbery, M., O'Connor, W., y Palanisami, T. (2018). Trophic transfer of microplastics and mixed contaminants in the marine food web and implications for human health [Transferencia trófica de microplásticos y contaminantes mixtos en la red trófica marina e implicaciones para la salud humana]. *Environment International*, 115, 400–409. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2018.03.007>

Castañeta, G., Gutiérrez, A. F., Nacaratte, F., y Manzano, C. A. (2020). Microplásticos: un contaminante que crece en todas las esferas ambientales, sus características y posibles riesgos para la salud pública por exposición. *Revista Boliviana de Química*, 37(3). <https://doi.org/10.34098/2078-3949.37.3.4>

Chae, Y., Kim, D., Kim, S., y An, Y. (2018). Trophic transfer and individual impact of nano-sized polystyrene in a four-species freshwater food chain [Transferencia trófica e impacto individual del poliestireno de tamaño nanométrico en una cadena trófica de agua dulce de cuatro especies]. *Scientific Reports*. 8(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18849-y>

Chae, Y., Kim, D., y An, Y. J. (2019). Effects of micro-sized polyethylene spheres on the marine microalga *Dunaliella salina*: Focusing on the algal cell to plastic particle size ratio [Efectos de las esferas de polietileno de tamaño micro en la microalga marina *Dunaliella salina*: centrándose en la relación entre la célula de algas y el tamaño de partícula de plástico]. *Aquatic Toxicology*, 216, 105296. <https://doi.org/10.1016/J.AQUATOX.2019.105296>

- Champenois, J., Marfaing, H., y Pierre, R. (2014). Review of the taxonomic revision of *Chlorella* and consequences for its food uses in Europe [Revisión de la revisión taxonómica de *Chlorella* y consecuencias para sus usos alimentarios en Europa]. *Journal of Applied Phycology*, 27(5), 1845–1851. <https://doi.org/10.1007/S10811-014-0431-2>
- Chen, F., Chen, Y., Pan, K., y Liu, H. (2024). Species-specific deformation of microalgae in the presence of microplastics [Deformación específica de las microalgas en presencia de microplásticos]. *Environmental Chemistry Letters*, 22(3), 953–959. <https://doi.org/10.1007/S10311-024-01699-2>
- Chen, J., Zhang, L., Wang, L., Kuang, M., Wang, S., y Yang, J. (2023). Toward carbon neutrality: Selective conversion of waste plastics into value-added chemicals [Hacia la neutralidad de carbono: Conversión selectiva de residuos plásticos en productos químicos de valor añadido]. *Matter*, 6(10), 3322–3347. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2023.07.025>
- Chen, S., Chmura, G., Wang, Y., Yu, D., Ou, D., Chen, B., Ye, Y., y Chen, G. (2019). Benthic microalgae offset the sediment carbon dioxide emission in subtropical mangrove in cold seasons [Las microalgas bentónicas compensan la emisión de dióxido de carbono de los sedimentos en los manglares subtropicales en las estaciones frías]. *Limnology and Oceanography*, 64(3), 1297–1308. <https://doi.org/10.1002/LNO.11116>
- Chen, Y., Ling, Y., Li, X., Hu, J., Cao, C., y He, D. (2020). Size-dependent cellular internalization and effects of polystyrene microplastics in microalgae *P. helgolandica* var. *Tsingtaoensis* and *S. quadricauda* [Internalización celular dependiente del tamaño y efectos de los microplásticos de poliestireno en microalgas *P. helgolandica* var. *Tsingtaoensis* y *S. quadricauda*]. *Journal of Hazardous Materials*, 399, 123092. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123092>
- Cheng, S., Jessica, Yoshikawa, K., y Cross, J. (2024). Influence of synthetic and natural microfibers on the growth, substance exchange, energy accumulation, and oxidative stress of field-collected microalgae compared with microplastic fragment [Influencia de las microfibras sintéticas y naturales en el crecimiento, el intercambio de sustancias, la acumulación de energía y el estrés oxidativo de las microalgas recolectadas en el campo en comparación con los fragmentos de microplásticos]. *Science of The Total Environment*, 908, 167936. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.167936>
- Choy, C., Robison, B., Gagne, T., Erwin, B., Firl, E., Halden, R., Hamilton, J., Katija, K., Lisin, S., Rolsky, C., y S. Van Houtan, K. (2019). The vertical distribution and biological transport of marine microplastics across the epipelagic and mesopelagic water column [La distribución vertical y el transporte biológico de microplásticos

marinos a través de la columna de agua epipelágica y mesopelágica]. *Scientific*. 9(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44117-2>

Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., y Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review [Microplásticos como contaminantes en el medio marino: una revisión]. *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), 2588–2597. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2011.09.025>

Comité de Plásticos de la Sociedad Nacional de Industrias. (2017). Percepción frente a los proyectos de ley sobre el plástico de un solo uso.

Coronado, J., Salazar, J., Juárez, B., y González, J. (2020). *Chlorella vulgaris*, a microalgae important to be used in Biotechnology: a review [*Chlorella vulgaris*, una microalga importante para su uso en Biotecnología: una revisión]. *Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1590/FST.37320>

Cox, K., Covernton, G., Davies, H., Dower, J., Juanes, F., y Dudas, S. (2019). Human Consumption of Microplastics [Consumo humano de microplásticos]. *Environmental Science & Technology*. 53(12), 7068–7074. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.9B01517>

Cunha, C., Lopes, J., Paulo, J., Faria, M., Kaufmann, M., Nogueira, N., Ferreira, A., y Cordeiro, N. (2020). The effect of microplastics pollution in microalgal biomass production: A biochemical study [El efecto de la contaminación por microplásticos en la producción de biomasa de microalgas: un estudio bioquímico]. *Water Research*. 186, 116370. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2020.116370>

Dabrowska, A., Łopata, I., y Osial, M. (2021). The ghost nets phenomena from the chemical perspective [El fantasma capta los fenómenos desde la perspectiva química]. *Pure and Applied Chemistry*, 93(4), 479–496. https://doi.org/10.1515/PAC-2020-1102/ASSET/GRAPHIC/J_PAC-2020-1102_FIG_012.JPG

Da Costa, M., Do Amaral Kehrig, H., y Da Silva Moreira, I. (2016). Bioaccumulation. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, 74–75. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8801-4_132

Daliry, S., Hallajisani, A., Mohammadi Roshandeh, J., Nouri, H., y Golzary, A. (2017). Investigation of optimal condition for *Chlorella vulgaris* microalgae growth [Investigación de la condición óptima para el crecimiento de microalgas *Chlorella vulgaris*]. *Global Journal of Environmental Science and Management*, (3). 2, Pp. 217–230. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2017.03.02.010>

- Darienko, T., Rad-Menéndez, C., Campbell, C., y Pröschold, T. (2019). Are there any true marine *Chlorella* species? Molecular phylogenetic assessment and ecology of marine *Chlorella*-like organisms, including a description of *Droopiella* gen. nov [¿Existen verdaderas especies marinas de *Chlorella*? Evaluación filogenética molecular y ecología de organismos marinos similares a *Chlorella*, incluida una descripción de *Droopiella* gen.]. *Systematics and Biodiversity*, 17(8), 811–829. <https://doi.org/10.1080/14772000.2019.1690597>
- Davarpanah, E., y Guilhermino, L. (2019). Are gold nanoparticles and microplastics mixtures more toxic to the marine microalgae *Tetraselmis chuii* than the substances individually? [¿Son las nanopartículas de oro y las mezclas de microplásticos más tóxicas para la microalga marina *Tetraselmis chuii* que las sustancias individualmente?]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 181, 60–68. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2019.05.078>
- De Morais, M., Da Silva Vaz, B., De Morais, E., y Vieira Costa, J. (2015). Biologically Active Metabolites Synthesized by Microalgae [Metabolitos biológicamente activos sintetizados por microalgas]. *BioMed Research International*. 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/835761>
- Eerkes-Medrano, D., Thompson, R., y Aldridge, D. (2015). Microplastics in freshwater systems: A review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs [Microplásticos en sistemas de agua dulce: una revisión de las amenazas emergentes, identificación de brechas de conocimiento y priorización de las necesidades de investigación]. *Water Research*. 75, 63–82. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2015.02.012>
- El-Sheekh, M., Gheda, S., El-Sayed, A., Abo Shady, A., El-Sheikh, M., y Schagerl, M. (2019). Outdoor cultivation of the green microalga *Chlorella vulgaris* under stress conditions as a feedstock for biofuel [Cultivo al aire libre de la microalga verde *Chlorella vulgaris* en condiciones de estrés como materia prima para biocombustible]. *Environmental Science and Pollution Research*. 26(18), 18520–18532. <https://doi.org/10.1007/S11356-019-05108-Y>
- Feng, L., Shi, Y., Li, X., Sun, X., Xiao, F., Sun, J., Wang, Y., Liu, X., Wang, S., y Yuan, X. (2020). Behavior of tetracycline and polystyrene nanoparticles in estuaries and their joint toxicity on marine microalgae *Skeletonema costatum* [Comportamiento de nanopartículas de tetraciclina y poliestireno en estuarios y su toxicidad conjunta sobre microalgas marinas *Skeletonema costatum*]. *Environmental Pollution*. 263, 114453. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114453>
- Fu, W., Gudmundsson, O., Feist, A. M., Herjolfsson, G., Brynjolfsson, S., y Palsson, B. (2012). Maximizing biomass productivity and cell density of *Chlorella vulgaris* by

