

GOTAS DE VIDA

Celebrando la Semana Internacional del

AGUA

Un legado de sostenibilidad
para las generaciones futuras

III Semana Internacional del Agua. UTEG - Red AMARU, 19, 20 y 21 de marzo de 2025

Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil (UTEG)
Red Iberoamericana de Tratamientos de Aguas mediante Tecnologías Innovadoras (RED)
Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el desarrollo (CYTED)

Tercer volumen



PROGRAMA IBEROAMERICANO DE CIENCIA
Y TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO



Ediciones UTEG

Título: Gotas de vida: celebrando la Semana Internacional del Agua

Sedolfo Carrasquero (Compilador)

Primera edición 2025

ISBN:

Multidisciplinar Publicaciones

Libro de Conferencias. III Semana Internacional del Agua. UTEG – Red AMARU. 2025.

Mara Cabanilla Guerra, PhD.
Rectora

Econ. Galo Cabanilla Guerra, PhD.
Canciller

Econ. Otto Suárez, PhD.
Vicerrector académica

Dr. Rolando Villavicencio
Vicerrectora de Innovación, Investigación y Desarrollo

Dra. Daniela Cabanilla
Decano de Grado

Arq. José Bohórquez, PhD.
Secretario General

RED AMARU
Dr. Gilberto Colina Andrade
Coordinador General

PROGRAMA IBEROAMERICANO DE CIENCIA
Y TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO (CYTED)
Dr. Luis Telo De Gama
Secretario General

ASOCIACIÓN PARAGUAYA DE MATERIALES (APYMAT)
Dra. Magna Monteiro
Presidenta

GOTAS DE VIDA

Celebrando la Semana Internacional del

AGUA

Un legado de Sostenibilidad para las generaciones futuras

© Editorial UTEG

© De los autores
ISBN xxxxxxxxx
Chile

Dirección y edición editorial:
Luis Carlos Mussó

Diseño y diagramación:
Ricardo Espinosa

Primera edición:
Agosto de 2025 Libro revisado por pares

La edición del Libro de memorias del II Congreso Internacional de Desarrollo, Ambiente Y Sociedad estuvo al cuidado de la Editorial UTEG. En su composición tipográfica se utilizó la familia RF Dewi.



Presentación

Con profundo orgullo y compromiso compartimos este tercer volumen del libro "Gotas de vida", resultado de la III Semana Internacional del Agua, celebrada los días 19, 20 y 21 de marzo de 2025, gracias a la articulación entre la Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil (UTEG), la Red Iberoamericana de Tratamientos de Aguas mediante Tecnologías Innovadoras – RED AMARU, y el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

Esta obra compila las valiosas conferencias de investigadores, académicos y expertos de renombre internacional, quienes se reunieron en torno a un objetivo común: la gestión responsable y sostenible del agua como legado para las generaciones futuras. Cada capítulo refleja no solo el avance del conocimiento científico y tecnológico en torno al recurso hídrico, sino también la construcción de propuestas integradoras que vinculan la ciencia con la ciudadanía, la educación, el territorio y la política pública. El intercambio de experiencias desde Colombia, Argentina, Ecuador, Venezuela, México y Chile, demuestra que el agua es mucho más que un recurso: es un derecho, un vínculo cultural, y una responsabilidad colectiva.

Como autor compilador y miembro activo de la Red AMARU, agradezco profundamente a cada uno de los investigadores que aceptaron esta invitación, a las instituciones que han hecho posible este encuentro y a quienes desde sus territorios trabajan por proteger nuestras aguas. Este libro no es solo una memoria académica; es un llamado a la acción, una inspiración para el cambio, y una contribución concreta a la construcción de una sociedad más resiliente, informada y solidaria frente a los desafíos hídricos del presente y del porvenir.

El libro Gotas de Vida: Celebrando la III Semana Internacional del Agua se estructura en tres grandes ejes temáticos que recogen el enfoque integral del evento: innovación científica, gestión sostenible y educación transformadora. Cada eje articula una serie de ponencias que, desde distintas perspectivas, abordan los desafíos y oportunidades que enfrenta la humanidad en torno al agua como recurso vital, derecho humano y eje del desarrollo sostenible.

El Eje I, titulado Innovación y Evaluación Ambiental en el Tratamiento y Monitoreo de Aguas Contaminadas, pone en evidencia el papel de la ciencia en la comprensión y solución de los problemas relacionados con la calidad del agua. Abre este eje la ponencia del Dr. Fernando Castro, quien presenta un estudio sobre la ecotoxicidad de elementos potencialmente tóxicos sobre bacterias y protozoarios del Lago de Maracaibo, destacando el valor de estos microorganismos como bioindicadores en ecosistemas contaminados. Le sigue la Dra. Kiara Montiel, con una ponencia sobre materiales nanoporosos para el tratamiento de aguas, en la que expone desarrollos recientes y aplicaciones efectivas en la adsorción de contaminantes. Finalmente, el Lcdo. Freddy Martínez aborda el uso de la espectroscopía Raman como herramienta avanzada para el monitoreo de microplásticos en sistemas acuáticos, aportando una visión innovadora frente a los contaminantes emergentes.

En el Eje II, Gestión Sostenible del Agua: Calidad, Reutilización y Circularidad, se analizan los enfoques estratégicos para el uso eficiente y responsable del recurso hídrico. La Dra. Altamira Díaz presenta un marco integral sobre la economía circular del agua, explorando soluciones que minimicen desperdicios y maximicen la reutilización. En una ponencia conjunta, la Msc. Allyson Barragán y el Msc. Alexis Bejarano reflexionan sobre el acceso al agua segura como base para una vida saludable, integrando perspectivas desde la salud pública y la inocuidad alimentaria. El Espc. Marcelo De La Rosa, por su parte, advierte sobre los conflictos entre agua y turismo en territorios frágiles, en su intervención titulada El colapso del paraíso. Cierra este eje, mi persona, con una propuesta basada en coagulantes naturales como alternativa sostenible en los procesos de tratamiento de aguas, resaltando el potencial de soluciones basadas en la naturaleza.

El Eje III, Educación, Gestión Hídrica y Conservación Ambiental: Estrategias para un Futuro Sostenible, destaca el papel de la formación, la participación comunitaria y la planificación territorial en la transformación ambiental. La Msc. Beatriz Almonacil, desde una pedagogía oceánica, propone la educación como herramienta clave para la conservación del agua, con experiencias enfocadas en niños y jóvenes en contacto directo con los ecosistemas marinos. La Msc. Isabel Tamariz profundiza en la necesidad de incorporar la educación ambiental en las ciudades como motor de cambio social y ecológico. Finalmente, la MSc. Irma Suárez expone la relevancia del agua en el contexto territorial, a través de la ponencia sobre la importancia del recurso hídrico en el Geoparque Aspirante Mundial UNESCO Huasteca Potosina, integrando dimensiones culturales, ecológicas y comunitarias.

Estos tres ejes, entrelazados por el compromiso común de asegurar un legado de sostenibilidad para las generaciones futuras, constituyen el corazón del presente libro y reflejan la riqueza de conocimientos compartidos durante la III Semana Internacional del Agua. Este volumen no solo preserva las memorias del encuentro, sino que inspira la continuidad del diálogo y la acción colectiva por un futuro más justo, resiliente y sustentable en torno al agua.

*Dr. Sedolfo Carrasquero, Director de Innovación
Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil (UTEG)
Miembro de la Red -AMARU*

Contenido

Eje I: Innovación y Evaluación Ambiental en el Tratamiento y Monitoreo de Aguas Contaminadas

Conferencia 1. Ecotoxicidad de elementos potencialmente tóxicos sobre bacterias y protozoarios del Lago de Maracaibo	11
<i>Fernando Castro</i>	
Conferencia 2. Materiales nanoporosos para el tratamiento de aguas: Desarrollo, tipologías y aplicaciones efectivas	19
<i>Kiara Montiel</i>	
Conferencia 3. Espectroscopía Raman en el monitoreo de microplásticos en sistemas acuáticos	29
<i>Freddy Martínez</i>	

Eje II: Gestión Sostenible del Agua: Calidad, Reutilización y Circularidad

Conferencia 4. Economía circular del agua: Hacia un futuro sin desperdicio	37
<i>Altamira Díaz</i>	
Conferencia 5. El agua segura, base de una vida saludable	44
<i>Allyson Barragán, Alexis Bejarano</i>	
Conferencia 6. El colapso del paraíso: Agua y turismo en peligro	50
<i>Marcelo De La Rosa</i>	
Conferencia 7. Coagulantes naturales: Hacia un futuro sostenible en el tratamiento de aguas	55
<i>Sedolfo Carrasquero</i>	

Eje III: Educación, Gestión Hídrica y Conservación Ambiental: Estrategias para un Futuro Sostenible

Conferencia 8. La educación como una herramienta clave para la conservación del agua	66
<i>Beatriz Almonacil</i>	
Conferencia 9. Ciudad de todos, planeta de todos: La educación ambiental como monitor de cambio	72
<i>Isabel Tamariz</i>	
Conferencia 10. Importancia del agua en el Geoparque Aspirante Mundial UNESCO Huasteca Postosina	78
<i>Irma Suárez</i>	
Jornada Integrativa. Diálogos por el Agua: Desafíos y Soluciones frente al Cambio Climático y los ODS	85
<i>Gabriel Vaca</i>	

Conferencistas Internacionales

Dr. Fernando Castro Echávez

Biólogo. Especialista en Ciencias Ambientales. Magíster en Ciencias Ambientales. Doctor en Ingeniería Ambiental. Profesor investigador de la Universidad de La Guajira, Colombia, con una destacada trayectoria en docencia, investigación y extensión universitaria. Experto en ecotoxicología acuática, limnología, biorremediación con macrófitas y toxicidad de metales pesados sobre bacterias y protozoarios en ecosistemas impactados.

Dra. Kiara Montiel

Licenciada en Química Industrial. Magíster en Ciencias de Superficies y Medios Porosos. Doctora en Química. Investigadora del Laboratorio de Sólidos Porosos del Instituto de Física Aplicada (INFAP) de la Universidad Nacional de San Luis (Argentina). Especialista en el desarrollo, caracterización y aplicación de materiales nanoporosos para la adsorción de contaminantes, almacenamiento de gases y liberación controlada de fármacos. Ha participado activamente en proyectos de investigación multidisciplinarios y en colaboración con equipos internacionales

Lcdo. Freddy Martínez

Licenciado en Química Industrial. Doctorando en Química Analítica en la Universidad de Buenos Aires (UBA), Argentina. Investigador en formación del CONICET, adscrito al Instituto de Química Física de los Materiales, Medio Ambiente y Energía (INQUIMAE), con actividades complementarias en el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UBA. Especialista en espectroscopía Raman y SERS aplicada a la detección de contaminantes emergentes y microplásticos en sistemas acuáticos.

Dra. Altamira Díaz

Ingeniera Ambiental. Magíster Scientiarum en Ingeniería Ambiental. Doctora en Procesos del Ambiente por el Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas de Toulouse (Francia). Profesora titular de la Universidad del Zulia (Venezuela), con amplia trayectoria en docencia, investigación y gestión académica en programas de pregrado, maestría y doctorado. Referente en América Latina en tratamiento físico-químico y biológico de aguas residuales, uso de coagulantes naturales, y tecnologías sostenibles para el saneamiento ambiental.

Msc. Allyson Barragán

Química Farmacéutica. Máster en Seguridad y Salud Ocupacional. Docente de la Facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil (UTEG), donde desempeña funciones de apoyo de investigación en laboratorios académicos. Cuenta con experiencia en análisis de metales pesados, control de calidad en la producción de medicamentos, diagnóstico clínico en inmunología y biología molecular.

Msc. Alexis Bejarano

Licenciado en Nutrición. Tecnólogo en Alimentos. Magíster en Agroindustria con mención en Calidad y Seguridad Alimentaria. Doctorando en Ingeniería. Docente de la Facultad de Ciencias de la Salud de la UTEG. Profesional con amplia experiencia en el sector alimentario, desde la gestión de servicios de alimentación hasta el control de calidad, producción e innovación de productos alimenticios. Ha sido jefe de laboratorios de microbiología de alimentos, responsable de asuntos regulatorios y asesor técnico en la implementación de sistemas de inocuidad.

Esp. Marcelo De La Rosa

Técnico Universitario en Turismo. Licenciado en Educación Técnica Profesional. Especialista en Planificación Turística, Desarrollo Curricular y Evaluación de Competencias. Presidente ejecutivo de la Red Iberoamericana de Ciencia, Naturaleza y Turismo (RECINATUR). Con más de 30 años de trayectoria en gestión pública y asesoría nacional e internacional en desarrollo turístico, sociocultural, ambiental y económico. Docente por más de 13 años en formación técnica y universitaria en turismo.

Dr. Sedolfo Carrasquero Ferrer

Ingeniero Químico. Magíster Scientiarum en Ingeniería Ambiental. Máster en Administración de Empresas por la Universidad de Burdeos, Francia. Doctor en Ingeniería Ambiental. Investigador y docente con más de 15 años de experiencia en procesos de tratamiento de aguas, gestión ambiental y sostenibilidad. Actualmente se desempeña como director de Innovación de la Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil. Autor de más de 80 artículos indexados, libros y capítulos de libros sobre tecnologías híbridas de tratamiento de efluentes, bioadsorción con coagulantes naturales, biorremediación, sostenibilidad ambiental y tecnologías emergentes para la gestión de recursos hídricos.

Msc. Beatriz Almonacil

Oceanógrafa. Máster en Educación Ambiental con énfasis en educación marina. Especialista en pedagogía vivencial y cultura oceánica. Fundadora y presidenta de Blue Wave Ec, una iniciativa pionera en Ecuador que integra natación, actividades subacuáticas y conservación marina a través de experiencias educativas inmersiva.

Msc. Isabel Tamariz

Ingeniera Ambiental con máster en Derecho Ambiental y diplomado en Gobernabilidad e Innovación Pública. Con más de 13 años de experiencia en gestión ambiental en los sectores público y privado, ha participado activamente en proyectos de recuperación de ecosistemas de bosque seco, manglares y humedales en diversas provincias costeras del Ecuador. Actualmente, ocupa el cargo de directora general de Ambiente del Municipio de Guayaquil, liderando políticas y proyectos ambientales urbanos.

Msc. Irma Suárez Rodríguez

Licenciada en Administración de Empresas Turísticas. Magíster en Mercadotecnia de Negocios Turísticos. Profesora investigadora de tiempo completo de la carrera de Turismo Sustentable en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), Unidad Zona Huasteca, donde también se desempeña como secretaria de planeación. Cuenta con más de 20 años de experiencia en docencia a nivel de licenciatura, maestría y diplomados, así como en asesoría y capacitación técnica a instituciones y organismos de América Latina en temas de planificación turística, desarrollo local, marketing territorial y sostenibilidad.

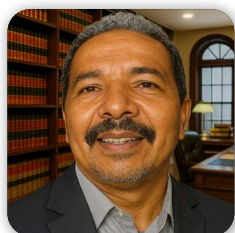
Msc. Gabriel Vaca Suárez.

Ingeniero en Turismo. Magister en Mercadotecnia mención Gestión Digital. Máster en Administración de Empresas. Profesor universitario en la Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil, donde su enfoque académico incluye la sostenibilidad, el turismo y el emprendimiento. Ha contribuido a la investigación sobre el uso de la realidad virtual en la educación y el turismo, explorando su impacto en la enseñanza de macromoléculas y en la transformación de negocios hacia un futuro sostenible.

Eje I: Innovación y evaluación ambiental en el tratamiento y monitoreo de aguas contaminadas



Ecotoxicidad de elementos potencialmente tóxicos sobre bacterias y protozoarios del lago de Maracaibo



Dr. Fernando Castro Echávez ¹

fcastro@uniguajira.edu.co

En los ecosistemas acuáticos, las bacterias y protozoarios desempeñan funciones fundamentales dentro de la red trófica microbiana, actuando como mediadores clave en la regeneración y el reciclaje de nutrientes. Las bacterias son responsables de la descomposición de la materia orgánica disuelta en el plancton, contribuyendo a la mineralización de compuestos hasta formas inorgánicas, y regulando activamente los ciclos biogeoquímicos del carbono, nitrógeno, fósforo y azufre. Por su parte, los protozoarios, al depredar bacterias, no solo controlan sus poblaciones, sino que también favorecen la transferencia energética hacia niveles superiores y la regeneración de nutrientes, funcionando como pastores, descomponedores y recicladores (Gurung et al., 2000).

En el Lago de Maracaibo, uno de los sistemas lacustres más relevantes de América del Sur, se ha observado un progresivo deterioro ecológico derivado de actividades humanas. El dragado constante ha incrementado la salinidad del sistema, mientras que la contaminación por desechos industriales, en particular de la industria petrolera y petroquímica, ha desencadenado impactos negativos sobre la biota (Parra-Pardi, 1986). A esto se suma la proliferación masiva de *Lemna* sp., planta acuática invasora que ha afectado notablemente la pesca y otros servicios ecosistémicos

¹ Biólogo. Magíster en Ciencias Ambientales. Doctor en Ingeniería Ambiental. Profesor investigador de la Universidad de La Guajira, Colombia.

(Rincón et al., 2004). Estos factores podrían estar alterando profundamente la composición y dinámica de los microorganismos que integran la red trófica microbiana, con consecuencias para la eficiencia de los procesos ecológicos como el reciclaje de nutrientes.

En este contexto, la presencia de elementos potencialmente tóxicos, especialmente metales pesados como plomo (Pb), cromo (Cr), cadmio (Cd) y níquel (Ni), representa una de las amenazas más persistentes para la salud del ecosistema acuático. Estos contaminantes, provenientes de actividades industriales, mineras y petroleras, llegan al lago a través de efluentes, escorrentías y procesos atmosféricos, acumulándose en el sedimento y en los organismos vivos (Beyer et al., 2014). Aunque algunos metales como el Ni pueden ser esenciales en bajas concentraciones, a niveles elevados se convierten en agentes tóxicos capaces de alterar la estructura y funcionamiento de las comunidades microbianas (Oyetibo et al., 2017).

La exposición crónica a estos metales genera una presión de selección que favorece la supervivencia de cepas bacterianas y protozoarias con mecanismos de resistencia, como la bioacumulación intracelular o la bioadsorción en su matriz extracelular (Zakaria et al., 2004). Sin embargo, estos procesos adaptativos no siempre son suficientes para preservar las funciones ecológicas del ecosistema, y su estudio permite identificar organismos indicadores clave que pueden emplearse en bioensayos de ecotoxicidad.

Dada la limitada información disponible sobre la diversidad taxonómica de bacterias y protozoarios en el Lago de Maracaibo y el potencial impacto de los metales pesados sobre sus comunidades, el presente capítulo tiene como objetivo describir un procedimiento para el aislamiento, cuantificación e identificación de bacterias y protozoarios ciliados presentes en muestras de agua del Lago de Maracaibo, evaluando además su respuesta ante la presencia de metales pesados y su utilidad como bioindicadores en estudios de ecotoxicidad.

Área y Sitios de Estudio

El Lago de Maracaibo, ubicado en el noroeste de Venezuela, es una extensa cuenca hidrográfica de gran importancia ecológica y económica, caracterizada por ser un estuario parcialmente mezclado y naturalmente eutrófico. Sin embargo, la actividad humana, especialmente la explotación petrolera, el vertido de aguas residuales y los aportes fluviales contaminados, ha intensificado su estado de hipertrofia y contaminación por metales pesados.

Para este estudio se seleccionaron dos sitios contrastantes:

Sitio 1: Vereda del Lago (Maracaibo), al norte, afectado por descargas industriales y domésticas, tráfico marítimo y dragado frecuente.

Sitio 2: Puerto Concha, al sur, influenciado por ríos tributarios que transportan contaminantes agrícolas, mineros y domésticos, así como por derrames petroleros transfronterizos.

Estos sitios representan diferentes presiones antrópicas sobre el ecosistema, permitiendo evaluar su efecto ecotoxicológico sobre bacterias y protozoarios (Figura 1).



Figura 1. Distribución de los dos sitios de muestreo

Análisis de parámetros fisicoquímicos y elementos potencialmente tóxicos en estaciones de monitoreo acuático

El valor de pH registrado en ambas estaciones se mantuvo en un rango cercano a 8.0, lo cual es consistente con las condiciones de aguas naturales aptas para la vida acuática. Este resultado concuerda con los valores de pH que permiten el desarrollo de organismos acuáticos (5.0 y 9.0). Asimismo, la temperatura media del agua registrada fue comparable con estudios previos realizados en el Lago de Maracaibo, como el de Marín et al. (2014), quienes reportaron una temperatura promedio de 31,4 °C en condiciones similares.

Respecto al potencial de óxido-reducción (ORP), sí se encontraron diferencias significativas entre las dos estaciones, lo que sugiere variabilidad en las condiciones redox del sistema acuático. En contraste, no se observaron diferencias significativas en variables como la conductividad eléctrica, cuya media fue de 7,64 mS/cm en la Estación 1 y de 6,03 mS/cm en la Estación 2. Estos valores se corresponden a los esperados en cuerpos de agua estuarinos.

Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs)

En el análisis de los elementos potencialmente tóxicos, se identificaron concentraciones variables entre las dos estaciones de monitoreo. En la Estación 1, el orden de concentración fue: Pb > Ni > Cd > Cr, mientras que en la Estación 2 se registró una ligera variación en el ordenamiento de los elementos, aunque sin alterar significativamente su prevalencia relativa (Figura 2).

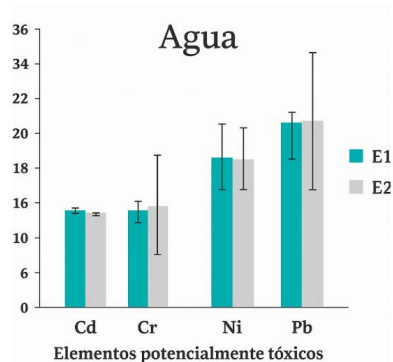


Figura 2. Elementos potencialmente tóxicos en el agua. Las concentraciones están expresadas en µg/L.

El análisis estadístico mediante ANOVA indicó que no existieron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre las concentraciones de los metales pesados evaluados, lo cual sugiere una distribución relativamente homogénea entre ambas estaciones. No obstante, se observaron variaciones específicas al comparar con estudios previos, por ejemplo, en el caso del plomo (Pb), donde la concentración en este estudio alcanzó los 25,11 µg/L, mientras que otros autores reportaron valores significativamente menores, como 1,40 µg/L en condiciones distintas.

Estas diferencias pueden estar asociadas a la dinámica hidrológica del sistema, así como a factores antrópicos, tales como la presencia de derrames petroleros. El Lago de Maracaibo, en particular, presenta una infraestructura de transporte de crudo con múltiples tuberías sumergidas, lo que aumenta el riesgo de contaminación difusa o localizada por hidrocarburos y metales pesados.

A pesar de estas variaciones, las concentraciones de metales pesados registradas en ambas estaciones se encontraron dentro de los límites permisibles establecidos por normativas nacionales e internacionales, lo que indica que al momento del muestreo la calidad del agua se mantenía dentro de los estándares aceptables para cuerpos lénticos con actividad antrópica significativa.

Los resultados obtenidos en este estudio permiten realizar una comparación con los criterios de calidad ambiental establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), tanto en su modalidad de concentración máxima (CMC) como de concentración continua (CCC), para cuerpos de agua dulce (Tabla 1, página siguiente).

Metal	Agua dulce CMC (µg/L)	Agua dulce CCC (µg/L)	Agua de mar CMC (µg/L)	Agua de mar CCC (µg/L)	Año de publicación
Cr	16	11	1100	50	1995
Pb	65	2.5	210	8,1	1980
Ni	470	52	74	8,2	1995
Cd	1,8	0,72	33	7,9	2016

Tabla 1. Criterios de Calidad para Metales en Agua Dulce y Agua de Mar (µg/L)
CMC: Criterio de Concentración máxima. CCC: Criterio de Concentración continua (CCC).

En general, los valores obtenidos para plomo (Pb), cromo (Cr) y níquel (Ni) en agua cumplieron con los criterios de concentración máxima, los cuales están asociados a eventos de toxicidad aguda en organismos acuáticos. No obstante, se identificó una excepción importante en el caso del cadmio (Cd), cuya concentración excedió el valor límite establecido por la EPA para el criterio de concentración máxima, lo que podría representar un riesgo potencial para la biota acuática expuesta a corto plazo.

En cuanto al criterio de concentración continua, que corresponde a los niveles aceptables para una exposición crónica y sostenida, los resultados mostraron un incumplimiento de los valores guía para el cromo y el níquel, lo que implica posibles efectos adversos sobre la vida acuática en exposiciones prolongadas, aun cuando los niveles máximos no sean superados. Este resultado es especialmente relevante, ya que el criterio de concentración continua es el principal indicador de riesgo ecológico crónico utilizado por la EPA para evaluar la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos.

Las concentraciones de elementos potencialmente tóxicos en sedimentos no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre las estaciones muestreadas ($p > 0,05$). El orden de concentración de los metales en sedimentos fue el siguiente: $Pb > Ni > Cr > Cd$, patrón que se mantuvo en ambas estaciones de monitoreo (Figura 3). Este resultado es coherente con lo reportado en estudios anteriores para cuerpos de agua dulce y estuarinos en la región.

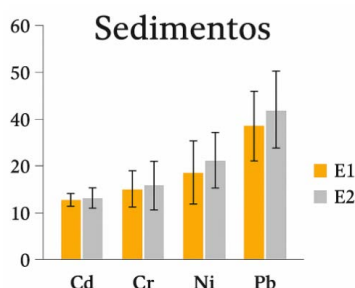


Figura 2. Elementos potencialmente tóxicos en los sedimentos.
Las concentraciones están expresadas en µg del elemento en Kg de peso seco.

Adicionalmente, las concentraciones de metales detectadas en este estudio fueron comparadas con los valores registrados por otras investigaciones realizadas en la bahía y el estrecho adyacente al Lago de Maracaibo. Por ejemplo, para cromo en agua, se encontraron concentraciones de 14,53 µg/L en la bahía, mientras que estudios previos reportaron 8,32 µg/L en el año 2012. Este incremento puede estar asociado a variaciones en la dinámica del sistema, posibles descargas industriales y derrames de hidrocarburos, considerando que el lago es atravesado por múltiples tuberías de transporte de crudo, lo que incrementa el riesgo de contaminación.

Identificación bacteriana y análisis de tolerancia frente a metales pesados en el Lago de Maracaibo

Como parte del estudio sobre la ecotoxicidad bacteriana en ambientes acuáticos, se realizaron ensayos microbiológicos orientados a la identificación de géneros bacterianos presentes en el Lago de Maracaibo, así como evaluaciones de susceptibilidad frente a diferentes metales pesados. Las muestras fueron sometidas a pruebas de cultivo en medios selectivos y diferenciales como agar MacConkey, agar verde brillante, agar manitol salado y agar Cetrimida, entre otros. Estas pruebas permitieron el aislamiento y crecimiento de un amplio número de cepas bacterianas, las cuales fueron caracterizadas con base en propiedades morfológicas, y bioquímicas.

Adicionalmente, se efectuaron ensayos de tinciones específicas para la observación de estructuras como esporas y cápsulas, lo cual facilitó la identificación preliminar a nivel de género. Las cepas fueron evaluadas mediante pruebas clásicas de identificación bioquímica, como oxidasa, catalasa, ureasa, rojo de metilo, prueba de citrato y pruebas de fermentación de glucosa, entre otras. Los resultados fueron interpretados utilizando manuales bacteriológicos estandarizados, tales como Bergey's Manual of Systematic Bacteriology y el manual de Coleman. Para confirmar la identificación, se empleó también el sistema automatizado API Web, que permite comparar los perfiles bioquímicos con una base de datos amplia, sugiriendo la especie más probable y pruebas complementarias necesarias.

Los géneros bacterianos identificados con mayor frecuencia en las muestras del lago fueron:

- *Escherichia* spp.
- *Pseudomonas* spp.
- *Bacillus* spp.
- *Enterobacter* spp.
- *Salmonella* spp.
- *Proteus* spp.

Estos microorganismos se encontraron de manera recurrente, tanto en estaciones cercanas a la desembocadura como en sectores internos del cuerpo de agua, lo cual sugiere una presencia constante y adaptada a las condiciones ambientales del lago.

Ensayos de tolerancia bacteriana frente a metales pesados

Se evaluó la concentración mínima inhibitoria (CMI) para determinar la resistencia bacteriana frente a metales pesados, específicamente: plomo (Pb), níquel (Ni), cadmio (Cd), cromo trivalente (Cr^{3+}) y cromo hexavalente (Cr^{6+}). Estos ensayos permitieron establecer tanto el orden de tolerancia como el orden de toxicidad relativa para cada especie bacteriana. El orden de tolerancia observado fue el siguiente: $\text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cr}^{3+} > \text{Cd} > \text{Cr}^{6+}$

Esto sugiere que el plomo fue el metal menos tóxico para la mayoría de las cepas analizadas, mientras que el cromo hexavalente fue el más tóxico. El orden de toxicidad, que representa la concentración mínima capaz de inhibir completamente el crecimiento bacteriano, fue congruente con estos resultados.

Los análisis estadísticos indicaron que no se presentaron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre ciertas cepas para algunas concentraciones, mientras que sí se detectaron diferencias significativas para otros metales, como en el caso de níquel, cromo y cadmio, lo que refleja variabilidad intraespecífica en los niveles de resistencia.

La formación de halos de inhibición permitió observar respuestas diferenciales atribuibles a factores como presencia de plásmidos de resistencia, producción de sustancias extracelulares protectoras, existencia de mecanismos de exclusión de iones metálicos, y adaptaciones genéticas cromosómicas y epigenéticas

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de CMI, fue posible clasificar las cepas bacterianas según su capacidad de tolerancia a metales. Por ejemplo, en el caso del cromo, las cepas de *Pantheoa* spp. demostraron ser las más tolerantes, soportando concentraciones de hasta 48.000 $\mu\text{g/L}$, mientras que *Proteus* spp. fue la menos tolerante dentro del conjunto analizado.

Esta clasificación es fundamental para identificar potenciales bioindicadores y cepas candidatas a procesos de biorremediación, especialmente en cuerpos de agua contaminados con metales pesados. La alta tolerancia observada en algunas cepas sugiere la existencia de adaptaciones ecológicas específicas al entorno del Lago de Maracaibo, caracterizado por la presencia histórica de actividad petrolera e industrial.

Evaluación de la toxicidad en protozoarios del Lago de Maracaibo frente a metales pesados

La evaluación ecotoxicológica del Lago de Maracaibo no se limitó a bacterias; también se realizó un análisis detallado de la respuesta de protozoarios nativos frente a la exposición a contaminantes, específicamente metales pesados. Esta sección del estudio buscó ampliar la comprensión de los efectos agudos que estos elementos pueden tener sobre organismos eucariotas microscópicos, fundamentales para las cadenas tróficas acuáticas.

La identificación de protozoarios se llevó a cabo mediante técnicas de microscopía óptica empleando cámaras de Sedgewick-Rafter, que permitieron observar y diferenciar géneros morfológicamente distintos (Figura 4). Se identificaron los siguientes géneros:

- Stylonychia spp.
- Paramecium spp.
- Colpoda spp.
- Chilomonas spp.

Entre ellos, el hallazgo de Chilomonas spp. resultó particularmente relevante, ya que constituye uno de los primeros reportes documentados de este género en el Lago de Maracaibo. Este protozoo, caracterizado por su baja estabilidad ecológica, presenta una presencia irregular, lo que sugiere una sensibilidad alta a las condiciones ambientales. En contraste, géneros como Paramecium y Stylonychia mostraron una resiliencia notable, lo cual facilitó su cultivo en laboratorio y su uso en ensayos de toxicidad.

Para evaluar la toxicidad aguda, se emplearon ensayos de exposición a corto plazo, consistentes en contactar a los protozoarios con diferentes concentraciones del contaminante durante intervalos de tiempo definidos. El efecto observado en los organismos fue la mortalidad progresiva, que fue cuantificada en función del tiempo y la concentración del tóxico. Se aceptó un porcentaje de mortalidad basal menor al 10% para los controles, considerando que el estrés por manipulación puede inducir mortalidad residual.



- a. **Género:** Oxytricha – Bory de Saint-Vincent, 1824
Especie: Oxytricha sp.
- b. **Género:** Euplotes – Ehrenberg, 1830
Especie: Euplotes sp.
- c. **Género:** Chilodonella Strand, 1928
Especie: Chilodonella sp.
- d. **Género:** Coleps – Ehrenberg, 1838
Especie: Coleps sp.

Figura 4. Protozoarios ciliados.

Para los protozoarios en conjunto, la CL_{50} de Cr^{+6} a los 10 minutos fue de 1164,2 mg/L, lo que indica una resistencia significativa al contaminante en comparación con otros microorganismos analizados, como bacterias. Cabe destacar que el método de ensayo, basado en observaciones de inmovilidad y ruptura celular, ofrece resultados reproducibles y cercanos a condiciones ambientales reales.

A continuación, se presenta el orden de tolerancia determinado en función de la concentración letal media de Cr^{+6} :

Loxodes spp. > *Dileptus spp.* > *Colpoda spp.* > *Chilomonas spp.*

El género *Loxodes* mostró la mayor tolerancia frente al contaminante, con una CL_{50} de Cr^{+6} 1164,2 mg/L, seguido por *Dileptus* y *Colpoda*. En contraste, *Chilomonas* se ubicó como el género más sensible. Esta información es clave para comprender la distribución diferencial de estos protozoarios en ambientes impactados por metales pesados y para el diseño de bioensayos estandarizados con especies indicadoras de calidad ambiental.

Una de las observaciones fundamentales que se desprende del estudio es que la resistencia elevada de ciertos organismos a contaminantes no los posiciona necesariamente como buenos bioindicadores de toxicidad, sino todo lo contrario. Los organismos más sensibles a los elementos potencialmente tóxicos permiten detectar más eficazmente la presencia y el impacto de dichos contaminantes, convirtiéndolos en indicadores más apropiados para evaluaciones ecotoxicológicas.

En los ensayos realizados con cromo trivalente (Cr^{3+}) los resultados mostraron que *Loxodes spp.* presentó una mayor tolerancia frente al Cr^{3+} , mientras que *Chilomonas spp.* y *Colpoda spp.* mostraron mayor sensibilidad. La concentración sin efecto observable (NOEC, por sus siglas en inglés) se incluyó en el análisis; sin embargo, en algunos casos no pudo ser determinada debido a que los datos experimentales no permitieron su estimación dentro del rango de concentraciones evaluado.

Los ensayos con cadmio (Cd^{2+}) revelaron efectos morfológicos diferenciados en los protozoarios, tales como hinchamiento celular y lisis, evidentes a través de las microfotografías tomadas en tiempos de exposición de 10, 30 y 60 minutos (Figura 5). El análisis mostró que *Dileptus spp.* fue el género más resistente a Cd^{2+} , mientras que *Loxodes spp.* fue el más sensible, revirtiendo así la tendencia observada con Cr^{3+} .

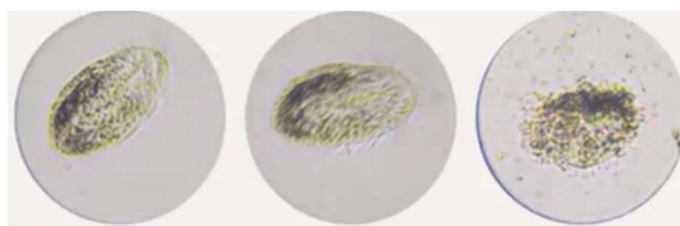


Figura 5. Efectos morfológicos en los protozoarios.

