

Guía para casos de contaminación de ríos



Sistema Bibliotecario de la Suprema Corte de Justicia de la Nación Catalogación

PO

F880.113

A734g

Arellano-Aguilar, Rodolfo Omar, autor

Guía para casos de contaminación de ríos / Rodolfo Omar Arellano-Aguilar, Ruth Cecilia Venegas Pérez, Claudia Ponce de León Hill ; apoyo a la coordinación y revisión por Cecelic Reséndiz Arias ; revisión de contenido por Estephania Zluhan Martínez y José David Camacho Galván ; esta obra estuvo a cargo de la Dirección General de Derechos Humanos y Justicia Pluricultural de la Suprema Corte de Justicia de la Nación. -- Primera edición. -- Ciudad de México, México : Suprema Corte de Justicia de la Nación, 2026.

1 recurso en línea (xix, 213 páginas : ilustraciones, mapas, tablas, fotografías a color)

Material disponible solamente en PDF.

1. Ríos – Contaminación del agua – Aspectos jurídicos – México 2. Contaminantes – Pruebas científicas – Técnicas de investigación 3. Evaluación de daño ambiental 4. Biodiversidad I. Venegas Pérez, Ruth Cecilia, autora II. Ponce de León Hill, Claudia, autora III. Reséndiz Arias, Cecelic, colaboradora, revisora IV. Zluhan Martínez, Estephania, revisora V. Camacho Galván, José David, revisor VI. México. Suprema Corte de Justicia de la Nación. Dirección General de Derechos Humanos y Justicia Pluricultural VII. t.

LC KGF3425.A9

Primera edición: febrero de 2026

D.R. © Suprema Corte de Justicia de la Nación

Avenida José María Pino Suárez núm. 2

Colonia Centro, Alcaldía Cuauhtémoc

C.P. 06060, Ciudad de México, México.

Prohibida su reproducción total o parcial por cualquier medio, sin autorización escrita de los titulares de los derechos.

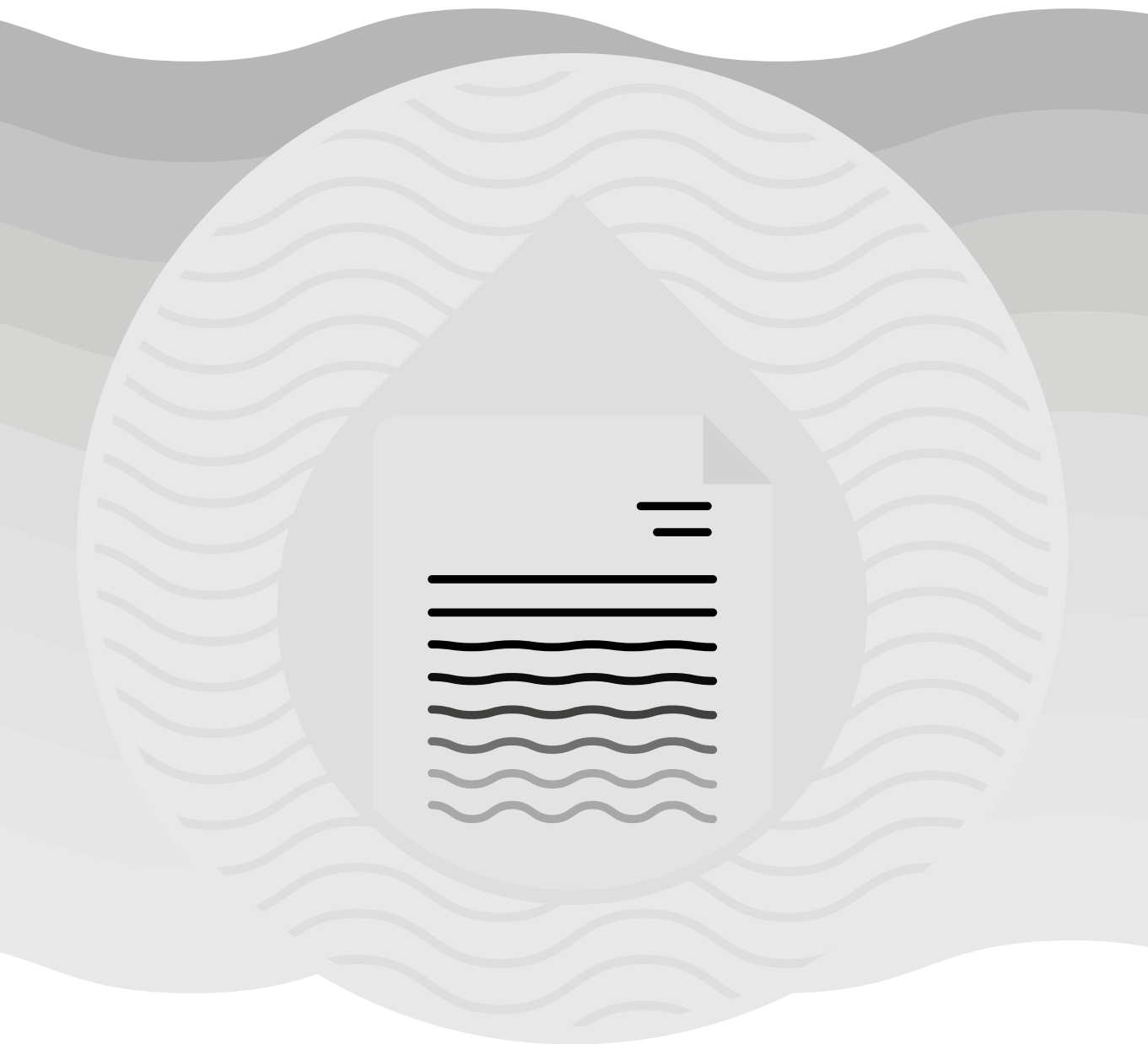
El contenido de los capítulos publicados es de responsabilidad exclusiva de los autores y no necesariamente refleja la opinión ni la política de la Suprema Corte de Justicia de la Nación.