- using light-emitting diode-based photobioreactor [Maximización de la productividad de la biomasa y la densidad celular de *Chlorella vulgaris* mediante el uso de un fotobiorreactor basado en diodos emisores de luz]. *Journal of Biotechnology*. 161(3), 242–249. <https://doi.org/10.1016/J.JBIOTEC.2012.07.004>
- Fu, D., Zhang, Q., Fan, Z., Qi, H., Wang, Z., y Peng, L. (2019). Aged microplastics polyvinyl chloride interact with copper and cause oxidative stress towards microalgae *Chlorella vulgaris* [Microplásticos envejecidos, el cloruro de polivinilo, interactúa con el cobre y causa estrés oxidativo hacia las microalgas *Chlorella vulgaris*]. *Aquatic Toxicology*, 216, 105319. <https://doi.org/10.1016/J.AQUATOX.2019.105319>
- Gambardella, C., Morgana, S., Bramini, M., Rotini, A., Manfra, L., Migliore, L., Piazza, V., Garaventa, F., y Faimali, M. (2018). Ecotoxicological effects of polystyrene microbeads in a battery of marine organisms belonging to different trophic levels [Efectos ecotoxicológicos de microperlas de poliestireno en una batería de organismos marinos pertenecientes a diferentes niveles tróficos]. *Marine Environmental Research*, 141, 313–321. <https://doi.org/10.1016/J.MARENRES.2018.09.023>
- Garrido, S., Linares, M., Campillo, J. A., y Albentosa, M. (2019). Effect of microplastics on the toxicity of *chlorpyrifos* to the microalgae *Isochrysis galbana*, clone t-ISO [Efecto de los microplásticos sobre la toxicidad del clorpirifós para la microalga *Isochrysis galbana*, clon t-ISO]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 173, 103–109. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2019.02.020>
- Gerken, H., Donohoe, B., y Knoshaug, E. (2012). Enzymatic cell wall degradation of *Chlorella vulgaris* and other microalgae for biofuels production [Degradación enzimática de la pared celular de *Chlorella vulgaris* y otras microalgas para la producción de biocombustibles]. *Planta*. 237(1), 239–253. <https://doi.org/10.1007/S00425-012-1765-0>
- Geyer, R., Jambeck, J., y Law, K. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made [Producción, uso y destino de todos los plásticos jamás fabricados]. *Science Advances*, 3(7). <https://doi.org/10.1126/SCIADV.1700782>
- Giraldez Alvarez, L., De Jesus, F., Lacerda Costa, A., Ferraz Bastos, L., Moura De Souza, D., y Gonçalves Da Silva, D. (2020). Efeitos dos microplásticos no meio ambiente: Um macroproblema emergente [Efectos de los microplásticos en el medio ambiente: un macroproblema emergente]. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 33, 100–107. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-75872020000100013&lng=es&tlng=es.

- Gómez, L., Tormos, L. y Ortega, Y. (2022). Cultivo y aplicaciones de *Chlorella vulgaris*: principales tendencias y potencialidades en la agricultura. *Tecnología Química*, 42(1), 70-93. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852022000100070&lng=es&tlng=es.
- Goncalves, E. C., Johnson, J. V., y Rathinasabapathi, B. (2013). Conversion of membrane lipid acyl groups to triacylglycerol and formation of lipid bodies upon nitrogen starvation in biofuel green algae *Chlorella* UTEX29 [Conversión de grupos acilo lipídicos de membrana en triacilglicerol y formación de cuerpos lipídicos tras la inanición de nitrógeno en algas verdes para biocombustible *Chlorella* UTEX29]. *Planta*. 238(5), 895–906. <https://doi.org/10.1007/S00425-013-1946-5>
- Gong, Q., Feng, Y., Kang, L., Luo, M., y Yang, J. (2014). Effects of Light and pH on Cell Density of *Chlorella Vulgaris* [Efectos de la luz y el pH sobre la densidad celular de *Chlorella vulgaris*]. *Energy Procedia*. 61, 2012–2015. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2014.12.064>
- González-Fernández, C., Le Grand, F., Bideau, A., Huvet, A., Paul-Pont, I., y Soudant, P. (2020). Nanoplastics exposure modulate lipid and pigment compositions in *diatoms* [La exposición a nanoplásticos modula la composición de lípidos y pigmentos en diatomeas]. *Environmental Pollution*. 262, 114274. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2020.114274>
- González-Pleiter, M., Velázquez, D., Edo, C., Carretero, O., Gago, J., Barón-Sola, Á., Hernández, L. E., Yousef, I., Quesada, A., Leganés, F., Rosal, R., y Fernández-Piñas, F. (2020). Fibers spreading worldwide: Microplastics and other anthropogenic litter in an Arctic freshwater lake [Fibras que se extienden por todo el mundo: microplásticos y otros desechos antropogénicos en un lago de agua dulce del Ártico]. *Science of The Total Environment*, 722, 137904. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.137904>
- Gooch, J. (2011). Vulcanization. *Encyclopedic Dictionary of Polymers*. 802–802. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6247-8_12651
- Gökçe, D. (2016). Algae as an Indicator of Water Quality [Las algas como indicador de la calidad del agua]. *Algae - Organisms for Imminent Biotechnology*. <https://doi.org/10.5772/62916>
- Green, D., Boots, B., Sigwart, J., Jiang, S., y Rocha, C. (2016). Effects of conventional and biodegradable microplastics on a marine ecosystem engineer (*Arenicola marina*) and sediment nutrient cycling [Efectos de los microplásticos convencionales y biodegradables en un ingeniero de ecosistemas marinos (*Arenicola marina*) y el ciclo

de nutrientes de los sedimentos]. *Environmental Pollution*. 208, 426–434. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2015.10.010>

Gröbner, J. (2012). Ultraviolet Radiation: Distribution and Variability. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. 11149–11158. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3_453

Guccione, A., Biondi, N., Sampietro, G., Rodolfi, L., Bassi, N., y Tredici, M. R. (2014). *Chlorella* for protein and biofuels: from strain selection to outdoor cultivation in a Green Wall Panel photobioreactor [*Chlorella* para proteínas y biocombustibles: de la selección de cepas al cultivo al aire libre en un fotobiorreactor Green Wall Panel]. *Biotechnology for Biofuels*. 7(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-7-84>

Guzzetti, E., Sureda, A., Tejada, S., y Faggio, C. (2018). Microplastic in marine organism: Environmental and toxicological effects [Microplásticos en organismos marinos: Efectos ambientales y toxicológicos]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*. 64, 164–171. <https://doi.org/10.1016/J.ETAP.2018.10.009>

Hadiyanto, H., Khoironi, A., Dianratri, I., Joelyna, F., Christwardana, M., Sabhira, A., y Baihaqi, R. (2025). Microplastic removal in aquatic systems using extracellular polymeric substances (EPS) of microalgae [Eliminación de microplásticos en sistemas acuáticos utilizando sustancias poliméricas extracelulares (EPS) de microalgas]. *Sustainable Environment*, 11(1). <https://doi.org/10.1080/27658511.2025.2454756>