Respecto al plomo (Pb^{2+}), los valores de CL_{50} indicaron que *Loxodes spp.* fue el género más sensible (CL_{50} = 887 mg/L), mientras que *Dileptus spp.* mostró mayor tolerancia (CL_{50} = 1825 mg/L). Se observaron patrones consistentes entre los géneros más sensibles a través de diferentes metales, lo que permite considerar su uso potencial como especies indicadoras estándar en ensayos toxicológicos para metales pesados.

Los análisis comparativos entre las dos estaciones de muestreo permitieron establecer un orden de toxicidad diferencial de los EPTs:

Estación 1: Cr^{3+} > Cd^{2+} > Pb^{2+} > Cr^{6+} > Ni^{2+}

Estación 2: Cr^{6+} > Cr^{3+} > Cd^{2+} > Pb^{2+} > Ni^{2+}

Estos resultados evidencian variaciones espaciales en la toxicidad, posiblemente relacionadas con la composición físico-química del agua, la presencia de complejantes, o la capacidad de los organismos para adaptarse a las condiciones locales.

Consideraciones finales

En términos generales, no se encontraron diferencias significativas en las concentraciones de metales pesados en agua entre las dos estaciones de muestreo, y ambas cumplieron con los criterios de concentración máxima establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), con la excepción del cadmio (Cd^{2+}).

En cuanto a los sedimentos, las concentraciones de cromo (Cr) y níquel (Ni) se mantuvieron dentro de los niveles de referencia establecidos por el Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente (CCME) para la protección de la vida acuática y el nivel de efecto probable. Sin embargo, estas normativas no fueron cumplidas para el plomo (Pb) y el cadmio, sin evidenciarse diferencias significativas entre estaciones.

Desde una perspectiva ecotoxicológica, los índices toxicológicos determinados para los microorganismos de diferentes niveles tróficos reflejaron en general una elevada tolerancia. Esto sugiere la existencia de mecanismos adaptativos de resistencia y/o detoxificación celular desarrollados a partir de la exposición prolongada a contaminantes. En particular, se identificaron diferencias estadísticamente significativas en los valores de CL_{50} (concentración de inhibición media) para bacterias expuestas a plomo y cromo, así como para protozoarios sometidos a cromo trivalente, cromo hexavalente, níquel y plomo.

La exposición sostenida a fuentes antropogénicas diversas—como el uso de pesticidas en el sur agrícola y el derrame de hidrocarburos en el norte industrial—ha propiciado una presión de selección que ha favorecido la adaptación microbiana. Se estableció que, en general, las bacterias mostraron mayor tolerancia que los protozoarios, y todas las cepas bacterianas aisladas presentaron algún grado de resistencia a los metales evaluados. En este contexto, la cepa identificada como *Bacillus* spp. fue la más sensible, razón por la cual se propone como un bioindicador potencial de contaminación metálica.

Es importante destacar que los valores de CL_{50} deben interpretarse con precaución, ya que podrían estar sobreestimados debido a las características del método analítico utilizado. No obstante, estos datos permiten afirmar que, dentro de los organismos ensayados, solo los protozoarios *Colpoda* spp. y *Chilodonella* spp. de la estación 2 mostraron la sensibilidad suficiente como para ser considerados bioindicadores efectivos de contaminación por metales pesados en este sistema acuático.

Finalmente, se enfatiza la relevancia del enfoque microbiológico como herramienta para el monitoreo ambiental, destacando el trabajo experimental riguroso realizado, que incluyó múltiples pruebas bioquímicas, tinciones diferenciales, y evaluaciones de mortalidad y toxicidad en condiciones controladas. La identificación de especies sensibles, como *Bacillus* spp., *Colpoda* spp. y *Chilodonella* spp., constituye un avance significativo hacia la construcción de índices ecotoxicológicos aplicables a ecosistemas tropicales altamente impactados como el Lago de Maracaibo.

Referencias bibliográficas

- Beyer, J., Petersen, K., Song, Y., Ruus, A., Grung, M., Bakke, T., Tollefsen, K. (2014). Environmental risk assessment of combined effects in aquatic ecotoxicology: A discussion paper. *Marine Environmental Research*, 96:81–91.
- Gurung, T., Nakanishi, M., Urabe, J. (2000). Seasonal and vertical difference in negative and positive effects of grazers on heterotrophic bacteria in lake Biwa. *Limnol. Oceanogr.* 45(8): 1689–1696.
- Marín Leal, J. C., Polo, C., Behling, E., Colina, G., Rincón, N., Carrasquero, S. (2014). Distribución espacial de Cd y Pb en Polyme-soda sólida y sedimentos costeros del Lago de Maracaibo. *Multiciencias*, 14(1). Recuperado a partir de <https://produccioncientificaluz.org/index.php/multiciencias/article/view/16989>
- Oyetibo, G., Chien, M., Ikeda-Ohtsubo, W., Suzuki, H., Obayori, O., Adebuseye, S., Ilori, M., Amund, O., Endo, G. (2017). Biodegradation of crude oil and phenanthrene by heavy metal resistant *Bacillus subtilis* isolated from a multi-polluted industrial wastewater creek. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 120:143–151
- Parra-Pardi, G. (1986). La conservación del Lago de Maracaibo. Diagnóstico ecológico y plan maestro. Refolit, C.A., Caracas, Venezuela, 86 pp.
- Rincón, N., Sulbarán, A., Melo, P., Espina, K., Dupontt, J., Díaz, L. (2004). Caracterización e identificación de bacterias asociadas a *Lemna* sp. Resúmenes, X Jornadas de Investigación Científica, Universidad del Zulia, 26 al 29 de octubre de 2004, Maracaibo, Venezuela, p. 66.
- Zakaria, Z., Jaapar, J. Ahmad, W. (2004). Bacteria as bioindicators for metal contamination (p. 131–135). En: Phang y Brown (Eds.), *Biomonitoring in tropical coastal ecosystems*. University of Malaysia Maritime Research Centre, Skudai, 328 p.



Materiales nanoporosos para el tratamiento de aguas: desarrollo, tipologías y aplicaciones efectivas



Dra. Kiara Montiel Centeno ²

kiaramontiel4@gmail.com

El agua, como matriz acuosa, presenta una composición compleja que incluye minerales, gases disueltos, materia orgánica, organismos vivos y otras sustancias cuya concentración varía en función de su origen. Generalmente, esta se clasifica en dos grandes categorías: aguas superficiales y aguas subterráneas. A pesar de que aproximadamente el 70% de la superficie del planeta está cubierta por agua, únicamente cerca del 3% corresponde a agua dulce, mientras que el restante 97% se encuentra en forma de agua salada en océanos y mares. Esta escasa fracción de agua dulce representa la fuente esencial para el desarrollo de las actividades humanas, por lo que su gestión y conservación se han convertido en un imperativo global.

La creciente presión sobre los recursos hídricos ha sido motivada por el incremento de la demanda en distintos sectores. El sector agropecuario representa el mayor consumidor de agua a nivel mundial, con un estimado del 69% del uso total, seguido por el sector industrial y, posteriormente, por el sector doméstico o municipal.

² Licenciada en Química Industrial. Magíster en Ciencias de Superficies y Medios Porosos. Doctora en Química. Investigadora del Laboratorio de Sólidos Porosos del Instituto de Física Aplicada (INFAP) de la Universidad Nacional de San Luis (Argentina).

Esta distribución refleja la magnitud de los desafíos que enfrentan las políticas públicas y las estrategias tecnológicas para garantizar un acceso equitativo, sostenible y seguro al recurso hídrico.

En este contexto, las jornadas científicas y académicas cobran especial relevancia, pues permiten no solo compartir resultados de investigación, sino también generar espacios de reflexión crítica e intercambio de saberes. Fomentar una conciencia colectiva sobre la necesidad de proteger las fuentes de agua dulce es clave para inspirar nuevas soluciones, especialmente entre los miembros de la comunidad estudiantil y docente, quienes pueden convertirse en agentes activos del cambio.

Si bien existen tecnologías para el aprovechamiento de fuentes alternativas, como el proceso de desalinización del agua marina, estas opciones siguen siendo costosas, energéticamente intensivas y, en muchos casos, inaccesibles para regiones de bajos recursos. Por ello, resulta indispensable proteger las fuentes de agua dulce actualmente disponibles y desarrollar tecnologías orientadas a reducir la contaminación de estos cuerpos hídricos.

Diversos estudios han documentado el impacto del consumo cotidiano en la huella hídrica de los productos. Por ejemplo, se estima que se requieren alrededor de 450 litros de agua para producir un solo huevo de gallina de granja, y cerca de 200 litros para fabricar una botella de refresco. Este tipo de datos revela la magnitud del consumo oculto de agua en los sistemas productivos y la necesidad urgente de mejorar los procesos industriales mediante soluciones que permitan reutilizar y tratar adecuadamente el agua residual generada.

En este contexto emergen los materiales nanoporosos como una alternativa prometedora, debido a su capacidad de adsorción, filtración y remoción eficiente de contaminantes. En los apartados siguientes se explorará su desarrollo, las distintas tipologías existentes y las aplicaciones más relevantes en el tratamiento de aguas residuales, como respuesta a la creciente demanda de tecnologías sostenibles.

Contaminantes emergentes: definición y contexto actual

En las últimas décadas, la creciente preocupación por la calidad del agua ha derivado en el reconocimiento de un grupo de sustancias denominadas contaminantes emergentes. Este término se refiere a compuestos que, si bien han estado presentes en el entorno, no han sido tradicionalmente considerados como contaminantes debido a que sus efectos adversos eran desconocidos o no existían metodologías estandarizadas para su detección y monitoreo. En la actualidad, estos compuestos aún no se encuentran regulados por la mayoría de las normativas ambientales internacionales y nacionales, lo cual representa un reto significativo para los sistemas de tratamiento y la gestión integral del recurso hídrico.

Los contaminantes emergentes suelen ser productos de consumo masivo y no necesariamente requieren ser persistentes en el ambiente para generar impactos negativos. Entre los más comunes se encuentran los colorantes sintéticos provenientes de la industria textil, detergentes utilizados en el ámbito doméstico e industrial, productos de cuidado personal, microplásticos, pesticidas y, de manera destacada, los productos farmacéuticos y sus metabolitos, en particular los antibióticos (Richardson y Ternes, 2021).

El uso generalizado de antibióticos tanto en la medicina humana como en la veterinaria los ha convertido en uno de los contaminantes emergentes más ampliamente distribuidos y de mayor preocupación ambiental (Reemtsma y Jekel, 2016). Estos compuestos, de origen natural o sintético, tienen como función principal inhibir el crecimiento de microorganismos patógenos. Sin embargo, su amplia disponibilidad, el uso indiscriminado y la automedicación han provocado una alarmante acumulación de residuos antibióticos en cuerpos de agua dulce.

Diversas investigaciones han revelado cifras preocupantes. Se estima que a nivel mundial se consumen entre 100.000 y 200.000 toneladas de antibióticos anualmente, siendo América Latina una de las regiones con mayor tasa de consumo. Una característica fundamental de estos compuestos es su baja tasa de metabolización en el cuerpo humano. Estudios recientes indican que apenas entre el 20% y 30% de la dosis administrada es metabolizada eficazmente, mientras que entre el 70% y 80% restante es excretada en forma activa a través de la orina o las heces, ingresando directamente a los sistemas de aguas residuales.

La infraestructura actual de tratamiento de aguas, basada mayoritariamente en tecnologías convencionales como el intercambio iónico, la precipitación química o incluso la ósmosis inversa, no está completamente adaptada para eliminar este tipo de contaminantes de estructura compleja (Kesari et al. 2021). Esto implica que una parte significativa de los antibióticos y sus residuos farmacéuticos alcanzan los cuerpos receptores sin ser degradados, generando impactos directos sobre los ecosistemas acuáticos y contribuyendo al desarrollo de cepas bacterianas resistentes a múltiples fármacos.

En este contexto, la búsqueda de soluciones más eficientes y sostenibles se vuelve prioritaria. Entre ellas, el desarrollo y aplicación de materiales adsorbentes avanzados, como los materiales nanoporosos, se posiciona como una alternativa prometedora para la remoción de antibióticos y otros contaminantes emergentes en aguas residuales.

Adsorción como tecnología emergente para el tratamiento de contaminantes emergentes

En la actualidad, el tratamiento de aguas residuales contaminadas con compuestos emergentes, como los antibióticos y otros productos farmacéuticos, representa uno de los principales desafíos ambientales. A pesar de los importantes avances en tecnologías como el tratamiento biológico y la fotocatalisis, su eficiencia para la degradación completa de estos compuestos aún presenta limitaciones, especialmente en lo referente a la eliminación de trazas residuales o estructuras químicamente complejas. En este sentido, se ha reconocido que una sola tecnología no es suficiente para abordar de forma integral la complejidad de los contaminantes presentes en las matrices acuosas, por lo que es necesario el desarrollo e implementación de sistemas de tratamiento híbridos o combinados.

Entre las tecnologías emergentes que han demostrado gran potencial en la remoción de contaminantes de origen orgánico se encuentra la adsorción, un proceso superficial mediante el cual una sustancia (adsorbato), ya sea en estado líquido, gaseoso o incluso disuelto, se adhiere a la superficie de un sólido (adsorbente). Este fenómeno no debe confundirse con la absorción, que implica la incorporación del adsorbato en el volumen interno del sólido, mientras que la adsorción ocurre exclusivamente en la superficie o en la interfase del material.

Desde un punto de vista técnico, la adsorción puede clasificarse en dos tipos según el mecanismo de interacción predominante: adsorción física (fisisorción) y adsorción química (quimisorción). En la primera, las fuerzas responsables de la retención del contaminante son de tipo físico, como las interacciones electrostáticas, fuerzas de Van der Waals o puentes de hidrógeno. En contraste, en la adsorción química se establecen enlaces covalentes o enlaces fuertes entre el adsorbente y las moléculas contaminantes, lo que proporciona una fijación más estable y específica.

El fenómeno de adsorción se puede representar como una secuencia de procesos donde el contaminante se difunde hacia la superficie del adsorbente, se une a los sitios activos y puede formar desde monocapas hasta múltiples capas de adsorción, dependiendo del tipo de adsorbente y de la naturaleza del adsorbato (Pourhakkak et al. 2021).

Esta tecnología presenta múltiples ventajas: su simplicidad operativa, bajos requerimientos energéticos, posibilidad de operación a temperatura ambiente, y la disponibilidad de materiales adsorbentes de bajo costo, muchos de ellos obtenidos a partir de residuos agroindustriales o subproductos, lo cual representa una solución alineada a los principios de la economía circular y la sostenibilidad (Figura 1).

Uno de los aspectos clave en la eficiencia del proceso de adsorción radica en las características del adsorbente, particularmente en su estructura porosa. Los materiales nanoporosos han sido ampliamente investigados en los últimos años debido a su elevada relación área superficial-volumen, su selectividad y su capacidad para retener moléculas de muy bajo tamaño. Estos materiales presentan poros o cavidades en el rango nanométrico, lo que les confiere una capacidad sobresaliente para atrapar moléculas que otras tecnologías no pueden remover con eficacia.



Figura 1. Ventajas de la adsorción

La escala de los materiales nanoporosos permite dimensionarlos entre las moléculas y los virus, posicionándolos estratégicamente como una herramienta clave para el tratamiento de contaminantes de bajo peso molecular. Según la IUPAC, estos materiales se clasifican en función del diámetro de sus poros en tres categorías:

- Microporos: con un diámetro inferior a 2 nanómetros (nm).
- Mesoporos: con diámetros entre 2 y 50 nm.
- Macroporos: con diámetros superiores a 50 nm.

Cada uno de estos tipos posee características específicas que los hacen adecuados para aplicaciones particulares en el tratamiento de aguas, ya sea en la adsorción de metales pesados, antibióticos, pesticidas u otros compuestos orgánicos persistentes.

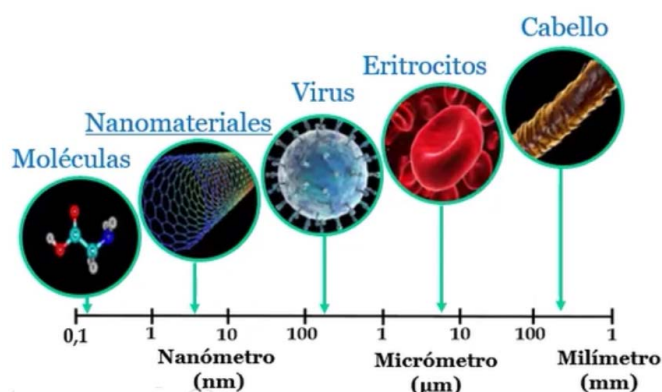


Figura 2. Comparación en tamaño de los nanomateriales

Principales tipos de materiales nanoporosos aplicados en el tratamiento de aguas

En el campo de los materiales nanoporosos, se han desarrollado múltiples tipos con propiedades específicas que los hacen altamente eficientes para la adsorción de contaminantes en medios acuosos. En esta sección se presentan algunas de las familias principales de materiales, entre las cuales se destacan tres que han sido empleadas en un estudio de caso que se analizará posteriormente.

Carbones activados: adsorbentes universales

Los carbones activados son ampliamente reconocidos como adsorbentes universales, debido a su capacidad para remover una amplia gama de contaminantes. Actualmente son de uso común en plantas de tratamiento de aguas residuales, especialmente en la eliminación de olores, materia orgánica y compuestos traza (Shafeeyan et al., 2010)

Desde un punto de vista estructural, estos materiales están constituidos por láminas de grafeno desordenadas, formando una red altamente porosa. Los poros se encuentran tanto en la superficie como en los intersticios de estas capas, permitiendo una elevada área superficial disponible para la adsorción.

- Entre sus principales ventajas se destacan:
- Naturaleza hidrofóbica, lo cual favorece la adsorción de contaminantes no polares sin disolverse en el medio.
- Inercia química frente a ácidos, lo que incrementa su estabilidad.
- Superficie funcionalizable, que puede modificarse químicamente para mejorar la selectividad frente a contaminantes específicos.

Síntesis sencilla y de bajo costo, a menudo a partir de residuos agroindustriales o textiles, promoviendo el aprovechamiento de materiales descartados.

El proceso de activación de los carbones –que les confiere su alta capacidad adsorbente– puede realizarse mediante dos métodos:

1. Activación física, considerada más sostenible, emplea gases como dióxido de carbono (CO_2) o vapor de agua en presencia de una atmósfera inerte, evitando la combustión del material carbonoso mientras se promueve el desarrollo de la porosidad.
2. Activación química, más agresiva pero ampliamente usada, implica el uso de agentes como ácido fosfórico (H_3PO_4) o hidróxido de potasio (KOH), que actúan sobre la matriz carbonosa generando poros y estructuras ordenadas (Balasubramanian et al. 2020)

Sílices mesoporosas ordenadas

Otra familia relevante de materiales nanoporosos está conformada por las sílices mesoporosas ordenadas, una clase de sólidos inorgánicos con estructuras altamente organizadas y poros uniformes, típicamente en el rango de 2 a 50 nanómetros. Estos materiales se distinguen de los carbones activados por su mayor control en la distribución del tamaño de poro y por la posibilidad de incorporar grupos funcionales específicos, tales como grupos silanol ($-\text{SiOH}$), que favorecen la interacción con una amplia variedad de analitos.

La síntesis de estos materiales se realiza a través de un proceso sol-gel templado por surfactantes. En este caso, el surfactante, como Pluronic P123, actúa como agente estructurante, y en presencia de un precursor de sílice, como el tetraetil ortosilicato (TEOS), y un medio ácido, se da lugar a la formación de una red ordenada (Figura 3). El proceso de remoción del surfactante, mediante calcinación o extracción, permite obtener una matriz de sílice con poros accesibles y uniformemente distribuidos (Montiel et al. 2019).

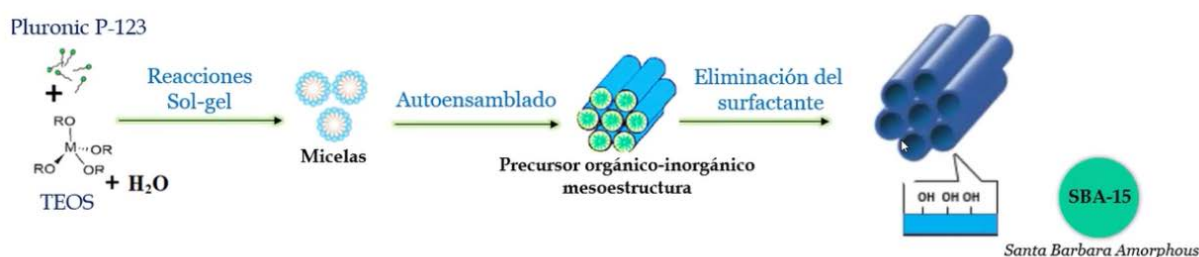


Figura 3. Síntesis de materiales mesoporosos ordenados de sílice

Una característica distintiva de estos materiales es la capacidad de ajustar su porosidad y funcionalidad superficial, modificando variables como la concentración del surfactante, el pH del medio, la temperatura de síntesis o los agentes funcionalizantes añadidos. Esto los convierte en excelentes candidatos para aplicaciones específicas en la eliminación de contaminantes emergentes como colorantes, pesticidas, antibióticos o metales pesados.

Estructuras organizadas de sílice mesoporosa

Los materiales porosos ordenados de sílice, como se mencionó previamente, presentan una red de cavidades generadas por la organización supramolecular de surfactantes y la posterior incorporación de una fuente de silicio. Este proceso de síntesis se realiza comúnmente a través del método sol-gel templado, en el cual el surfactante autoensambla en estructuras micelares, alrededor de las cuales se condensa el precursor de sílice. Posteriormente, mediante procesos de lavado o calcinación controlada, se elimina el surfactante, generando así una matriz porosa sólida.

Dependiendo de las condiciones de síntesis, como la concentración de surfactante, el tipo de agente de sílice y el pH, es posible obtener estructuras con diferentes simetrías: hexagonales, cúbicas o laminares. Estas características estructurales influyen directamente en la eficiencia del material para la adsorción, ya que determinan el acceso, distribución y retención de los contaminantes en las cavidades internas del sólido.

Además, una de las ventajas más destacadas de las sílices mesoporosas es su capacidad de ser funcionalizadas superficialmente. Mediante procesos de modificación química, es posible incorporar grupos activos adicionales que mejoren la interacción con contaminantes específicos. Entre estas estrategias se encuentra la impregnación con moléculas orgánicas, como las aminas. En investigaciones recientes realizadas en laboratorio, se ha utilizado 3-aminopropiltrietoxisilano para introducir grupos amino ($-\text{NH}_2$) en la superficie del material, logrando una superficie enriquecida con funcionalidad dual ($-\text{OH}$ y $-\text{NH}_2$), que incrementa la capacidad de interacción con moléculas orgánicas cargadas o polares.

La morfología típica de estos materiales ha sido descrita como “tipo rod” o “tipo salchicha”, debido a su forma alargada y cilíndrica. Las micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM) muestran claramente una estructura interna altamente ordenada, la cual se conserva incluso después del proceso de funcionalización. Los resultados de caracterización textural indican que los materiales tienen poros promedio entre 7 y 8 nanómetros, y aunque la modificación con agentes funcionales tiende a reducir ligeramente el tamaño de poro y la superficie específica, se conserva su estructura mesoporosa y su capacidad adsorbente.

La incorporación exitosa de los grupos funcionales ha sido confirmada mediante análisis espectroscópicos, como FTIR, observándose bandas características asociadas a la presencia de grupos amino. Esto evidencia que los procesos de modificación superficial fueron efectivos y que los materiales obtenidos son adecuados para la interacción con contaminantes orgánicos presentes en el agua.

Carbones mesoporosos ordenados (OMC)

Una tercera familia de materiales nanoporosos ampliamente investigada para el tratamiento de aguas corresponde a los carbones mesoporosos ordenados (OMC, por sus siglas en inglés). Estos materiales se obtienen utilizando estructuras de sílice mesoporosa como plantillas, las cuales definen la organización espacial del carbono durante su síntesis. El procedimiento implica llenar los poros de la sílice con un precursor de carbono –como sacarosa, alcohol furfurílico u otras fuentes orgánicas–, seguido de un tratamiento térmico controlado que induce la carbonización. Posteriormente, la fase de sílice es eliminada mediante procesos de ataque químico (usualmente con soluciones ácidas), dando lugar a un material con una morfología heredada del molde de sílice, pero cuya fase es completamente carbonosa.

Esta técnica ha permitido desarrollar materiales con estructuras altamente organizadas. Entre los ejemplos más destacados se encuentran los materiales MK-3 y MK-5, originalmente desarrollados en Corea. Ambos se sintetizan a partir de la misma plantilla de sílice, pero difieren en el tipo de precursor de carbono utilizado mientras el MK-3 emplea sacarosa, el MK-5 se sintetiza a partir de polvo de resina fenólica. Esta diferencia en precursores da lugar a distintos tipos de porosidad: en el MK-3, los poros se ubican entre los dominios estructurales (inter-rods), mientras que en el MK-5 existen poros tanto entre como dentro de dichos dominios, dando lugar a una doble porosidad jerárquica.

Al igual que en las sílices mesoporosas, los OMC pueden ser funcionalizados superficialmente para potenciar su afinidad por ciertos contaminantes. En investigaciones recientes, se ha logrado modificar exitosamente estos carbones mediante el anclaje de grupos amino utilizando agentes como el 3-aminopropiltrietoxisilano, lo que permite enriquecer su superficie con funcionalidades específicas ($-NH_2$), además de los grupos típicos carboxilo y fenólicos presentes en el carbono no modificado. Las micrografías electrónicas han mostrado que, tras la modificación, la morfología original y la porosidad ordenada del material se mantienen estables.

La caracterización textural de estos materiales mediante adsorción de nitrógeno indica que los poros del OMC suelen ubicarse en el rango de 4 a 5 nanómetros, evidenciando una mezcla de mesoporos y microporos. Esta doble distribución es particularmente útil, ya que los microporos incrementan la capacidad de adsorción mediante interacciones más fuertes con moléculas pequeñas. Las áreas superficiales específicas alcanzadas por estos carbones superan los 300 m²/g, aunque esta superficie puede disminuir ligeramente tras la modificación química debido a la ocupación parcial de los poros.

Materiales híbridos sílice-carbono

Una estrategia innovadora en el desarrollo de materiales nanoporosos consiste en la síntesis de materiales híbridos que combinan características estructurales tanto de la sílice como del carbono. En lugar de eliminar el surfactante después de la síntesis de la sílice, como es habitual mediante calcinación o lavado, este surfactante se utiliza como precursor de carbono. La estrategia consiste en impregnar la estructura con un ácido, que actúa como agente polimerizante y promotor de la carbonización, lo cual permite generar un material con una capa externa inorgánica (de sílice) y un núcleo interno carbonoso.

Estos materiales híbridos han mostrado propiedades texturales altamente atractivas, con superficies específicas que pueden superar los 500 m²/g. Además, la inclusión del carbono en la estructura interna introduce microporos, complementando la porosidad mesoestructurada de la fase de sílice. Esta combinación resulta particularmente útil para la remoción de una gama más amplia de contaminantes con características fisicoquímicas diversas.

Otra vía emergente y sustentable para la obtención de materiales nanoporosos es la síntesis mecanoquímica, un método considerado ecológico por prescindir de disolventes y emplear energía mecánica como agente de activación (Mateti et al., 2021). En esta técnica, los precursores se someten a choques y fricción dentro de molinos de bolas, lo cual favorece la disminución del tamaño de partícula y la descomposición parcial de materia orgánica, favoreciendo la carbonización a bajas temperaturas. Esta metodología ha demostrado ser una alternativa viable para la producción de adsorbentes a bajo costo, especialmente cuando se parte de residuos agrícolas o urbanos como materia prima.

Entre los desarrollos más prometedores en el campo de los nanomateriales porosos se encuentra la síntesis de carbones activados a partir de tanino de Mimosa, un compuesto extraído de un árbol ampliamente disponible. En este caso, el tanino se combina con un surfactante y agua en un molino de bolas, dando lugar a una mezcla homogénea sin necesidad de etapas intermedias de plantillas o calcinaciones típicas de otros métodos tradicionales. Esta mezcla es posteriormente sometida a un proceso de carbonización y, si se desea, a una activación física. El resultado es un material con una estructura porosa altamente ordenada y una superficie específica que supera los 2000 m²/g, lo cual es significativamente superior a los valores obtenidos mediante síntesis con sílice templada (1000–1200 m²/g). Este enfoque, además de ser más ecológico y eficiente, reduce costos y minimiza la generación de residuos secundarios.

Biocarbones

Paralelamente, los biocarbones (o biochar) constituyen otra línea de desarrollo muy relevante. Estos materiales se obtienen mediante la pirólisis o procesos hidrotermales de biomasa vegetal o animal, tales como cáscaras de frutas, estiércol, bagazo de caña o de arroz (Weber y Quicker, 2018). El proceso implica calentar la biomasa en condiciones de atmósfera controlada con bajo oxígeno y temperaturas superiores a los 300 °C, lo que permite transformar los residuos orgánicos en sólidos carbonosos ricos en funcionalidad superficial (Guo et al., 2022).

Dentro de este enfoque, se han realizado investigaciones con materiales obtenidos a partir de cáscara de mango, zapote, bagazo de arroz y caña de azúcar, los cuales demostraron una remoción superior al 95% de colorantes textiles presentes en aguas residuales. Aunque aún no han sido probados directamente en la eliminación de antibióticos, estos resultados preliminares sugieren un potencial significativo en la remoción de contaminantes emergentes mediante procesos de adsorción.

Biosorbentes

Una última categoría destacada es la de los biosorbentes, materiales obtenidos a partir de residuos biológicos sin necesidad de procesos térmicos. Su preparación consiste en una reducción mecánica del tamaño de partícula mediante molienda o trituración, lo que permite exponer y activar sus unidades estructurales funcionales. Este enfoque aprovecha directamente la capacidad de ciertos materiales vegetales o animales para adsorber contaminantes gracias a la presencia natural de grupos funcionales como -OH, -COOH, o -NH₂.

Como ejemplo de aplicación concreta, se destaca el desarrollo de biosorbentes a partir de cáscara de plátano, un residuo ampliamente disponible en países como Ecuador. En Nicaragua, se llevó a cabo la síntesis de este biosorbente utilizando únicamente técnicas mecánicas: secado, reducción del tamaño de partícula y molienda centrífuga. Los materiales obtenidos han mostrado alta capacidad de adsorción frente a colorantes textiles y se perfilan como una opción viable, de bajo costo, sostenible y de fácil implementación en comunidades rurales o industrias locales.

Estos casos de estudio reafirman que los materiales nanoporosos, tanto sintéticos como derivados de residuos, representan una solución altamente efectiva y sostenible para el tratamiento de aguas contaminadas. En particular, los carbones activados, sílices mesoporosas, OMCs, biocarbones y biosorbentes han mostrado un potencial notable en la adsorción de contaminantes emergentes, como antibióticos y colorantes, superando incluso a tecnologías tradicionales en ciertos parámetros de eficiencia.

Los biosorbentes obtenidos a partir de residuos vegetales, como la cáscara de plátano, también han demostrado ser altamente efectivos para la remoción de contaminantes, particularmente colorantes textiles, alcanzando eficiencias de eliminación superiores al 90%. El proceso de preparación de estos materiales es relativamente simple, involucra etapas básicas como secado, reducción de tamaño de partícula mediante trituración o molienda (manual o mecánica), y tamizado para asegurar la homogeneidad (Figura 4, página siguiente). Si bien el procedimiento es sencillo en escala de laboratorio, su escalabilidad requiere de adaptaciones tecnológicas, como el uso de molinos industriales. No obstante, sus costos de producción y la simplicidad de su procesamiento lo convierten en una alternativa viable y sostenible.



Figura 4. Obtención del biosorbente a partir de cáscara de plátano

Estudio de caso: Uso de materiales nanoporosos para la remoción antibióticos

Como parte de la validación experimental, se desarrolló un estudio de caso para evaluar la eficiencia de adsorción de diferentes materiales nanoporosos sobre un antibiótico modelo: la penicilina. Para ello, se preparó una solución madre del fármaco, la cual fue mezclada con 10 mg de cada adsorbente (carbones ordenados, sílice mesoporosa y materiales híbridos). Las mezclas fueron sometidas a un tiempo de contacto de 8 horas a 30 °C. Posteriormente, se separaron las fases sólidas y líquidas. A la fase líquida se le determinó la concentración remanente del antibiótico y, al sólido, se le caracterizó para confirmar la adsorción efectiva mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), observándose bandas características de los grupos funcionales del antibiótico (carboxilo y N-H).

Las pruebas de caracterización evidenciaron que la morfología de los materiales se mantuvo estable, aunque se registró una ligera reducción en el tamaño de poro, lo cual confirma la presencia de moléculas adsorbidas. En cuanto a la capacidad de adsorción, los carbones mesoporosos ordenados, particularmente el MK-5, presentaron los valores más elevados, superiores a 400 mg/g. Este resultado se atribuye a su alta superficie específica, su doble porosidad (micro y mesoporos), y la afinidad química entre la fase carbonosa y los grupos funcionales del antibiótico.

Un hallazgo inesperado fue que la modificación superficial con grupos amino, si bien no mejoró la capacidad de adsorción, sí favoreció la dispersión del material en medio acuoso, lo cual puede representar una ventaja en sistemas a mayor escala donde se requiera una adecuada distribución del adsorbente en el volumen total de agua tratada.

Además, el uso de residuos agroindustriales para la síntesis de adsorbentes introduce una visión circular y de bajo impacto ambiental, alineada con los principios de producción más limpia y las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN). Esta estrategia no solo permite valorizar residuos, sino también generar tecnologías accesibles para contextos rurales o de escasos recursos.

En este sentido, se recomienda continuar con investigaciones aplicadas que integren procesos de síntesis más verdes (como la mecanosíntesis), pruebas con contaminantes múltiples, escalado industrial y evaluación de costos para asegurar la viabilidad técnica, ambiental y económica de estas tecnologías en escenarios reales. Los materiales nanoporosos no solo son eficientes, sino que simbolizan una nueva generación de soluciones para enfrentar la crisis hídrica global con enfoque en sostenibilidad, equidad y ciencia aplicada.

Consideraciones finales

El uso creciente e indiscriminado de antibióticos en el ámbito médico, veterinario, agrícola e incluso en productos de uso cotidiano ha derivado en una presencia cada vez más significativa de estos compuestos en el ambiente acuático. Muchos de estos antibióticos no son completamente metabolizados por el organismo humano, y una fracción considerable es excretada en forma activa, ingresando así a los sistemas de aguas residuales. Las tecnologías convencionales de tratamiento no siempre logran eliminarlos eficazmente, lo que contribuye al problema de la resistencia bacteriana y a la acumulación de estos contaminantes emergentes en ecosistemas sensibles.

En este contexto, la adsorción se presenta como una tecnología viable, eficiente y prometedora para el tratamiento de aguas residuales. A diferencia de otros métodos más complejos, como la fotocatalisis o la ósmosis inversa, la adsorción requiere de infraestructura relativamente sencilla, condiciones operativas moderadas y permite trabajar con materiales de bajo costo, muchos de ellos derivados de residuos agroindustriales o vegetales.

El eje central de esta estrategia radica en el diseño y desarrollo de materiales adsorbentes con propiedades estructurales y químicas específicas. En particular, los materiales nanoporosos, tales como carbones activados, sílices mesoporosas, híbridos organo-minerales y biosorbentes, permiten una alta eficiencia de remoción gracias a su gran área superficial, porosidad ajustable y potencial de modificación superficial.