Hahladakis, J., Velis, C., Weber, R., Iacovidou, E., y Purnell, P. (2018). An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling [Una visión general de los aditivos químicos presentes en los plásticos: migración, liberación, destino e impacto ambiental durante su uso, eliminación y reciclaje]. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 179–199. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2017.10.014>

Hartmann, N., Hüffer, T., Thompson, R., Hassellöv, M., Verschoor, A., Daugaard, A., Rist, S., Karlsson, T., Brennholt, N., Cole, M., Herrling, M., Hess, M., Ivleva, N., Lusher, A., y Wagner, M. (2019). Are We Speaking the Same Language? Recommendations for a Definition and Categorization Framework for Plastic Debris [¿Estamos hablando el mismo idioma? Recomendaciones para un marco de definición y categorización de los desechos plásticos]. *Environmental Science & Technology*. 53(3), 1039–1047. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.8B05297>

Hazeem, L., Yesilay, G., Bououdina, M., Perna, S., Cetin, D., Suludere, Z., Barras, A., y Boukherroub, R. (2020). Investigation of the toxic effects of different polystyrene micro-and nanoplastics on microalgae *Chlorella vulgaris* by analysis of cell viability,

pigment content, oxidative stress and ultrastructural changes [Investigación de los efectos tóxicos de diferentes micro y nanoplasticos de poliestireno sobre microalgas *Chlorella vulgaris* mediante el análisis de viabilidad celular, contenido de pigmentos, estrés oxidativo y cambios ultraestructurales]. *Marine Pollution Bulletin*. 156, 111278. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2020.111278>

Hernández R., Fernández C., y Baptista P. (2014). Metodología de la investigación. *Online Learning Center.*, 1–600. <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>

Hofbauer, W., y Gärtner, G. (2021). Aerophytic Organisms Colonizing Façades: Diversity, Taxonomy and Ecophysiology [Organismos que colonizan fachadas: diversidad, taxonomía y ecofisiología]. *Microbial life on Façades*. 29–191. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54833-2_3

Huang, D., Tao, J., Cheng, M., Deng, R., Chen, S., Yin, L., y Li, R. (2021). Microplastics and nanoplastics in the environment: Macroscopic transport and effects on creatures [Microplásticos y nanoplasticos en el medio ambiente: transporte macroscópico y efectos en las criaturas]. *Journal of Hazardous Materials*. 407, 124-399. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.124399>

Instituto de Estudios Económicos y Sociales [IEES] de la Sociedad Nacional de Industrias [SNI]. (2019). Reporte Sectorial N° 04 – 2019. https://www.sni.org.pe/wp-content/uploads/2019/07/Reporte-Sectorial-PI%C3%A1sticos_2019.pdf

Integrated Taxonomic Information System. (2021). ITIS Results *Chlorella*. <https://www.itis.gov/servlet/SingleRpt/SingleRpt>

Jang, M., Shim, W. J., Cho, Y., Han, G., Ha, S., y Hong, S. (2024). Hazardous chemical additives within marine plastic debris and fishing gear: Occurrence and implications [Aditivos químicos peligrosos en los desechos plásticos marinos y los aparejos de pesca: ocurrencia e implicaciones]. *Journal of Cleaner Production*, 442, 141115. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.141115>

Journal Citation Reports. Obtenido el 7 de enero de 2024 de <https://jcr-clarivate-com.uchile.idm.oclc.org/jcr-jp/journal-profile?journal=J%20HAZARD%20MATER&year=2022&fromPage=%2Fjcr%2Fhome>

Jung, M., Horgen, F., Orski, S., Rodriguez C., V., Beers, K., Balazs, G., Jones, T., Work, T. M., Brignac, K., Royer, S., Hyrenbach, K., Jensen, B., y Lynch, J. (2018). Validation

- of ATR FT-IR to identify polymers of plastic marine debris, including those ingested by marine organisms [Validación de ATR FT-IR para identificar polímeros de desechos marinos plásticos, incluidos los ingeridos por organismos marinos]. *Marine Pollution Bulletin*. 127, 704–716. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2017.12.061>
- Kaufman, A. (2014). Cyanobacteria at work [Cianobacterias en acción]. *Nature Geoscience* 2014 7:4, 7(4), 253-254. <https://doi.org/10.1038/ngeo2128>
- Kedzierski, M., Frère, D., Le Maguer, G., y Bruzaud, S. (2020). Why is there plastic packaging in the natural environment? Understanding the roots of our individual plastic waste management behaviours [¿Por qué hay envases de plástico en el entorno natural? Comprender las raíces de nuestros comportamientos individuales de gestión de residuos plásticos]. *Science of The Total Environment*. 740, 139985. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.139985>
- Kent, M., Welladsen, H. M., Mangott, A., y Li, Y. (2015). Nutritional Evaluation of Australian Microalgae as Potential Human Health Supplements [Evaluación nutricional de microalgas australianas como posibles suplementos para la salud humana]. *PLOS ONE*. 10(2), e0118985. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0118985>
- Khoeyi, Z., Seyfabadi, J., y Ramezanpour, Z. (2012). Effect of light intensity and photoperiod on biomass and fatty acid composition of the microalgae, *Chlorella vulgaris* [Efecto de la intensidad lumínica y del fotoperiodo sobre la biomasa y la composición de ácidos grasos de la microalga *Chlorella vulgaris*]. *Aquaculture International*. 20(1), 41–49. <https://doi.org/10.1007/s10499-011-9440-1>
- Kik, K., Bukowska, B., y Sicińska, P. (2020). Polystyrene nanoparticles: Sources, occurrence in the environment, distribution in tissues, accumulation and toxicity to various organisms [Nanopartículas de poliestireno: Fuentes, presencia en el medio ambiente, distribución en los tejidos, acumulación y toxicidad para diversos organismos]. *Environmental Pollution*. 262, 114-297. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2020.114297>
- Kim, L., Cui, R., Il Kwak, J., y An, Y. J. (2022). Trophic transfer of nanoplastics through a microalgae–crustacean–small yellow croaker food chain: Inhibition of digestive enzyme activity in fish [Transferencia trófica de nanoplasticos a través de una cadena trófica de microalgas-crustáceos-corvina amarilla: inhibición de la actividad enzimática digestiva en peces]. *Journal of Hazardous Materials*, 440, 129715. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2022.129715>

- Krienitz, L., Huss, V., y Bock, C. (2015). *Chlorella*: 125 years of the green survivalist [*Chlorella*: 125 años de la superviviente verde]. *Trends in Plant Science*. 20(2), 67–69. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.11.005>
- Kuczynski, B., y Kolakowsky-Hayner, S. (2011). Inhibition. *Encyclopedia of Clinical Neuropsychology*. 1319–1320. https://doi.org/10.1007/978-0-387-79948-3_2092
- Kusi, J., Scheuerman, P., y Maier, K. (2020). Emerging environmental contaminants (silver nanoparticles) altered the catabolic capability and metabolic fingerprinting of microbial communities [Los contaminantes ambientales emergentes (nanopartículas de plata) alteraron la capacidad catabólica y la huella metabólica de las comunidades microbianas] *Aquatic Toxicology*. 228, 105-633. <https://doi.org/10.1016/J.AQUATOX.2020.105633>
- Lambert, S. (2013). *Environmental risk of polymers and their degradation products*. [PhD thesis, University of York]. White Rose eTheses Online, a shared repository of electronic theses. <https://etheses.whiterose.ac.uk/4194/>
- Lambert, S., y Wagner, M. (2018). Microplastics Are Contaminants of Emerging Concern in Freshwater Environments: An Overview [Los microplásticos son contaminantes de preocupación emergente en los entornos de agua dulce: una visión general]. *Handbook of Environmental Chemistry*. 58, 1–23. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61615-5_1
- Lebreton, L., Egger, M., y Slat, B. (2019). A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean [Un presupuesto masivo global para desechos macroplásticos de flotación positiva en el océano]. *Scientific Reports*. 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49413-5>
- Leng, P., Yu, H., Wang, X., Li, D., Feng, J., Liu, J., y Xu, C. (2024). Effects of different concentrations and particle sizes of microplastics on the full life history of freshwater *Chlorella* [Efectos de las diferentes concentraciones y tamaños de partícula de los microplásticos en la historia de vida completa de *Chlorella* de agua dulce]. *Environmental Pollution*, 344, 123349. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2024.123349>
- Li, S., Wang, P., Zhang, C., Zhou, X., Yin, Z., Hu, T., Hu, D., Liu, C., y Zhu, L. (2020). Influence of polystyrene microplastics on the growth, photosynthetic efficiency and aggregation of freshwater microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* [Influencia de los microplásticos de poliestireno en el crecimiento, la eficiencia fotosintética y la agregación de microalgas de agua dulce *Chlamydomonas reinhardtii*]. *Science of The Total Environment*. 714, 136-767. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.136767>

- Li, W., Tse, H., y Fok, L. (2016). Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects [Residuos plásticos en el medio marino: una revisión de las fuentes, la presencia y los efectos]. *Science of The Total Environment*. 566–567, 333–349. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2016.05.084>
- Liao, Y., Jiang, X., Xiao, Y., y Li, M. (2020). Exposure of microalgae *Euglena gracilis* to polystyrene microbeads and cadmium: Perspective from the physiological and transcriptional responses [Exposición de la microalga *Euglena gracilis* a microperlas de poliestireno y cadmio: Perspectiva desde las respuestas fisiológicas y transcripcionales]. *Aquatic Toxicology*. 228, 105-650. <https://doi.org/10.1016/J.AQUATOX.2020.105650>
- Liu, J., y Chen, F. (2014). Biology and Industrial Applications of *Chlorella*: Advances and Prospects [Biología y Aplicaciones Industriales de la *Chlorella*: Avances y Perspectivas]. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*. 153, 1–35. https://doi.org/10.1007/10_2014_286
- Liu, Y., Wang, Z., Wang, S., Fang, H., Ye, N., y Wang, D. (2019). Ecotoxicological effects on *Scenedesmus obliquus* and *Danio rerio* Co-exposed to polystyrene nano-plastic particles and natural acidic organic polymer [Efectos ecotoxicológicos sobre *Scenedesmus obliquus* y *Danio rerio* Co-expuestos a partículas nanoplásticas de poliestireno y polímeros orgánicos ácidos naturales]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 67, 21–28. <https://doi.org/10.1016/J.ETAP.2019.01.007>
- Lizzul, A., Lekuona-Amundarain, A., Purton, S., y Campos, L. (2018). Characterization of *Chlorella sorokiniana*, UTEX 1230 [Caracterización de *Chlorella sorokiniana*, UTEX 1230]. *Biology*. 7(2), 25. <https://doi.org/10.3390/BIOLOGY7020025>
- Lu, X., y Wang, Z. (2024). Molecular mechanism for combined toxicity of micro(nano)plastics and carbon nanofibers to freshwater microalgae *Chlorella pyrenoidosa* [Mecanismo molecular de la toxicidad combinada de micro(nano)plásticos y nanofibras de carbono para las microalgas de agua dulce *Chlorella pyrenoidosa*]. *Environmental Pollution*, 344, 123403. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2024.123403>
- Mammo, F., Amoah, I., Gani, K., Pillay, L., Ratha, S., Bux, F., y Kumari, S. (2020). Microplastics in the environment: Interactions with microbes and chemical contaminants [Microplásticos en el medio ambiente: interacciones con microbios y contaminantes químicos]. *Science of The Total Environment*. 743, 140-518. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.140518>
- Maurice, N. (2021). Bioenergy Production: Opportunities for Microorganisms (Part I) [Producción de Bioenergía: Oportunidades para los Microorganismos (Parte I)]

- Maz-Courrau, A., López-Vera, C., Galván-Magaña, F., Escobar-Sánchez, O., Rosiles-Martínez, R., y Sanjuán-Muñoz, A. (2011). Bioaccumulation and Biomagnification of Total Mercury in Four Exploited Shark Species in the Baja California Peninsula, Mexico [Bioacumulación y biomagnificación de mercurio total en cuatro especies de tiburones explotadas en la península de Baja California, México]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 88(2), 129–134. <https://doi.org/10.1007/S00128-011-0499-1>
- Mezzelani, M., Gorbi, S., y Regoli, F. (2018). Pharmaceuticals in the aquatic environments: Evidence of emerged threat and future challenges for marine organisms [Productos farmacéuticos en el medio acuático: evidencia de la amenaza emergente y los desafíos futuros para los organismos marinos]. *Marine Environmental Research*. 140, 41–60. <https://doi.org/10.1016/J.MARENRES.2018.05.001>
- Miloloža, M., Bule, K., Ukić, Š., Cvetnić, M., Bolanča, T., Kušić, H., Bulatović, V., y Grgić, D. (2021). Ecotoxicological Determination of Microplastic Toxicity on Algae *Chlorella* sp.: Response Surface Modeling Approach [Determinación ecotoxicológica de la toxicidad de microplásticos en algas *Chlorella* sp.: Enfoque de modelado de superficie de respuesta]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 232(8), 1–16. <https://doi.org/10.1007/S11270-021-05267-0/TABLES/2>
- Mohamed, A., y Paleologos, E. (2018). Emerging Pollutants: Fate, Pathways, and Bioavailability [Contaminantes emergentes: destino, vías y biodisponibilidad]. *Fundamentals of Geoenvironmental Engineering*. 327–358. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804830-6.00010-7>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., y Altman, D. (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement [Elementos de información preferidos para revisiones sistemáticas y metaanálisis: la declaración PRISMA]. *PLoS Medicine*. 6(7), e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Moreno, B., Muñoz, M., Cuellar, J., Domancic, S., y Villanueva, J. (2018). Revisiones Sistemáticas: definición y nociones básicas. *Revista clínica de periodoncia, implantología y rehabilitación oral*. 11(3), 184–186. <https://doi.org/10.4067/s0719-01072018000300184>
- Mujtaba, G., Choi, W., Lee, C., y Lee, K. (2012). Lipid production by *Chlorella vulgaris* after a shift from nutrient-rich to nitrogen starvation conditions [Producción de lípidos por *Chlorella vulgaris* después de un cambio de condiciones ricas en

nutrientes a condiciones de inanición de nitrógeno]. *Bioresource Technology*. 123, 279–283. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2012.07.057>

Nasser, A., Sheekh, M., Zeineldein, M., Al Maghraby, D., y Hassan, I. (2022). Physiological, morphological, and growth effects of microplastics on freshwater alga *Chlorella vulgaris* [Efectos fisiológicos, morfológicos y de crecimiento de los microplásticos en el alga de agua dulce *Chlorella vulgaris*]. *Rendiconti Lincei*, 33(4), 815-821. <https://doi.org/10.1007/S12210-022-01104-6>

Nava, V., y Leoni, B. (2021). A critical review of interactions between microplastics, microalgae and aquatic ecosystem function [Una revisión crítica de las interacciones entre los microplásticos, las microalgas y la función de los ecosistemas acuáticos]. *Water Research*, 188, 116476. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2020.116476>

Parsai, T., Figueiredo, N., Dalvi, V., Martins, M., Malik, A., y Kumar, A. (2022). Implication of microplastic toxicity on functioning of microalgae in aquatic system [Implicación de la toxicidad de los microplásticos en el funcionamiento de las microalgas en el sistema acuático]. *Environmental Pollution*, 308, 119626. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119626>

Patrício Silva, A., Prata, J., Walker, T., Duarte, A., Ouyang, W., Barcelò, D., y Rocha-Santos, T. (2021). Increased plastic pollution due to COVID-19 pandemic: Challenges and recommendations [Aumento de la contaminación plástica por la pandemia de COVID-19: retos y recomendaciones]. *Chemical Engineering Journal*. 405, 126-683. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2020.126683>

Peng, Y., Wu, P., Schartup, A., y Zhang, Y. (2021). Plastic waste release caused by COVID-19 and its fate in the global ocean [La liberación de residuos plásticos causada por la COVID-19 y su destino en el océano mundial]. *Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences*. 118(47), e2111530118. <https://doi.org/10.1073/PNAS.2111530118>