La investigación reciente demuestra que la combinación de adsorbentes naturales con otras tecnologías –como procesos biológicos o fotoquímicos– potencia su rendimiento, facilitando la remoción simultánea de contaminantes múltiples. Estos enfoques integrados ofrecen una ruta viable hacia la sostenibilidad, ya que permiten reducir el uso de productos químicos sintéticos, disminuir el costo energético y promover la reutilización de residuos sólidos.

Asimismo, se reconoce que los desafíos actuales trascienden el laboratorio. La escalabilidad de los procesos, la estandarización de los materiales, el monitoreo en tiempo real de la remoción y la validación en condiciones reales de operación son pasos indispensables para lograr una implementación efectiva a nivel industrial o comunitario.

Referencias Bibliográficas

- Balasubramanian, V., Daniel, I., Henry, J., Sivakumar, G., & Mohanraj, K. (2020). Electrochemical performances of activated carbon prepared using eggshell waste. *Applied Sciences*, 2, 1–12.
- Guo, F., Bao, L., Wang, H., Larson, S. L., Ballard, J. H., Knotek-Smith, H. & Han, F. A simple method for the synthesis of biochar nanodots using hydrothermal reactor (2020). *MethodsX*, 7, 101022
- Kesari, K. K., Soni, R., Jamal, Q. M. S., Tripathi, P., Lal, J. A., Jha, N. K., & Ruokolainen, J. (2021). Wastewater Treatment and Reuse: a Review of its Applications and Health Implications. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232, 1–28.
- Mateti, S., Mathesh, M., Liu, Z., Tao, T., Ramireddy, T., Glushenkov, A. M., Chen, Y. Mechanochemistry: A force in disguise and conditional effects towards chemical reaction (2021). *Chemical Communications*, 57(9), 1080–1092.
- Montiel-Centeno, K., Barrera, D., Villarroel-Rocha, J., Moreno, M. S., & Sapag, K. (2019). Hierarchical nanostructured carbons as CO₂ adsorbents. *Adsorption*, 25, 1287–1297.
- Pourhakkak, P., Taghizadeh, A., Taghizadeh, M., Ghaedi, M., & Haghdoust, S. (2021). Fundamentals of adsorption technology. *Interface Science and Technology*, 33, 1–70.
- Richardson, S. D., & Ternes, T. A. (2021). Water Analysis: Emerging Contaminants and Current Issues. *Analytical Chemistry*, 94(1), 382–416.
- Reemtsma, T., & Jekel, M. (2016). Monitoring anthropogenic particles in the environment. Wiley-VCH. Germany, pp. 65–86
- Shafeeyan, M. S., Daud, W. M. A. W., Houshmand, A., & Shamiri, A. (2010). A review on surface modification of activated carbon for carbon dioxide adsorption. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 89(2), 143–151.
- Weber, K., & Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel*, 217, 240–261.

Espectroscopía Raman en el monitoreo de microplásticos en sistemas acuáticos

Lcdo. Freddy Martinez³

kiaramontiel4@gmail.com

La creciente preocupación ambiental por la contaminación plástica ha impulsado el desarrollo de nuevas técnicas de monitoreo, entre ellas, la espectroscopía Raman, que ha emergido como una herramienta analítica poderosa para la identificación de microplásticos en sistemas acuáticos. Antes de profundizar en esta técnica, es esencial definir con claridad qué se entiende por microplásticos.

Los microplásticos son partículas sólidas plásticas cuya dimensión oscila entre 5 milímetros y 1 micrómetro (Perilla et al., 2023; Tiwari et al., 2023). Cuando su tamaño es inferior a 1 micrómetro, se clasifican como nanoplásticos, una categoría emergente de gran interés científico debido a su alta capacidad de penetración en organismos vivos y ecosistemas (Figura 1). Para dimensionar su escala, basta con compararlos con partículas de polen o glóbulos rojos, encontrándose en un rango similar, lo que facilita su ingreso en cuerpos de agua, atmósfera e incluso en el organismo humano.

Desde el punto de vista morfológico y de origen, los microplásticos se clasifican en dos grandes grupos:

³ Licenciado en Química Industrial. Doctorante en Química Analítica en la Universidad de Buenos Aires dentro del Instituto de Química Física de los Materiales, Medio Ambiente y Energía.



1. Microplásticos primarios: Son partículas fabricadas intencionalmente con tamaño reducido para ser empleadas como componentes de productos cosméticos, pastas dentales, exfoliantes o cremas, con el propósito de mejorar su textura, adherencia o funcionalidad. Estas micropartículas, al finalizar su uso, terminan ingresando a los sistemas acuáticos mediante el sistema de drenaje urbano y, eventualmente, al cuerpo humano.
2. Microplásticos secundarios: Corresponden a fragmentos de plásticos mayores que han sido degradados por acción de factores físico-químicos como la radiación solar, la abrasión o la oxidación. Entre sus principales fuentes se encuentran los residuos de bolsas plásticas, botellas de PET, textiles sintéticos, pellets industriales y el desgaste de neumáticos.



Figura 1. Comparación de tamaños de macroplásticos, microplásticos y nanoplasticos

La dinámica de transporte de los microplásticos es compleja y multifactorial. Diversas investigaciones han demostrado que estas partículas pueden ser movilizadas por corrientes fluviales, vientos, aguas pluviales e incluso alcanzar la atmósfera y volver a depositarse mediante la lluvia. Estudios recientes han identificado microplásticos en el agua de lluvia, lo cual sugiere que estas partículas pueden incorporarse al ciclo hidrológico, expandiendo así su alcance a regiones remotas y a distintos niveles del sistema ambiental (Lam et al., 2023).

En este contexto, el monitoreo efectivo de los microplásticos en ambientes acuáticos se vuelve prioritario. Es aquí donde la espectroscopía Raman surge como una técnica de gran potencial, permitiendo una identificación precisa de la composición química de las partículas sin necesidad de procedimientos destructivos o reactivos adicionales. En las siguientes secciones se abordarán los fundamentos de esta técnica, sus aplicaciones específicas en el análisis de microplásticos, así como sus ventajas, limitaciones y oportunidades de mejora.

Impacto ambiental y rutas de exposición de los microplásticos

Una fuente crítica y muchas veces subestimada de dispersión de microplásticos en los ecosistemas acuáticos son las plantas de tratamiento de aguas residuales. En múltiples instalaciones, especialmente en países donde la regulación ambiental aún no contempla específicamente la remoción de microplásticos, estos contaminantes no son adecuadamente retenidos durante los procesos convencionales de tratamiento. En consecuencia, una parte significativa de estos residuos plásticos microscópicos es liberada en cuerpos de agua superficiales como ríos, lagunas y lagos. En respuesta a esta problemática, ciertos países europeos han comenzado a legislar para exigir la implementación de tecnologías capaces de capturar microplásticos antes de la descarga final de efluentes.

Los microplásticos, una vez liberados al ambiente, pueden ser transportados a largas distancias por corrientes hídricas, precipitaciones o incluso por el viento. Su ubicuidad ha sido ampliamente documentada, incluyendo hallazgos en zonas remotas como la Antártida, lo cual evidencia la magnitud de su dispersión a escala global.

Desde el punto de vista ambiental y ecológico, los microplásticos se encuentran no solo en las columnas de agua, sino también en sedimentos, organismos acuáticos y redes tróficas. Su presencia en peces es particularmente preocupante, dado que representa un vector directo de ingreso a la cadena alimentaria humana. En el tejido y tracto digestivo de peces capturados para consumo, se han identificado microplásticos adheridos o incrustados, evidenciando dos procesos claves: bioacumulación y biomagnificación.

- Bioacumulación se refiere a la acumulación progresiva de microplásticos en organismos individuales, como peces pequeños, debido a la exposición continua en su entorno. Estas partículas pueden alojarse en órganos como branquias, intestinos y piel, generando estrés fisiológico e incluso afectando su comportamiento y reproducción (Figura 2).

- Biomagnificación, por otro lado, ocurre a lo largo de la cadena trófica. Organismos de mayor nivel trófico, como peces predadores, aves o humanos, que se alimentan de peces contaminados, no solo incorporan microplásticos, sino también los contaminantes adsorbidos en sus superficies. Los microplásticos tienen una alta afinidad por sustancias tóxicas persistentes como metales pesados, pesticidas o productos farmacéuticos, actuando como vectores móviles de contaminación química.

Este fenómeno implica que el ser humano no solo está expuesto a los riesgos intrínsecos del plástico en sí, sino también a la toxicidad de los compuestos que estos materiales transportan. Así, el impacto sanitario es doble: por la presencia física de las partículas y por la carga química que estas portan.

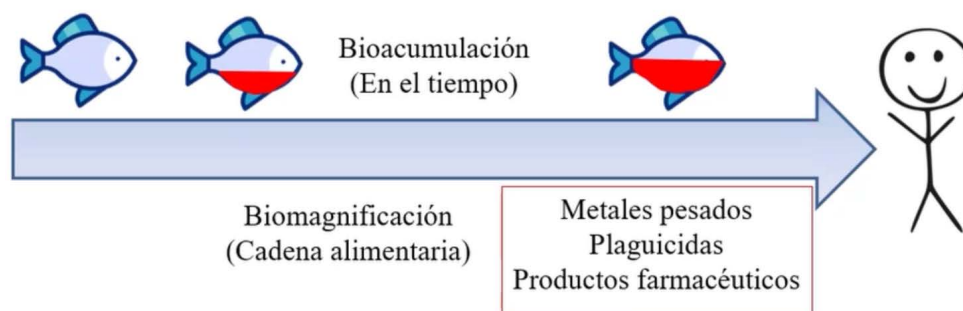


Figura 2. Comparación de biomagnificación y bioacumulación

La exposición humana a microplásticos puede producirse a través de diversas rutas: ingestión, inhalación, absorción dérmica e incluso por contacto térmico con materiales plásticos que liberan partículas por degradación o calentamiento (Figura 3). En la vida cotidiana, el uso de cosméticos, productos alimenticios envasados en plástico o la inhalación de aire en ambientes contaminados son ejemplos comunes de cómo los microplásticos pueden ingresar al organismo. Incluso alimentos aparentemente saludables, como ensaladas servidas en recipientes plásticos, pueden ser fuente de exposición.

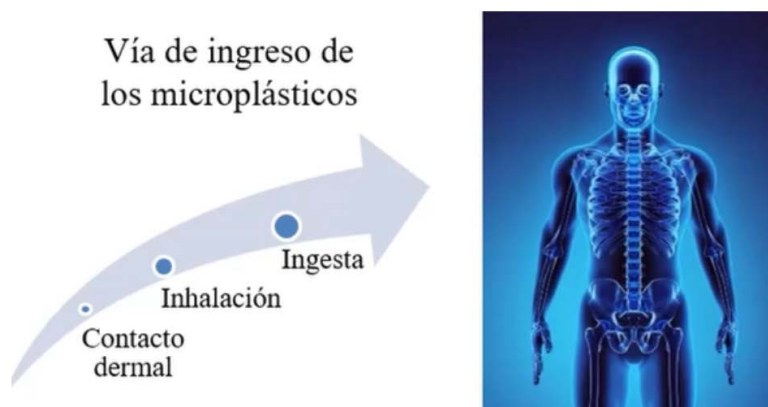


Figura 3. Vías de ingreso de microplásticos

Una vez dentro del cuerpo, estos fragmentos pueden transitar por diferentes sistemas fisiológicos. Diversos estudios han documentado la presencia de microplásticos en órganos humanos tan sensibles como la placenta, el cerebro, e incluso en el tejido óseo. Este último hallazgo ha generado especial preocupación, debido a que el tejido óseo, al ser poroso, podría permitir el anclaje de partículas microscópicas durante periodos prolongados. Investigaciones recientes han comenzado a vincular la presencia de microplásticos en el sistema nervioso central con enfermedades neurodegenerativas, como el mal de Parkinson, aunque estos hallazgos todavía están en fase exploratoria y requieren más evidencia científica.

A nivel celular y molecular, se han identificado efectos fisiopatológicos como inflamación crónica, estrés oxidativo, disfunción mitocondrial, y alteraciones hormonales. Estas respuestas pueden variar según el tamaño, forma, composición química del microplástico y la carga contaminante que transporta (Manrique, 2020). La posibilidad de que estos materiales sirvan como vectores de compuestos tóxicos, como metales pesados y fármacos, acentúa aún más los posibles efectos adversos en la salud pública.

Introducción a la espectroscopía Raman como herramienta de análisis

Una vez comprendido el impacto ambiental y sanitario de los microplásticos, resulta esencial contar con herramientas analíticas precisas para su detección, caracterización e identificación. Entre las técnicas más prometedoras destaca la espectroscopía Raman, una herramienta vibracional que ha cobrado gran relevancia en los últimos años, especialmente en el estudio de materiales plásticos a micro y nanoescala.

La espectroscopía Raman se basa en la dispersión inelástica de la luz (Bugliani et al. 2012). Cuando un haz de luz láser monocromático, por ejemplo, con longitud de onda de 532 nm, incide sobre una muestra, la mayoría de los fotones se dispersan elásticamente (Rayleigh), manteniendo su misma energía. Sin embargo, una fracción muy pequeña de estos fotones interactúa con los modos vibracionales de la molécula y sufre un cambio de energía: este fenómeno se conoce como dispersión Raman.

Dicho cambio permite obtener información sobre los modos vibracionales de las moléculas presentes en la muestra, generando un espectro que actúa como una huella dactilar molecular. Esta huella es única para cada tipo de polímero, lo que permite diferenciar entre, por ejemplo, polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), tereftalato de polietileno (PET), entre otros. Esta característica convierte a la espectroscopía Raman en una técnica extremadamente útil para la identificación precisa de microplásticos en matrices complejas como agua, sedimentos, tejidos animales o alimentos.

Una diferencia clave respecto a otras técnicas vibracionales, como la espectroscopía infrarroja (IR), es que Raman mide la dispersión de la luz, mientras que IR mide la absorción de energía. Ambas son técnicas complementarias y pueden utilizarse de forma conjunta para confirmar la composición química de las partículas. En contextos ambientales, donde las muestras suelen estar contaminadas o mezcladas con materiales orgánicos, Raman ofrece ventajas sustanciales, como la posibilidad de análisis in situ, sin necesidad de preparación química intensiva.

Funcionamiento del equipo Raman y ventajas de la técnica

El principio de funcionamiento de un equipo de espectroscopía Raman se basa en la interacción de un haz de luz monocromático con la muestra. Cuando esta radiación incide sobre el material, una parte de la luz es dispersada de forma inelástica, proporcionando información sobre los modos vibracionales de las moléculas presentes. Esta luz dispersada es dirigida hacia el sistema óptico del equipo Raman, donde atraviesa un filtro notch que elimina la señal Rayleigh (la luz dispersada elásticamente) y permite el paso únicamente de las longitudes de onda que contienen la información vibracional útil.

Posteriormente, la señal entra en una red de difracción, que actúa descomponiendo la luz en sus distintas longitudes de onda, similar a un arcoíris espectral, y permite su análisis detallado. Esta luz, ya separada, llega a un detector, que transforma la señal óptica en una señal digital. Finalmente, se obtiene un espectro Raman, el cual representa la intensidad de la señal dispersada en función del número de onda (cm^{-1}), generando un patrón único que actúa como una huella dactilar molecular del analito.

En el laboratorio, se utiliza un microscopio Raman confocal, el cual combina capacidades ópticas de alta resolución con el sistema espectroscópico, permitiendo no solo identificar, sino también localizar espacialmente los microplásticos sobre una superficie. Este tipo de microscopio ofrece ventajas significativas en cuanto a precisión y resolución tridimensional (X, Y, Z), facilitando el análisis volumétrico de muestras complejas.

Entre las principales ventajas de la espectroscopía Raman se destacan:

- **Técnica no destructiva:** no requiere contacto físico con la muestra ni preparación previa compleja. A diferencia de técnicas ópticas tradicionales, no es necesario el uso de líquidos de inmersión ni medios de montaje.
- **Posibilidad de análisis directo:** pueden analizarse muestras sólidas, líquidas o en polvo sin necesidad de pretratamiento. Incluso soluciones acuosas pueden ser evaluadas debido a que el espectro Raman del agua es prácticamente despreciable, a diferencia del espectro de absorción infrarroja (IR).
- **Alta resolución espacial:** el límite de resolución de la espectroscopía Raman confocal alcanza el orden de 1 micrómetro, lo cual supera ampliamente al límite de detección de técnicas como FTIR, cuyo umbral mínimo se sitúa alrededor de 10 micrómetros. Esto permite identificar microplásticos de tamaño extremadamente reducido.
- **Capacidad de mapeo superficial:** mediante el escaneo automatizado de superficies, la técnica permite generar mapas químicos detallados, identificando y clasificando las partículas presentes. El equipo captura imágenes de alta resolución y genera datos espectrales asociados a cada punto del mapeo.
- **Versatilidad en el tipo de muestra:** tanto partículas en filtros como muestras líquidas pueden ser caracterizadas con precisión.

Estas propiedades convierten a la espectroscopía Raman en una herramienta poderosa y precisa para el monitoreo de microplásticos en medios acuáticos, permitiendo avanzar significativamente en la caracterización de estos contaminantes emergentes, incluso en concentraciones y tamaños antes imposibles de detectar con otras técnicas.

Si bien la espectroscopía Raman presenta una serie de ventajas notables en el análisis de microplásticos, no está exenta de limitaciones. En primer lugar, una de las principales desventajas al aplicar esta técnica al estudio de microplásticos es la interferencia por fluorescencia. Muchos polímeros plásticos contienen aditivos orgánicos o pigmentos que, al ser excitados por el haz láser, generan una señal fluorescente intensa. Esta señal no deseada eleva la línea base del espectro, dificultando la interpretación de las bandas Raman y, en algunos casos, saturando el detector.

Otra limitación importante es la baja eficiencia intrínseca de dispersión Raman. De cada 10.000 fotones que inciden sobre una molécula, solo uno genera un evento Raman detectable. Esta escasa eficiencia puede ser particularmente problemática en muestras con baja concentración del analito o en aquellas con baja sección de dispersión Raman.

Para superar estas limitaciones, se han desarrollado técnicas complementarias y de intensificación de la señal, entre las que destaca la espectroscopía Raman amplificada por superficie (Surface-Enhanced Raman Spectroscopy, SERS). Esta técnica permite incrementar la señal Raman hasta en varios órdenes de magnitud, mediante el uso de nanopartículas metálicas, típicamente de oro o plata, o superficies metálicas nanoestructuradas que presentan rugosidades específicas.

En SERS, el fenómeno de intensificación ocurre cuando la molécula analizada se encuentra próxima o en contacto con estas superficies metálicas. Las nanopartículas generan campos electromagnéticos localizados (efecto "hot spot") que amplifican significativamente la señal Raman. En consecuencia, incluso soluciones altamente diluidas, por ejemplo, del orden de 10^{-7} M, pueden generar espectros de alta intensidad, comparables o incluso superiores a los obtenidos con espectros Raman convencionales de muestras sólidas.

Un espectro Raman típico de una sustancia sólida (línea negra) puede ser intensificado en presencia de una superficie SERS, alcanzando señales mucho más intensas y nítidas. Este tipo de tecnología resulta especialmente útil en el análisis de contaminantes emergentes, como microplásticos y residuos de plaguicidas, donde la detección a nivel traza es fundamental.

Así, el uso combinado de Raman y SERS no solo mejora la sensibilidad analítica, sino que amplía el rango de aplicaciones de la espectroscopía vibracional en el monitoreo ambiental. Sin embargo, la selección del método debe considerar cuidadosamente la naturaleza del analito, la matriz de la muestra, y las condiciones experimentales, dado que la reproducibilidad en superficies SERS todavía representa un desafío técnico en contextos rutinarios o de campo.

Identificación espectroscópica de microplásticos: desafíos analíticos y consideraciones técnicas

La identificación de microplásticos en matrices ambientales mediante espectroscopía Raman presenta múltiples ventajas, pero también conlleva ciertos desafíos metodológicos, especialmente cuando las muestras contienen interferencias generadas por aditivos, pigmentos o contaminantes orgánicos adheridos a las partículas plásticas.

En un escenario ideal, la señal Raman obtenida de una microfibra puede ser superpuesta con una referencia espectral de la base de datos, permitiendo una identificación directa del polímero. No obstante, este proceso no siempre es sencillo. En algunos casos, como con el polipropileno, los espectros obtenidos presentan importantes diferencias respecto a los de referencia. Estas discrepancias son particularmente evidentes en la región espectral conocida como "zona de huella dactilar", comprendida entre los 500 y 1600 cm^{-1} , donde suelen observarse las bandas características más informativas para la identificación de polímeros. En tales situaciones, resulta complejo discernir cuáles picos corresponden efectivamente al polímero base y cuáles son atribuibles a aditivos, pigmentos o a procesos de degradación.

Para solventar esta limitación, se complementa el análisis espectral con el estudio estructural de los polímeros. La mayoría de los plásticos contienen grupos funcionales característicos como los grupos metilo ($-\text{CH}_3$), los cuales generan señales intensas en la región de 2940 cm^{-1} , asociadas al estiramiento simétrico y asimétrico de los enlaces C-H. Esta banda suele estar presente de forma recurrente en plásticos como el polietileno, el polipropileno y otros polímeros derivados del petróleo.

Tras superar los retos analíticos, el equipo de investigación ha logrado identificar distintos tipos de microplásticos en diversas matrices ambientales, incluyendo peces, mejillones y sedimentos. Entre los polímeros detectados se encuentran el poliéster, el neopreno (un tipo de caucho sintético), el poliácridonitrilo (PAN) y el tereftalato de polietileno (PET). En todos los casos, la validación de la identificación se ha apoyado en la coincidencia espectral con bibliotecas de referencia, así como en el análisis de los grupos funcionales característicos observados en los espectros Raman.

Esta metodología permite no solo la detección, sino también la caracterización estructural de los microplásticos, lo cual es crucial para entender su origen, comportamiento ambiental y posibles implicancias toxicológicas.

Resultados preliminares del monitoreo de microplásticos en peces del río Pergamino (Buenos Aires, Argentina)

Como parte del estudio de caso, se presenta a continuación una experiencia de identificación de microplásticos en peces de la especie Mojarra, recolectados en distintos puntos del río Pergamino, ubicado en la provincia de Buenos Aires, Argentina. El objetivo del muestreo fue comparar la presencia de microplásticos en peces capturados antes, en medio, y después del paso del río por la zona urbana de la ciudad de Pergamino, tomando como sitios de referencia los puntos denominados De la Cruz, Asuela y Crisol, respectivamente (Figura 4).



Figura 4. Puntos del muestreo del río Pergamino.

En total, se analizaron 21 ejemplares de Mojarra, con una distribución equitativa de siete individuos por sitio. De los peces muestreados, 14 presentaron al menos un microplástico, detectado ya sea en el tracto digestivo o en las branquias. Para el análisis se disecaron ambos órganos por separado, aplicando los protocolos de extracción, filtración e identificación mediante espectroscopía Raman.

Los polímeros identificados incluyeron polipropileno (PP), poliéster (PES) y polietileno (PE), entre otros. Estos resultados confirman la ingestión activa de microplásticos por parte de los peces, así como la exposición directa a través de las branquias, lo que evidencia diferentes rutas de ingreso de estos contaminantes al organismo.

Un hallazgo relevante del estudio fue la variabilidad espacial observada en la distribución de microplásticos entre los sitios muestreados. En el caso de De la Cruz (aguas arriba de la ciudad), se detectaron microplásticos únicamente en el tracto digestivo, con nueve microplásticos en total, mientras que las branquias no mostraron presencia detectable. Esto sugiere una posible incorporación por alimentación, pero limitada exposición directa.

En contraste, en el sitio Asuela, ubicado inmediatamente después del paso del río por la zona urbana, no se detectaron microplásticos en el tracto digestivo, pero sí en las branquias, lo cual resulta inesperado, ya que se presumía que esta zona presentaría mayor contaminación por ser aguas abajo de la ciudad.

Finalmente, en el sitio Crisol, más alejado de la ciudad, se encontraron microplásticos tanto en el tracto digestivo como en las branquias, lo que indica una doble vía de exposición y posiblemente una mayor acumulación de contaminantes en ese sector.

Estos hallazgos preliminares reflejan la complejidad del transporte y distribución de microplásticos en ecosistemas fluviales y advierten sobre la necesidad de realizar un monitoreo más exhaustivo para obtener patrones más sólidos. Se ha planificado una nueva campaña de muestreo con una muestra poblacional ampliada, lo que permitirá fortalecer las inferencias y generar conclusiones más robustas respecto al comportamiento de los microplásticos en estos sistemas acuáticos.

Identificación de microplásticos en mejillones y sedimentos: estudio de casos en ambientes costeros y fluviales de Argentina

Además del análisis en peces, se realizaron estudios complementarios en otras matrices ambientales, con el objetivo de comprender de manera más integral la distribución y tipos de microplásticos presentes en ecosistemas acuáticos. En este sentido, se abordaron dos nuevas líneas de investigación: mejillones recolectados en la zona costera de Mar del Plata y sedimentos del río Matanza-Riachuelo, ubicado en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA).

Microplásticos en mejillones (Mar del Plata)

Los mejillones analizados fueron muestreados en la costa de Mar del Plata, una de las zonas costeras más turísticas y transitadas de Argentina. Esta área es receptora potencial de descargas industriales, urbanas y recreativas, lo que la convierte en un sitio clave para el monitoreo de contaminantes emergentes.

A partir del análisis mediante espectroscopía Raman, se logró identificar la presencia de cinco tipos diferentes de microplásticos en los tejidos de los mejillones. Estos resultados, que ya han sido enviados para publicación científica, evidencian que los bivalvos actúan como bioindicadores eficientes de la contaminación plástica en ambientes marinos. La acumulación en estos organismos filtra grandes volúmenes de agua, permitiendo la detección de partículas incluso a bajas concentraciones.

Microplásticos en sedimentos del río Matanza-Riachuelo

Por otra parte, se realizó un muestreo sistemático de sedimentos superficiales en el río Matanza-Riachuelo, uno de los cuerpos de agua más contaminados del país. Esta cuenca representa una fuente prioritaria de preocupación ambiental, por lo que constituye un entorno propicio para la evaluación de la presencia de microplásticos.

Los resultados fueron contundentes, de un total de 197 partículas analizadas, se confirmó que más del 50% correspondían a microplásticos, específicamente 100 partículas. Este alto porcentaje no solo refleja la severidad de la contaminación, sino que también valida la utilidad de los sedimentos como matriz de monitoreo en áreas altamente impactadas.

Los tipos de polímeros más comúnmente identificados incluyeron poliéster (PES), tereftalato de polietileno (PET), polietileno de alta densidad (HDPE) y polietileno nitrilo (PEN). Cabe destacar que estas sustancias están ampliamente presentes en bolsas plásticas, envases y textiles, lo que sugiere su origen en fuentes domésticas, industriales y urbanas.

Un análisis detallado de la distribución de tamaños mostró que la mayoría de las partículas tenían dimensiones menores a 100 micrómetros, lo que resalta la complejidad de su remoción y detección. Estas fracciones de menor tamaño pueden ser particularmente problemáticas, dado su potencial de penetración biológica y persistencia ambiental.

Consideraciones finales

A lo largo de la conferencia se ha presentado un panorama integral sobre la problemática de los microplásticos en ecosistemas acuáticos, destacando sus fuentes, vías de ingreso, impactos potenciales y desafíos analíticos. La técnica de espectroscopía Raman, particularmente con configuración de microscopía confocal, ha demostrado ser una herramienta altamente eficaz para la identificación y caracterización de estos contaminantes, siempre que se disponga de una base de datos espectral robusta y se apliquen protocolos de control adecuados.

Los resultados obtenidos en peces, mejillones y sedimentos respaldan la urgencia de fortalecer el monitoreo ambiental, avanzar en la implementación de políticas de control y fomentar la investigación en técnicas avanzadas de detección. En conjunto, estas acciones permitirán abordar de manera interdisciplinaria uno de los desafíos emergentes más relevantes para la salud ambiental y humana del siglo XXI.

Referencias Bibliográficas

- Bugliani, M. Fabiana, Di Lello, Claudia, Freire, Eleonora, Polla, Griselda, Petragalli, Alicia, Reinoso, María, & Halac, Emilia B. (2012). Empleo de espectroscopia RAMAN, difracción de rayos X y microscopia electrónica para el análisis de pigmentos en cerámicas vaquerías.. Boletín del Museo Chileno de Arte Precolombino, 17(2), 65-74. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-68942012000200006>
- Lam, T. W. L., Tsui, Y. C. J., Cheng, Y. L., Hin, A. T., MA, & Fok, L. (2023). Microplastic contamination in edible clams from popular recreational clam-digging sites in Hong Kong and implications for human health. The Science Of The Total Environment, 875, 162576. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162576>
- Manrique, R. (2020). Microplásticos: el enorme problema de pequeñas partículas de plástico. Revista De Química, 34(1-2), 8-14. Recuperado a partir de <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/2079>
- Perilla, F., Quiroz, J. (2023). Microplásticos, una amenaza invisible para la salud humana y ambiente. Revista Cubana de Salud Pública, 49(4).
- Tiwari, B. R., Lecka, J., Pulicharla, R., & Brar, S. K. (2023). Microplastic pollution and associated health hazards: Impact of COVID-19 pandemic. Current Opinion In Environmental Science & Health, 34, 100480.

Eje II: Gestión Sostenible del Agua: Calidad, Reutilización y Circularidad



Economía circular del agua: hacia un futuro sin desperdicio



Dra. Altamira Díaz⁴

adiaz@fing.luz.edu.ve

La presente conferencia, titulada “Economía circular del agua: hacia un futuro sin desperdicio”, tuvo como objetivo destacar la necesidad urgente de replantear la forma en que gestionamos el recurso hídrico, incorporando los principios de la economía circular a un sector tradicionalmente abordado desde una lógica lineal. Si bien existe una amplia difusión del concepto de economía circular en el ámbito de los residuos sólidos, su aplicación al recurso agua continúa siendo poco conocida o comprendida por gran parte de la sociedad y de los responsables de políticas públicas.

El agua ha sido ampliamente reconocida como un recurso vital para la vida en la Tierra. Diversos organismos internacionales, como el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la FAO o la UNESCO, han advertido que este elemento constituye una de las piedras angulares sobre las que se asienta el futuro compartido de la humanidad. En ese contexto, se reafirma su presencia dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente en el ODS 6: Agua limpia y saneamiento, y se lo vincula de manera transversal con otras metas de la Agenda 2030.

⁴ Ingeniera Civil. Magister Scientiarum en Ingeniería Ambiental. Doctora en Ingeniería de procesos y medio ambiente.

Uno de los principales errores históricos ha sido considerar al agua como un recurso abundante y renovable, lo cual ha fomentado patrones de uso ineficientes, desperdicio y una limitada conciencia sobre su escasez real. Desde etapas tempranas de formación, se ha transmitido la idea de que el agua puede utilizarse sin restricciones, sin internalizar que se trata de un recurso finito y cada vez más inaccesible.

Actualmente, apenas el 1% del agua dulce en el planeta es fácilmente accesible para consumo humano, mientras que el restante 99% se encuentra atrapado en glaciares, acuíferos profundos o en formas no potables. Esta realidad obliga a tratar el agua como un recurso escaso, y a repensar los modelos de extracción, tratamiento, consumo y reutilización desde una perspectiva circular y sostenible.

La elección de trabajar sobre el agua dulce se justifica, entre otros aspectos, por ser la fracción más amigable ambientalmente y la más sencilla de tratar mediante tecnologías convencionales. Los sistemas tradicionales de tratamiento de agua, basados en procesos físicos, químicos y biológicos de bajo costo relativo, permiten su implementación a escala comunitaria e industrial. Sin embargo, estas soluciones resultan insuficientes frente al crecimiento desmedido de la demanda y la aceleración de la contaminación.

Diversos informes internacionales alertan sobre una crisis hídrica global en el corto y mediano plazo. Un reporte de las Naciones Unidas estima que para el año 2030 habrá un déficit del 40% de agua potable a nivel mundial. Esta proyección se basa en el crecimiento demográfico, el aumento del consumo per cápita y los impactos acumulativos de la degradación ambiental. Para el año 2050, se prevé que más de 6.000 millones de personas sufrirán algún grado de escasez hídrica, como consecuencia directa de la presión sobre las fuentes de agua dulce y el deterioro de los ecosistemas acuáticos.

Además, datos recientes del World Resources Institute (WRI) revelan que al menos 25 países presentan actualmente niveles críticos de estrés hídrico, muchos de ellos en África y Asia, pero también en regiones de América Latina. Esta situación se agrava por la persistencia de modelos de desarrollo intensivos en recursos, derivados de la Revolución Industrial, que no han sido suficientemente corregidos por las transiciones tecnológicas recientes.

En este contexto, resulta ilustrativo recuperar los aportes del famoso informe de 1972, "Los límites del crecimiento", que ya advertía sobre los riesgos de un crecimiento demográfico y económico desenfrenado. El modelo de simulación elaborado por este grupo de científicos señalaba que la disponibilidad de recursos naturales podía convertirse en un límite insalvable para la continuidad del desarrollo. Sin embargo, en una actualización publicada en 2004, el grupo sostuvo que el mayor límite al crecimiento no sería la escasez de recursos en sí misma, sino la contaminación generada por los modelos de producción y consumo actuales (Donner et al., 2021).

Este cambio de enfoque es particularmente relevante para el caso del agua. No es únicamente su disponibilidad lo que está en juego, sino su calidad. La contaminación de ríos, lagos, acuíferos y océanos está reduciendo de forma acelerada la cantidad de agua apta para el uso humano, agrícola e industrial. Por tanto, la economía circular del agua no solo debe centrarse en la reutilización y el reciclaje, sino también en la prevención de la contaminación, la reducción de pérdidas y la regeneración de ecosistemas hídricos (Pomoni et al., 2024).

Hacia un Modelo Circular y Resiliente para la Gestión del Agua

Los avances tecnológicos de las últimas décadas han abierto oportunidades significativas para optimizar el uso de los recursos naturales. Se disponen hoy de herramientas y soluciones innovadoras que permitirían mantener el valor y el flujo de los recursos dentro de los sistemas económicos. Sin embargo, el verdadero desafío ya no es exclusivamente tecnológico, sino ambiental, la contaminación está generando un impacto creciente que amenaza con superar nuestras capacidades de respuesta.

Ante esta situación, los profesionales del área ambiental proponen un cambio de paradigma, articulado en torno al modelo de economía circular. Se trata de un sistema global regenerativo, en el cual los recursos conservan su valor durante el mayor tiempo posible y la generación de residuos se minimiza al máximo. Este principio, la minimización de residuos, es la clave para alcanzar un modelo sostenible, particularmente en el sector hídrico.

Actualmente, el modelo dominante sigue siendo el de la economía lineal, basado en una secuencia de extracción, producción, consumo y descarte. Este enfoque genera productos de corta vida útil y elevado impacto ambiental, lo cual no es compatible con la gestión sustentable, especialmente cuando se trata de recursos finitos como el agua. Por el contrario, el modelo circular busca cerrar los ciclos productivos, reutilizando, regenerando y valorizando los flujos que hoy consideramos desechos (Kirchherr et al., 2018; Korhonen et al., 2018).