Phukan, M., Chutia, R., Konwar, B., y Kataki, R. (2011). Microalgae *Chlorella* as a potential bio-energy feedstock [Microalgas *Chlorella* como potencial materia prima bioenergética]. *Applied Energy*. 88(10), 3307–3312. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2010.11.026>

Pirsaheb, M., Hossini, H., y Makhdoumi, P. (2020). Review of microplastic occurrence and toxicological effects in marine environment: Experimental evidence of inflammation [Revisión de la presencia de microplásticos y efectos toxicológicos en el medio marino: evidencia experimental de inflamación]. *Process Safety and Environmental Protection*. 142, 1–14. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2020.05.050>

- PlasticsEurope. (2020). Plastics - the Facts 2020 Green Growth Knowledge Platform. <https://plasticseurope.org/es/knowledge-hub/plasticos-situacion-en-2020/>
- Politaeva, N., Ilin, I., Velmozhina, K., y Shinkevich, P. (2023). Carbon Dioxide Utilization Using Chlorella Microalgae [Utilización de dióxido de carbono con microalgas Chlorella]. *Environments* 2023, Vol. 10, Page 109, 10(7), 109. <https://doi.org/10.3390/ENVIRONMENTS10070109>
- Prabakaran, G., Moovendhan, M., Arumugam, A., Matharasi, A., Dineshkumar, R., y Sampathkumar, P. (2018). Evaluation of Chemical Composition and In Vitro Antiinflammatory Effect of Marine Microalgae *Chlorella vulgaris* [Evaluación de la composición química y el efecto antiinflamatorio in vitro de la microalga marina *Chlorella vulgaris*]. *Waste and Biomass Valorization*. 10(11), 3263–3270. <https://doi.org/10.1007/S12649-018-0370-2>
- Prata, J. (2016). Avaliação da toxicidade do antibiótico doxiciclina isoladamente e na presença de microplásticos na microalga marinha *Tetraselmis chuii*. [Dissertation de Master's Degree, Instituto de Ciências Biomédicas de Abel Salazar]. Repositório Aberto da Universidade do Porto. <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/83847>
- Prata, J., da Costa, J., Lopes, I., Andrady, A., Duarte, A., y Rocha-Santos, T. (2021). A One Health perspective of the impacts of microplastics on animal, human and environmental health [Una perspectiva de «Una sola salud» sobre los impactos de los microplásticos en la salud animal, humana y ambiental]. *Science of The Total Environment*. 777, 14-94. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.146094>
- Prata, J. , Da Costa, J., Lopes, I., Duarte, A., y Rocha-Santos, T. (2019). Effects of microplastics on microalgae populations: A critical review [Efectos de los microplásticos en las poblaciones de microalgas: una revisión crítica]. *Science of The Total Environment*. 665, 400–405. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.02.132>
- Ramos, C. (2020). Los Alcances de una investigación. *CienciAmérica*, 9(3) 1–6. <http://dx.doi.org/10.33210/ca.v9i3.336>
- Rampino, M. (2019). Erosion Processes. En C. W. Finkl y C. Makowski (Eds.) *Encyclopedia of Coastal Science*. 790-792. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93806-6_139
- Rani-Borges, B., Moschini-Carlos, V., y Pompêo, M. (2021). Microplastics and freshwater microalgae: what do we know so far? [Microplásticos y microalgas de agua dulce:

¿qué sabemos hasta ahora?] *Aquatic Ecology*, 55(2), 363–377.
<https://doi.org/10.1007/S10452-021-09834-9>

Reichelt, S., y Gorokhova, E. (2020). Micro- and Nanoplastic Exposure Effects in Microalgae: A Meta-Analysis of Standard Growth Inhibition Tests [Efectos de la exposición a micro y nanoplásticos en microalgas: un metaanálisis de las pruebas estándar de inhibición del crecimiento]. *Frontiers in Environmental Science*. 0, 131.
<https://doi.org/10.3389/FENV.S.2020.00131>

Rocha-Santos, T., y Duarte, A. (Eds). (2017). Characterization and Analysis of Microplastics [Caracterización y análisis de Microplásticos]. *Comprehensive Analytical Chemistry*. (75). [https://doi.org/10.1016/S0166-526X\(17\)30014-4](https://doi.org/10.1016/S0166-526X(17)30014-4)

Ru, I., Sung, Y., Jusoh, M., Wahid, M., y Nagappan, T. (2020). *Chlorella vulgaris*: a perspective on its potential for combining high biomass with high value bioproducts [*Chlorella vulgaris*: una perspectiva sobre su potencial para combinar biomasa elevada con bioproductos de alto valor]. 1(1), 2–11.
<https://doi.org/10.1080/26388081.2020.1715256>

Safi, C., Zebib, B., Merah, O., Pontalier, P., y Vaca-Garcia, C. (2014). Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review [Morfología, composición, producción, procesamiento y aplicaciones de *Chlorella vulgaris*: una revisión]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 35, 265–278.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.04.007>

Ścieszka, S., Gorzkiewicz, M., y Klewicka, E. (2021). Innovative fermented soya drink with the microalgae *Chlorella vulgaris* and the probiotic strain *Levilactobacillus brevis* [Innovadora bebida de soja fermentada con la microalga *Chlorella vulgaris* y la cepa probiótica *Levilactobacillus brevis*]. *LWT*. 151, 112–131.
<https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.112131>

Senousy, H., Khairy, H., El-Sayed, H., Sallam, E., El-Sheikh, M., y Elshobary, M. (2023). Interactive adverse effects of low-density polyethylene microplastics on marine microalga *Chaetoceros calcitrans*. [Efectos adversos interactivos de los microplásticos de polietileno de baja densidad en las microalgas marinas *Chaetoceros calcitrans*] *Chemosphere*, 311, 137182.
<https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.137182>

Shankar, K., y Mehendale, H. M. (2014). Oxidative Stress. *Encyclopedia of Toxicology: Third Edition*, 735–737. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00345-6>

- Shanmugam, S., Mathimani, T., Anto, S., Sudhakar, M. P., Kumar, S. S., y Pugazhendhi, A. (2020). Cell density, Lipidomic profile, and fatty acid characterization as selection criteria in bioprospecting of microalgae and cyanobacterium for biodiesel production [Densidad celular, perfil lipídico y caracterización de ácidos grasos como criterios de selección en la bioprospección de microalgas y cianobacterias para la producción de biodiesel]. *Bioresource Technology*. 304, 12-61. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2020.123061>
- Sharif, N., Munir, N., Naz, S., Iqbal, R., y Rauf, W. (2017). Origin of Algae and Their Plastids. Algae Based Polymers, Blends, and Composites [Origen de las algas y sus plástidos. Polímeros, mezclas y compuestos a base de algas]. *Chemistry, Biotechnology and Materials Science*. 77–113. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812360-7.00004-5>
- Siddaway, A. P., Wood, A. M., y Hedges, L. V. (2019). How to Do a Systematic Review: A Best Practice Guide for Conducting and Reporting Narrative Reviews [Cómo hacer una revisión sistemática: una guía de mejores prácticas para realizar y reportar revisiones narrativas]. *Meta-Analyses, and Meta-Syntheses*. 70, 747–770. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-PSYCH-010418-102803>
- Simul Bhuyan, M., Venkatramanan, S., Selvam, S., Szabo, S., Maruf Hossain, M., Rashed-Un-Nabi, M., Paramasivam, C. R., Jonathan, M. P., y Shafiqul Islam, M. (2021). Plastics in marine ecosystem: A review of their sources and pollution conduits [Plásticos en el ecosistema marino: una revisión de sus fuentes y conductos de contaminación]. *Regional Studies in Marine Science*. 41, 101539. <https://doi.org/10.1016/J.RSMA.2020.101539>
- Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos [SIGERSOL]. (2020). Reporte: Generación total de Residuos Sólidos Domiciliarios. <https://sigersol.minam.gob.pe/>
- Sjollema, S. B., Redondo-Hasselerharm, P., Leslie, H. A., Kraak, M. H. S., y Vethaak, A. D. (2016). Do plastic particles affect microalgal photosynthesis and growth? [¿Afectan las partículas de plástico a la fotosíntesis y el crecimiento de las microalgas?]. *Aquatic Toxicology*. 170, 259–261. <https://doi.org/10.1016/J.AQUATOX.2015.12.002>
- Sociedad Nacional de Industrias [SNI]. (2021). Quienes Somos. <https://sni.org.pe/quienes-somos/>
- Song, W., Fu, C., Fang, Y., Wang, Z., Li, J., Zhang, X., Bhatt, K., Liu, L., Wang, N., Liu, F., y Zhu, S. (2023). Single and combined toxicity assessment of primary or UV-aged microplastics and adsorbed organic pollutants on microalga *Chlorella pyrenoidosa*.