La Agenda 2030 de las Naciones Unidas, a través de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), promueve activamente este cambio. Varios de los ODS están directamente relacionados con el agua y los ecosistemas acuáticos, como el ODS 6 (Agua lim-

pia y saneamiento), el ODS 12 (Producción y consumo responsables), y el ODS 14 (Vida submarina). Además, desde el año 2010, la Organización de las Naciones Unidas ha reconocido formalmente que el acceso al agua es un derecho humano, lo que refuerza la urgencia de reformar su gestión con principios de equidad, eficiencia y sostenibilidad (Naciones Unidas, 2015).

En este marco, se plantea que la economía circular aplicada al sector hídrico requiere no solo nuevas tecnologías, sino también transformaciones organizacionales y sociales profundas. Es necesario transitar progresivamente desde el modelo lineal hacia un modelo circular, mediante procesos de transición estructurados que involucren:

- Modelos de negocio innovadores, centrados en la reutilización de los flujos considerados residuos.
- Tecnologías disruptivas, capaces de recuperar agua, nutrientes y energía de sistemas actualmente ineficientes.
- Innovaciones sociales y culturales, que fomenten la participación ciudadana y el cambio de comportamiento en relación con el uso del agua.

Este proceso no está exento de resistencias. La transición hacia una economía circular implica una revisión de los modelos tradicionales de producción, y en muchos casos, una reducción de la producción total en favor de una mayor eficiencia y durabilidad de los bienes y servicios. Asimismo, exige un paso importante: migrar desde una economía industrializada, fuertemente dependiente de la extracción y transformación de materias primas, hacia una economía de servicios, centrada en la sostenibilidad y la resiliencia.

Para lograrlo, el incentivo y la participación activa de todos los sectores es fundamental. Se requiere el compromiso no solo de los tomadores de decisión, sino también de los profesionales, las empresas, la academia y la ciudadanía. La economía circular no debe verse únicamente como una solución técnica, sino como una oportunidad para rediseñar nuestros sistemas desde una lógica regenerativa y colaborativa.

En el ámbito del agua, esto implica diseñar productos, servicios y políticas públicas que prioricen el uso racional y eficiente del recurso, por encima de su valor comercial. La resiliencia, término que ha cobrado gran relevancia en los últimos años, debe aplicarse no solo a las personas y las comunidades, sino también a los sistemas de gestión ambiental. Solo así será posible construir un modelo hídrico circular, equitativo y sostenible, capaz de enfrentar los desafíos actuales y de garantizar la seguridad hídrica a largo plazo.

Ineficiencias del Modelo Actual y el Rol del Uso Consuntivo del Agua

Una de las grandes ventajas de la economía circular aplicada al recurso hídrico es su capacidad para reducir ineficiencias, recuperar recursos y promover soluciones basadas en la naturaleza (SbN). Este enfoque no solo permite reutilizar materiales, sino también disminuir los costos de capital y operación, lo cual se traduce en una mayor rentabilidad a largo plazo. Sin embargo, esta perspectiva aún no es plenamente aceptada por todos los actores involucrados en la gestión del agua, lo que representa un obstáculo para la implementación efectiva de este modelo.

La pregunta de fondo, que aún no ha sido resuelta de forma integral, es: ¿dónde se originan nuestras principales deficiencias en la gestión del agua?. ¿Qué errores estructurales hemos cometido y cómo podemos corregirlos?. Para ello, es necesario examinar con atención el origen del agua que utilizamos, el destino que le damos y el nivel de circularidad y sostenibilidad que hemos logrado establecer en el sistema.

Un concepto clave en este análisis es el uso consuntivo del agua, es decir, el agua que, tras su utilización, no retorna al cuerpo hídrico de origen o lo hace en condiciones de alta contaminación. Dentro de este grupo se encuentran los usos domésticos, urbanos, industriales y agrícolas, que constituyen la mayor parte del consumo hídrico global. Esta agua, una vez utilizada, raramente es recuperada o reciclada, y en los casos en que se devuelve al medio ambiente, lo hace altamente contaminada, comprometiendo los ecosistemas y la salud pública.

Según estimaciones recientes, entre el 90% y el 95% del agua utilizada en estos sectores proviene de fuentes convencionales, como ríos, lagos y acuíferos, sin pasar por procesos de reutilización o desalación. Este modelo lineal genera una fuerte dependencia de los recursos hídricos primarios y no aprovecha fuentes alternativas como el agua reciclada o el agua desalada.

La desalación, aunque representa una alternativa prometedora –especialmente en regiones áridas o costeras–, enfrenta importantes limitaciones: es una tecnología de alto costo energético y financiero, frecuentemente inaccesible para países con recursos limitados. Por estas razones, los esfuerzos deberían centrarse en incentivar el reciclaje de aguas residuales tratadas, una estrategia que permite cerrar ciclos, reducir la presión sobre las fuentes naturales y garantizar una mayor resiliencia hídrica.

Cabe destacar que el uso doméstico, aunque relevante, representa un porcentaje menor del uso consuntivo total. Son los sectores industrial y agropecuario los que concentran la mayor demanda de agua, especialmente en actividades de gran escala. Lamentablemente, en estos sectores, el nivel de tratamiento de las aguas residuales es mínimo. Se estima que aproximadamente el 80% de las aguas residuales generadas a nivel mundial son vertidas directamente en cuerpos de agua sin ningún tipo de tratamiento previo. Esta cifra, ampliamente conocida entre los profesionales del sector, pone en evidencia la magnitud del desafío.

La situación descrita no solo representa una pérdida de recursos y una amenaza ambiental, sino también una oportunidad para rediseñar el sistema de gestión del agua desde una lógica circular. Transformar este modelo implica revalorizar las aguas residuales como recursos, implementar tecnologías de tratamiento accesibles y adaptadas al contexto, y generar incentivos que promuevan la reutilización segura, particularmente en sectores con alto consumo hídrico.

Solo con una visión sistémica y una voluntad política y técnica decidida, será posible avanzar hacia un sistema hídrico regenerativo, en el que los recursos se mantengan en uso el mayor tiempo posible, se minimicen las pérdidas, y se garantice la salud de los ecosistemas acuáticos y terrestres que dependen del agua.

La Agricultura y su Rol Crítico en la Economía Circular del Agua

La industria y, en particular, la agricultura, constituyen los sectores de mayor consumo de agua dulce a nivel global, lo que hace insostenible la demanda actual del recurso. De todos los usos consuntivos del agua, el sector agrícola es el que concentra el mayor porcentaje de extracción, representando aproximadamente el 69% del uso total de agua dulce, de acuerdo con estimaciones de organismos internacionales. Esta cifra equivale a casi tres cuartas partes del agua disponible en sistemas naturales, destinada exclusivamente al riego de cultivos.

Esta elevada presión sobre los recursos hídricos exige una transformación profunda en las prácticas agrícolas. Reducir el uso de agua dulce en este sector permitiría liberar volúmenes significativos del recurso, lo que contribuiría a aliviar la tensión sobre los cuerpos de agua, mejorar la disponibilidad para otros usos y, en consecuencia, favorecer la adaptación al cambio climático.

Además del elevado consumo, la agricultura también representa una fuente significativa de contaminación difusa. El uso excesivo de nutrientes, fertilizantes y agroquímicos genera escorrentías y percolaciones que terminan en ríos, lagos y acuíferos, cargadas con sustancias tóxicas que degradan los ecosistemas acuáticos y afectan la salud humana. De este modo, el problema no radica únicamente en la cantidad de agua extraída, sino también en la calidad del agua que se devuelve –cuando se devuelve– al sistema.

Este fenómeno pone en evidencia una verdad incómoda pero irrefutable: el agua también se come. Cada producto que consumimos tiene un “agua virtual” asociada, es decir, el volumen de agua necesario para su producción. Por ejemplo, se requieren aproximadamente 120 litros de agua para producir una copa de vino, y más de 7.000 litros para obtener un solo bife de carne vacuna. Estos datos ilustran el vínculo entre la seguridad alimentaria, el consumo cotidiano y la presión sobre los recursos hídricos.

Por ello, es urgente incorporar soluciones sostenibles en la cadena de suministro alimentario. Una gestión eficiente del agua en la agricultura permitiría avanzar hacia los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en especial aquellos vinculados al fin de la pobreza (ODS 1), hambre cero (ODS 2), agua limpia y saneamiento (ODS 6) y acción por el clima (ODS 13). La agricultura es un actor clave tanto en el cumplimiento de la Agenda 2030 como del Acuerdo de París sobre cambio climático, y por tanto, debe ser considerada un eje estratégico en toda política hídrica.

La clave para lograr estos objetivos está en modificar la visión actual sobre el agua en el sector agrícola, promoviendo prácticas sostenibles y una gestión más consciente del recurso. Esto no implica imponer restricciones arbitrarias o culpabilizar a los agricultores, como ha ocurrido históricamente, sino empoderarlos mediante incentivos, asistencia técnica e innovación tecnológica.

Para ello, se requiere el diseño y ejecución de políticas públicas robustas, con incentivos ambientales y sociales, que fomenten la conservación de la biodiversidad, la protección de los ecosistemas y la reducción del impacto ambiental. La participación activa de los agricultores no solo es deseable, sino imprescindible. Incluirlos como aliados estratégicos permitirá implementar soluciones adaptadas a las realidades del territorio y construir un modelo agrícola más resiliente, justo y sostenible.

Si no se actúa de forma inmediata y decidida, los desafíos actuales se intensificarán. La crisis del agua no es un escenario futuro hipotético, sino una realidad presente que ya afecta a millones de personas. Aún estamos a tiempo de transformar el modelo agrícola en un motor de cambio positivo. Solo así será posible garantizar la seguridad alimentaria, reducir la pobreza y conservar los ecosistemas que sostienen la vida en el planeta.

En diversos países europeos, las iniciativas orientadas hacia una gestión circular del agua han alcanzado niveles de desarrollo significativos. Esto ha sido posible gracias al compromiso coordinado entre autoridades, sectores productivos y especialmente la agricultura, donde se han implementado transformaciones estructurales en los procesos productivos para cumplir con los estándares ambientales. Sin embargo, estos estándares no han sido simplemente impuestos, sino acompañados por esquemas de incentivos que han motivado a los actores a alinearse con los objetivos de sostenibilidad.

El éxito de estos procesos radica en la adopción de cambios profundos y sistémicos, que abarcan no solo la gestión del agua en sí, sino también otros pilares clave como:

- El diseño de productos, que debe considerar desde su concepción el ciclo de vida del recurso hídrico implicado.
- La transformación de los modelos de negocio, que incorporen la reutilización, el reúso y la eficiencia hídrica como criterios fundamentales.
- La gestión de residuos, íntimamente relacionada con la contaminación del agua y la recuperación de recursos.
- La formulación de instrumentos económicos eficaces, como tasas de uso, incentivos fiscales, subsidios verdes y pagos por servicios ambientales.

No obstante, uno de los mayores desafíos –y quizás el más complejo– radica en el cambio de los patrones de consumo. Transformar la manera en que las sociedades consumen bienes y servicios, incluyendo su relación con el agua, requiere una modificación cultural profunda, así como políticas públicas integrales y campañas de concienciación sostenidas en el tiempo. Esta transformación es indispensable para avanzar hacia un modelo verdaderamente sustentable, en el que las decisiones de consumo reflejen criterios de responsabilidad ecológica y equidad intergeneracional.

A pesar de los avances normativos, la legislación sobre recursos hídricos sigue enfrentando importantes brechas en su implementación práctica. En muchos países, existen leyes modernas y progresistas, pero la falta de monitoreo, de ejecución efectiva y de recursos humanos y técnicos adecuados, limita su impacto real. Sin planes de acción claros, presupuestos asignados, y sistemas de seguimiento y evaluación, las políticas públicas corren el riesgo de convertirse en declaraciones sin efecto operativo.

Por tanto, alcanzar una economía circular del agua exige una acción articulada en múltiples niveles: desde el rediseño de los sistemas productivos hasta el empoderamiento de los consumidores, pasando por la actualización normativa, la innovación tecnológica y la educación ambiental. Solo con un enfoque integral será posible garantizar una gestión eficiente, justa y sostenible de los recursos hídricos en un mundo sometido a crecientes presiones ambientales y sociales.

Soluciones Estratégicas para la Gestión Sostenible del Agua en el Marco de la Economía Circular

Para construir un equilibrio efectivo entre las dimensiones económica, social y ambiental, pilares del desarrollo sostenible, es imprescindible adoptar soluciones concretas y sistémicas en la gestión del recurso hídrico (Salminen et al. 2021). A continuación, se presentan propuestas integradas que permiten avanzar hacia modelos circulares, resilientes y sostenibles en el uso del agua:

1. Uso sostenible de los recursos hídricos

La tecnología para una gestión eficiente del agua ya existe. La extracción de agua, tanto de fuentes superficiales como subterráneas, debe realizarse dentro de los límites de renovación natural del recurso, a fin de evitar el estrés hídrico y preservar el equilibrio de los ecosistemas acuáticos. Es fundamental reconocer que la naturaleza tiene límites, y la sobreexplotación de cuerpos de agua puede comprometer su funcionalidad ecológica.

Asimismo, el agua potable empleada en la producción de alimentos puede ser reemplazada por agua tratada, una alternativa viable desde el punto de vista técnico y ambiental. Esto requiere fortalecer la información, la capacitación y el empoderamiento de actores clave como los agricultores, así como diseñar planes comunitarios inclusivos.

2. Aprovechamiento de residuos y subproductos

La integración entre la producción de energía y la recuperación de recursos es un elemento clave en la economía circular. Un ejemplo concreto es la reutilización de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales urbanas como fertilizantes agrícolas, debido a su alto contenido de nutrientes. Existen también aplicaciones en la industria de la construcción, donde los lodos de plantas de tratamiento de agua potable se utilizan como materia prima para la fabricación de materiales alternativos.

Además, estudios recientes han explorado el uso de estos lodos como materiales adsorbentes en procesos de tratamiento de aguas, aumentando su valor agregado. Estas iniciativas contribuyen a la valorización de residuos, disminuyen el volumen de disposición final y reducen los costos de operación.

3. Eliminación temprana de contaminantes críticos

Las sustancias nocivas, como los productos farmacéuticos y los compuestos químicos tóxicos, deben ser eliminadas en etapas preliminares del tratamiento de aguas residuales, especialmente aquellas provenientes de sectores industriales específicos como la industria farmacéutica. La presencia de estos contaminantes inhibe la actividad de los microorganismos encargados de la biodegradación, afectando la eficiencia global del tratamiento.

Implementar pretratamientos específicos según el origen del efluente no solo mejora el desempeño de las plantas, sino que reduce significativamente el impacto ambiental de los vertidos.

4. Reutilización del agua tratada y captación de agua de lluvia

Las aguas residuales adecuadamente tratadas pueden ser reutilizadas en múltiples sectores: industrias manufactureras, acuicultura, saneamiento, riego de cultivos y zonas verdes, e incluso para la recarga artificial de acuíferos, contribuyendo a mitigar el estrés hídrico.

Asimismo, la captación y uso del agua de lluvia representa una solución accesible y de bajo costo para abastecimiento doméstico o agrícola. Promover su implementación, incluso en zonas rurales, requiere desarrollar infraestructura básica, educación técnica y mecanismos de financiamiento.

5. Simbiosis industrial y redes de intercambio

Una de las estrategias más innovadoras es el fomento de redes industriales que permitan el intercambio de residuos y subproductos entre sectores productivos, un modelo conocido como simbiosis industrial. En este esquema, el residuo de una industria se convierte en insumo para otra, cerrando ciclos de materiales y agua, reduciendo costos y aumentando la eficiencia sistémica.

Este enfoque promueve la mejora del diseño de productos, la selección de materiales reutilizables y el alargamiento de la vida útil de los bienes. Aplicado al agua, permite la creación de circuitos cerrados de tratamiento y reutilización dentro de entornos industriales interconectados.

6. Biomimética e innovación inspirada en la naturaleza

Finalmente, el concepto de biomimética ofrece un paradigma innovador: diseñar soluciones inspiradas en los procesos cíclicos de la naturaleza. La naturaleza no genera desperdicios; todo lo que se produce es reintegrado al sistema a través de ciclos como el del agua, el oxígeno, el nitrógeno o el carbono. Aplicar estos principios al diseño urbano, industrial y agrícola puede derivar en sistemas regenerativos, autosuficientes y resilientes.

Consideraciones finales

El desafío actual no es únicamente tecnológico o normativo: es conceptual. Para lograr una transición efectiva hacia modelos sostenibles, la humanidad debe aprender a imitar los procesos cíclicos de la naturaleza, donde no existen residuos, sino transformaciones continuas de la materia y la energía. Esta es la premisa central de enfoques como la biomimética y los sistemas regenerativos, que invitan a rediseñar nuestras cadenas de producción e infraestructura bajo principios ecológicos.

Profesionales de distintas disciplinas trabajan actualmente en la integración de estos procesos naturales a los sistemas productivos, con el objetivo de generar bienes y servicios competitivos que, además de ser económicamente viables, reduzcan drásticamente el consumo de materias primas y energía. Se trata de repensar todo el sistema: desde el diseño del producto hasta su comercialización, uso, reutilización y disposición final, priorizando eficiencia, circularidad y sostenibilidad.

En este contexto, el consumo informado cobra especial relevancia. Una verdadera economía circular solo será posible si los consumidores pueden elegir entre productos que hayan sido fabricados con menor impacto ambiental, es decir, con menor uso de energía, menos agua, menos recursos naturales y mayor vida útil. Herramientas como el etiquetado ambiental –aunque ya presentes en algunos países– aún enfrentan falta de incentivos desde el sector público y privado, y no han logrado generar el cambio de comportamiento esperado a escala masiva.

Para que estas medidas funcionen, se requiere una combinación de innovación, voluntad política y conciencia ciudadana. Es necesario fomentar marcos legales que promuevan la transparencia en las cadenas de suministro, políticas públicas que respalden la producción responsable, y educación ambiental que fortalezca la capacidad crítica del consumidor.

Principio del formulario

Referencias bibliográficas

- Donner, M., Verniquet, A., Broeze, J., Kayser, K., & De Vries, H. (2020). Critical success and risk factors for circular business models valorising agricultural waste and by-products. *Resources Conservation And Recycling*, 165, 105236. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105236>
- Kirchherr, J., Piscicelli, L., Bour, R., Kostense-Smit, E., Muller, J., Huibrechtse-Truijens, A., & Hekkert, M. (2018). Barriers to the circular economy: Evidence from the European Union (EU). *Ecological economics*, 150, 264-272.
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular economy: the concept and its limitations. *Ecological economics*, 143, 37-46.
- Naciones Unidas. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- Pomoni, D. I., Koukou, M. K., Vrachopoulos, M. G., & Vasiliadis, L. (2024). Circular economy: A multilevel approach for natural resources and wastes under an agri-food perspective. *Water-Energy Nexus*, 7, 103-123. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2023.12.003>
- Salminen, J., Määttä, K., Haimi, H., Maidell, M., Karjalainen, A., Noro, K., Koskiahho, J., Tikkanen, S., & Pohjola, J. (2021). Water-smart circular economy – Conceptualisation, transitional policy instruments and stakeholder perception. *Journal Of Cleaner Production*, 334, 130065. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130065>

El agua segura, base para una vida saludable



Msc. Allyson Barragán⁵

abarragán@uteg.edu.ec

Msc. Alexis Bejarano⁶

abejarano@uteg.edu.ec

Cuando se habla de agua segura, se hace referencia a aquella que no contiene microorganismos ni sustancias químicas nocivas que puedan afectar la salud humana. Este concepto es fundamental tanto para el bienestar diario de las personas como para la salud pública en general. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el agua destinada al consumo humano debe ser inocua a lo largo de toda la vida, sin representar riesgos relevantes para la salud, incluso considerando las distintas condiciones de vulnerabilidad que pueden darse en cada etapa del desarrollo humano (Marín et al. 2017). Cuando no se cumplen los estándares de calidad establecidos, se pueden generar enfermedades con un impacto considerable en la salud pública.



⁵ Química Farmacéutica. Magister en Salud y seguridad ocupacional. Docente de la Facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil.

⁶ Tecnólogo en alimentos. Licenciado en Nutrición. Magister en Agroindustrial, mención Calidad y Alimentaria. Doctorante en Ingeniería. Docente de la Facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil

Por ello, implementar acciones orientadas a mejorar la calidad del agua potable contribuye de forma significativa al bienestar de las personas (OMS, 2006).

La OMS resalta que el agua cumple múltiples funciones vitales para el organismo humano: hidrata la piel, mantiene la temperatura corporal, lubrica articulaciones y órganos, facilita la digestión y permite el transporte de nutrientes, como vitaminas, minerales y glucosa, hacia las células. Asimismo, el agua actúa como un medio para eliminar toxinas producidas por el metabolismo, cumpliendo así un papel integral en la homeostasis del cuerpo humano.

En términos de desarrollo, el agua no solo representa un elemento esencial para la salud, sino que también desempeña un rol clave en la erradicación de la pobreza, la seguridad alimentaria, la protección de los derechos humanos, la estabilidad social y la conservación de los ecosistemas. En este contexto, el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 6: Agua limpia y saneamiento, establece que el acceso al agua potable, al saneamiento y a la higiene es un derecho humano universal y un componente esencial del desarrollo sostenible. Para avanzar en el cumplimiento de este objetivo, resulta indispensable fortalecer la inversión pública, así como promover la formación técnica y la investigación aplicada en todos los niveles del sector hídrico (Naciones Unidas, 2025).

Uno de los aspectos más relevantes en la gestión del agua segura es el aseguramiento de su calidad microbiológica. La presencia de bacterias coliformes en el agua, principalmente *Escherichia coli*, está estrechamente relacionada con enfermedades gastrointestinales y constituye uno de los indicadores más utilizados en la evaluación sanitaria del recurso. Por tanto, es necesario implementar sistemas de tratamiento adecuados que incluyan barreras físicas, químicas y biológicas, capaces de inactivar o remover estos patógenos en todas las etapas del tratamiento del agua. Estos análisis son esenciales tanto para el consumo humano directo como para otras actividades en las que el agua cumple una función crítica.

En la industria alimentaria, por ejemplo, el agua interviene en prácticamente todos los procesos de producción, desde la limpieza de maquinarias, utensilios e instalaciones, hasta el contacto directo con los alimentos. También es utilizada en la fabricación de hielo, un insumo clave en la cadena de frío, que garantiza la inocuidad de productos frescos y perecibles. En todos estos casos, la calidad del agua utilizada influye directamente en la seguridad alimentaria y la protección del consumidor.

En el marco de esta temática, se presenta en esta conferencia el proyecto de investigación titulado "Determinación cualitativa de coliformes totales como indicadores de calidad sanitaria en marcas comerciales de agua potable envasadas y distribuidas en la ciudad de Guayaquil". Este estudio se propuso evaluar la calidad microbiológica del agua embotellada, identificando la presencia de coliformes totales como indicadores de contaminación. La investigación aporta evidencia valiosa para los entes reguladores, las empresas proveedoras de agua y la ciudadanía en general, en cuanto a la necesidad de mantener altos estándares de calidad en los productos destinados al consumo humano directo.

La gestión del agua segura, por tanto, no puede desligarse del enfoque de salud pública ni de los principios del desarrollo sostenible. Asegurar su disponibilidad y calidad implica compromiso institucional, vigilancia técnica y participación ciudadana informada, siendo estos elementos fundamentales para construir comunidades más saludables, resilientes y sostenibles.

Evaluación de la calidad sanitaria del agua embotellada: un estudio aplicado en Guayaquil

El presente estudio surge como respuesta a una problemática latente, la seguridad y la calidad del agua potable envasada, un producto de consumo habitual para gran parte de la población. La investigación fue desarrollada en los laboratorios de la Facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil. El interés por esta línea de investigación partió del reconocimiento de que, en algún momento, todos han consumido agua embotellada confiando en su calidad sanitaria, sin verificar necesariamente su cumplimiento normativo o microbiológico.

Durante el diagnóstico preliminar, se identificaron cinco dimensiones críticas que justificaron la ejecución de este estudio:

- Presencia de coliformes totales: La detección de este grupo de bacterias puede ser un indicio de contaminación microbiológica en el agua, lo cual representa un riesgo directo para la salud de los consumidores.
- Deficiencias en los procesos de purificación: Algunas marcas comerciales podrían carecer de controles rigurosos en sus procesos de tratamiento, lo cual compromete la eficacia de purificación del producto final.
- Impacto sobre la salud pública: Las consecuencias de consumir agua contaminada afectan con mayor intensidad a grupos vulnerables, como niños, personas mayores y pacientes inmunocomprometidos.
- Desviaciones respecto a los estándares de calidad: Las no conformidades frente a la normativa vigente pueden acarrear sanciones regulatorias, pérdida de productividad y daño a la reputación de la marca.

- Limitaciones en infraestructura y formación del personal: La falta de capacitación del personal operativo y las deficiencias en las condiciones de almacenamiento y transporte pueden agravar el riesgo de contaminación.

Ante este escenario, se planteó como objetivo general del estudio determinar la calidad sanitaria del agua potable embotellada distribuida en la ciudad de Guayaquil, mediante la detección cualitativa de coliformes totales como indicadores de contaminación.

Para alcanzar este propósito, se establecieron tres objetivos específicos:

- Identificar cualitativamente la presencia de coliformes totales en muestras de agua embotellada, utilizando el método EC Blue, una técnica de detección rápida ampliamente empleada para evaluar la potabilidad del agua y detectar microorganismos presentes en medios acuáticos o suelos contaminados.
- Analizar las características microbiológicas del agua potable envasada, considerando los parámetros establecidos en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108:2020, la cual regula los requisitos sanitarios que deben cumplir las aguas aptas para consumo humano en el Ecuador.
- Verificar el cumplimiento de las regulaciones vigentes por parte de las diferentes marcas comerciales de agua, contrastando los resultados obtenidos con los límites permisibles establecidos por la norma INEN.

Este estudio busca aportar evidencia empírica relevante para fortalecer la vigilancia sanitaria y fomentar una cultura de consumo informado, en la que las empresas productoras de agua embotellada mantengan procesos de tratamiento confiables, supervisión técnica continua y responsabilidad social respecto a la salud de sus consumidores.

Desarrollo metodológico del estudio de calidad microbiológica del agua embotellada

Esta experiencia de investigación enmarcada como actividad de investigación áulica dentro de la carrera de Nutrición y Dietética, correspondiente al cuarto semestre de formación, fue supervisada por el cuerpo docente de la Facultad de Ciencias de la Salud, quien acompañó los procesos de monitoreo, ejecución técnica y transmisión de conocimientos, fortaleciendo así las competencias prácticas y científicas de los estudiantes participantes.

Equipamiento y materiales utilizados

El estudio se desarrolló con instrumental especializado que garantizó condiciones seguras y controladas para el análisis microbiológico. Entre los equipos empleados se destaca la cabina de flujo laminar, la cual proporciona un ambiente aséptico que evita contaminaciones externas sobre las muestras procesadas (Figura 1). Como medida adicional, se utilizó también un mechero Bunsen con alcohol, con el fin de establecer un triángulo de calor que refuerce la esterilidad del entorno de trabajo.



Figura 1. Campana de flujo laminar

Para la detección de coliformes totales se utilizó el reactivo S Blue Test, una prueba cualitativa de acción rápida que permite identificar la presencia o ausencia de microorganismos a través de virajes de color. Esta técnica se basa en la detección enzimática del grupo coliforme, incluyendo *Escherichia coli* cuando está presente, aunque el alcance de este estudio se centró únicamente en coliformes totales. Las muestras analizadas fueron de 100 mL de agua, contenidas en envases estériles diseñados específicamente para este tipo de ensayos microbiológicos (Figura 2)



Figura 2. Componentes de un entorno de laboratorio estéril

El protocolo incluyó el uso de una incubadora, con el objetivo de mantener las muestras a una temperatura controlada de $37 \pm 1^\circ\text{C}$, lo cual es estándar para favorecer el desarrollo de las bacterias indicadoras. Posteriormente, se empleó una lámpara de fluorescencia para facilitar la observación y diferenciación de resultados, especialmente útil para la identificación de *E. coli* en ensayos extendidos.

Metodología y diseño experimental

La metodología implementada incluyó la toma de triplicado por cada muestra analizada, siguiendo los criterios comúnmente aplicados en laboratorios acreditados, que exigen conservar contramuestras como medida de verificación. Esta estrategia permitió reforzar la validez y reproducibilidad de los resultados obtenidos en cada una de las marcas evaluadas.

El estudio incluyó cuatro marcas de agua embotellada comercializadas en la ciudad de Guayaquil, seleccionadas por su alta participación en el mercado. Aunque por motivos académicos y éticos no se revelaron los nombres comerciales, se destacó que estas marcas representan más del 80% del volumen de agua embotellada distribuida en la ciudad, otorgando así al estudio una alta representatividad poblacional.

Las muestras fueron incubadas durante un periodo de 22 a 24 horas, y posteriormente evaluadas en función del viraje de color y otros parámetros definidos en los protocolos del método EC Blue. Este procedimiento metodológico permitió valorar de forma precisa el cumplimiento sanitario de las muestras analizadas, aportando evidencia útil para comprender el estado de la calidad microbiológica del agua embotellada consumida en la ciudad.

Análisis e interpretación de resultados microbiológicos

Los resultados obtenidos en esta investigación fueron comparados con los parámetros establecidos en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108 (2020), que regula los requisitos para el agua potable de consumo humano en el Ecuador. Esta comparación permitió valorar el cumplimiento sanitario de las muestras procesadas con base en un estándar oficial reconocido.

Para la interpretación de resultados se empleó un método de lectura cualitativa, basado en la técnica presencia/ausencia mediante viraje de color. Esta metodología, ampliamente utilizada en pruebas rápidas de agua, permite detectar de manera preliminar la presencia de coliformes totales y, bajo condiciones extendidas, de *Escherichia coli* (*E. coli*).

El reactivo utilizado permite interpretar los resultados en función del color de la muestra tras la incubación:

- Resultado incoloro: indica una ausencia de coliformes totales y *E. coli*, por tanto, la muestra cumple con los estándares microbiológicos establecidos y no requiere etapas adicionales de análisis.
- Resultado azul brillante: se interpreta como positivo para coliformes totales. En este caso, el protocolo indica que la muestra debe ser incubada por 24 horas adicionales para determinar la posible presencia de *E. coli*, utilizando una lámpara de luz ultravioleta (UV) de 365 nm, la cual permite evidenciar colonias fluorescentes características de esta bacteria.

Es importante precisar que, aunque el método permite detectar *E. coli*, la norma INEN 1108:2020 se enfoca exclusivamente en coliformes totales y coliformes fecales, por lo que la detección específica de *E. coli* no constituye un requisito obligatorio dentro del marco normativo ecuatoriano, aunque sí es un indicador relevante en términos de salud pública.

Durante el proceso de análisis, se emplearon formatos estandarizados de registro, en los cuales se documentaron todas las muestras procesadas, los resultados obtenidos y las observaciones técnicas asociadas. Estos registros fueron elaborados con una estructura similar a la utilizada en laboratorios acreditados, garantizando la trazabilidad, sistematicidad y confiabilidad del proceso analítico.

Los resultados obtenidos permiten reflexionar sobre la necesidad de reforzar los sistemas de control microbiológico en la producción y distribución de agua embotellada, así como de fomentar la actualización de las normativas nacionales, incorporando herramientas de detección más específicas que respondan a los riesgos emergentes en materia de calidad sanitaria del agua.

Los análisis realizados sobre cuatro marcas comerciales de agua embotellada fueron negativos para coliformes totales, lo que confirma el cumplimiento de los estándares microbiológicos establecidos en la normativa vigente. Además, se incluyó una muestra adicional de una marca identificada como potencialmente fraudulenta o informal, la cual también arrojó un resultado negativo, si bien este hallazgo requiere una evaluación más amplia en futuras investigaciones para confirmar su consistencia.

Cabe destacar que los estudiantes no iniciaron el trabajo experimental sin preparación previa. El estudio se enmarcó en actividades prácticas guiadas dentro de la asignatura Seguridad e Higiene de los Alimentos, y se realizaron ensayos piloto utilizando muestras de agua de grifo, hielo, y agua embotellada, lo que permitió desarrollar habilidades técnicas antes de aplicar los procedimientos en el estudio de campo.

Consideraciones finales

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten establecer conclusiones relevantes en torno a los indicadores microbiológicos de la calidad del agua potable. En particular, se confirma que los coliformes totales, coliformes fecales y *Escherichia coli* (*E. coli*) son los principales parámetros utilizados para evaluar la contaminación de origen fecal, y constituyen referentes clave en el monitoreo de la calidad sanitaria del agua, al permitir la identificación de riesgos potenciales para la salud pública.

El agua es reconocida como un posible vehículo de transmisión de enfermedades infecciosas, tanto de forma directa como indirecta, especialmente en su interacción con los alimentos. Este riesgo se intensifica en contextos donde no se aplican adecuadamente prácticas de higiene personal, como el lavado de manos, especialmente entre manipuladores de alimentos, lo cual puede derivar en procesos de contaminación cruzada.

Finalmente, se recomienda para futuras investigaciones:

- Ampliar el tamaño muestral, incluyendo un mayor número de marcas y lotes.
- Reforzar el análisis de aguas de origen informal o no regulado.
- Explorar la detección de *E. coli* con técnicas de confirmación adicional, ya que, aunque no es exigido explícitamente por la normativa nacional, representa un marcador importante en contextos de salud pública.

Este estudio demuestra la viabilidad de articular docencia, investigación y formación técnica, aportando evidencia científica útil tanto para la academia como para los entes reguladores y la comunidad en general.

Referencias bibliográficas

- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2020). NTE INEN 1108:2020. Agua potable. Requisitos. <https://www.normalizacion.gob.ec>
- Marín, J., Behling, E., Carrasquero, S., Colina, G., Díaz, A., Rincón, N. (2017). Calidad sanitaria de agua envasada expendida en la ciudad de Maracaibo (Venezuela). Boletín de Malariología y Salud Ambiental, 57(1), 26-35.
- Naciones Unidas. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2006). Guías para la calidad del agua potable. Tercera edición. Ediciones de la OMS. Suiza.

El colapso del paraíso: agua y turismo en peligro



Esp. Marcelo de la Rosa ⁶

marcelodelarosa@recinatur.org

En pleno siglo XXI, el acceso al agua potable continúa siendo una deuda pendiente en numerosos países, regiones y comunidades del mundo. A pesar de que el agua para el consumo humano representa una necesidad básica e irrenunciable, más allá de sus múltiples aplicaciones industriales, agrícolas o recreativas, millones de personas carecen aún de acceso seguro, equitativo y asequible a este recurso vital. Esta situación se vuelve especialmente crítica en comunidades originarias, sectores rurales y zonas empobrecidas, donde la precariedad de servicios responde a procesos históricos de exclusión y marginalidad, independientemente del modelo económico imperante.

Uno de los dilemas más urgentes es cómo garantizar agua para calmar la sed en poblaciones que ni siquiera pueden costear la compra de productos básicos como agua embotellada o tratada. Esta reflexión, planteada desde un enfoque de justicia social, invita a “bajar al piso” la conversación y reconocer la brecha estructural entre quienes pueden pagar por agua segura y quienes viven con carencias diarias en su acceso.



⁶ Técnico Universitario en Turismo. Licenciado en Educación Técnica Profesional. Especialista en Planificación Turística. Especialista en Desarrollo Curricular y Evaluación de Competencias.