- Souza, A. S., Bezerra, M. A., Cerqueira, U. M. F. M., Rodrigues, C. J. O., Santos, B. C., Novaes, C. G., y Almeida, E. R. V. (2024). An introductory review on the application of principal component analysis in the data exploration of the chemical analysis of food samples [Una revisión introductoria sobre la aplicación del análisis de componentes principales en la exploración de datos del análisis químico de muestras de alimentos]. *Food Science and Biotechnology*, 33(6), 1323-1336. <https://doi.org/10.1007/S10068-023-01509-5/TABLES/3>
- Sridharan, S., Kumar, M., Bolan, N. S., Singh, L., Kumar, S., Kumar, R., y You, S. (2021). Are microplastics destabilizing the global network of terrestrial and aquatic ecosystem services? [¿Están los microplásticos desestabilizando la red mundial de servicios ecosistémicos terrestres y acuáticos?]. *Environmental Research*. 198, 111-243. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2021.111243>
- Sutton, I. (2017). Personal Protective Equipment [Equipo de protección personal]. *Plant Design and Operations*, 401–415. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812883-1.00014-0>
- Thompson, R. (2015). Microplastics in the Marine Environment: Sources, Consequences and Solutions [Microplásticos en el medio marino: fuentes, consecuencias y soluciones]. *Marine Anthropogenic Litter*. 185–200. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_7
- Thompson, E., Wu, H., Melloni, C., Balevic, S., Sullivan, J., Laughon, M., Clark, K., Kalra, R., Mendley, S., Payne, E., Erinjeri, J., Gelber, C., Harper, B., Cohen-Wolkowicz, M., y Hornik, C. (2019). Population pharmacokinetics of doxycycline in children. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 63(12). <https://doi.org/10.1128/AAC.01508-19>
- Thompson, R., Moore, C., Saal, F., y Swan, S. (2009). Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends [Plásticos, medio ambiente y salud humana: consenso actual y tendencias futuras]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2153. <https://doi.org/10.1098/RSTB.2009.0053>
- Ugwu, K., Herrera, A., y Gómez, M. (2021). Microplastics in marine biota: A review [Microplásticos en la biota marina: una revisión]. *Marine Pollution Bulletin*. 169, 112-540. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2021.112540>

- Unuofin, J. O., Falade, A. O., y Aladekoyi, O. J. (2021). Applications of microbial laccases in bioremediation of environmental pollutants: potential issues, challenges, and prospects [Aplicaciones de lacasas microbianas en la biorremediación de contaminantes ambientales: posibles problemas, desafíos y perspectivas]. *Bioremediation for Environmental Sustainability*, 519–540. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820524-2.00021-3>
- Van Eck, N. J., Waltman, L., Dekker, R., y Van Den Berg, J. (2010). A comparison of two techniques for bibliometric mapping: Multidimensional scaling and VOS [Revista de la Sociedad Americana de Ciencia y Tecnología de la Información]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 61(12), 2405-2416. <https://doi.org/10.1002/ASI.21421>
- Vázquez-Rodríguez, G. (2019). Los Microplásticos textiles (o la increíble historia de cómo tu suéter termina en el salero). *Ciencia*. 70(1), 56-63
- Waller, C. L., Griffiths, H. J., Waluda, C. M., Thorpe, S. E., Loaiza, I., Moreno, B., Pacherrres, C. O., y Hughes, K. A. (2017). Microplastics in the Antarctic marine system: An emerging area of research [Microplásticos en el sistema marino antártico: un área emergente de investigación]. *Science of The Total Environment*. 598, 220–227. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.03.283>
- Wan, J. K., Chu, W. L., Kok, Y. Y., y Lee, C. S. (2021). Influence of polystyrene microplastic and nanoplastic on copper toxicity in two freshwater microalgae. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(25), 33649–33668. <https://doi.org/10.1007/S11356-021-12983-X>
- Wang, Q., Wangjin, X., Zhang, Y., Wang, N., Wang, Y., Meng, G., y Chen, Y. (2020). The toxicity of virgin and UV-aged PVC microplastics on the growth of freshwater algae *Chlamydomonas reinhardtii* [La toxicidad de los microplásticos de PVC vírgenes y envejecidos por UV en el crecimiento de algas de agua dulce *Chlamydomonas reinhardtii*]. *Science of The Total Environment*. 749, 141603. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.141603>
- Wu, M., Jiang, Y., Kwong, R. W. M., Brar, S. K., Zhong, H., y Ji, R. (2021). How do humans recognize and face challenges of microplastic pollution in marine environments? A bibliometric analysis [¿Cómo reconocen los seres humanos y se enfrentan a los desafíos de la contaminación por microplásticos en los entornos marinos? Un análisis bibliométrico]. *Environmental Pollution*. 280, 116-959. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2021.116959>
- Wu, Y., Guo, P., Zhang, X., Zhang, Y., Xie, S., y Deng, J. (2019). Effect of microplastics exposure on the photosynthesis system of freshwater algae [Efecto de la exposición

- a microplásticos en el sistema de fotosíntesis de algas de agua dulce]. *Journal of Hazardous Materials*, 374, 219–227. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2019.04.039>
- Wurm, F. R., Spierling, S., Endres, H.-J., y Barner, L. (2020). Plastics and the Environment-Current Status and Challenges in Germany and Australia [Plásticos y medio ambiente: situación actual y desafíos en Alemania y Australia]. *Macromolecular Rapid Communications*, 41(18), 200-351. <https://doi.org/10.1002/MARC.202000351>
- Xiao, Y., Jiang, X., Liao, Y., Zhao, W., Zhao, P., y Li, M. (2020). Adverse physiological and molecular level effects of polystyrene microplastics on freshwater microalgae [Efectos adversos a nivel fisiológico y molecular de los microplásticos de poliestireno en las microalgas de agua dulce]. *Chemosphere*, 255, 126-914. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.126914>
- Xie, X., Chen, L., Shao, S., Zhou, Y., Wu, J., Zhou, Q., y Luo, S. (2024). Growth inhibition and toxic effects of microplastics on *Chlorella vulgaris* [Inhibición del crecimiento y efectos tóxicos de los microplásticos sobre *Chlorella vulgaris*]. *Algal Research*, 78, 103378. <https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2023.103378>
- Yang, W., Gao, X., Wu, Y., Wan, L., Tan, L., Yuan, S., Ding, H., y Zhang, W. (2020). The combined toxicity influence of microplastics and nonylphenol on microalgae *Chlorella pyrenoidosa* [Influencia combinada de la toxicidad de los microplásticos y el nonilfenol en las microalgas *Chlorella pyrenoidosa*]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 195, 110484. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2020.110484>
- Yuan, Q., Li, H., Wei, Z., Lv, K., Gao, C., Liu, Y., y Zhao, L. (2020). Isolation, structures and biological activities of polysaccharides from *Chlorella*: A review [Aislamiento, estructuras y actividades biológicas de los polisacáridos de *Chlorella*: una revisión]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 163, 2199–2209. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2020.09.080>
- Zhang, C., Chen, X., Wang, J., y Tan, L. (2017). Toxic effects of microplastic on marine microalgae *Skeletonema costatum*: Interactions between microplastic and algae [Efectos tóxicos de los microplásticos en las microalgas marinas *Skeletonema costatum*: Interacciones entre microplásticos y algas]. *Environmental Pollution*, 220, 1282–1288. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2016.11.005>
- Zhang, F., Wang, Z., Song, L., Fang, H., y Wang, D. G. (2020). Aquatic toxicity of iron-oxide-doped microplastics to *Chlorella pyrenoidosa* and *Daphnia magna* [Toxicidad acuática de los microplásticos dopados con óxido de hierro para *Chlorella*

pyrenoidosa y *Daphnia magna*]. *Environmental Pollution*. 257, 113-451. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2019.113451>