La experiencia compartida desde Chile ilustra esta tensión de manera clara. A pesar de estar ubicado en una región geográfica privilegiada, la Patagonia, que concentra una de las mayores reservas de agua dulce del planeta, esta abundancia no se traduce en acceso gratuito ni universal para la población local. Incluso en zonas con presencia de lagos, ríos y campos de hielo, el agua tratada no siempre llega a todos los hogares, ni lo hace sin costo alguno. Esto pone en tela de juicio la efectiva implementación del derecho humano al agua, tal como lo reconocen organismos internacionales.

Chile, sin embargo, es uno de los pocos países de América Latina donde el agua de la red pública es potable directamente desde el grifo, gracias a décadas de inversión en infraestructura de tratamiento y distribución. De hecho, el Estado ha promovido recientemente campañas de consumo de agua del grifo, para reducir el uso de agua embotellada y fomentar la confianza en los sistemas públicos. Esta estrategia está respaldada por estándares de calidad internacionales, alcanzados en las plantas de tratamiento urbano. Aun así, esta realidad coexiste con zonas donde el acceso sigue siendo costoso o limitado, particularmente en regiones alejadas o con sistemas de abastecimiento insuficientes.

Desde el punto de vista del origen del agua consumida en Chile, alrededor del 51-52% proviene de fuentes subterráneas, mientras que un 47% corresponde a aguas superficiales. Un porcentaje marginal –cercano al 1%– proviene de plantas desalinizadoras ubicadas en el norte del país, específicamente en Antofagasta, una zona marcada por el desierto de Atacama, uno de los más áridos del mundo. Estas tecnologías han permitido suplir parcialmente la escasez hídrica, aunque su alto costo operativo y energético limita su implementación masiva.

Este caso evidencia que, incluso en países con infraestructura avanzada, el acceso equitativo al agua no está garantizado para todos los territorios ni todos los sectores sociales. Por ello, es fundamental incorporar criterios de justicia territorial, equidad económica y sostenibilidad ambiental en el diseño de políticas públicas, y reconocer al agua no como una mercancía, sino como un derecho humano esencial para la vida y el desarrollo de los pueblos.

Modelos de gestión hídrica y uso eficiente del agua en Chile: turismo, tratamiento y reutilización

El acceso al agua potable no solo requiere de redes de distribución, sino también de sistemas de tratamiento paralelos que garanticen su potabilidad y posterior gestión sustentable. En este sentido, Chile ha avanzado significativamente en las últimas décadas, desarrollando modelos integrados de captación, tratamiento, distribución y reutilización del agua, especialmente en contextos urbanos y zonas con fuerte presión turística o agrícola.

Las inversiones públicas realizadas desde mediados de la década de 1990 han permitido que cada localidad del país cuente con una planta de tratamiento de aguas servidas, lo que se traduce en un avance notable en cuanto a saneamiento básico. En la actualidad, el 78,5% de las aguas tratadas se descargan hacia ríos y cuerpos superficiales, mientras que el 20% se vierte al mar, ya tratada. Solo un pequeño porcentaje –0,8% y 0,3% respectivamente– se destina al riego y a cuerpos lacustres.

En relación con el uso del agua, el 59% se destina al desarrollo forestal, dada la fuerte vocación exportadora del país en productos derivados de la madera. La agricultura y ganadería también representan sectores con alta demanda hídrica, mientras que apenas el 2% del agua es potabilizada para consumo humano, y el 0,2% es utilizado por la industria o para generación hidroeléctrica.

Un elemento relevante que se incorpora a este análisis es el vínculo entre agua y turismo sostenible. Aunque el sector turístico consume solo el 2% del agua a nivel mundial, su impacto se distribuye territorialmente de manera desigual, y todos los ciudadanos, en algún momento, se convierten en turistas. Por tanto, es fundamental gestionar responsablemente los recursos en destinos turísticos, especialmente en zonas de alta fragilidad ecológica como la Patagonia chilena, donde se concentran vastas reservas de agua dulce (campos de hielo, lagos y ríos), pero no siempre existe un acceso equitativo a estas fuentes.

Las dinámicas del cambio climático y el crecimiento acelerado del turismo en destinos naturales están generando presiones sin precedentes sobre los recursos hídricos a nivel global. A pesar de que el turismo representa apenas el 2% del consumo total de agua a nivel mundial, el impacto de esta actividad es altamente localizado, especialmente en regiones con ecosistemas frágiles, comunidades pequeñas y fuentes limitadas de agua potable (Gössling et al. 2012).

Uno de los casos más ilustrativos se encuentra en el sur de Chile, en la ciudad de Valdivia, conocida como la “ciudad de los ríos”, donde convergen múltiples cuerpos de agua navegables, conectados incluso con el océano Pacífico. A pesar de su abundancia hídrica, la región enfrenta los efectos del cambio climático, incluyendo prolongadas sequías, temperaturas inusualmente altas durante el otoño y una reducción significativa en la precipitación anual. Chile ha declarado en los últimos años emergencias hídricas en varias regiones, donde incluso se ha debido abastecer a comunidades rurales mediante camiones cisterna debido al agotamiento de las napas subterráneas.

Además, se observa un preocupante retroceso de los glaciares patagónicos, como los de la Laguna San Rafael y los campos de hielo del sur, los cuales constituyen reservas estratégicas de agua dulce para el planeta. Este fenómeno está directamente vinculado al aumento de la temperatura global y al desbalance en los ciclos hidrológicos naturales.

En paralelo, la creciente demanda turística está generando una sobreexplotación del recurso hídrico (Becken, 2014). En algunos casos, como el de Punta Cana (República Dominicana), se ha tenido que perforar a profundidades cada vez mayores para extraer agua, debido a la presión ejercida por la alta concentración de visitantes. Mientras tanto, en muchas de estas comunidades locales el agua no llega de manera regular, ni en cantidad ni calidad suficientes.

El contraste entre la población residente y la población flotante turística se vuelve alarmante. En localidades con apenas 5.000 o 6.000 habitantes permanentes, pueden recibirse hasta 200.000 turistas anuales, multiplicando exponencialmente el consumo diario de agua. Mientras que una persona local promedio utiliza entre 120 y 140 litros de agua por día, un turista puede llegar a consumir entre 450 y 800 litros diarios, especialmente en alojamientos que ofrecen servicios intensivos en agua como piscinas, spas, y tinajas de agua caliente.

Este consumo exacerbado, sumado a infraestructuras turísticas construidas sin una adecuada planificación ambiental, está provocando una degradación progresiva de los ecosistemas, pérdida de biodiversidad y alteración de los cursos naturales de agua. La proliferación de cabañas, hoteles y construcciones recreativas en zonas costeras, lacustres o ribereñas –muchas veces sin control territorial efectivo–, transforma en pocos años entornos naturales prístinos en zonas densamente urbanizadas, con consecuencias ambientales irreversibles.

Un ejemplo concreto de esta transformación es el uso turístico de tinajas de madera con agua caliente, una práctica común en el sur de Chile, donde se calientan grandes volúmenes de agua con leña, consumiendo recursos energéticos e hídricos en cada rotación de huéspedes. Si bien estas actividades generan empleo y dinamismo económico local, también conllevan altos costos ambientales que no siempre se reflejan en los planes de ordenamiento territorial.

En consecuencia, urge replantear los modelos de desarrollo turístico en función de la capacidad real de los ecosistemas y de la disponibilidad del recurso agua. La sostenibilidad del turismo debe pasar del discurso a la acción concreta, promoviendo infraestructura ecológicamente responsable, tecnologías de reutilización de agua, normativas claras de conservación y participación activa de las comunidades locales.

El turismo, cuando no es gestionado adecuadamente, puede ser tan nocivo como beneficioso. La planificación territorial, el monitoreo del consumo hídrico y la educación ambiental son herramientas fundamentales para mitigar sus impactos y avanzar hacia una convivencia armónica entre las personas, la naturaleza y el agua (Cole, 2014).

Esta situación plantea una necesidad urgente de diferenciar entre el turista convencional y el viajero consciente, así como de revisar profundamente el modelo turístico predominante, que ha operado bajo una lógica mayormente extractiva. En muchos casos, la inversión turística no ha considerado criterios de sostenibilidad. Apenas una minoría de los proyectos cuenta con certificaciones ambientales o sociales, mientras que la gran mayoría funciona sin regulación clara, utilizando de forma indebida los recursos hídricos, energéticos y territoriales.

Entre los ejemplos más comunes se encuentran inversiones que, aunque promueven planes de tratamiento de aguas servidas y el uso de energías renovables, son seguidas por otras que se “cuelgan del sistema”, reemplazan soluciones técnicas por pozos sépticos rudimentarios, y operan sin control. Esto genera una carga ambiental y social desproporcionada, afectando tanto al ecosistema como a las comunidades locales.

Una de las propuestas más discutidas en este contexto es la implementación de modelos de turismo regenerativo. Este enfoque no solo busca diversificar las actividades económicas, sino regenerar ecosistemas degradados, restaurar paisajes y garantizar el acceso equitativo a bienes comunes como el agua, el paisaje y las playas. Es necesario revisar el propósito del turismo actual e incorporar principios de economía circular, que promuevan la reutilización de recursos y el beneficio compartido entre el turista y la comunidad local.

Para avanzar hacia este modelo, se requiere:

- Evaluar el impacto ambiental y social a largo plazo de cada inversión, incluyendo estudios de capacidad de carga, consumo de agua, y protección activa de los ecosistemas.
- Incluir a las comunidades locales como actores fundamentales del proceso de planificación, evitando su marginación en los espacios donde históricamente han habitado.

- Promover la educación ambiental y establecer sistemas de monitoreo constante, que permitan identificar, prevenir y corregir impactos negativos.
- Garantizar la certificación efectiva de prácticas sostenibles, asegurando que todos los proyectos turísticos cumplan estándares mínimos y no se beneficien del esfuerzo de unos pocos.
- Defender el acceso público a ríos, lagos y playas, evitando su privatización bajo pretextos de inversión o desarrollo.

Un fenómeno particularmente preocupante es la exclusión territorial generada por ciertos modelos turísticos que apropian el paisaje y lo convierten en un bien de acceso restringido. Así, espacios naturales que históricamente fueron compartidos por las comunidades son cerrados por grupos privados, limitando la posibilidad de que las poblaciones locales se reconecten con su entorno y se conviertan en agentes activos de conservación.

En palabras de los habitantes locales, “¿cómo convencer a una persona de que cuide un río, si ya no tiene derecho a visitarlo?”. Esta frase resume una de las tensiones centrales en el debate sobre turismo y sostenibilidad: la necesidad de garantizar justicia ambiental y territorial como condición indispensable para cualquier estrategia de conservación.

El turismo actual, tal como está planteado en muchas regiones, no resiste más. Es imperativo transformarlo desde sus cimientos, con una visión que reconozca el valor del agua como derecho humano, patrimonio ecológico y elemento de cohesión social. Solo así se podrá avanzar hacia un turismo verdaderamente regenerativo, al servicio de las personas y de la naturaleza.

Educación, turismo y planificación territorial: claves para una transformación regenerativa

La lucha por la sostenibilidad y la justicia ambiental no puede dissociarse del ser humano común, de la ciudadanía que habita los territorios y que, muchas veces, solo accede a los problemas ambientales a través de medios de comunicación o titulares de prensa. La sostenibilidad debe bajar a la comunidad, convertirse en un conocimiento vivo y cotidiano, que nazca en el seno familiar y se fortalezca a través de la educación desde las edades más tempranas.

En palabras de educadores y planificadores territoriales, el cambio estructural más efectivo se produce a largo plazo, especialmente a través de la niñez y la juventud. Por ello, los procesos educativos deben orientarse a formar generaciones con conciencia ambiental, social y cultural, capaces de liderar transformaciones profundas dentro de 10, 15 o 20 años. Esta apuesta por la educación como palanca de transformación social ha dado resultados: la conciencia ambiental juvenil actual no es casual, sino consecuencia de programas escolares implementados desde hace décadas, como los días del árbol, del agua, de la tierra, o del aire, que fomentaron un vínculo emocional y cognitivo con el entorno natural.

Además, es urgente establecer límites al crecimiento urbano y turístico, reconociendo que los territorios no resisten más. Se necesita una planificación territorial seria y prospectiva, capaz de anticiparse a los desafíos de los próximos 20 o 30 años. Los planes reguladores deben dejar de ser meros instrumentos técnicos y convertirse en herramientas vivas de ordenamiento ambiental y social, en armonía con la capacidad ecológica de los territorios.

Consideraciones finales

El turismo no puede mantenerse en un modelo extractivo. Debe transformarse en una actividad regenerativa, que no solo genere bienestar económico, sino también valor sociocultural, pedagógico y comunitario. El turismo debe ser una palanca de transformación, donde el visitante no llegue a imponer su cultura ni a consumir un paisaje, sino a aprender del otro, especialmente en comunidades rurales y pueblos originarios que han sabido resolver grandes desafíos con soluciones sencillas y sabias.

El modelo actual de turismo, centrado en el visitante masivo, debe ser reemplazado por una nueva visión: la del viajero consciente. Mientras el turista tradicional concibe el destino como un punto fijo en el mapa, el viajero pone énfasis en el trayecto, en los vínculos que se tejen y en los intercambios genuinos que se generan con cada paso. El viajero fluye, se adapta, aprende, deja huella, pero no impone ni desplaza. Su presencia busca integrarse respetuosamente en la dinámica local, reconociendo el valor del entorno y de las comunidades que lo habitan.

Desde esta perspectiva, el turismo puede y debe convertirse en un agente de transformación positiva. Entre sus aportes más significativos se destacan: la reconexión profunda con la naturaleza y la cultura; el empoderamiento real de las comunidades locales; la educación del visitante como sujeto activo de cambio; el fortalecimiento de redes solidarias para el desarrollo comunitario; y la gestión responsable y ética de los recursos hídricos y ambientales. En este sentido, el turismo deja de ser un fin en sí mismo y pasa a ser una herramienta para el bienestar colectivo y la regeneración ecológica y social.

Este capítulo cierra con una reflexión clave: ya no es suficiente con diversificar las actividades económicas. El momento histórico exige algo más profundo y urgente: regenerar. Regenerar los ecosistemas que hemos dañado, regenerar las relaciones entre las personas, regenerar los lazos entre las comunidades y la tierra. Y para lograrlo, es indispensable que la educación, la planificación territorial y el turismo responsable avancen de forma articulada y coherente.

Referencias bibliográficas

- Becken, S. (2014). Water equity – Contrasting tourism water use with that of the local community. *Water Resources and Industry*, 7-8, 9-22.
- Cole, S. (2014). Tourism and water: from stakeholders to rights holders, and what tourism businesses need to do. *Journal of Sustainable Tourism*, 22(1), 89-106
- Gössling, S., Peeters, P., Hall, C. M., Ceron, J. P., Dubois, G., Lehmann, L. V., & Scott, D. (2012). Tourism and water use: Supply, demand, and security. An international review. *Tourism Management*, 33(1), 1-15.

Coagulantes naturales: hacia un futuro sostenible en el tratamiento de aguas



Dr. Sedolfo Carrasquero Ferrer⁷

scarrasquero@uteg.edu.ec

El presente capítulo aborda el uso de coagulantes naturales en el tratamiento de aguas destinadas al consumo humano, bajo una perspectiva de sostenibilidad. Este enfoque se convierte en una alternativa prometedora frente a los desafíos que plantea el uso de productos químicos tradicionales, los cuales pueden generar subproductos con potencial impacto negativo para el ambiente y la salud.

La reflexión inicial parte de una pregunta fundamental que se plantea comúnmente a estudiantes de ingeniería sanitaria: ¿Qué es el agua?. La mayoría responde con la definición aprendida desde la escuela: un líquido inodoro, incoloro e insípido, esencial para la vida. Sin embargo, desde una mirada técnica y aplicada, el agua va mucho más allá. Es una suspensión o solución que contiene distintas sustancias disueltas o en forma coloidal, razón por la cual el agua pura es prácticamente inexistente en la naturaleza. Cada fuente de agua posee características particulares que deben ser evaluadas para su adecuado tratamiento.

⁷ Ingeniero Químico. Magister Scientarum en Ingeniería Ambiental. Máster en Administración de Empresas. Doctor en Ingeniería Ambiental. Director de Innovación de la Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil (UTEG)

El acceso a agua segura sigue siendo uno de los grandes retos del siglo XXI. Tal como lo han señalado expertos del área de salud pública, la potabilización enfrenta múltiples limitaciones, tanto por escasez física del recurso, es decir, la falta material de fuentes disponibles, como por escasez económica, que implica la imposibilidad de aplicar tecnologías debido a restricciones financieras o de infraestructura.

Este problema se manifiesta con claridad en múltiples regiones del planeta. A pesar de los avances tecnológicos, más del 25% de la población mundial aún no dispone de acceso fácil a agua potable, según estadísticas actualizadas al año 2024. Esta situación afecta de manera particular a comunidades rurales y periféricas, donde las mujeres –principalmente– deben recorrer grandes distancias para recolectar agua, cargando recipientes pesados en condiciones de riesgo y precariedad. Este patrón de desigualdad hídrica pone en evidencia la urgencia de avanzar hacia soluciones sostenibles, adaptadas y socialmente inclusivas.

Fue precisamente frente a estos desafíos que, en el año 2015, los Estados miembros de las Naciones Unidas adoptaron los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Entre ellos, el ODS 6 plantea el compromiso de garantizar el acceso universal al agua limpia y al saneamiento seguro, promoviendo además la gestión sostenible de los recursos hídricos. En este contexto, la utilización de coagulantes naturales en el tratamiento del agua se posiciona como una herramienta innovadora, eficiente y respetuosa con el medio ambiente.

En las siguientes secciones se abordará la importancia de contar con agua de calidad para el consumo humano, se presentarán las principales operaciones utilizadas en su tratamiento, y se revisarán experiencias prácticas sobre el uso de coagulantes naturales, como extractos de semillas y otros compuestos de origen vegetal, que han mostrado resultados favorables en distintos contextos.

El agua segura y el derecho humano al acceso: un eje transversal en los ODS

El Objetivo de Desarrollo Sostenible número 6 (ODS 6) tiene como finalidad garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible, así como el acceso al saneamiento para todos. Este objetivo se articula en una serie de metas e indicadores que pueden ser consultados abiertamente a través del portal oficial de las Naciones Unidas, y cuya importancia radica en su impacto transversal sobre otros objetivos de la Agenda 2030.

En esencia, el ODS 6 aborda dos aspectos clave: la disponibilidad de agua segura para consumo humano y el acceso a servicios de saneamiento básico. Esta meta resulta crítica si se considera que miles de millones de personas, especialmente en áreas rurales y periferias urbanas, carecen de ambos derechos fundamentales. De acuerdo con los informes de la ONU, una de cada tres personas en el mundo no tiene acceso a agua potable de forma segura, lo cual condiciona su salud, calidad de vida, y posibilidades de desarrollo.

Mientras que en ciertos hogares, particularmente en zonas urbanas y países con mayores niveles de infraestructura, es posible abrir un grifo y contar con un suministro continuo de agua tratada, en muchas otras comunidades el acceso es limitado, intermitente o directamente inexistente, obligando a las personas a buscar fuentes alternativas, muchas veces no seguras ni controladas sanitariamente. Esta situación no solo vulnera el derecho humano al agua, sino que también afecta gravemente otros derechos fundamentales.

El agua limpia y el saneamiento adecuado están estrechamente vinculados con múltiples dimensiones del desarrollo. Su ausencia incide directamente en la propagación de enfermedades, especialmente aquellas de transmisión hídrica, lo cual repercute negativamente en el ODS 3: Salud y bienestar. Asimismo, la presencia de agua segura en escuelas contribuye al ODS 4: Educación de calidad, ya que reduce la deserción escolar causada por enfermedades o la necesidad de ausentarse para recolectar agua. Esto, a su vez, impacta en el ODS 5: Igualdad de género, pues en muchas regiones las niñas son las encargadas de acarrear agua a largas distancias, lo que limita su acceso a la educación (Naciones Unidas, 2015).

Estas interrelaciones han llevado a que el derecho al agua sea reconocido formalmente como un derecho humano. La Resolución 64/292 de las Naciones Unidas, adoptada en el año 2010, establece con claridad que el acceso al agua limpia y al saneamiento es un derecho inherente a todas las personas, condición indispensable para la realización de todos los demás derechos humanos. Entre los elementos señalados en dicha resolución, uno resulta especialmente relevante: la dotación mínima por persona. Según esta disposición, deben garantizarse al menos 50 litros diarios de agua por persona, cantidad considerada suficiente para cubrir necesidades básicas como la hidratación, la preparación de alimentos, la higiene personal y el saneamiento (Naciones Unidas, 2010).

Esta perspectiva fortalece el argumento a favor de tecnologías sostenibles, accesibles y replicables para el tratamiento del agua. Es aquí donde los coagulantes naturales cobran un valor estratégico. Su implementación puede facilitar la potabilización del agua en comunidades con escasos recursos, reduciendo la dependencia de insumos químicos y disminuyendo los costos

operativos. Además, su origen vegetal y su bajo impacto ambiental los convierte en herramientas coherentes con la lógica de sostenibilidad que promueve la Agenda 2030.

Desigualdad en el acceso y calidad del agua: una realidad que exige soluciones sostenibles

Aunque la Resolución 64/292 de la Asamblea General de las Naciones Unidas establece que deben garantizarse al menos 50 litros de agua por persona al día para satisfacer las necesidades básicas, la realidad en muchos países supera ampliamente ese mínimo recomendado (Naciones Unidas, 2010). En contextos urbanos de América Latina, por ejemplo, el consumo promedio por persona puede alcanzar los 249 litros diarios, reflejando un uso excesivo e insostenible del recurso en ciertas áreas, al mismo tiempo que otras comunidades carecen incluso del mínimo vital.

Uno de los elementos menos visibilizados de esta problemática es la distancia entre los hogares y las fuentes de agua. La normativa internacional recomienda que la fuente no supere los 1.000 metros del domicilio, con un recorrido de ida y vuelta que no exceda los 500 metros en cada dirección. Sin embargo, en muchas regiones del mundo, especialmente en zonas rurales o semiáridas de África, Asia y América Latina, las fuentes de agua se encuentran a varias horas de distancia, y es común que las mujeres y niñas asuman la responsabilidad del acopio, cargando pesados recipientes durante trayectos extensos, lo que implica también riesgos físicos y sociales.

Desde el año 2001, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha advertido que el mayor problema relacionado con el agua no es solo su escasez, sino su contaminación. Se estima que el 90% de las muertes vinculadas al agua tienen como causa principal la calidad deficiente del recurso. Actualmente, alrededor de 2.000 millones de personas en el mundo utilizan fuentes contaminadas de agua potable, lo que incrementa la exposición a enfermedades como diarrea, cólera, disentería, poliomielitis, entre otras.

Estas cifras se traducen en consecuencias devastadoras, de acuerdo con datos de Acción contra el Hambre (2019), el consumo de agua no potable genera alrededor de 500.000 muertes por diarrea cada año a nivel global. Esto equivale a la muerte de un niño cada 90 segundos por enfermedades relacionadas con el agua contaminada. Se trata de una realidad dolorosa y evitable, que evidencia la urgencia de implementar medidas integrales y sostenibles.

En este contexto, el uso de coagulantes naturales surge como una alternativa viable, accesible y ecológicamente responsable para el tratamiento del agua en comunidades rurales y asentamientos marginados. Esta tecnología puede contribuir a mejorar la calidad microbiológica del recurso, especialmente en aquellas zonas donde no se dispone de plantas convencionales de tratamiento ni acceso a insumos químicos.

Adicionalmente, la problemática del agua también afecta directamente al funcionamiento del sistema de salud. En países de bajos ingresos, se estima que el 38% de las instalaciones de atención sanitaria no cuentan con agua segura, el 19% carece de servicios básicos de saneamiento, y el 35% no dispone de infraestructura para el lavado de manos. Esta situación es alarmante, ya que prácticas tan simples como el lavado adecuado de manos pueden reducir drásticamente la incidencia de enfermedades infecciosas y gastrointestinales.

Desde la perspectiva de la ingeniería sanitaria, el agua no debe entenderse simplemente como un líquido incoloro, insípido e inodoro, sino como un medio complejo que actúa como solvente universal, transportando compuestos orgánicos e inorgánicos a lo largo de su trayecto por los distintos ecosistemas. Esta capacidad de disolución, si bien es esencial para los ciclos biogeoquímicos, la expone también a múltiples formas de contaminación, lo que plantea el desafío de desarrollar procesos adecuados para su remoción y tratamiento.

Calidad del agua: fundamentos técnicos para la potabilización

En sentido estricto, el agua pura no existe en la naturaleza. A medida que circula a través de los distintos compartimentos del ciclo hidrológico, el agua incorpora una serie de sustancias disueltas o en suspensión, tanto de origen natural como antropogénico. Algunas de estas sustancias pueden ser beneficiosas para el organismo humano en concentraciones adecuadas, mientras que otras representan riesgos para la salud o deterioran sus características organolépticas y estéticas. Por tanto, uno de los desafíos fundamentales en la ingeniería ambiental es transformar esa agua cruda en un recurso apto para el consumo humano, mediante tecnologías sostenibles y accesibles, que permitan proteger los recursos hídricos y garantizar su disponibilidad para las generaciones presentes y futuras.

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), el agua potable es aquella que no representa un riesgo significativo para la salud cuando se consume a lo largo de toda la vida, incluyendo a personas con diferentes grados de vulnerabilidad. Además de cumplir con esta condición de seguridad microbiológica y química, el agua potable debe ser suministrada en cantidad suficiente, de manera continua y a un costo asequible, entendiendo este último como un gasto que no supere el 5%

del presupuesto familiar total. Esta asequibilidad constituye una dimensión esencial del derecho humano al agua, el cual no implica necesariamente la gratuidad del servicio, sino su disponibilidad bajo condiciones equitativas y razonables (Naciones Unidas, 2017).

Para determinar si un recurso hídrico es apto para el consumo humano, deben evaluarse diversos parámetros físicos, químicos y biológicos, los cuales se encuentran especificados en las normas técnicas y sanitarias de cada país, así como en las directrices internacionales. Estos parámetros están delimitados mediante valores máximos permisibles, y su cumplimiento es un requisito indispensable en los sistemas de abastecimiento de agua potable.

Parámetros físicos de calidad del agua

Entre los parámetros físicos, se destacan aquellos perceptibles por los sentidos, como la turbidez, el color, el olor, el sabor y la temperatura. Cada uno de ellos ofrece indicios valiosos sobre la calidad del recurso:

- **Turbidez:** se refiere a la pérdida de transparencia del agua debido a la presencia de partículas suspendidas. Este parámetro es clave en el control de calidad, ya que altos niveles de turbidez pueden proteger a microorganismos patógenos del efecto de los desinfectantes. La turbidez se mide en unidades nefelométricas de turbidez (NTU), y se recomienda que el agua destinada al consumo humano no supere el valor de 1 NTU como valor deseable, admitiendo un máximo de 5 NTU en circunstancias excepcionales.
- **Color:** puede clasificarse en color aparente (medido directamente) y color real (tras filtración de la muestra). Se expresa en unidades de color platino-cobalto (UPC) y suele deberse a la presencia de materia orgánica disuelta, como los ácidos húmicos y fúlvicos. El color real proporciona información más precisa sobre compuestos solubles que podrían interferir con procesos de tratamiento y desinfección.
- **Olor y sabor:** generalmente están asociados a la presencia de compuestos orgánicos volátiles, microorganismos, algas o productos de descomposición. Idealmente, el agua no debe presentar olor ni sabor perceptible por el consumidor.
- **Temperatura:** influye en las reacciones químicas, la solubilidad de gases y la actividad microbiológica. Se recomienda que el agua potable no tenga una diferencia de más de 5 °C respecto a la temperatura ambiente, especialmente en sistemas sin refrigeración.
- **Sólidos totales:** comprenden tanto sólidos disueltos (TDS) como sólidos suspendidos (TSS). Los sólidos disueltos incluyen sales, minerales y metales, mientras que los suspendidos están relacionados con sedimentos o materia orgánica. Una alta concentración puede afectar la palatabilidad, la eficiencia de los tratamientos y la vida útil de las infraestructuras hidráulicas.

El análisis riguroso de estos parámetros es fundamental en los sistemas de abastecimiento de agua potable. Además, ofrece un marco técnico que justifica el empleo de operaciones unitarias específicas en el tratamiento del agua, como la coagulación-floculación, donde los coagulantes naturales pueden desempeñar un rol destacado. En la siguiente sección, se abordarán los principios de esta operación y se presentarán alternativas sostenibles a los coagulantes químicos convencionales.

Además de las propiedades físicas, el control de calidad del agua para consumo humano exige la evaluación de una serie de parámetros químicos que permiten detectar posibles riesgos para la salud pública y el medio ambiente. Aunque no todos serán detallados en este capítulo, resulta imprescindible reconocer la relevancia de indicadores como el pH, la alcalinidad, la dureza y la posible presencia de metales pesados, los cuales pueden tener efectos adversos sobre la salud si no se encuentran dentro de los límites permisibles establecidos por organismos internacionales.

Por ejemplo, en algunas regiones como Arequipa, Perú, se han identificado problemas significativos de contaminación por arsénico, producto de la naturaleza geológica del suelo. Investigadores han documentado que los niveles de arsénico en fuentes de agua potable pueden incrementarse durante ciertos períodos del año, lo cual obliga a implementar medidas específicas para su remoción dentro de los sistemas de tratamiento (Guillen y Torres, 2015).

El pH es uno de los parámetros más básicos y frecuentemente monitoreados en el agua para consumo. La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que se mantenga dentro del rango de 6,5 a 8,5 unidades, aunque se acepta un margen más amplio de 6 a 9 unidades dependiendo del contexto (WHO, 2017). Este parámetro está estrechamente vinculado con la alcalinidad, que representa la capacidad del agua para neutralizar ácidos y está determinada por la concentración de iones como carbonato y bicarbonato. Una alcalinidad elevada puede conferir un sabor amargo al agua, y al combinarse con iones de metales bivalentes, como el calcio, puede generar compuestos responsables de la dureza del agua.

La dureza no solo afecta el sabor del agua, sino que también tiene implicaciones operativas, como la formación de incrustaciones en tuberías de agua caliente y el incremento del consumo de detergentes, ya que en aguas duras se reduce la formación de espuma. Este parámetro, por tanto, tiene un impacto directo tanto en la calidad de vida de los usuarios como en la eficiencia de los sistemas de distribución y uso doméstico.

En cuanto a los parámetros microbiológicos, estos resultan cruciales para identificar contaminaciones fecales y prevenir enfermedades de transmisión hídrica. Tal como fue expuesto por los especialistas en salud pública en capítulos anteriores, se presta especial atención al grupo de las bacterias coliformes, las cuales actúan como indicadores indirectos de contaminación de origen fecal. La detección de coliformes totales o coliformes fecales en una muestra sugiere la posible presencia de otros microorganismos patógenos como virus, protozoarios y bacterias, que representan un riesgo significativo para la salud humana. Estos indicadores son, por tanto, fundamentales en la evaluación de la potabilidad del agua.

La integración de estos parámetros físico-químicos y microbiológicos permite establecer un diagnóstico integral de la calidad del recurso hídrico, guiando así las decisiones técnicas en el tratamiento y aseguramiento de un suministro de agua segura y sostenible.

Procesos Convencionales de Potabilización y el Rol de la Coagulación

El tratamiento de aguas para consumo humano requiere de una serie de procesos técnicos que transformen el agua cruda, tomada directamente de fuentes naturales, en un recurso seguro, apto para el consumo y libre de riesgos para la salud. Este tratamiento comienza en la fuente de captación y continúa a través de operaciones y procesos unitarios que deben ser definidos con base en las características específicas del agua bruta. Sin embargo, como se evidenció en un foro reciente, existe un notable desconocimiento de la ciudadanía, especialmente entre los jóvenes, respecto a las etapas necesarias para que el agua llegue potabilizada hasta los hogares. Este desconocimiento contrasta con la complejidad y el costo operativo que implica garantizar un suministro seguro y continuo.

Las plantas potabilizadoras tienen como finalidad fundamental eliminar partículas coloidales en suspensión y otros contaminantes presentes en el agua cruda. Su objetivo principal es asegurar un producto final que cumpla con los criterios establecidos en la normativa de calidad sanitaria vigente y que no represente un riesgo ni biológico ni químico.

Entre los sistemas de potabilización, uno de los más comunes es el sistema convencional, compuesto por etapas secuenciales como coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. En este sistema, la primera etapa es la coagulación, proceso en el cual se añade un agente coagulante que neutraliza las cargas negativas de las partículas coloidales, promoviendo su aglomeración. Estas partículas, responsables de la turbidez y del color del agua, no sedimentan de forma natural debido a su carga superficial, que provoca repulsión entre ellas. Al añadir el coagulante, se produce una inversión de carga, facilitando la atracción entre partículas y la formación de coágulos (Figura 1).



Figura 1. Partículas presentes en el agua cruda

Posteriormente, durante la floculación, estos coágulos crecen y forman flóculos de mayor tamaño y peso, los cuales pueden sedimentar por acción de la gravedad (Figura 2). La coagulación se realiza mediante agitación rápida para asegurar una distribución homogénea del coagulante, con velocidades superiores a las 100 revoluciones por minuto. A continuación, la floculación se efectúa con mezclas lentas, que permiten la consolidación de los flóculos. Estos, una vez sedimentados, forman un lodo que es removido de la corriente principal en la etapa de sedimentación.

Como complemento, y para eliminar partículas remanentes, el agua se somete a procesos de filtración, seguidos de una etapa de desinfección, generalmente con cloro, para inactivar microorganismos patógenos. En casos donde los coagulantes químicos afectan el pH, se realiza una corrección del mismo para mantener la estabilidad del agua tratada.

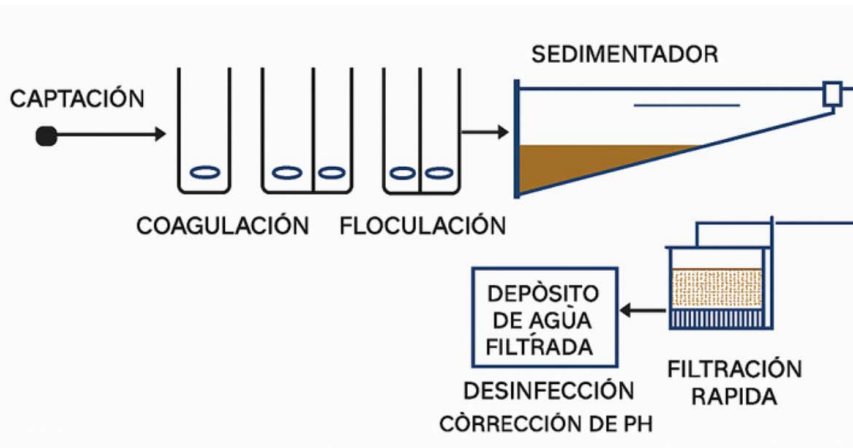


Figura 2. Esquema de floculación

En el laboratorio, la eficiencia de los coagulantes puede evaluarse mediante las llamadas pruebas de jarras, una metodología estándar que permite estudiar el comportamiento de distintas sustancias coagulantes bajo condiciones controladas de turbidez inicial, velocidades de agitación y tiempos de sedimentación. Estos ensayos permiten estimar las dosis óptimas y simular condiciones que posteriormente pueden ser utilizadas para el diseño, operación y optimización de plantas de tratamiento.

Mecanismos de coagulación y potencial de los coagulantes naturales

La coagulación, como etapa fundamental del tratamiento de aguas para consumo humano, puede producirse a través de distintos mecanismos físico-químicos. Uno de los más comunes es la adsorción y neutralización de cargas, donde las partículas coloidales suspendidas en el agua, que naturalmente poseen cargas similares y se repelen entre sí, son desestabilizadas por la acción del coagulante. Este agente, al invertir la carga de las partículas, facilita su atracción y aglomeración, permitiendo la formación de flóculos más grandes que posteriormente sedimentan.

Además de este mecanismo, existen otros procesos que cobran especial relevancia en el uso de coagulantes naturales. Entre ellos, destaca el fenómeno de coagulación por barrido, que ocurre cuando el coagulante excede su límite de solubilidad y forma una matriz gelatinosa capaz de atrapar las partículas en suspensión, incluso aquellas que inicialmente no presentaban afinidad con el coagulante. Este tipo de coagulación es particularmente útil en aguas de baja turbidez. De hecho, en algunos sistemas de potabilización se recurre a un incremento deliberado de la turbidez para favorecer la eficiencia de remoción mediante este mecanismo.

Otro proceso relevante, especialmente asociado a coagulantes de origen biológico, es la adsorción con formación de puentes interparticulares. En este caso, se emplean compuestos poliméricos presentes en materiales naturales como proteínas catiónicas o almidones, cuya estructura molecular permite la adhesión de partículas dispersas en el agua. A medida que estas se adhieren a lo largo de la cadena polimérica, el sistema gana peso y volumen, favoreciendo su posterior sedimentación.

Si bien los coagulantes químicos tradicionales, como los basados en sales de aluminio o hierro, son ampliamente utilizados y eficaces, presentan ciertas desventajas. Entre ellas, su potencial para modificar el pH del agua tratada, la generación de lodos con bajo valor agregado y, en algunos casos, la asociación con riesgos para la salud, como se ha señalado en investigaciones sobre enfermedades neurodegenerativas (por ejemplo, el mal de Alzheimer).

Ante estas limitaciones, se han desarrollado diversas líneas de investigación centradas en la identificación, caracterización y aplicación de coagulantes naturales. Estos compuestos ofrecen una alternativa sostenible, accesible y eficaz, especialmente para comunidades rurales o periurbanas con acceso limitado a tecnologías convencionales.

La premisa fundamental es promover el uso de recursos locales o subproductos agroindustriales, como semillas y cáscaras de frutas, que puedan ser procesados para formular coagulantes. Si bien su producción a gran escala representa un desafío, debido a la disponibilidad irregular de materia prima o a las dosis requeridas, su implementación comunitaria ha mostrado resultados prometedores.

Entre los coagulantes evaluados en nuestras investigaciones se encuentran extractos obtenidos a partir de semillas de sandía, durazno, mango, moringa, tamarindo y *Cassia fistula*, entre otros (Sathish et al., 2018; Carrasquero et al., 2015; Martínez et al., 2017; Mas y Rubí et al., 2013, Carrasquero y Díaz, 2021). En particular, los estudios con semillas de sandía han sido publicados recientemente, destacando su eficiencia en la remoción de turbidez y color, indicadores clave de la calidad del agua. En contextos específicos, se ha observado que el uso combinado de coagulantes naturales con pequeñas dosis de coagulantes químicos permite mantener la eficiencia del tratamiento, al tiempo que se reduce el impacto ambiental y sanitario asociado al uso exclusivo de sustancias sintéticas.

Además del uso de semillas como insumos para la formulación de coagulantes naturales, se ha explorado también la aplicación de residuos vegetales y subproductos de la industria camaronera, destacándose el uso de almidones y la extracción de quitosano como agentes coagulantes efectivos (Carrasquero et al., 2017; Carrasquero et al., 2017). Estas estrategias no solo promueven la sostenibilidad mediante el aprovechamiento de residuos, sino que también fomentan la economía circular en contextos locales. Los detalles específicos sobre los procedimientos de extracción pueden consultarse en las publicaciones científicas desarrolladas por el grupo de investigación.

Un aspecto especialmente positivo de este tipo de sustancias es que ninguno de los coagulantes naturales evaluados produjo alteraciones significativas en el pH residual del agua tratada, lo que representa una ventaja comparativa respecto a coagulantes químicos tradicionales.

El coagulante natural a partir de semillas, específicamente de sandía, fue obtenido mediante un proceso de extracción sencillo (Figura 3), que inicia con el lavado y secado de las semillas con el fin de eliminar residuos orgánicos superficiales. Posteriormente, se procede a la molienda y tamizado, con lo cual se obtiene un polvo fino apto para ser manipulado en laboratorio. A continuación, se realiza una caracterización parcial del polvo obtenido, analizando parámetros como el contenido de humedad, grasa y cenizas, esenciales para determinar su comportamiento en el tratamiento de aguas.

En los casos donde se evidencia un contenido graso significativo, se aplica un proceso de desgrasado utilizando solventes orgánicos, ya que la presencia de lípidos puede interferir negativamente en la eficiencia de coagulación, incrementando la turbidez y el color del agua tratada. Finalmente, se elabora una solución madre con concentraciones típicas entre 5.000 y 10.000 mg/L, que es posteriormente diluida según las necesidades de cada ensayo, permitiendo evaluar la dosis óptima para lograr los mejores resultados en remoción de turbidez y color..

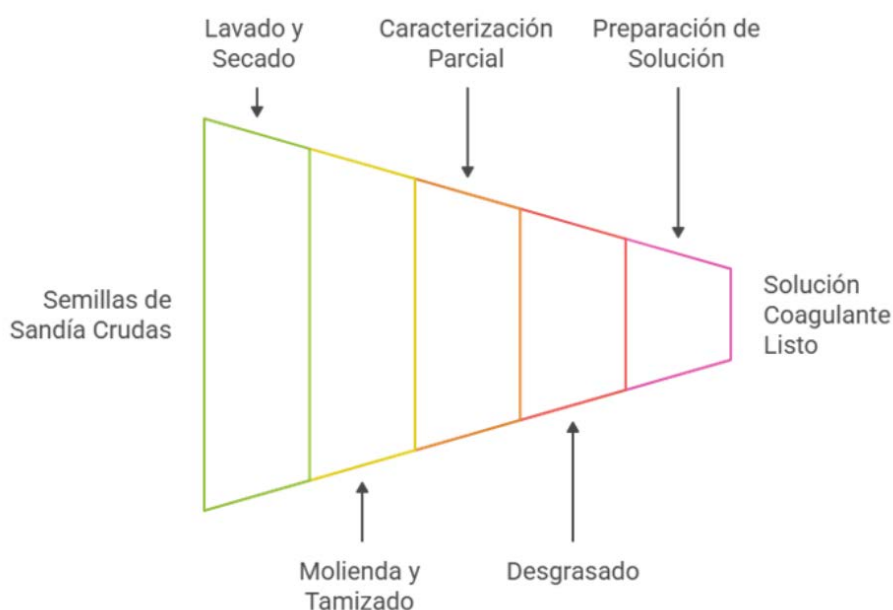


Figura 3. Proceso de refinamiento de las semillas

En algunos casos, como el del mango, se ha observado que incluso sin el proceso de desgrasado, el rendimiento del coagulante sigue siendo elevado, lo cual representa una simplificación técnica y económica en la producción. Este enfoque permite avanzar hacia un tratamiento de aguas eficiente, de bajo costo y ambientalmente sostenible, facilitando su implementación en comunidades rurales, periurbanas o en contextos donde los recursos son limitados. Los resultados experimentales refuerzan la viabilidad de los coagulantes naturales como una alternativa efectiva a las sustancias químicas tradicionales, particularmente cuando se consideran los principios de sostenibilidad, salud pública y gestión integral del recurso hídrico.

Una vez que el sistema de potabilización se encuentra en funcionamiento, surge la pregunta clave: ¿qué tipo de agua se debe utilizar para evaluar la efectividad del coagulante? Aunque el uso de agua real proveniente de la fuente de captación es posible, en la mayoría de los ensayos se opta por utilizar agua turbia sintética, cuya composición permite estandarizar las condiciones experimentales y obtener mayor estabilidad en los parámetros de control, especialmente la turbidez.

Para la preparación de este tipo de agua, se emplea caolín, una arcilla blanca que permite simular diferentes niveles de turbidez. A partir de una solución madre, se realizan diluciones sucesivas para obtener rangos representativos de condiciones reales: turbidez baja (10–15 NTU), media (50–75 NTU) y alta (100–200 NTU). Estas soluciones son tratadas mediante el ensayo de jarras, utilizando volúmenes constantes, condiciones operativas específicas y diferentes dosis del coagulante natural.

Tras el proceso de tratamiento, se procede a extraer el agua clarificada para la medición de parámetros de control como turbidez, color y pH. Posteriormente, a las dosis más efectivas se les evalúan otros parámetros conforme a los límites establecidos en la normativa vigente. A partir de esta evaluación, se determina la dosis óptima, entendida como la concentración mínima del coagulante capaz de reducir la turbidez a niveles aceptables (usualmente <5 NTU), de acuerdo con los estándares de la Organización Mundial de la Salud.

En el caso del coagulante obtenido a partir de semillas de sandía, por ejemplo, se observó un contenido graso aproximadamente 25% superior al reportado en otras semillas empleadas como coagulantes. Este exceso de lípidos puede interferir negativamente en el proceso, por lo que es recomendable aplicar un proceso de desgrasado previo, especialmente cuando el contenido de aceites supera el 20–25%, como ocurre también con las semillas de durazno o moringa.

En las evaluaciones realizadas, se construyeron curvas de dosis frente a turbidez residual, que permitieron observar el comportamiento del coagulante ante distintas concentraciones. Estas curvas ayudan a identificar la dosis óptima. Por ejemplo, para agua con turbidez media (75 NTU), una dosis de 150 mg/L de coagulante de sandía permitió reducir la turbidez a valores inferiores a 5 NTU. Se debe recordar que, tras la coagulación y sedimentación, la siguiente etapa del tratamiento sería la filtración, que mejora aún más la calidad del agua.

Además, se monitorearon parámetros como sólidos totales (y sus fracciones), así como alcalinidad, dado que esta última es un parámetro crítico en la estabilidad química del agua. Se recomienda mantener valores entre 80 y 200 mg/L para evitar tanto la corrosividad como la incrustación en las redes de distribución.

Otras experiencias desarrolladas por el equipo de investigación han incluido el uso de residuos de papa y plátano como precursores de coagulantes naturales. Estos residuos, que no tienen valor comercial, fueron transformados en insumos con valor agregado. Los resultados de remoción fueron alentadores, alcanzando eficiencias mayores al 85% en aguas de alta turbidez y superiores al 50% en aguas de baja turbidez. En algunos casos, los valores finales de turbidez para aguas tratadas con residuos de papa lograron situarse por debajo de los 5 NTU.

Consideraciones finales

A modo de cierre, se reafirma que los coagulantes naturales representan una alternativa eficaz, económica y sostenible en el tratamiento de aguas, especialmente en contextos rurales o comunidades con acceso limitado a insumos químicos. Su combinación con coagulantes convencionales también puede optimizar los procesos, reduciendo el uso de productos sintéticos y promoviendo un enfoque de tratamiento más respetuoso con el ambiente.

Los resultados obtenidos hasta el momento confirman que los coagulantes naturales tienen un potencial considerable en el tratamiento de aguas turbias, especialmente en contextos rurales o de difícil acceso. Esto está ampliamente documentado en la literatura y respaldado por los ensayos realizados en laboratorio. Por lo tanto, es fundamental dar continuidad a las investigaciones orientadas no solo a optimizar las condiciones operativas que maximicen la eficiencia de remoción, sino también a establecer combinaciones sinérgicas entre coagulantes naturales y sintéticos que permitan reducir las dosis necesarias, minimizar costos y garantizar la viabilidad técnica y económica a mayor escala.

Entre los coagulantes evaluados, la moringa (*Moringa oleifera*) y el citrino (*Citrullus lanatus*) han mostrado los mejores resultados, con remociones superiores al 90%, tanto en condiciones de baja como alta turbidez, sin alterar significativamente parámetros críticos como el pH o la alcalinidad. Esta eficiencia sugiere que su aplicación puede jugar un rol clave en el diseño de tecnologías sostenibles, especialmente en comunidades vulnerables donde el acceso a insumos industriales es limitado.

El uso de estas soluciones basadas en la naturaleza se alinea plenamente con los principios de producción más limpia y con los lineamientos establecidos por los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), el ODS 12 (Producción y consumo responsables) y el ODS 13 (Acción por el clima). La sustitución parcial o total de coagulantes sintéticos por alternativas naturales no solo contribuye a la reducción de residuos químicos, sino que disminuye el impacto ambiental de los procesos de tratamiento, promoviendo una gestión más responsable de los recursos hídricos.

Referencias bibliográficas

- Acción contra el Hambre. (2019). Memoria anual 2018. Acción contra el Hambre - España. <https://www.accioncontraelhambre.org/es/memoria-anual>
- Carrasquero, S., Lozano, Y., García, M., Camacho, M., Rincón, A., Mas y Rubí, M. (2015). Eficiencia de las semillas de durazno (*Prunus persica*) como coagulante natural en la potabilización de aguas. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*, 49(3):239-255.
- Carrasquero, S., Ferreira, M., Acosta, R., Mezzoni, V., Marin, J., Colina, G. (2016). Efectividad del quitosano en la potabilización de aguas para una industria procesadora de alimentos. *Revista de la Facultad de Ingeniería UCV*, 31(2):57-68. http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_fiucv/article/view/15458
- Carrasquero, S., Montiel, S., Faria, E., Parra, P., Marín, J., Díaz, A. (2017). Efectividad de coagulantes obtenidos de residuos de papa (*Solanum tuberosum*) y plátano (*Musa paradisiaca*) en la clarificación de aguas. *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 13(2):90-99.
- Carrasquero, S., Martínez, M., Castro, M., López, Y., Díaz, A., Colina, G. (2019). Remoción de turbidez usando semillas de *Tamarindus indica* como coagulante en la potabilización de aguas. *Revista Bases de la Ciencia*, 4(1):19-44. <https://revistas.utm.edu.ec/index.php/Basedelaciencia/article/view/1424>
- Carrasquero, S., Díaz, A. (2021). Efectividad de semillas de *Cassia fistula* como coagulante en la clarificación de aguas para consumo. 22 – 25 p.p. En: Carrasquero, S., Hernández, A., La Mota, G., Townsend, J., Arias, A., Trasviña, R. (2021). *Desarrollo, ambiente y sociedad. Perspectiva multidisciplinaria. Volumen I*. Editorial UTEG. 95 p.p
- Martínez, U., Marquina, C., Carrasquero, S., Martínez, M., Monroy, C., Morris, A. (2017). El extracto de semillas de mango (*Mangifera indica* L.) como coagulante natural en la potabilización de aguas. *Proceedings of 15th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Global Partnerships for Development and Engineering Education"*, 19-21 July 2017, Boca Raton FL, United States. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7352998>
- Mas y Rubí, M., Carrasquero, S., Martínez, D., Mejías, D., Vargas, L. (2013). Efectividad de las semillas *Moringa oleifera* como coagulante en la remoción de metales en aguas de baja turbiedad. *Revista Tecnocientífica*. 5(2):27-37. <http://ojs.uru.edu/ojs/index.php/tc/article/viewFile/515/410>
- Gössling, S., Peeters, P., Hall, C. M., Ceron, J. P., Dubois, G., Lehmann, L. V., & Scott, D. (2012). Tourism and water use: Supply, demand, and security. *An international review. Tourism Management*, 33(1), 1-15.
- Guillen Zegarra, R. E., & Torres Cornejo, V. K. (2015). Determinación y monitoreo de arsénico en agua potable de fuentes superficiales y de manantial, provistas por Sedapar: Arequipa 2014. Universidad Católica de Santa María. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/3430>
- Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- Naciones Unidas. (2010). Resolución 64/292. El derecho humano al agua y el saneamiento. Asamblea General de las Naciones Unidas. <https://www.un.org/es/ga/64/resolutions.shtml>

- Sathish S., Vikram, S., Suraj, R. (2018). Effectiveness of turbidity removal from synthetic and tannery wastewater by using seeds of a natural coagulant *Citrullus lanatus*. *Nature Environment and Pollution Technology: An International Quarterly Scientific Journal*, 17(2), 551-553. [https://www.neptjournal.com/upload-images/NL-64-30-\(28\)B-3487.pdf](https://www.neptjournal.com/upload-images/NL-64-30-(28)B-3487.pdf)
- World Health Organization. (2017). *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first addendum*. WHO. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>

Eje III: Educación, Gestión Hídrica y Conservación Ambiental: estrategias para un futuro sostenible

La educación como una herramienta clave para la conservación del agua



Msc. Beatriz Almonacil⁸

bea.almonacil@gmail.com

La creciente degradación de los ecosistemas marinos y la desconexión entre las personas y el océano representan uno de los principales desafíos ambientales de los tiempos actuales. En este contexto, la educación emerge no solo como un vehículo de conocimiento, sino como una poderosa herramienta para movilizar afectos, despertar conciencia y construir ciudadanía ambiental activa.

La educación constituye una herramienta fundamental para promover la conservación del medio ambiente. Sin embargo, aún persiste la percepción errónea de que la educación está dirigida únicamente a un grupo específico, como los niños, y se limita a espacios formales. Por el contrario, a través de esta breve charla, se busca ampliar esa visión y abrir horizontes sobre el verdadero alcance de la educación ambiental.

En este contexto, se presenta una experiencia significativa, el club deportivo Blue-Wave EC un club de natación y actividades acuáticas, debidamente registrado ante el Ministerio del Deporte desde el año 2018. Este club tiene como propósito principal acercar el océano a las personas, combinando la práctica deportiva



⁸ Oceanógrafa. Máster en Educación Ambiental con énfasis en Educación Marina. Fundadora y presidenta del club deportivo Blue-Wave EC.

con actividades educativas que fomentan el conocimiento, la conexión emocional y el respeto hacia los ecosistemas marinos. Todos sus integrantes comparten un profundo amor por el océano, y ese entusiasmo motiva sus acciones de divulgación, con la esperanza de que más personas se enamoren del entorno marino y se comprometan activamente con su cuidado.

Antes de avanzar, es importante presentar una definición clara de educación ambiental, ya que en ocasiones se la asocia únicamente con charlas o actividades puntuales como mingas de limpieza. No obstante, la educación ambiental es mucho más que eso: es un proceso continuo, permanente y transformador que acompaña el crecimiento personal a lo largo de toda la vida. Enfrentar nuevos desafíos ambientales requiere que las personas se adapten, aprendan y evolucionen en su forma de relacionarse con el entorno natural del cual dependen.

Por tanto, al hablar de educación ambiental, es esencial comprender que los cambios significativos no ocurren de forma inmediata. Una charla, por sí sola, no garantiza una transformación profunda. Sin embargo, puede ser el punto de partida de un proceso interno que despierte el interés, la conciencia y el deseo de actuar. Existen múltiples formas de iniciar este camino: desde participar en programas y proyectos de educación ambiental, hasta tomar decisiones personales como aprender a nadar, si el miedo al agua ha impedido una experiencia directa con el océano.

Lo importante es reconocer que la educación ambiental debe entenderse como un proceso activo y sostenido, que busca dotar a las personas de herramientas para analizar, comprender y enfrentar los problemas ambientales actuales. Esto implica conectar con el entorno y repensar los paradigmas tradicionales. Desde el año 2000, han surgido nuevas perspectivas sobre cómo enfocar la educación ambiental para que su impacto sea real, duradero y, sobre todo, sostenible.

Uno de los aspectos clave en la educación ambiental es que no puede ser uniforme ni replicable en cualquier contexto. Las estrategias utilizadas deben adaptarse al lugar, a la cultura y a la realidad específica de los destinatarios. No es lo mismo trabajar con un grupo de niños en el Mediterráneo que hacerlo con niños de una comuna local en América Latina. Por ello, es esencial diseñar procesos educativos situados, que reconozcan las particularidades del entorno y las vivencias de quienes participan.

Además, los destinatarios deben ser los protagonistas del proceso educativo. La educación ambiental efectiva no puede concebirse como un acto unidireccional, en el que el conocimiento se transfiere pasivamente. Al contrario, requiere del empoderamiento de las personas, brindándoles herramientas que les permitan comprender su entorno, tomar decisiones informadas y actuar en consecuencia. El objetivo final es fomentar una acción concreta, un cambio de comportamiento que tenga impacto positivo en el ambiente.

Sin embargo, no se trata simplemente de transmitir conceptos. Durante muchos años, la educación ambiental se limitó a ofrecer charlas informativas sobre temas como el cambio climático o el uso del plástico. Aunque necesarias, estas actividades, por sí solas, no logran generar transformaciones profundas ni sostenidas. Por ejemplo, una charla sobre cambio climático difícilmente logrará, de manera inmediata, que las personas cambien sus hábitos de consumo, utilicen menos plástico o se movilicen en bicicleta. Para lograrlo, se necesita una conexión más profunda con el entorno, una experiencia que despierte emociones, valores y sentido de pertenencia.

En ese sentido, el contacto directo con la naturaleza cobra especial importancia. La educación ambiental actual reconoce que no basta con apelar al conocimiento racional, sino que también se debe trabajar desde la dimensión emocional y vivencial. Numerosos estudios científicos han demostrado que la infancia temprana –especialmente entre los siete y ocho años– es una etapa decisiva para establecer vínculos significativos con el medio natural. Las experiencias en la naturaleza durante esa etapa influyen directamente en la conciencia y sensibilidad ambiental en la vida adulta.

Esto se refleja en la memoria afectiva de muchas personas: al evocar momentos felices de la niñez, es común que surjan imágenes en contacto con la naturaleza –en la playa, el campo, las montañas o los ríos–, generalmente en compañía de familiares o amigos. Esas experiencias tempranas forjan la relación que desarrollamos con el entorno y, en muchos casos, determinan nuestro compromiso con su cuidado.

Por todo ello, la educación ambiental contemporánea se propone ir más allá de la transmisión de información. Busca generar experiencias transformadoras, promoviendo una interacción continua entre conocimiento, emoción y acción. Solo así será posible formar ciudadanos comprometidos con la sostenibilidad y capaces de responder a los desafíos ambientales del presente y el futuro.

Educación oceánica

La educación ambiental oceánica es un enfoque educativo que busca concienciar sobre la importancia de los océanos y su conservación, es crucial para promover la conciencia sobre la importancia de los océanos y su conservación. Esto se logra a través de proyectos educativos que involucran a la comunidad y fomentan prácticas sostenibles (Antón et al. 2024).

La conectividad oceánica se refiere a cómo las diferentes partes de los océanos están interrelacionadas a través de corrientes, migraciones de especies y procesos ecológicos. Este concepto es fundamental para entender el funcionamiento de los ecosistemas marinos a escala global.

Según un Halpern et al. (2015), los océanos funcionan como un sistema interconectado donde las acciones en una región pueden tener consecuencias en áreas distantes. Este estudio demuestra cómo la contaminación, la pesca excesiva y el cambio climático en una zona pueden afectar ecosistemas marinos en otras partes del mundo debido a las corrientes oceánicas y las migraciones de especies. De igual manera, Botsford et al. (2009) destaca la importancia de la conectividad para el diseño efectivo de áreas marinas protegidas (Treml et al., 2008).

El concepto de educación oceánica, una rama específica dentro del campo más amplio de la educación ambiental, cobra creciente relevancia en el contexto del desarrollo sostenible. La educación es una pieza fundamental del rompecabezas para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Sin ella, es imposible comprender ni actuar de forma consciente frente a los desafíos ambientales que enfrenta el planeta.

En este contexto, se resalta una frase profundamente significativa del activista ambiental senegalés Baba Dioum: "Solo conservaremos lo que amamos, solo amaremos lo que comprendemos y solo comprenderemos lo que se nos ha enseñado." Esta reflexión subraya el papel transformador de la educación en la construcción de vínculos emocionales y racionales con el entorno. En ese sentido, se sabe que sin la integración del ODS 4: Educación de calidad, el cumplimiento de otros ODS, como el ODS 14: Vida submarina, directamente relacionado con la labor del ponente, queda incompleto.

Transmitir conocimiento no es suficiente si no se logra una conexión emocional. Enseñar implica despertar algo en el interior de las personas, sembrar una inquietud que, con el tiempo, puede evolucionar en una conciencia ambiental profunda y en un cambio de comportamiento genuino. Nadie puede amar lo que no conoce, y en el caso del océano, esa desconexión es especialmente marcada.

Aquí entra en juego el concepto de educación oceánica, un enfoque relativamente nuevo que surgió en el año 2002 en Estados Unidos. Esta propuesta nace como respuesta a lo que se denomina "ceguera marítima", es decir, la falta de conocimiento y conciencia sobre el océano, incluso entre personas que viven cerca de la costa. Esta desconexión se agrava aún más en quienes habitan regiones interiores, a pesar de que la humanidad depende profundamente del océano para sobrevivir.

El océano cubre más del 71% de la superficie del planeta, regula el clima, genera más del 50% del oxígeno que respiramos, y actúa como un gran sumidero de carbono, ayudando a mitigar los efectos del cambio climático. Además, es fuente de alimento, de compuestos para medicinas, y cumple funciones vitales a través de sus corrientes y ecosistemas. Sin embargo, menos del 10% del océano ha sido explorado, lo que nos revela un enorme vacío de conocimiento sobre esta parte esencial del planeta.

La educación oceánica surge precisamente para romper esa barrera entre el ser humano y el mar, promoviendo un entendimiento más profundo, informado y emocional del océano. Busca superar las visiones mitificadas o temerosas del océano –aquellas que evocan calamares gigantes, tiburones o leyendas como Moby Dick– y reemplazarlas por una comprensión científica, accesible y respetuosa. El objetivo final es lograr que cada persona, al conocer el océano y su importancia, se sienta parte de él y actúe en consecuencia.

Uno de los ecosistemas más ricos en biodiversidad marina es el que rodea a las costas del Ecuador. Este país se ha posicionado como el número uno a nivel mundial en cuanto a la población de mantas gigantes, tanto por la cantidad de individuos como por el tamaño de estas especies. Ecuador alberga las mantas gigantes más grandes del mundo, un privilegio natural extraordinario que, sorprendentemente, se encuentra al alcance de todos.

Para observar una manta gigante no es necesario contar con certificaciones de buceo ni realizar inmersiones profundas. Basta con colocarse una máscara de snorkel y sumergirse en aguas superficiales, especialmente durante la temporada en la Isla de la Plata, donde estas especies se alimentan cerca de la superficie. Para quienes se sienten más apasionados por el mar, el club también promueve prácticas como la apnea o buceo a pulmón, fomentando el contacto directo con la vida marina. Esta experiencia no solo requiere técnica, sino también un estado de calma y conexión profunda, donde el ser humano, al igual que las tortugas marinas, debe aprender a contener la respiración, integrarse al ritmo del océano y fluir con su energía.

Educación ambiental a través de prácticas deportivas acuáticas

Desde el club se impulsa el uso del deporte y las actividades acuáticas como herramientas educativas que permiten acercarse al océano, conocerlo y, por ende, conservarlo. Una de las iniciativas destacadas es el desarrollo de recorridos guiados por zonas de plataforma rocosa intermareal, como las que se encuentran en sectores como "La Gallinita" o "La Punta", cerca de Montañita. Durante la marea baja, estas áreas quedan expuestas y revelan un ecosistema con más de 15 especies marinas

que habitan entre las rocas. Para esta actividad, se emplean guías ilustradas y plastificadas diseñadas por el mismo equipo del club, lo que permite una experiencia de aprendizaje accesible y participativa para personas de todas las edades: desde bebés en brazos hasta adultos mayores.

Otra de las estrategias educativas implementadas es la organización del Festival del Océano, un evento anual que integra actividades recreativas, deportivas y formativas con el objetivo de fortalecer la conexión de la ciudadanía con los ecosistemas marinos. Este año, además, el club participa en competencias de Aguas Abiertas Ambos Pacíficos, donde instalan stands de educación ambiental dirigidos a nadadores y asistentes. Estos espacios buscan sensibilizar a los participantes sobre el impacto de nuestras acciones cotidianas, especialmente en relación con el consumo de plásticos de un solo uso.

Durante estas actividades, se invita a reflexionar sobre la persistencia del plástico en los océanos: qué sucede con estos residuos cuando terminan en el mar, cómo se fragmentan en microplásticos y qué efectos tienen sobre las especies marinas y, finalmente, sobre la salud humana. La propuesta es clara: promover un cambio de comportamiento, fomentar el rechazo de productos desechables y optar por alternativas más sostenibles.

Desde 2023, el club forma parte de una red internacional denominada "Océanos por la Alianza", una plataforma colaborativa que trabaja en la educación oceánica mediante una metodología estructurada en 11 pasos de conexión con el océano. A través de estos procesos, se busca inspirar y empoderar a las personas, generando conciencia, acción y compromiso por la protección del mar.

Este programa se trabaja directamente con niños y jóvenes en Ecuador continental y en las Islas Galápagos, utilizando una metodología de conexión oceánica que tiene su origen en Sudáfrica. Actualmente, dicha metodología se encuentra en fase de replicación y evaluación de impacto en colaboración con la Universidad de Wilmington (Carolina del Norte, EE. UU.), con grupos de niñas y niños de diferentes contextos. El objetivo principal es fortalecer su vínculo con el entorno marino mediante actividades vivenciales y emocionales.

Dentro de estas jornadas, que se desarrollan íntegramente en el ecosistema costero, se integran múltiples experiencias sensoriales y de aprendizaje. Entre ellas destacan el snorkel, la práctica de yoga, y una caminata consciente en la que los participantes utilizan todos sus sentidos para conectarse con el entorno natural (Figura 1,2). También se realiza una dinámica de línea del tiempo, donde se analiza el recorrido y el impacto de los residuos, reforzando la comprensión sobre la persistencia de la basura marina. Todo esto se realiza en contacto directo con la naturaleza, en un entorno real: la playa.



Figura 1. Talleres en territorio de Blue Wave EC

Uno de los mensajes fundamentales que transmite el programa es que la playa no es únicamente un espacio de recreación, sino un ecosistema lleno de vida. A través de las actividades propuestas, se busca que los niños y jóvenes comprendan que bajo la arena habitan especies como gusanos marinos, crustáceos, aves costeras y organismos microscópicos, cuya existencia es esencial para el equilibrio ecológico. El reconocimiento de esta biodiversidad fortalece la conciencia sobre la necesidad de conservación (Figura 2).

Además, se compartió una experiencia significativa llevada a cabo por la Fundación Amiguitos del Océano, con el acompañamiento del equipo de Blue Way, que participó como formador en natación y snorkel. Entre 2023 y 2024, este proyecto benefició a 19 niños locales, quienes participaron en un programa intensivo de dos meses para aprender a nadar y realizar snorkel. Una vez adquiridas estas habilidades, los mismos niños se organizaron para realizar limpiezas mensuales en la bahía de Yáñez, intervenciones que se llevan a cabo directamente con snorkel, bajo el agua.

Esta iniciativa no solo se mantuvo activa, sino que ha ido creciendo. Otros niños de la comunidad, al ver a sus compañeros participando en actividades de conservación marina, se sumaron de manera voluntaria. Hoy en día, el grupo está conformado por más de 20 niños, acompañados por adultos y voluntarios de distintas edades, lo que ha permitido consolidar una comunidad activa en torno a la protección del océano.



Figura 2. Reconocimiento de biodiversidad por parte de participantes de la actividad de formación de Blue Wave EC

La actividad es completamente abierta al público, y se realiza el último domingo de cada mes al mediodía, del lado derecho de la bahía, donde se encuentran atracadas las embarcaciones. Allí, niños, familias y voluntarios se reúnen para realizar una jornada de limpieza submarina con snorkel. La próxima cita será el domingo 30 de marzo, y todos quienes deseen sumarse están cordialmente invitados a formar parte de esta experiencia de educación, acción y amor por el océano.

Consideraciones finales

La educación ambiental debe ser vivencial, continua y emocionalmente significativa para generar cambios reales. No basta con charlas puntuales o la transmisión de información; se requiere un proceso educativo que involucre la experiencia directa con la naturaleza, especialmente en edades tempranas, para construir vínculos afectivos con el entorno y fomentar comportamientos sostenibles.

La educación oceánica es esencial para romper la desconexión con el mar y fortalecer la conservación marina. Frente a la "ceguera marítima", es urgente promover enfoques educativos que despierten la conciencia sobre la importancia de los océanos, su biodiversidad y su papel vital en la vida humana. Conocer el océano es el primer paso para amarlo y, por ende, conservarlo.

El deporte y la acción comunitaria son medios efectivos para impulsar la educación ambiental y el compromiso ciudadano. Iniciativas como las del club Blue-Wave EC, que integran deporte, ciencia y comunidad, han demostrado que es posible educar desde la experiencia, motivando a niños, jóvenes y adultos a convertirse en agentes activos en la protección del agua y de los ecosistemas marinos.

Referencias bibliográficas

- Antón Linares, I., Abel Abellán, I., Izquierdo Muñoz, A., & Giménez Casaldueiro, F. (2024). Educar en la mar: Educación ambiental marina desde CIMAR-Universidad de Alicante. Centro de Investigación Marina de Santa Pola (CIMAR) – Universidad de Alicante. <https://web.ua.es/es/cimar/>
- Botsford, L. W., White, J. W., Cofforth, M. A., Paris, C. B., Planes, S., Shearer, T. L., Thorrold, S. R., & Jones, G. P. (2009). Connectivity and resilience of coral reef metapopulations in marine protected areas: matching empirical efforts to predictive needs. *Ecological Applications*, 19(2), 447-467. <https://doi.org/10.1890/07-1861.1>
- Cummins, S., y Snively, G. (2000). The effect of instruction on children's knowledge of marine ecology, attitudes toward the ocean, and stances toward marine resource issues. *Canadian Journal of Environmental Education*, 5, 305–326.
- Halpern, B. S., Frazier, M., Potapenko, J., Casey, K. S., Koenig, K., Longo, C., Lowndes, J. S., Rockwood, R. C., Selig, E. R., Selkoe, K. A., & Walbridge, S. (2015). Spatial and temporal changes in cumulative human impacts on the world's ocean. *Nature Communications*, 6, 7615. <https://doi.org/10.1038/ncomms8615>
- Treml, E. A., Halpin, P. N., Urban, D. L., & Pratson, L. F. (2008). Modeling population connectivity by ocean currents, a graph-theoretic approach for marine conservation. *Landscape Ecology*, 23(S1), 19-36. <https://doi.org/10.1007/s10980-007-9138-y>

Ciudad de todos, planeta de todos: la educación ambiental como motor de cambio



Ing. Isabel Tamariz Mata⁹

itamarizm@guayaquil.gov.ec

La ciudad contemporánea constituye mucho más que un espacio físico; representa un ecosistema complejo de dimensiones sociales, culturales y ambientales en el que convergen los principales desafíos globales del desarrollo sostenible. En este escenario, la educación ambiental emerge como una herramienta transformadora, al permitir la reflexión crítica sobre las formas en que las sociedades habitan y se relacionan con su entorno. Lo que ocurre en calles, escuelas y hogares tiene un impacto directo y acumulativo sobre el planeta, por lo que es imperativo replantear dichos vínculos desde una perspectiva educativa (McPhearson et al., 2016; Meira y Caride, 2020).