Zhao, T., Tan, L., Zhu, X., Huang, W., y Wang, J. (2020). Size-dependent oxidative stress effect of nano/micro-scaled polystyrene on *Karenia mikimotoi* [Efecto del estrés oxidativo dependiente del tamaño del poliestireno a nano/microescala en *Karenia mikimotoi*]. *Marine Pollution Bulletin*. 154, 11-74. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2020.111074>

Zhao, Z., Zheng, X., Han, Z., Li, Y., He, H., Lin, T., y Xu, H. (2024). Polystyrene microplastics enhanced the effect of PFOA on *Chlorella sorokiniana*: Perspective from the cellular and molecular levels [Los microplásticos de poliestireno potenciaron el efecto del PFOA sobre la *Chlorella sorokiniana*: Perspectiva desde los niveles celular y molecular]. *Journal of Hazardous Materials*, 465, 133455. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2024.133455>

Zheng, X., Zhang, W., Yuan, Y., Li, Y., Liu, X., Wang, X., y Fan, Z. (2021). Growth inhibition, toxin production and oxidative stress caused by three microplastics in *Microcystis aeruginosa* [Inhibición del crecimiento, producción de toxinas y estrés oxidativo causado por tres microplásticos en *Microcystis aeruginosa*]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 208, 111-575. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2020.111575>

Zheng, Y., Li, J., Cao, W., Liu, X., Jiang, F., Ding, J., Yin, X., y Sun, C. (2019). Distribution characteristics of microplastics in the seawater and sediment: A case study in Jiaozhou Bay, China [Características de distribución de los microplásticos en el agua de mar y los sedimentos: un estudio de caso en la bahía de Jiaozhou, China]. *Science of The Total Environment*. 674, 27-35. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.04.008>

Zhou, K., Hu, Y., Zhang, L., Yang, K., y Lin, D. (2016). The role of exopolymeric substances in the bioaccumulation and toxicity of Ag nanoparticles to algae [El papel de las sustancias exopoliméricas en la bioacumulación y toxicidad de las nanopartículas de Ag para las algas]. *Scientific Reports* 6(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/srep32998>

Zhou, S., Li, W., y He, S. (2023). Microalgal diversity enhances water purification efficiency in experimental microcosms [La diversidad de microalgas mejora la eficiencia de la purificación del agua en microcosmos experimentales]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11, 1125743. <https://doi.org/10.3389/FEVO.2023.1125743/BIBTEX>

TERMINOLOGÍA

Abrasión. Erosión que produce desgaste mecánico y triturado de superficies por fricción e impacto de partículas. La corrosión es un tipo de abrasión causada por arena, grava y rocas movidas por las olas (Rampino, 2019).

Bifenilos policlorados (PCBs). Compuestos orgánicos sintéticos líquidos o sólidos formados por alrededor de 209 sustancias comunes (congéneres), son incoloros o de tonos amarillos claros y se consideran sustancias tóxicas (Unuofin *et al.*, 2021).

Bioacumulación. Aglomeración de contaminantes o metabolitos en tejidos de organismos vivos (animales o vegetales), durante el tiempo de exposición al material presente en su entorno (Da Costa *et al.*, 2016).

Biomagnificación. Incremento de la concentración de una sustancia persistente a lo largo de la cadena alimentaria, donde los depredadores de altos niveles acumulan la mayor concentración de dicho material (Maz-Courrau *et al.*, 2012).

Doxiciclina. Antibiótico de tetraciclina más eficaz y una farmacocinética muy ventajosa. Es la tetraciclina de elección requerida para un paciente con insuficiencia renal (Thompson *et al.*, 2019).

Equipos de protección personal (EPPs). Prendas o accesorios especializados, como ropa, cascos, guantes, etc., los cuales cumplen una función protectora contra diversos peligros, mecánicos, químicos y biológicos (Sutton, 2017).

Estrés oxidativo. Desequilibrio de la producción de radicales libres, metabolitos reactivos de especies reactivas de oxígeno (ROS) y su eliminación por mecanismos protectores (antioxidantes) (Shankar y Mehendale, 2014).

Factor de impacto de 5 años. Promedio de citas de artículos de una revista en los últimos cinco, este se calcula dividiendo el número de citas anual entre el total de artículos publicados en ese período (Journal Citation Reports, 2024).

Industria petroquímica. Comprende diferentes procesos que, mediante conversión química y separaciones físicas, producen una gama de productos, como olefinas ligeras y aromáticos, a partir del petróleo (Bernardo, 2016).

Inhibición. Limitación en un proceso específico, que en fisiología puede ser una respuesta motora o fisiológica restringida o amortiguada y capaz de detener un efecto (Kuczynski y Kolakowsky-Hayner, 2011).

Radiación ultravioleta. Ingresa a la atmósfera, llega a la superficie de la Tierra se dispersa y absorbe, aunque representa una pequeña fracción de la energía solar, es lo suficientemente energética para afectar tejido biológico y romper enlaces de ADN (Gröbner, 2012).

Vulcanización. Reacción química que produce el cambio de las propiedades físicas del caucho, cambia sus características haciéndolo menos pegajoso y aumentando su resistencia a la tracción (Gooch, 2011).

APÉNDICES

Apéndice 1

Matriz de artículos seleccionados para la revisión sistemática

N°	Título del artículo	Autores	Año de publicación	Base de datos	Tipo de microplástico	Origen	Tamaño de microplástico (µm)	DOI
1	Physiological, morphological, and growth effects of microplastics on freshwater alga <i>Chlorella vulgaris</i>	Amani MW Nasser ,Mostafa M. El Sheekh ,Marwa H. Zeineldein ,Dalia M. Al Maghraby & Ibrahim A. Hassan	2022	WOS	plásticos en polvo (POLV)	Compañía Aldrich	≤100	doi.org/10.1007/s12210-022-01104-6
2	Effect of microplastics PAN polymer and/or Cu ²⁺ pollution on the growth of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Lin, W; Su, F; Lin, MZ; Jin, MF; Li, YH; Ding, KW; Chen, QH; Qian, QR; Sun, XL	2020	WOS	PAN	Centro de Investigación de Ingeniería de Reciclaje Verde de Polímeros del Ministerio de Educación de la Universidad Normal de Fujian	0,05 - 0,8	doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114985

N°	Título del artículo	Autores	Año de publicación	Base de datos	Tipo de microplástico	Origen	Tamaño de microplástico (µm)	DOI
3	Ecotoxicological Determination of Microplastic Toxicity on Algae <i>Chlorella</i> sp.: Response Surface Modeling Approach	Miloloza, M; Bule, K; Ukic, S; Cvetnic, M; Bolanca, T; Kusic, H; Bulatovic, VO; Grgic, DK	2021	WOS	PS	Artículos de plástico (bolsas de plástico, cucharas, cuchillos, botellas y cajas de embalaje)	200 - 400 - 600	doi.org/10.1007/s11270-021-05267-0
4	Chronic toxic effects of polystyrene microplastics, DCOIT and their combination on marine <i>Chlorella</i> sp	Ru, JC; Zhao, XL; Cao, ZH; Chen, CZ; Li, P; Li, ZH	2022	WOS	PS	Wuxi Rigel Biotechnology Co., Ltd.	0,2	doi.org/10.1016/j.cbpc.2022.109426
5	Effect of microplastics and microplastic-metal combinations on growth and chlorophyll a concentration of <i>Chlorella vulgaris</i>	Tunali, M; Uzoefuna, EN; Tunali, MM; Yenigun, O	2020	WOS	PS	Sigma-Aldrich (Número de producto: 59769; no fluorescente)	0,5	doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140479
6	Distinct responses of <i>Chlorella vulgaris</i> upon combined exposure to microplastics and bivalent zinc	Li, YX; Liu, ST; Ji, ZY; Sun, J; Liu, XH	2023	WOS	PE - PVC	Zhongxin Plastics Co., Ltd (Dongguan, China)	6,5	doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130137

N°	Título del artículo	Autores	Año de publicación	Base de datos	Tipo de microplástico	Origen	Tamaño de microplástico (µm)	DOI
7	Aged microplastics polyvinyl chloride interact with copper and cause oxidative stress towards microalgae <i>Chlorella vulgaris</i>	Fu, DD; Zhang, QJ; Fan, ZQ; Qi, HY; Wang, ZZ; Peng, LC	2019	WOS	PVC virgen	Aladdin industrial corporation, Shanghai, China)	97 - 139 - 197	doi.org/10.1016/j.aquatox.2019.105319
8	Different interaction performance between microplastics and microalgae: The bio-elimination potential of <i>Chlorella</i> sp. L38 and <i>Phaeodactylum tricornutum</i> MASCC-0025	Song, CF; Liu, ZZ; Wang, CL; Li, SH; Kitamura, Y	2020	WOS	PE - PP - PET - PVC	Dongguan Xingwang Material of Plastics Co. Ltd	74	doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138146
9	Biodegradable and conventional microplastics posed similar toxicity to marine algae <i>Chlorella vulgaris</i>	Su, YY; Cheng, ZR; Hou, YP; Lin, SY; Gao, L; Wang, ZZ; Bao, RQ; Peng, LC	2022	WOS	PE	Exxon Mobil Corporation, Ube Industries	77,75 - 59,88	doi.org/10.1016/j.aquatox.2022.106097
10	The combined toxicity influence of microplastics and nonylphenol on microalgae <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Yang, WF; Gao, XX; Wu, YX; Wan, L; Tan, LC; Yuan, SM;	2020	WOS	PE - PA - PS	Dongguan Junxin Plastics Co. Ltd., China	150	doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110484

N°	Título del artículo	Autores	Año de publicación	Base de datos	Tipo de microplástico	Origen	Tamaño de microplástico (µm)	DOI
11	The toxic effects of polystyrene microplastics on freshwater algae <i>Chlorella pyrenoidosa</i> depends on the different size of polystyrene microplastics	Ding, HJ; Zhang, WH Cao, QS; Sun, WB; Yang, T; Zhu, Z; Jiang, YA; Hu, WL; Wei, WZ; Zhang, YY; Yang, H	2022	WOS	PS	Centro de investigación de tecnología cromática de línea base de Tianjin (Tianjin, China)	1 - 5'	doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136135
12	Aged microplastics decrease the bioavailability of coexisting heavy metals to microalga <i>Chlorella vulgaris</i>	Wang, ZZ; Fu, DD; Gao, L; Qi, HY; Su, YY; Peng, LC	2021	WOS	PS - PVC virgen	Shanghai Aladdin Bio-Chem Technology Co., Ltd., China	250 - 150	doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112199
13	Investigation of the toxic effects of different polystyrene micro-and nanoplastics on microalgae <i>Chlorella vulgaris</i> by analysis of cell viability, pigment content, oxidative stress and ultrastructural changes	Hazeem, LJ; Yesilay, G; Bououdina, M; Perna, S; Cetin, D; Suludere, Z; Barras, A;	2020	WOS	PS	Bangs Laboratories, Alemania	0,02 - 0,05 - 0,5	doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111278

N°	Título del artículo	Autores	Año de publicación	Base de datos	Tipo de microplástico	Origen	Tamaño de microplástico (µm)	DOI
		Boukherroub, R						
14	Elucidating the negatively influential and potentially toxic mechanism of single and combined micro-sized polyethylene and petroleum to <i>Chlorella vulgaris</i> at the cellular and molecular levels	Gao, L; Xie, Y; Su, YY; Mehmood, T; Bao, RQ; Fan, HJ; Peng, LC	2022	WOS	PE VIRGIN	Dongwan shunjie Technology Co., Ltd	550 - 165 - 13	doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114102
15	Phytoplankton response to polystyrene microplastics: Perspective from an entire growth period	Mao, YF; Ai, HN; Chen, Y; Zhang, ZY; Zeng, P; Kang, L; Li, W; Gu, WK; He, Q; Li, H	2018	WOS	PS	Sigma-Aldrich	0,1 - 1	doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.170
16	Combined effect of polystyrene plastics and triphenyltin chloride on the green algae <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Yi, XL; Chi, TT; Li, ZC; Wang, JF; Yu, MY; Wu, MH; Zhou, H	2019	WOS	PS	Baseline ChromTech Research Center	0,55 - 5	doi.org/10.1007/s11356-019-04865-0

N°	Título del artículo	Autores	Año de publicación	Base de datos	Tipo de microplástico	Origen	Tamaño de microplástico (µm)	DOI
17	Combined effect of polystyrene microplastics and dibutyl phthalate on the microalgae <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Li, ZC; Yi, XL; Zhou, H; Chi, TT; Li, WT; Yang, KM	2020	WOS	PS	BaseLine ChromTech Research Center (Tianjin, China)	0,1 - 0,55 - 5	doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113604
18	Influence of polystyrene microplastic and nanoplastic on copper toxicity in two freshwater microalgae	Wan, JK; Chu, WL; Kok, YY; Lee, CS	2021	WOS	PS	Sigma-Aldrich/Merck.	10 - 0,5	doi.org/10.1007/s11356-021-12983-x
19	Extensive investigation and beyond the removal of micro-polyvinyl chloride by microalgae to promote environmental health	Manzi, HP; Zhang, M; Salama, ES	2022	WOS	PVC	Dongguan Shengbang Chemical Co., Ltd, China	0,2	doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134530
20	Adsorption mechanism of trace heavy metals on microplastics and simulating their effect on microalgae in river	Liu, Q; Wu, HW; Chen, JJ; Guo, BH; Zhao, XF; Lin, H; Li, W; Zhao, X; Lv, SH; Huang, C	2022	WOS	PP	Hua Chuang Plastic Raw Materials Firm (Dongguan, China)	<100	doi.org/10.1016/j.envres.2022.113777

N°	Título del artículo	Autores	Año de publicación	Base de datos	Tipo de microplástico	Origen	Tamaño de microplástico (µm)	DOI
21	Effect of microplastics exposure on the photosynthesis system of freshwater algae	Wu, YM; Guo, PY; Zhang, XY; Zhang, YX; Xie, ST; Den, J	2019	WOS	PP - PVC	Aladdin Industrial Corporation (Shanghai, China)	64 - 236 111 - 216	doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.039
22	Microplastics can affect the trophic cascade strength and stability of plankton ecosystems via behavior-mediated indirect interactions	Pan, Y; Long, YY; Hui, J; Xiao, WY; Yin, J; Li, Y; Liu, D; Tian, QD; Chen, LQ	2022	WOS	PE	Cospheric (Santa Bárbara, CA, EE. UU.) en forma de polvo seco	32 - 38	doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128415
23	Effects of microplastics of different sizes on the <i>Chlorella vulgaris</i> - <i>Ganoderma lucidum</i> copellets formation processes	Gong X., Wang Y., Huang D., Zhang J.	2022	SCOPUS	PS	Centro de Desarrollo de Tecnología de Cromatografía de Beisler (Tianjin, China)	0,065 - 0,5 - 5	doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153266

N°	Título del artículo	Autores	Año de publicación	Base de datos	Tipo de microplástico	Origen	Tamaño de microplástico (µm)	DOI
24	Acute toxic effects of polycyclic aromatic hydrocarbons (naphthalene) combined with polystyrene microspheres on chlorella vulgaris	Zhang X.-Q., Li L.-J., Peng M., Chai Y., Zhang H., Luo M.-Z.	2022	SCOPUS	PS	Wuxi Regal Biotechnology Co., Ltd.	5	doi.org/10.7541/2022.2021.0187
25	Effects of PS and PVC microplastics on the growth of Chlorella sp.	Wang L., Ma Y., Ji R.	2021	SCOPUS	PS - PVC	Shanghai Guanbu Electro Mechanical Technology Co., Ltd.	150 - 200 1 - 2	http://html.rhhz.net/hjkxxb/html/20200612001.htm

Nota. Se asignó un color a cada número que corresponde a un artículo para indicar el tipo de dato extraído. Los artículos de color naranja proporcionaron tanto tasas de inhibición como concentraciones de clorofila. Los artículos de color verde y amarillo proporcionaron únicamente datos de tasas de inhibición y concentraciones de clorofila, respectivamente. El artículo que no tiene color fue descartado.