Este capítulo analiza el potencial de la educación ambiental cuando se implementa de forma participativa, inclusiva y contextualizada, destacando su capacidad para movilizar transformaciones significativas en la ciudadanía. A través de prácticas situadas que vinculan a las comunidades con sus territorios, se promueve la corresponsabilidad en la gestión de los recursos na-



⁹ Ingeniera en Gestión Ambiental. Máster en Ordenamiento Territorial y Gestión Ambiental. Máster en Derecho Ambiental con mención en Sostenibilidad. Directora de Ambiente del Municipio de Guayaquil, Ecuador.

turales, la biodiversidad urbana y la respuesta frente al cambio climático. Ya sea desde acciones comunitarias o a través de políticas públicas, el objetivo es fomentar una ciudadanía ecológicamente consciente y activa, capaz de integrar el cuidado ambiental con principios de equidad y justicia social (Huckle y Wals, 2015).

En este contexto, el Municipio de Guayaquil, tiene el programa “La sostenibilidad va a tu aula”, una iniciativa liderada por la Dirección General de Ambiente y Preservación de Áreas Verdes del, enfocada en fortalecer la educación ambiental y la sensibilización ciudadana en el contexto urbano. Este programa se enmarca dentro de los objetivos de la actual administración municipal, cuyo eje central es la reconstrucción del tejido social a través de políticas públicas inclusivas, en las que la educación juega un papel protagónico. En particular, la educación ambiental ha sido concebida como una herramienta clave para despertar conciencia, movilizar conocimientos y generar compromiso en la población, especialmente en niñas, niños y adolescentes.

Entre los años 2023 y 2024, el municipio ha implementado acciones sistemáticas orientadas a sensibilizar a los estudiantes de instituciones educativas de Guayaquil. Con el reinicio del calendario escolar, se proyecta continuar con estas actividades, buscando ampliar el alcance del programa y consolidar su impacto a largo plazo. “La sostenibilidad va a tu aula” se estructura como un programa de intervención directa en centros educativos, donde se desarrollan charlas formativas, talleres participativos y experiencias interactivas. Uno de los elementos más relevantes de la intervención fue la presentación de un video institucional que resume los resultados del programa. En él, se muestra que más de 50 instituciones educativas fueron visitadas solo en el año 2024, llegando a cientos de estudiantes con contenidos sobre sostenibilidad, cambio climático y consumo responsable.

Los testimonios recogidos en el audiovisual reflejan el impacto del programa en la comunidad estudiantil. Un adolescente, por ejemplo, señaló que este tipo de iniciativas “ayuda a concientizar sobre el daño que se le hace al planeta”. Otro aspecto que generó particular asombro entre los participantes fue conocer que ciertos residuos, como los plásticos, pueden permanecer más de mil años en el mar antes de descomponerse.

La experiencia ha demostrado que los mensajes impartidos durante las actividades no se quedan únicamente en las aulas. Muchos estudiantes han llevado lo aprendido a sus hogares, generando transformaciones en sus entornos familiares y motivando cambios en los hábitos de consumo. Esta cadena de sensibilización ha permitido que el programa trascienda el ámbito educativo y fortalezca el compromiso ambiental de las comunidades

Formar para transformar: sensibilización ambiental en el contexto urbano de Guayaquil

Desde el Municipio de Guayaquil se considera que la educación ambiental representa uno de los legados más significativos que una administración puede dejar a la ciudadanía. Cada acción, cada mensaje y cada espacio intervenido forma parte de un esfuerzo colectivo por promover la sostenibilidad. Bajo esta premisa, se reafirma el compromiso institucional de trabajar de forma articulada, impulsando un futuro más sostenible para la ciudad.

En el marco del programa “La sostenibilidad va a tu aula”, se ha diseñado una estrategia dirigida especialmente a la comunidad educativa. Dado el tamaño y la densidad poblacional de Guayaquil –una ciudad con cerca de tres millones de habitantes–, el acceso a las instituciones educativas constituye un canal clave para multiplicar el mensaje de conciencia ambiental. Al llegar a niñas, niños y adolescentes, también se llega a los hogares y se fomenta la adopción de nuevas prácticas dentro del núcleo familiar.

El programa aborda cuatro ejes temáticos fundamentales en sus charlas y actividades (Figura 1), A través de estos componentes, se busca transformar la educación ambiental en una herramienta capaz de incentivar actitudes responsables, empáticas y duraderas hacia el entorno.



Figura 1. Ejes temáticos fundamentales del programa La Sostenibilidad va a tu aula

Durante la intervención, se destacaron los logros alcanzados entre los años 2022 y 2024. En su primera fase, el programa sensibilizó a aproximadamente 5.810 estudiantes. En 2024, el número de beneficiarios se incrementó significativamente, alcanzando a 10.200 estudiantes adicionales. En total, más de 16.000 niñas, niños y adolescentes han sido impactados por esta iniciativa. Con base en el éxito del programa y en la apertura expresada por directivos y docentes de diversas instituciones educativas, el Municipio de Guayaquil proyecta triplicar esta cifra en el año lectivo 2025, fortaleciendo aún más su presencia en el sistema educativo local.

Para la administración municipal, estos avances son reflejo de un camino colectivo hacia una ciudad más consciente y resiliente. La educación ambiental no solo transmite conocimientos: forma valores, transforma hábitos y construye ciudadanía ecológica. En ese sentido, este programa representa un modelo de intervención desde lo local, que permite proyectar cambios globales, sostenidos y significativos.

Estrategias pedagógicas y temáticas abordadas en la educación ambiental municipal

Como parte de su compromiso con la sostenibilidad y la transformación educativa, el Municipio de Guayaquil ha implementado una serie de acciones sistemáticas de sensibilización ambiental en el ámbito escolar. Entre los años 2023 y 2024, se desarrollaron más de 120 sesiones educativas, ejecutadas en instituciones de educación básica y media. Estas sesiones han sido concebidas como espacios de diálogo, aprendizaje y acción colectiva, diseñados específicamente para fomentar el pensamiento crítico y la participación activa de los estudiantes frente a los desafíos ambientales locales.

Durante el periodo comprendido entre 2022 y 2023, se intervinieron 37 instituciones educativas. Para el año 2024, el alcance territorial se amplió considerablemente, llegando a un total de 85 instituciones educativas en distintos sectores de la ciudad. Esta expansión ha sido posible gracias a la colaboración con docentes, directivos y comunidades educativas, así como al desarrollo de una metodología basada en la interacción y la vivencia directa de los contenidos ambientales.

Las actividades se han estructurado en torno a charlas formativas, talleres participativos y dinámicas interactivas, orientadas a conectar la realidad ambiental de Guayaquil con las acciones cotidianas de las y los estudiantes. El enfoque de estas sesiones ha sido eminentemente práctico, buscando no solo informar, sino generar conciencia, compromiso y transformación de hábitos.

En el área de Cambio climático y su impacto local se analizan las evidencias concretas del cambio climático en el contexto de Guayaquil, como las inundaciones recurrentes durante la temporada invernal, uno de los principales riesgos ambientales que enfrenta la ciudad. A partir de esta realidad, se reflexiona con los estudiantes sobre las causas del cambio climático, sus implicaciones, y las acciones individuales y colectivas que pueden contribuir a reducir la huella de carbono.

Por su parte, en Gestión de residuos y economía circular, el programa enfatiza la necesidad de reducir la generación de residuos desde el origen. Aunque se promueve el reciclaje, el énfasis está en generar conciencia sobre el consumo responsable. Como se señala en las sesiones: “no hay mejor residuo que aquel que no se genera”. En este eje se abordan también los impactos de los residuos en la salud ambiental, urbana y marina, así como la importancia de fomentar una cultura de separación, reutilización y reducción.

De igual manera, en el área del Uso responsable del agua y conservación de los recursos hídrico, se promueven prácticas para el uso eficiente del agua tanto en el hogar como en las instituciones educativas, al tiempo que se enfatiza la necesidad de evitar la contaminación de ríos, esteros y canales. Este eje es particularmente relevante en una ciudad atravesada por cuerpos de agua y que enfrenta desafíos crecientes relacionados con la calidad y disponibilidad de este recurso.

Adicionalmente, se han abordado otras problemáticas ambientales locales, como el manejo inadecuado de los residuos sólidos, la deforestación de ecosistemas periurbanos y los incendios forestales, fenómenos que amenazan la biodiversidad de Guayaquil. En este contexto, se ha buscado que los estudiantes reconozcan y valoren la riqueza ecológica de su entorno –su flora, fauna y ecosistemas– entendiendo que no es posible proteger lo que no se conoce.

El Municipio de Guayaquil ha consolidado una propuesta de educación ambiental coherente con los desafíos locales, comprometida con la transformación de prácticas cotidianas, y orientada a formar una ciudadanía capaz de responder con responsabilidad ante la crisis climática y ambiental del presente.

Impacto institucional y transformación educativa hacia la sostenibilidad}

Uno de los principales logros alcanzados por el programa “La sostenibilidad va a tu aula” ha sido la incorporación progresiva de prácticas sostenibles en las instituciones educativas intervenidas. Más allá de las visitas y charlas puntuales, se ha logrado que muchas de estas escuelas adopten de forma activa iniciativas orientadas a la sostenibilidad, integrándolas en su dinámica

institucional. Entre estas acciones destacan la implementación de programas de reciclaje, la creación de huertos ecológicos, el desarrollo de eco-espacios y la consolidación de clubes ecológicos escolares. Estas iniciativas han sido posibles gracias a la articulación con directivos, docentes y estudiantes, y reflejan la apropiación del mensaje ambiental promovido por el municipio.

Otro de los resultados más significativos del programa ha sido la reducción del consumo de plásticos de un solo uso en las instituciones participantes. A través de campañas de concienciación y actividades prácticas, se ha incentivado el uso de botellas reutilizables, promoviendo entre los estudiantes el hábito de llevar sus propios termos o envases. Esta acción, aparentemente sencilla, representa un cambio de comportamiento importante, pues fomenta una cultura del consumo responsable y reduce significativamente la generación de residuos plásticos en los entornos escolares (Figura 2).

Sin embargo, uno de los impactos más valiosos ha sido el incremento en la participación docente y estudiantil. Si bien las intervenciones iniciales estaban dirigidas a grupos específicos dentro de cada institución, la acogida del programa ha motivado a los docentes a solicitar su ampliación a un mayor número de estudiantes. Esta respuesta refleja tanto la pertinencia de los contenidos como el vacío que existe en los planes curriculares formales respecto a la educación ambiental contextualizada. La propuesta municipal ha logrado llenar ese vacío, ofreciendo herramientas actualizadas y relevantes frente a las problemáticas ambientales del cantón Guayaquil, como el cambio climático, la gestión de residuos y la conservación de los ecosistemas.



Figura 2. Ruta de reducción de plásticos

La calidad del contenido, su adecuación al territorio y la metodología participativa han facilitado el acceso a nuevas instituciones educativas y el compromiso creciente de la comunidad docente. En muchos casos, las escuelas han abierto voluntariamente sus puertas al programa, y han manifestado su interés en recibir más formación sobre temas ambientales, tanto para sus estudiantes como para el cuerpo docente.

Mirando hacia el futuro, el principal reto del programa es su expansión a un número mayor de instituciones educativas, especialmente aquellas ubicadas en zonas de alta vulnerabilidad ambiental. La meta propuesta para el año lectivo 2025 es triplicar el número de estudiantes impactados, priorizando aquellas escuelas situadas en sectores con mayores riesgos socioambientales: áreas propensas a inundaciones, zonas cercanas a ecosistemas degradados o a cuerpos de agua contaminados, así como espacios vulnerables a incendios forestales.

En ese sentido, se ha adoptado una estrategia de priorización geográfica y ambiental, que permitirá enfocar los esfuerzos educativos en comunidades donde la sensibilización ambiental puede marcar una diferencia tangible en la gestión del riesgo y la protección de los recursos naturales. El municipio concibe esta expansión no solo como una meta cuantitativa, sino como una apuesta cualitativa por fortalecer capacidades, construir resiliencia y fomentar un compromiso profundo con el ambiente desde la escuela.

Uno de los principales desafíos que el Municipio de Guayaquil se ha propuesto como segunda fase del programa “La sostenibilidad va a tu aula” es el fortalecimiento de las alianzas estratégicas. Aunque esta iniciativa se ejecuta con recursos públicos, se reconoce el valor que aportan los aliados externos, particularmente del sector privado y de organizaciones no gubernamentales (ONGs) con presencia activa en la ciudad. Estas instituciones han identificado en el programa una oportunidad significativa para canalizar sus acciones de responsabilidad social corporativa hacia el ámbito educativo y ambiental.

Estas alianzas han sido clave para ampliar la cobertura del programa, enriquecer los contenidos y diversificar las experiencias ofrecidas a los estudiantes. Empresas privadas y organizaciones de la sociedad civil han apostado por la educación como motor de transformación, convencidas de que invertir en los jóvenes no solo es un compromiso con el presente, sino una inversión sostenible en el futuro de la ciudad. La articulación de esfuerzos entre actores públicos y privados ha permitido construir una red colaborativa en favor del desarrollo sostenible local.

Otro de los retos prioritarios en la proyección del programa es el desarrollo e implementación de herramientas de seguimiento y evaluación, que permitan medir el impacto a largo plazo de las intervenciones educativas. La experiencia ha demostrado que los estudiantes no solo reciben una capacitación, sino que, en muchos casos, se apropian de la iniciativa y dan continuidad al trabajo iniciado. Así, luego de la intervención, quedan institucionalizados en las escuelas espacios como eco clubes, programas de reciclaje y huertos escolares ecológicos, gestionados por los propios estudiantes y docentes.

Ante esta realidad, el Municipio de Guayaquil reconoce la necesidad de establecer mecanismos sistemáticos de monitoreo y evaluación, que aseguren que estas prácticas sostenibles se mantengan en el tiempo y no se diluyan una vez concluida la visita inicial. El seguimiento permitirá identificar buenas prácticas replicables, evaluar cambios de comportamiento, y garantizar que el programa no solo tenga resultados inmediatos, sino que genere transformaciones duraderas en la cultura ambiental escolar.

Finalmente, se resalta que, para el Municipio de Guayaquil, compartir estas experiencias no solo es un acto de transparencia y rendición de cuentas, sino también una forma de inspirar a otras ciudades y fortalecer el tejido social a través de la educación ambiental. Esta estrategia de sensibilización –construida desde el aula, con el acompañamiento institucional y el compromiso comunitario– refleja una forma concreta y efectiva de acercarse a la ciudadanía y de sembrar en ella las semillas del cambio.

Consideraciones finales

La educación ambiental, implementada desde el contexto urbano, tiene el poder de transformar la ciudadanía y fortalecer la justicia ambiental. El caso del programa “La sostenibilidad va a tu aula” demuestra que, cuando la educación ambiental se integra de forma participativa, inclusiva y contextualizada, puede generar impactos significativos en los territorios. Este tipo de intervención permite no solo transmitir conocimientos, sino también fomentar la corresponsabilidad en la gestión de los recursos naturales, vincular a las comunidades con sus ecosistemas urbanos y consolidar una ciudadanía ambientalmente activa, consciente y comprometida con la equidad y el desarrollo sostenible.

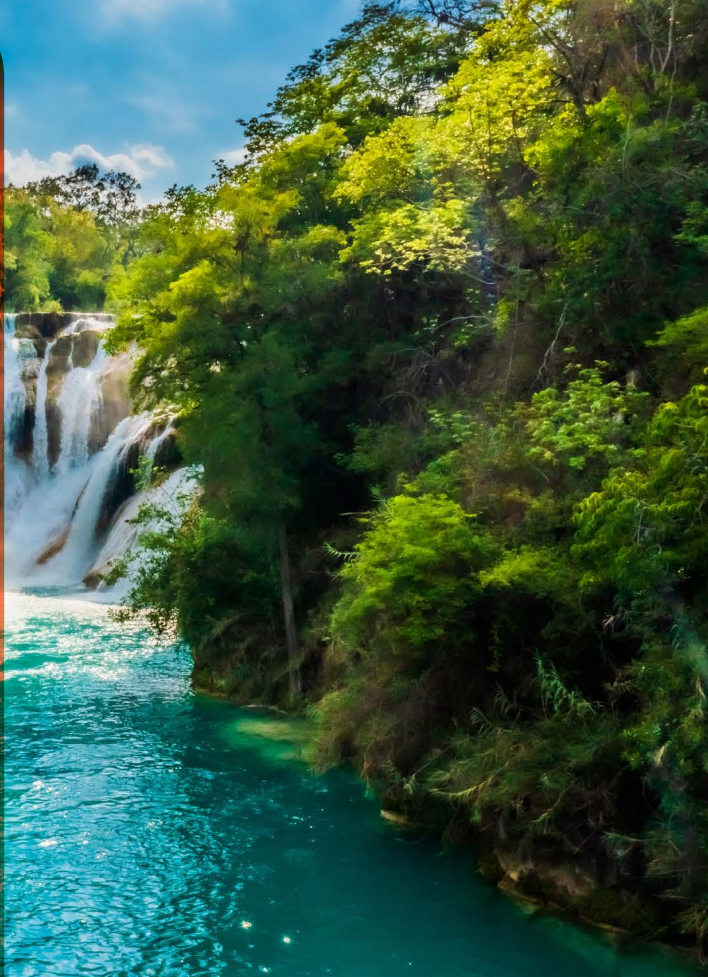
Las instituciones educativas son actores estratégicos para multiplicar el impacto de las políticas públicas ambientales. La experiencia desarrollada por el Municipio de Guayaquil ha evidenciado que las escuelas, más allá de ser espacios de aprendizaje, funcionan como nodos de transformación sociocultural. A través de la implementación de programas de reciclaje, huertos ecológicos, clubes ambientales y la adopción de hábitos sostenibles, los estudiantes se convierten en agentes de cambio que trasladan lo aprendido a sus hogares y comunidades. Este enfoque ha permitido trascender el ámbito escolar e influir positivamente en los entornos familiares, demostrando que la educación ambiental también tiene un efecto multiplicador en la cultura ciudadana.

El éxito del programa se sustenta no solo en su ejecución, sino en su visión a futuro. Fortalecer alianzas con el sector privado y las organizaciones de la sociedad civil ha permitido expandir su alcance y enriquecer sus contenidos. No obstante, garantizar la permanencia de las acciones transformadoras exige también sistemas de monitoreo y evaluación que permitan medir el impacto en el tiempo. Solo así se podrá asegurar que las iniciativas no sean efímeras, sino que contribuyan de forma sostenible a la construcción de una cultura ambiental sólida y resiliente en la ciudad de Guayaquil.

Referencias bibliográficas

- Caride, J. A., & Meira, P. Á. (2020). La educación ambiental en los límites, o la necesidad cívica y pedagógica de respuestas a una civilización que colapsa. *Pedagogía Social. Revista Interuniversitaria*, (36), 21-34. https://doi.org/10.7179/PSRI_2020.36.01
- Huckle, J., & Wals, A. E. (2015). The UN Decade of Education for Sustainable Development: business as usual in the end. *Environmental Education Research*, 21(3), 491-505.
- McPhearson, T., Pickett, S. T. A., Grimm, N. B., Niemelä, J., Alberti, M., Elmqvist, T., Weber, C., Haase, D., Breuste, J., & Qureshi, S. (2016). Advancing Urban Ecology toward a Science of Cities. *BioScience*, 66(3), 198-212.
- UNESCO. (2017). Educación para los Objetivos de Desarrollo Sostenible: objetivos de aprendizaje. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247444>

Importancia del agua en el geoparque aspirante mundial unesco huasteca potosina



MSc. Irma Suárez Rodríguez¹⁰

irma.suarez@uaslp.mx

El presente capítulo aborda la importancia del agua en el contexto del Geoparque Aspirante Mundial UNESCO Huasteca Potosina, con especial énfasis en su vínculo con el turismo sostenible. Se invita a jóvenes investigadores y profesionales a los Geoparques, destacando que el agua constituye un recurso vital para la vida y el equilibrio del planeta, sea que se lo nombre como Gaia, Pachamama o Madre Tierra.

En el contexto del turismo, el uso del agua representa una problemática creciente. Diversos estudios han evidenciado que en los destinos turísticos se produce una competencia desigual por el consumo del recurso entre turistas y residentes locales. Se estima que un turista consume hasta tres veces más agua que un habitante del lugar, una situación que se agrava en zonas con presión hídrica o débil infraestructura.



¹⁰ Licenciada en Administración de Empresas Turísticas. Máster en Mercadotecnia de Negocios Turísticos. Profesora investigadora Tiempo Completo de la Carrera de Turismo Sostenible de la Universidad Autónoma San Luis Potosí (UASL), México.

Encuestas aplicadas en distintos contextos indican que los turistas reconocen utilizar mayor cantidad de agua cuando están de viaje, debido a una sensación de libertad que disminuye su percepción de responsabilidad ambiental.

A nivel global, el acceso desigual al agua sigue siendo uno de los principales retos del desarrollo sostenible. Las estadísticas muestran cómo regiones enteras de África tienen una participación mínima en el acceso al recurso, mientras que países como Estados Unidos y México figuran entre los mayores consumidores per cápita. Esta brecha no solo es alarmante, sino que exige una acción internacional coordinada. En este marco, surgen iniciativas como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), establecidos a partir de largos procesos de debate internacional, con la intención de establecer compromisos colectivos hacia un modelo de desarrollo más justo, inclusivo y resiliente para las generaciones futuras.

No.	País	Porcentaje de acceso al agua
1	Eritrea	19%
2	Papúa Nueva Guinea	37%
3	Uganda	38%
4	Etiopía	39%
5	República Democrática del Congo	39%
6	Somalia	40%
7	Angola	41%
8	Chad	43%
9	Nigeria	46%
10	Mozambique	47%

Tabla 1. Los 10 países con menor acceso al agua en el mundo
Fuente: CNN en español (2023).

N.º	País	Litros diarios per cápita
1	Estados Unidos	575
2	Australia	493
3	Italia	386
4	Japón	374
5	México	366
6	España	366
7	Noruega	301

Tabla 2. Países con mayor consumo promedio diario de agua per cápita

Particular atención merece el ODS 6, enfocado en el acceso universal al agua y al saneamiento. A pesar de su importancia, los avances en su cumplimiento han sido limitados, como lo evidencian diversos informes oficiales. Es por ello que organismos internacionales como ONU Turismo y UNESCO han asumido el compromiso de impulsar acciones concretas. En este esfuerzo, la UNESCO promueve programas que no solo valoran el patrimonio natural y cultural, sino que también funcionan como herramientas educativas y de acción climática. Uno de estos es el Programa de Geoparques Mundiales, el cual se presenta como una oportunidad para que regiones como la Huasteca Potosina articulen estrategias de conservación, uso racional del agua, turismo responsable y desarrollo comunitario.

El Geoparque Aspirante Mundial Huasteca Potosina se convierte así en un laboratorio vivo para repensar la relación entre el agua, el turismo y la sostenibilidad. Desde esta perspectiva, el capítulo propone una reflexión sobre cómo los destinos turísticos pueden actuar como territorios de aprendizaje, sensibilización y gestión colaborativa del recurso hídrico, contribuyendo tanto a la conservación ambiental como al bienestar social y económico de las comunidades locales.

Geoparques Mundiales de la UNESCO: territorios de conciencia y sostenibilidad

Los Geoparques Mundiales de la UNESCO se configuran como una estrategia innovadora para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) a través de la integración del conocimiento geológico, el patrimonio cultural y las acciones comunitarias. Se trata de un programa de escala mundial, que proporciona una gama de herramientas educativas, científicas y sociales aplicables desde una perspectiva global, es decir, que transita de lo global a lo local. Esta característica permite que cada territorio pueda adaptar los lineamientos generales del programa a su contexto cultural, geográfico y ambiental específico (Guerrón et al. 2019; Tejada y Girault, 2021).

Hasta la fecha, existen 213 Geoparques Mundiales distribuidos en 48 países. Se trata de una iniciativa relativamente reciente que comenzó hacia el año 2000, y que reconoce oficialmente aquellos territorios que cumplen con los criterios establecidos por la UNESCO y la Red Global de Geoparques. La designación de un territorio como geoparque conlleva una responsabilidad continua: cada cuatro años estos espacios deben someterse a una reevaluación técnica, lo cual garantiza su compromiso permanente con los principios de sostenibilidad, educación, conservación y participación comunitaria.

En el caso de Ecuador, el país cuenta con dos geoparques reconocidos oficialmente: el Geoparque Imbabura y el Geoparque Tungurahua. Además, posee un territorio aspirante, el Geoparque Napo Sumaco, cuya aprobación consolidaría a Ecuador como uno de los países con mayor número de geoparques en Latinoamérica, después de Brasil. Este avance representa un motivo de orgullo y al mismo tiempo un compromiso con la gestión territorial sostenible.

La filosofía de los geoparques se sustenta en la geología como base del paisaje y de la diversidad cultural. Un Geoparque Mundial de la UNESCO es un territorio con relevancia geológica internacional, en donde el patrimonio geológico se vincula estrechamente con el patrimonio natural, cultural e inmaterial. A través de este enfoque, las comunidades pueden comprender tanto la evolución histórica de su territorio como los desafíos actuales que enfrentan. El conocimiento de los procesos geológicos –desde la formación de montañas hasta la caída de meteoritos– se convierte en una herramienta para reforzar la identidad local y la conciencia ambiental.

En efecto, la historia geológica de la Tierra, que se extiende por más de 4.600 millones de años, ha estado marcada por eventos de gran magnitud, como las cinco extinciones masivas documentadas. La más reciente, provocada por el impacto de un meteorito en el sureste mexicano, marcó el fin de la era de los dinosaurios y el inicio de una nueva etapa geológica. Hoy en día, algunos estudios advierten sobre la posibilidad de una sexta extinción masiva, esta vez causada por la acción humana. Frente a este escenario, los geoparques surgen como territorios de conciencia, desde los cuales se pueden promover mejores prácticas en materia de conservación, educación ambiental y turismo responsable.

Además de preservar el patrimonio natural, los geoparques impulsan un desarrollo territorial sostenible, fomentando la participación activa de las comunidades locales en el diseño e implementación de estrategias de protección. Promueven el uso racional de los recursos, la mitigación del cambio climático y la reducción del riesgo de desastres naturales. Todo ello se logra a través de la educación, el fortalecimiento de la identidad cultural y la valoración del territorio.

Un ejemplo ilustrativo se encuentra en las cuevas sagradas del viento y la fertilidad, consideradas un espacio espiritual por una comunidad indígena local. En este sitio, una médica tradicional mantiene viva la conexión con el entorno natural, a través de prácticas ancestrales que combinan el conocimiento ecológico, la espiritualidad y el cuidado de la salud. Este vínculo con el territorio, profundamente simbólico, evidencia cómo los geoparques no solo protegen la biodiversidad y la geodiversidad, sino también la riqueza cultural e inmaterial de los pueblos que los habitan.

En diversas comunidades indígenas de México, las cuevas son consideradas espacios sagrados, conocidos como el “ombligo del mundo” o entrada al inframundo. Estos sitios tienen un profundo significado espiritual y cultural, y son utilizados para la realización de rituales, prácticas ceremoniales y ofrendas vinculadas con la conservación de los recursos naturales y el bienestar colectivo. Dentro del marco de los Geoparques Mundiales de la UNESCO, estas expresiones culturales adquieren un valor especial, ya que contribuyen a preservar el patrimonio inmaterial del territorio y promueven una visión integral del paisaje que reconoce las dimensiones ecológicas, históricas y simbólicas del entorno.

Los geoparques también impulsan nuevas formas de desarrollo local, promoviendo actividades como el geoturismo, una modalidad de turismo sostenible que combina la apreciación del patrimonio geológico con experiencias educativas, culturales y recreativas (Rodríguez et al., 2020). Esta estrategia permite diversificar las fuentes de ingreso de las comunidades, fomentar el emprendimiento local y sensibilizar a los visitantes sobre la importancia de conservar el territorio que están explorando. Además, los geoparques actúan como plataformas de diálogo multiactoral, promoviendo la cooperación entre diversos sectores: comunidades rurales, actores del turismo, agricultores, gobiernos locales, organizaciones de la sociedad civil y centros educativos.

La experiencia del Geoparque Aspirante Huasteca Potosina ilustra con claridad las tensiones y aprendizajes que emergen en este tipo de territorios. Uno de los escenarios más representativos es la cascada de Tamul, una majestuosa caída de agua de 103 metros que ha enfrentado desafíos relacionados con el uso y manejo del recurso hídrico. Durante la temporada de sequía, el caudal de la cascada disminuye drásticamente debido a la derivación del agua hacia cultivos cañeros, una práctica agrícola extendida en la región. Sin embargo, durante la Semana Santa, periodo de alta afluencia turística, se redirecciona nuevamente el flujo de agua hacia la cascada para satisfacer las expectativas del turismo. Esta situación ha generado conflictos entre sectores productivos, evidenciando la necesidad urgente de una gestión integral y participativa del agua, que considere tanto las necesidades económicas como la sustentabilidad ecológica.

Los Geoparques Mundiales de la UNESCO abordan diez grandes temáticas asociadas al desarrollo sostenible, la conservación, la resiliencia climática y la educación territorial (Figura 1). Estas líneas de acción pueden convertirse en ejes de investigación académica, proyectos de tesis o prácticas profesionales para estudiantes interesados en temas como el cambio climático, la geodiversidad, la gestión del patrimonio, los conflictos por el agua, la educación intercultural o el ecoturismo.

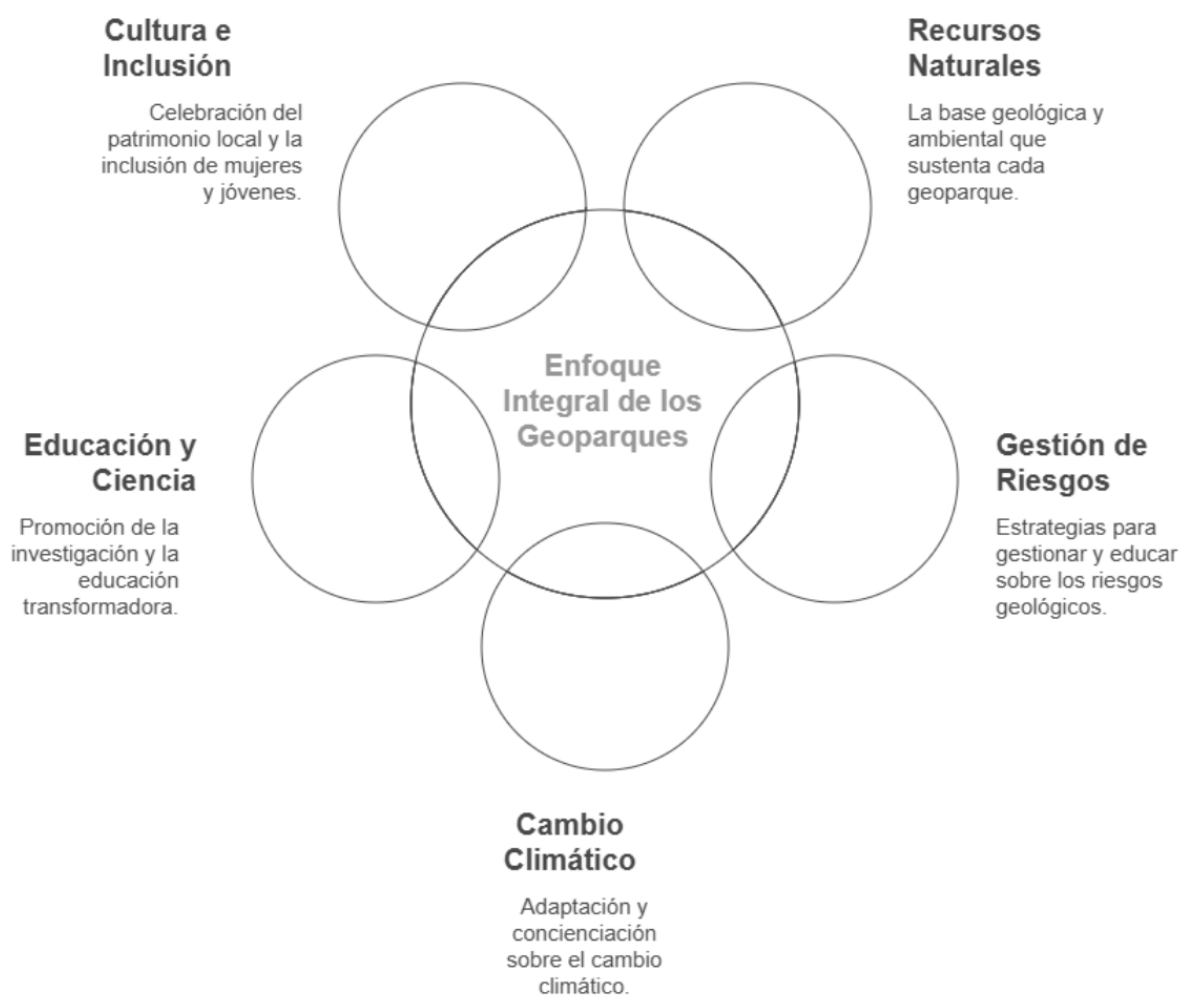


Figura 1. Estrategias sostenibles y culturales en Geoparques mundiales (UNESCO, 2010)

Desde el origen mismo de la humanidad, los recursos naturales proporcionados por la corteza terrestre han sido fundamentales para el desarrollo social, económico y cultural de las civilizaciones. En este contexto, los Geoparques Mundiales de la UNESCO surgen como una plataforma integradora para educar, conservar y promover el desarrollo sostenible, reconociendo el vínculo vital entre la humanidad y la Tierra. Su enfoque se basa en una gestión territorial que articula la geodiversidad con el patrimonio natural, cultural, material e inmaterial, destacando el valor internacional de estos territorios únicos.

Uno de los pilares del programa es la investigación científica en las ciencias de la Tierra, la cual permite comprender los procesos geológicos que han moldeado el planeta a lo largo de 4.600 millones de años. Este conocimiento resulta esencial para

concienciar sobre los riesgos naturales, fomentar estrategias de mitigación y fortalecer la resiliencia de las comunidades ante desastres. En este proceso, las comunidades locales son no solo beneficiarias, sino también protagonistas, al ser empoderadas para proteger su patrimonio y conservar la integridad del paisaje.

Los geoparques buscan reconectar a la sociedad con la historia del planeta, celebrando cómo la Tierra ha influido en la configuración de la cultura, las artes, la arquitectura, las prácticas agrícolas y las tradiciones populares. A través de actividades educativas, se genera conciencia sobre el patrimonio geológico y sus vínculos con los otros patrimonios naturales y culturales, fomentando así una comprensión holística del territorio.

Además de su dimensión educativa, los geoparques actúan como impulsores del desarrollo económico local. En ellos se fomenta el geo turismo como una forma de turismo sostenible, inclusivo y respetuoso, que pone en valor los saberes tradicionales, las expresiones culturales y los productos artesanales. Este enfoque promueve nuevas fuentes de ingreso, especialmente para mujeres, jóvenes, comunidades indígenas y otros grupos vulnerables, fortaleciendo el tejido social y económico del territorio.

El modelo de los Geoparques Mundiales de la UNESCO promueve una sinergia entre la ciencia y las artes, entre el conocimiento ancestral y la innovación contemporánea. Compartir la belleza de la Madre Tierra, mostrar la pureza de los recursos bien gestionados y elevar el valor de las culturas locales no solo genera orgullo y pertenencia, sino que también fortalece la conciencia colectiva en torno a la sostenibilidad.

Recorrer un geoparque no es simplemente visitar un lugar: es vivirlo, entender su historia, dialogar con sus habitantes y comprometerse con su futuro. Al incentivar el desarrollo de emprendimientos turísticos sostenibles y proyectos productivos locales, se construye un modelo territorial donde el respeto al medio ambiente, la cultura y la comunidad son principios rectores.

Confiar en el presente como punto de inflexión y actuar desde la conciencia del hoy permitirá garantizar la continuidad de las futuras generaciones. Los geoparques no solo celebran el patrimonio de la Tierra: sostienen comunidades, educan para la resiliencia y proyectan un futuro en armonía con el planeta.

Diversidad, patrimonio y fragilidad territorial: la Huasteca Potosina como Geoparque Aspirante

La región de la Huasteca Potosina, aspirante a Geoparque Mundial de la UNESCO, se caracteriza por una extraordinaria diversidad natural, geológica y cultural, que la posiciona como un territorio único en México y en América Latina. Esta área presenta un origen claramente geológico y geomorfológico, con una abundante biodiversidad y una notable variedad de ecosistemas. En su paisaje también se integran elementos del patrimonio construido, como templos coloniales y sitios religiosos que datan del siglo XVI, así como una rica expresión cultural sustentada en la presencia de tres grupos étnicos: los náhuatl, los tenek y los pame. Estas comunidades conservan lenguas vivas y prácticas ancestrales que todavía se expresan en la región, representando un patrimonio inmaterial de valor incalculable.

Los municipios que conforman el territorio del Geoparque se caracterizan por su naturaleza eminentemente rural, y en algunos de ellos, la población indígena representa hasta el 80% de los habitantes. Este componente sociocultural dota al territorio de un esplendor singular, pero también de una fragilidad estructural que exige un enfoque sensible, respetuoso y participativo. Los saberes ancestrales de estas comunidades ofrecen enseñanzas esenciales para repensar los modelos de desarrollo, evidenciando los errores cometidos en relación con la degradación ambiental y orientando caminos posibles para su reparación. En un contexto marcado por los efectos del cambio climático, ya no se habla únicamente de mitigación, sino de adaptación de los medios de vida a nuevas realidades ambientales.

La región se encuentra enclavada en la Sierra Madre Oriental, y su geología está dominada por formaciones de caliza y cuarzo. Este tipo de composición genera procesos de disolución que han dado lugar a paisajes kársticos, caracterizados por cuevas, sótanos, cañones y sistemas subterráneos de gran singularidad. Se observa también una importante presencia de fósiles marinos, como resultado del pasado geológico de la zona, situada sobre la antigua Plataforma Valle de San Luis. Uno de los municipios que conforman el geoparque, Ébano, tiene además un reconocimiento histórico nacional: fue allí donde se explotó comercialmente el primer pozo petrolero de México, lo que le confiere un valor geopolítico y patrimonial de escala internacional.

La región posee un complejo sistema hídrico, conformado por caudales como los ríos Moctezuma, Gallinas, Guayacán, Valles y Tampaón, que no solo sostienen los ecosistemas y las actividades humanas, sino que también configuran paisajes turísticos emblemáticos, como las cascadas de aguas turquesas y balnearios naturales. Estos espacios han impulsado el desarrollo del ecoturismo y el turismo de aventura, convirtiéndose en una fuente económica para muchas comunidades.

Sin embargo, este entorno también enfrenta graves problemáticas asociadas al agua. El caso citado por el activista ambiental Rogelio del Rosal denuncia el acaparamiento y la contaminación de los recursos hídricos por parte de empresas energéticas,

ganaderas, agroindustriales e inmobiliarias. Según su testimonio, estas industrias extraen más de 70 millones de metros cúbicos de agua al año, afectando no solo la disponibilidad del recurso para las poblaciones locales, sino también la salud pública y los ecosistemas acuáticos. Esta situación refleja un escenario de conflicto socioambiental creciente, donde la gestión del agua se ha convertido en un tema central para el desarrollo sostenible de la región.

Frente a esta realidad, el Programa de Geoparques Mundiales de la UNESCO representa una oportunidad estratégica para abordar de manera articulada los desafíos del territorio. La propuesta busca conectar el conocimiento geocientífico con las prácticas comunitarias, generar modelos de desarrollo sustentables e inclusivos, y fortalecer los vínculos entre el ser humano y la tierra. La Huasteca Potosina, por sus atributos naturales, su riqueza cultural y su historia geológica, posee todas las condiciones para consolidarse como un laboratorio vivo de sostenibilidad, patrimonio y resiliencia.

Uno de los principales problemas que enfrenta la región Huasteca Potosina, a pesar de su riqueza hídrica, es el deterioro de sus ecosistemas acuáticos. En diversos puntos del territorio, las comunidades han observado descargas de residuos industriales al río, como es el caso de una juguería local. Asimismo, se ha documentado que cinco ingenios azucareros realizan vertidos contaminantes durante el proceso de lavado de maquinaria, afectando la calidad del agua y provocando episodios de mortandad de peces.

Este fenómeno no solo está relacionado con la contaminación antropogénica, sino también con la disminución del nivel del caudal y la oxigenación de los ríos, resultado directo de eventos de sequía prolongada, lo cual agrava la fragilidad de los sistemas naturales. Fotografías recientes muestran lechos secos en cauces que antes fueron caudalosos, así como proliferación de vegetación indeseada por falta de oxígeno. Según el Dr. Antonio Ávalos, responsable estatal de la estrategia de cambio climático, estas sequías son una manifestación intensa de la variabilidad climática, y se espera que su frecuencia y severidad aumenten en el futuro.

Ante esta situación crítica, el proyecto de Geoparque ha sido concebido como una estrategia integradora para enfrentar las problemáticas socioambientales del territorio. Desde 2019, el equipo de trabajo –coordinado por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y en alianza con la Red Iberoamericana de Ciencia, Naturaleza y Turismo, investigadores, comunidades y múltiples instituciones a nivel local, nacional e internacional– ha construido un expediente sólido que fue presentado ante la UNESCO. Este esfuerzo colectivo refleja una visión compartida: que el Geoparque puede convertirse en una herramienta efectiva para la identificación, preservación, divulgación y puesta en valor del patrimonio, orientado al desarrollo sostenible de las comunidades locales.

El territorio propuesto como Geoparque está conformado por seis municipios, en los cuales se han descrito hasta el momento:

- 33 geositos de interés geológico,
- 12 sitios del patrimonio natural,
- 10 sitios del patrimonio cultural, y
- 7 manifestaciones del patrimonio intangible.

Aunque se reconoce que existe una riqueza patrimonial aún mayor, este conjunto de sitios consolidados ofrece una base sólida para el reconocimiento oficial. La misión de evaluación de la UNESCO, realizada en 2022, derivó en observaciones técnicas que el equipo se encuentra actualmente atendiendo. Se espera que, con la entrega de los ajustes correspondientes en 2024, la región sea oficialmente reconocida como Geoparque Mundial en 2025.

Entre los retos más importantes identificados, destaca la necesidad de trabajo conjunto entre sectores y actores del territorio, especialmente para abordar el problema del agua desde una perspectiva de corresponsabilidad, justicia hídrica y gobernanza territorial. A ello se suman los esfuerzos ya realizados: investigaciones de campo y gabinete, talleres, congresos, capacitaciones, acompañamiento comunitario, y alianzas intersectoriales con instituciones públicas, privadas y organizaciones de la sociedad civil.

El proceso ha contado con asesoría técnica de otros geoparques en México y el mundo, y una fuerte presencia de jóvenes, quienes han participado activamente en estancias, tesis, proyectos de investigación y actividades de divulgación. Estas experiencias formativas han permitido a las nuevas generaciones reconectar con su territorio, comprender los procesos geológicos y culturales que lo configuran, y asumir un rol protagónico en su protección.

Eventos como excursiones geológicas, recorridos temáticos y actividades de sensibilización ambiental han despertado el interés ciudadano por el patrimonio geológico y sus vínculos con el agua, la biodiversidad, la identidad y el paisaje. Estas acciones

no solo promueven el conocimiento del territorio, sino también su apropiación consciente y su defensa colectiva.

Geoturismo, regeneración y orgullo territorial: educar desde el alma del agua

Una de las líneas estratégicas impulsadas en el marco del Geoparque Aspirante Huasteca Potosina es el fortalecimiento del geoturismo como herramienta educativa, económica y de regeneración territorial (Suárez et al., 2018). En este sentido, se han promovido rutas turísticas vinculadas al patrimonio agroalimentario local, especialmente aquellas asociadas a productos emblemáticos como el café, el cacao, la caña de azúcar, la miel, la vainilla y la canela. Estas rutas no solo diversifican la oferta turística, sino que también generan identidad, orgullo comunitario y oportunidades de desarrollo sostenible para los productores locales.

Un proyecto destacado es el rescate del cacao, planta originaria de América que durante siglos ocupó un lugar central en la cultura y economía de los pueblos mesoamericanos. Aunque su cultivo ha disminuido en la región, las condiciones agroecológicas siguen siendo favorables. Por ello, se trabaja en su recuperación con una doble finalidad: revalorarlo como producto turístico y, al mismo tiempo, contribuir a la soberanía económica y cultural de las comunidades rurales.

El Geoparque ha sido concebido también como un espacio de aprendizaje más allá del aula. La geoeducación se ha desplegado a través de múltiples actividades en territorio: talleres, excursiones, campañas escolares, senderos interpretativos y eventos comunitarios. Estas acciones buscan formar ciudadanía crítica, empática y conectada con su paisaje, haciendo de la experiencia directa en la naturaleza una oportunidad pedagógica transformadora.

Los medios de comunicación han desempeñado un papel clave en este proceso, al visibilizar las iniciativas locales y amplificar el mensaje del Geoparque, contribuyendo a que la población se apropie del proyecto como una construcción colectiva. Esta sinergia entre comunidad, instituciones, academia, medios y sector productivo ha sido fundamental para sostener el proceso y proyectar un modelo de gestión territorial participativa.

Como se planteó en los debates recientes, el reto ya no es solo la sostenibilidad: el enfoque debe apuntar hacia la regeneración, entendida como la capacidad de los territorios para sanar, fortalecerse y proyectarse hacia el futuro. En esa línea, se trabaja por convertir los desafíos ambientales, sociales, económicos – en oportunidades de innovación, articulación y resiliencia.

Consideraciones finales

El geoturismo se reafirma como una de las principales herramientas para alcanzar este objetivo. Se concibe como una forma de turismo que valora la identidad del territorio, promueve la conciencia ambiental, impulsa la economía local y pone en el centro el bienestar de sus habitantes. Este enfoque exige corresponsabilidad por parte de los residentes, quienes son los verdaderos gestores de los recursos, pero también plantea un llamado a la educación del visitante: se busca que el turista no solo conozca, sino que respete, se transforme y regrese a su hogar siendo mejor persona.

Finalmente, la reflexión concluye con un mensaje poderoso: el agua es alma del planeta, y en la Huasteca Potosina representa un legado natural que debemos proteger con urgencia y amor. Garantizar el agua hoy es garantizar la vida mañana. La defensa de este recurso vital no es solo un acto ambiental: es un compromiso ético, cultural y humano con las generaciones futuras.

Referencias bibliográficas

- Guerrón, S. L. A., Mera, D. M. A., Albuja, E. A. C., & Leiton, C. E. M. (2019). Geoparques mundiales de la UNESCO y su importancia en el desarrollo sostenible de las comunidades. Estudio de caso: "Geoparque Imbabura". *Siembra*, 6(1), 093-108. <https://doi.org/10.29166/siembra.v6i1.1710>
- Suárez Rodríguez, I. B., Meraz Acevedo, G., Gutiérrez Hernández, A., & Turrubiates Flores, H. O. (2020). Identificación del geopatrimonio para la construcción del Geoparque Huasteca Potosina. *Revista Tlatemoani*, (34), 207-228. Recuperado de <https://www.eumed.net/rev/tlatemoani/index.html>
- Suárez Rodríguez, I. B., Gaitán Morán, J., Hart Robertson, M. J., Barboza Gudiño, J. R., Gutiérrez Hernández, A., & Márquez González, A. R. (2018). Geositios y potencial turístico: acercamiento a la Huasteca Potosina, San Luis Potosí, México. *Aportes y Transferencias*, 16(1), 71-91.
- Tejada, C. G., & Girault, Y. (2021). Los Geoparques Mundiales de la UNESCO en España: entre divulgación científica y desarrollo turístico. *Cuadernos Geográficos*, 255-274. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v60i2.15949>
- UNESCO. (2017). Los Geoparques Mundiales de la UNESCO (Número). <http://valentincarrera.es/wpcontent/uploads/2019/01/>

Jornada Integrativa. La importancia del agua frente al cambio climático y los ODS: presente y futuro

Diálogos por el agua: desafíos y soluciones frente al cambio climático y los ods.



MSc. Gabriel Vaca Suárez¹¹

gvaca@uteg.edu.ec

En el marco de la III Semana Internacional del Agua, organizada por la Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil (UTEG) en conjunto con EMAPAG-EP, se llevó a cabo el conversatorio internacional “La importancia del agua frente al cambio climático y los ODS: presente y futuro”, evento que inauguró una semana dedicada al análisis multidisciplinario sobre los desafíos y oportunidades que enfrenta la gestión del agua en un contexto de acelerada crisis climática.

El conversatorio reunió a panelistas de destacada trayectoria en los ámbitos académico, institucional, empresarial y de la cooperación internacional, generando un espacio de reflexión crítica y propuestas concretas. Participaron el Ing. Mario García Cruz, MSc, Gerente General de EMAPAG-EP, quien ofreció una mirada institucional sobre la planificación urbana del recurso hídrico en Guayaquil; el Ing. Jaime Yáñez, MBA, Gerente Técnico de Plástigama-Wavin, con un enfoque centrado en soluciones tecnológicas desde la industria para mejorar el acceso y uso eficiente del agua; el Biólogo Carlos Fabián Viteri, MSc, Coordinador de la estrategia

¹¹ Ingeniero en Turismo. Magister en Mercadotecnia mención Gestión Digital. Máster en Administración de Empresas. Profesor universitario en la Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil, donde su enfoque académico incluye la sostenibilidad, el turismo y el emprendimiento.

marino-costera de The Nature Conservancy (TNC), quien aportó desde la conservación ambiental y la gestión ecosistémica; el Oceanógrafo Felipe Costa, especialista en ciencias del clima del Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño (CIIFEN), quien contextualizó los impactos del cambio climático y la variabilidad climática en la disponibilidad del agua dulce; y el Ing. Sedolfo Carrasquero, PhD, Director de Innovación y Vinculación de la UTEG, quien analizó el rol de la educación superior y las alianzas estratégicas en la promoción de la sostenibilidad institucional.

El objetivo principal del conversatorio fue analizar los efectos del cambio climático sobre el agua y su vinculación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular el ODS 6, así como explorar soluciones integradas desde diversos sectores. La discusión se estructuró mediante preguntas temáticas que permitieron intervenciones profundas y espacios de intercambio entre los expertos. Este capítulo tiene como propósito sistematizar los aportes centrales del conversatorio, organizados por ejes temáticos, integrando además evidencia académica reciente que sustente el análisis y proyecte recomendaciones alineadas con las metas globales de sostenibilidad.

Impacto del cambio climático en la disponibilidad y calidad del agua dulce

El cambio climático está alterando el ciclo hidrológico global, afectando tanto la disponibilidad como la calidad del agua dulce. Por ejemplo, el calentamiento global modifica los patrones de precipitación y evapotranspiración, lo que agudiza la escasez hídrica en muchas regiones. Estudios recientes cuantifican este efecto: se proyecta un incremento de los déficits de agua a nivel global conforme aumentan las temperaturas, enfatizando la necesidad de mitigar el cambio climático para aliviar la presión sobre los recursos hídricos. De hecho, modelos al 2100 muestran que el clima más cálido redistribuirá el agua disponible: algunas cuencas podrían ver aumentos de caudal, pero otras sufrirán reducciones severas en la disponibilidad de agua debido al cambio climático (Rosa y Sangiorgio, 2025).

Asimismo, el cambio climático también deteriora la calidad del agua dulce. Mayores temperaturas del agua y eventos de lluvia extremos tienden a exacerbar la contaminación hídrica, promoviendo fenómenos como floraciones de algas nocivas y aumentando la escorrentía de sedimentos y contaminantes (Wang et al., 2024). Un estudio global evaluó el impacto conjunto de cantidad y calidad del agua ante escenarios futuros y halló que la contaminación (por ejemplo, exceso de nutrientes como nitrógeno) triplicará para 2050 el número de cuencas con escasez severa de “agua limpia”, en comparación con evaluar solo la cantidad.

Esto indica que el cambio climático, al combinarse con actividades humanas (agrícolas, urbanas), influye en la disponibilidad y a la vez agrava los problemas de calidad del agua, amenazando la seguridad hídrica de millones de personas y ecosistemas. En resumen, la evidencia reciente confirma que el cambio climático representa una doble amenaza para el agua dulce, reduciendo su disponibilidad en muchos sitios y comprometiendo su calidad, lo que exige estrategias integrales de adaptación en la gestión del agua.

Efectos de eventos extremos (sequías, inundaciones) en los recursos hídricos

Los eventos hidrológicos extremos, como sequías prolongadas e inundaciones severas, están aumentando en frecuencia e intensidad bajo el clima cambiante, con impactos directos en los recursos hídricos. Investigaciones recientes señalan que el aumento de la temperatura y la variabilidad de las lluvias ya están conduciendo a sequías e inundaciones más frecuentes y severas en diversas cuencas. Por ejemplo, una revisión sistemática en la cuenca del Nilo Azul (África) concluye que las fluctuaciones climáticas actuales están intensificando los períodos tanto secos como húmedos, generando sequías más extremas y crecidas más intensas (Azizi y Leandro, 2023; Malede et al., 2025).

Estos eventos extremos afectan la cantidad y la calidad del agua. Durante las sequías disminuye el caudal en ríos y la recarga de acuíferos, reduciendo la disponibilidad de agua y la dilución de contaminantes, por lo que las concentraciones de polución tienden a aumentar. En cambio, las inundaciones súbitas aportan grandes volúmenes de agua, pero suelen arrastrar contaminantes difusos (fertilizantes, sedimentos, patógenos) desde la tierra hacia las aguas superficiales. Van Vliet et al. (2023) analizaron 965 casos en ríos de todo el mundo, mostró que en la mayoría de los eventos extremos la calidad del agua se deteriora: en 68% de los casos durante sequías y olas de calor, y en 51% de los casos durante lluvias torrenciales e inundaciones.

Esto se debe a que las sequías concentran contaminantes al haber menos agua para diluirlos, mientras que las lluvias intensas incrementan el arrastre de contaminantes desde los suelos hacia los cuerpos de agua. Aunque en algunos casos puntuales se observan mejoras temporales (por ejemplo, dilución durante ciertas inundaciones), la tendencia general indica que los eventos extremos agravan los problemas de calidad hídrica y ponen en riesgo los ecosistemas acuáticos. En conjunto, la literatura reciente subraya que las sequías intensas reducen la disponibilidad de agua dulce y las inundaciones deterioran su calidad, amenazando tanto el abastecimiento humano como la salud de los ecosistemas, problemas que se ven exacerbados por el cambio climático.

Rol de la educación ambiental en el uso responsable del agua

La educación ambiental juega un rol crucial para fomentar comportamientos de uso responsable y conservación del agua, según evidencia académica reciente. De hecho, se ha argumentado que la educación ambiental es “muy importante para lograr un consumo de agua más racional, eficiente y socialmente justo”, tal como señalan Sartori et al. (2022). Esta premisa teórica cuenta con respaldo empírico: por ejemplo, Iwasaki (2022) evaluó un programa educativo para niños de preescolar en Japón enfocado en el cambio climático y el ahorro de agua. Los resultados mostraron que dicho programa estuvo asociado con un aumento medible en los comportamientos de ahorro de agua en los niños participantes. Los niños expuestos a actividades y estímulos visuales, como indicadores junto a los grifos, redujeron el desperdicio de agua y esta conducta perduró en el tiempo, evidenciando el potencial de la educación temprana para forjar hábitos proambientales de larga duración.

Otro ejemplo proviene de la educación ambiental a través de juegos, en este sentido Bilancini, et al. (2023) implementó un programa lúdico con estudiantes de primaria y sus familias en Italia para promover el uso sostenible del agua. Los hallazgos indican que este tipo de programas pueden ser muy efectivos para incentivar prácticas de consumo responsable del agua tanto en los niños como en sus padres. Específicamente, los estudiantes que participaron en juegos educativos sobre el cuidado del agua reportaron mayores ahorros de agua en el hogar y conversaciones más frecuentes con sus padres sobre el tema, en comparación con un grupo control. Además, los efectos positivos se mantuvieron al evaluarlos seis meses después.

En conjunto, estos estudios recientes demuestran que la educación ambiental mejora el conocimiento, las actitudes y los comportamientos relacionados con el agua. Al inculcar desde edades tempranas la importancia de conservar este recurso y brindar a la comunidad herramientas lúdicas e informativas, se logra un uso más responsable del agua, contribuyendo al ahorro y la sostenibilidad hídrica a largo plazo.

Gestión integrada de los recursos hídricos y desarrollo sostenible

La gestión integrada de recursos hídricos (GIRH) se considera un pilar para lograr el desarrollo sostenible relacionado con el agua. La GIRH es un proceso que promueve la gestión coordinada del agua y recursos relacionados para equilibrar los resultados socioeconómicos con la salud de los recursos hídricos y los ecosistemas que dependen de ellos” En otras palabras, implica integrar todos los sectores (usuarios agrícolas, industriales, urbanos, energéticos y ambientales) en la planificación y manejo del agua, reconociendo que el agua es un recurso transversal para la sociedad y el ambiente (Bryla et al. (2025). Este enfoque coordinado busca satisfacer las necesidades humanas y económicas a la vez que se protege el estado de ríos, acuíferos y ecosistemas asociados, logrando así un balance entre el desarrollo y la sostenibilidad.

La importancia de la GIRH ha sido reconocida internacionalmente – por ejemplo, es el objetivo de la meta 6.5 de los ODS. Implementar la GIRH a todos los niveles para 2030 es una meta explícita, dado que una gestión fragmentada del agua dificulta el cumplimiento de múltiples objetivos de desarrollo (UN-Water, 2023). Estudios recientes destacan que la GIRH subyace a todas las metas relacionadas con el agua e incluso apoya otros objetivos climáticos y de biodiversidad, sirviendo como marco integrador (Gordon, Hueso, 2021). Por ejemplo, una gestión integrada en cuencas transfronterizas puede simultáneamente mejorar el acceso al agua (ODS6), reducir conflictos y adaptarse al cambio climático (ODS13) y conservar ecosistemas de agua dulce (ODS15).

En la práctica, la aplicación de la GIRH requiere la participación activa de todos los interesados (gobiernos, comunidades, sector privado) en la toma de decisiones sobre el agua. Esto conlleva desafíos –como coordinar marcos legales, capacidades institucionales y voluntad política–, pero donde se ha implementado con éxito, se han logrado avances hacia la seguridad hídrica sostenible, incluyendo una mejor resiliencia climática y una gestión equitativa del recurso. En suma, la literatura posiciona a la gestión integrada del agua como estrategia clave para el desarrollo sostenible, ya que permite alinear el manejo del agua con objetivos sociales, económicos y ambientales de largo plazo.

Cooperación internacional frente a los desafíos hídricos y climáticos

Dado que el agua trasciende fronteras y el cambio climático global afecta los ciclos hídricos regionales, la cooperación internacional es fundamental para enfrentar estos desafíos conjuntos. Actualmente, una gran parte del agua dulce mundial se encuentra en cuencas hidrográficas transfronterizas compartidas por dos o más países, las cuales son vitales para miles de millones de personas. Estos recursos compartidos encaran crecientes presiones por el aumento poblacional, el desarrollo no sostenible y el cambio climático, lo que puede exacerbar tensiones entre naciones. Diversos estudios resaltan que los esfuerzos colaborativos entre Estados ribereños son indispensables para la gestión sostenible de las aguas compartidas.

La cooperación puede tomar la forma de tratados de agua, comisiones de cuenca, intercambio de datos hidrológicos y planes coordinados de adaptación al clima. Tales mecanismos cooperativos incrementan la resiliencia al repartir riesgos y beneficios: por ejemplo, acuerdos para compartir caudales en épocas de sequía, o alertas tempranas conjuntas ante inundaciones. Si

bien la cooperación enfrenta obstáculos (diferencias de poder, capacidades técnicas desiguales, prioridades nacionales en conflicto), la historia reciente muestra numerosos casos de éxito. En los últimos 50 años se han firmado más de 150 tratados internacionales de agua (frente a solo 37 disputas hídricas que derivaron en violencia), lo cual indica que la diplomacia hídrica suele prevalecer sobre el conflicto. Estos acuerdos han permitido regular el uso, desarrollo, conservación y protección de ríos compartidos de manera pacífica.

Un ejemplo positivo es la cooperación en la gestión de acuíferos transfronterizos y la creación de planes integrados de cuenca que incluyen a todos los países involucrados. La urgencia de la cooperación se acentúa ante el cambio climático: la variabilidad creciente de lluvias y caudales requiere respuestas coordinadas más allá de las fronteras. En este sentido, iniciativas internacionales recientes, como la Water Action Agenda tras la Conferencia del Agua de la ONU 2023, buscan precisamente impulsar la cooperación multilateral en materia de agua y clima. En conclusión, la literatura académica concuerda en que ningún país por sí solo puede resolver los problemas hídricos y climáticos globales; la cooperación internacional efectiva (intercambio de conocimientos, financiamiento, acuerdos vinculantes) es imprescindible para gestionar riesgos compartidos, evitar conflictos y construir resiliencia hídrica ante el cambio climático.

Innovación e infraestructura hídrica sostenible

La modernización e innovación en infraestructura hídrica son elementos clave para alcanzar la sostenibilidad en el manejo del agua. Muchos sistemas de agua urbanos e infraestructura de riego fueron diseñados bajo condiciones climáticas del siglo pasado y hoy enfrentan serias dificultades (sequías más severas, inundaciones más frecuentes). En 2022, el Foro Económico Mundial destacó que numerosas comunidades con infraestructura hídrica envejecida están “repensando el statu quo” y aprovechando nuevas tecnologías para lograr mayor sostenibilidad en el suministro de agua (Alexander, 2022). Esto incluye la adopción de soluciones digitales e inteligentes (sensores, modelación predictiva, IoT) para detectar fugas y optimizar redes, así como la implementación de energías renovables y procesos más eficientes en plantas de tratamiento, con el fin de avanzar hacia sistemas de agua neutros en carbono y resilientes.

De hecho, el sector agua representa alrededor del 2% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (similar a la industria naviera), por lo que innovar en eficiencia energética y energías limpias en la gestión del agua contribuye tanto a la sostenibilidad hídrica como a la acción climática. En la investigación académica reciente también se exploran nuevas formas de infraestructura descentralizada y soluciones basadas en la naturaleza. Garrido-Baserba et al. (2024) evaluaron la transición desde el modelo tradicional de grandes plantas centralizadas de agua potable y saneamiento hacia sistemas descentralizados a escala de barrio, que integran tratamiento local de aguas residuales, reutilización de agua y recuperación de recursos (por ejemplo, obtención de biogás y nutrientes del alcantarillado). El estudio concluye que estos sistemas descentralizados innovadores pueden ser un pilar para mejorar la eficiencia en el uso de recursos y la resiliencia urbana, actuando como “una piedra angular para mejorar la eficiencia de recursos y la resiliencia de las ciudades”.

En dichas configuraciones, el agua reutilizada localmente puede destinarse a riego urbano o recarga de acuíferos, reduciendo la presión sobre fuentes tradicionales. Complementariamente, se suelen combinar con infraestructura verde, como techos o tanques de captación de lluvia, humedales construidos y agricultura urbana vertical, generando sinergias ambientales. Otra línea de innovación es la economía circular del agua, que busca “cerrar el ciclo” del agua en las ciudades. Esto incluye la recarga gestionada de acuíferos, la desalación con energías renovables, la potabilización de aguas residuales tratadas para uso doméstico (ya implementada en ciudades pioneras) y la aplicación de Soluciones Basadas en la Naturaleza (por ejemplo, restaurar ecosistemas de humedales para filtrar el agua de manera natural). Estas estrategias están siendo probadas y escaladas en diversos contextos, con resultados prometedores en cuanto a sustentabilidad. En síntesis, los artículos recientes enfatizan que lograr infraestructuras hídricas sostenibles requerirá innovación tecnológica, nuevas formas de gestión y diversificación de fuentes, desde redes inteligentes de agua hasta proyectos de reutilización y soluciones verdes, todo orientado a garantizar la seguridad hídrica en un clima cambiante.

Conexión entre el ODS 6 (agua y saneamiento) y otros ODS como el 13 (acción climática) y 15 (vida terrestre)

El Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (agua limpia y saneamiento) está fuertemente interconectado con muchos otros ODS, especialmente con el ODS 13 (acción por el clima) y el ODS 15 (vida de ecosistemas terrestres). Esto se debe a que el agua, el clima y los ecosistemas forman un entramado inseparable: “el agua es el sustento de la vida humana” y fluye a través de todos los ámbitos del desarrollo. Por un lado, el cambio climático (ODS 13) se manifiesta principalmente a través de alteraciones en el ciclo del agua. Las variaciones en patrones de lluvia, sequías más frecuentes, derretimiento de nieves y glaciares, e inundaciones extremas son formas en que experimentamos el cambio climático en términos hidrológicos. Un informe señala que “el cambio climático está provocando estragos en el ciclo natural del agua”, por ejemplo, al intensificar tanto las sequías como las tormentas. Por tanto, proteger el clima ayuda a proteger el agua: limitar el calentamiento global y adaptarse a sus impactos es vital para alcanzar las metas de disponibilidad y calidad de agua del ODS 6.

De hecho, muchas estrategias de adaptación climática (ODS 13) giran en torno al agua – como construir resiliencia ante sequías, mejorar el almacenamiento de agua, diversificar fuentes hídricas y proteger deltas y cuencas – lo que muestra la sinergia positiva entre la acción climática y la seguridad hídrica. Por otro lado, el ODS 15, que abarca la vida terrestre y los ecosistemas, está intrínsecamente ligado al agua dulce. Los ecosistemas terrestres saludables (bosques, humedales, praderas) regulan el ciclo del agua, asegurando filtración, recarga de acuíferos y flujo estable en ríos. A su vez, la degradación de ecosistemas –por deforestación o mal uso de la tierra– afecta la cantidad y calidad del agua disponible río abajo. El informe de síntesis de la ONU (2023) destaca que las actividades humanas insostenibles (como la urbanización descontrolada, la contaminación y la expansión agrícola) están “envenenando y drenando el agua, y trastocando su ciclo natural”, lo cual amenaza tanto a las personas como al planeta.

Por ejemplo, la pérdida de bosques (ODS 15) en cuencas altas suele conducir a mayor escorrentía y erosión, empeorando inundaciones y reduciendo la calidad del agua (retroceso para ODS 6). Asimismo, la sobreexplotación de acuíferos y ríos impacta negativamente en humedales y biodiversidad de agua dulce (retroceso para ODS 15). La buena noticia es que también hay importantes sinergias: acciones en un objetivo pueden co-beneficiar a los otros. “Integrar nuestro enfoque en agua, ecosistemas y clima” es fundamental para fortalecer la resiliencia y el desarrollo sostenible. Por ejemplo, proteger cuencas y ecosistemas (ODS 15) mejora la calidad del agua y regula su disponibilidad (avanzando ODS 6) y además captura carbono y reduce riesgos de desastres (apoyando ODS 13). Inversamente, mejorar el acceso al agua y saneamiento (ODS 6) tiene impactos positivos en la salud de los ecosistemas terrestres y la adaptación climática, al reducir la contaminación (menos aguas residuales vertidas a ríos) y la presión sobre recursos naturales.

Consideraciones finales

En particular, sin avances en agua (ODS 6) será muy difícil cumplir las metas de acción climática (muchas medidas de resiliencia climática dependen del agua) y de vida terrestre (los ecosistemas terrestres dependen del agua limpia y abundante). En conclusión, la literatura y los reportes recientes enfatizan que lograr el ODS 6 facilita el cumplimiento del ODS 13 y ODS 15, y viceversa.

Reconocer estas conexiones es crucial: las políticas integradas que aborden conjuntamente agua, clima y biodiversidad generan soluciones con múltiples beneficios. Por ejemplo, invertir en infraestructura verde (restauración de ríos, reforestación de cuencas) contribuye simultáneamente a la adaptación climática, a la provisión de agua potable y a la conservación de la biodiversidad terrestre.

Referencias bibliográficas:

- Alexander, A. (2022, 7 de diciembre). How the water sector is using innovative tech to become more resilient and sustainable. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/stories/2022/12/how-water-sector-using-innovative-tech-resilience-sustainability/>
- Azizi, M. A., Leandro, J. (2023). Factors Affecting Transboundary Water Disputes: Nile, Indus, and Euphrates-Tigris River Basins. *Water*, 17(4), 525.
- Bilancini, E., Boncinelli, L., & Di Paolo, R. (2023). Game-based education promotes practices supporting sustainable water use. *Ecological Economics*, 208, 107801. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.107801>
- Bryła, M., Zdralewicz, I., Lejcuś, I., Kraj, K., Dumieński, G., Tokarczyk, T., & Walczykiwicz, T. (2025). Integrated Water Resources Management for Implementing Sustainable Energy Development—Challenges and Perspectives in Poland. *Sustainability*, 17(3), 1169. <https://doi.org/10.3390/su17031169>
- Garrido-Baserba, M., Sedlak, D.L., Molinos-Senante, M. (2024). Using water and wastewater decentralization to enhance the resilience and sustainability of cities. *Nat Water* 2, 953–974. <https://doi.org/10.1038/s44221-024-00303-9>
- Gordon, T., Hueso, A. (2021). Integrating sanitation and climate change adaptation: Lessons learned from case studies of WaterAid's work in four countries. *Waterlines*, 40(2), 107–114. <https://doi.org/10.3362/1756-3488.20-0001>
- Iwasaki, S. (2022). Effects of Environmental Education on Young Children's Water-Saving Behaviors in Japan. *Sustainability*, 14(6), 3382.
- Malede, D. A., Elumalai, V., Andualem, T. G., Mekonnen, Y. G., Yibeltal, M., Demeke, G. G., Alamirew, T., Kassaye, S. M., Hagos, Y. G., Kassie, A. E., Kassa, M., Berihun, G. S., & Ray, R. L. (2025). Understanding Flood and Drought Extremes Under a Changing Climate in the Blue Nile Basin: A review. *Environmental And Sustainability Indicators*, 100638. <https://doi.org/10.1016/j.esi.2025.100638>

org/10.1016/j.indic.2025.100638

Rosa, L., & Sangiorgio, M. (2025). Global water gaps under future warming levels. *Nature Communications*, 16(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56517-2>.

Sartori, S. V., Navarro, A. C., Mariosa, D. F., Falsarella, O. M., & Valencia, A. M. S. (2022). Environmental education in the context of sustainable water resource management. *Deleted Journal*, 10(3), 341-354.

<https://doi.org/10.31686/ijier.vol10.iss3.3698>.

UN-Water. (2023). *Blueprint for acceleration: SDG 6 Synthesis Report on Water and Sanitation 2023* (PDF ISBN 978-92-1-002644-4). United Nations Publications. <https://www.un.org/publications>.

Van Vliet, M.T.H., Thorslund, J., Stokal, M. (2023). Global river water quality under climate change and hydroclimatic extremes. *Nat Rev Earth Environ* 4, 687–702. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00472-3>.

Wang, M., Bodirsky, B. L., Rijneveld, R., Beier, F., Bak, M. P., Batool, M., Droppers, B., Popp, A., Van Vliet, M. T. H., & Stokal, M. (2024). A triple increase in global river basins with water scarcity due to future pollution. *Nature Communications*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-44947-3>