Esta obra estuvo a cargo de la Dirección General de Derechos Humanos y Justicia Pluricultural de la Suprema Corte de Justicia de la Nación.

La edición y el diseño estuvieron al cuidado de la Coordinación de Compilación y Sistematización de Tesis de la Suprema Corte de Justicia de la Nación.

Presentación y Conclusión por María Andrea Niño Rivera, José Manuel Vilchis Conde y Oliver Joaquín Giménez Héau; apoyo a la coordinación y revisión por Cecelic Reséndiz Arias; revisión de contenido por Estephania Zluhan Martínez y José David Camaño Galván.

Guía para casos de contaminación de ríos



Suprema Corte de Justicia de la Nación

Ministro Hugo Aguilar Ortiz
Presidente

Ministra Lenia Batres Guadarrama
Ministro Irving Espinosa Betanzo
Ministra Yasmín Esquivel Mossa
Ministro Giovanni Azael Figueroa Mejía
Ministro Aristides Rodrigo Guerrero García
Ministra Sara Irene Herrerías Guerra
Ministra Loretta Ortiz Ahlf
Ministra María Estela Ríos González

Dirección General de Derechos Humanos y Justicia Pluricultural

Víctor Leonel Juan Martínez
Director General

Contenido

Presentación	IX
Reseñas curriculares	XVII

Introducción.

Sistema fluvial mexicano: caracterización, naturaleza y biodiversidad	1
A. Definición de los ríos y la contaminación	4
I. Definición de río y sus elementos de acuerdo con las leyes mexicanas	5
B. Origen geohidrológico del sistema fluvial mexicano	8
C. Incidencia climática y pluvial en la morfogénesis de los ríos...	14
D. Biodiversidad ancestral y presente de los ríos y lagos de México.....	18
I. Diversidad de peces dulceacuícolas	18
II. Biodiversidad de la vegetación acuática	25
E. Alteraciones ecohidrológicas de ríos y lagos de México.....	30
F. Pérdida de la calidad del agua por contaminación	34
Conclusión	37
Bibliografía	37

Capítulo 1

Pruebas técnico-científicas para el diagnóstico y evaluación de cuerpos de agua superficiales	45
A. Monitoreo ambiental: programa de monitoreo de la calidad del agua.....	48
B. Fuentes y destino ambiental del aporte de contaminantes a los cuerpos de agua.....	59
I. Fuentes de contaminantes	59
II. Destino ambiental de contaminantes en los sistemas acuáticos.....	60
III. Efectos tóxicos en los organismos acuáticos y procesos ecológicos afectados	62
C. Redes de monitoreo	65
I. Localización de los sitios de muestreo	66
II. Frecuencia y recurrencia del muestreo.....	67
III. Parámetros ambientales sujetos a monitoreo	69
IV. Herramientas operativas para el monitoreo.....	72
Conclusiones	73
Bibliografía	81

Capítulo 2

Herramientas y pruebas analíticas para la determinación de contaminantes	85
A. ¿Qué es y cómo se mueve un contaminante?	88
I. Sustancia contaminante	88
II. Movilidad de los contaminantes	89
1. Medios de Transporte	89
2. Procesos de Transporte	90
3. Transformación y Degradación	90
B. Contaminación del agua	91
I. ¿Agua contaminada?	92
II. Contaminantes en el agua.....	92
1. Contaminantes con demanda de oxígeno	93
2. Agentes causantes de enfermedades.....	94

3. Químicos inorgánicos y minerales	94
4. Químicos orgánicos sintéticos	94
5. Sedimentos de erosión	96
6. Desechos radiactivos.....	97
7. Contaminación térmica	97
C. Impacto de la contaminación de los ríos, lagos y aguas subterráneas.....	98
I. Ríos	98
II. Lagos	99
III. Aguas subterráneas	100
D. Análisis químicos del agua.....	101
I. Parámetros fisicoquímicos	101
II. Parámetros químicos	102
III. Parámetros biológicos.....	103
IV. Parámetros microbiológicos.....	104
V. Metales pesados y contaminantes orgánicos	104
E. La matriz en el análisis químico.....	104
F. Control de calidad en los análisis químicos	106
I. La buena planeación	106
II. Laboratorios acreditados.....	107
III. La validación de un método.....	109
IV. Selección de un método analítico	115
V. Plan de Análisis y Muestreo (PAM)	116
G. Normas mexicanas e internacionales sobre los cuerpos de agua	119
I. Normas ambientales en México y Estados Unidos	121
1. Estructura regulatoria	121
2. Proceso de creación y aplicación.....	122
3. Enfoque y detalle de las normas	122
4. Enfoque en la protección y responsabilidad.....	122
5. Perspectiva en el cambio climático.....	123
II. Relación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes estudiados en agua y normas aplicables.....	123
Conclusiones.....	134
Bibliografía	135

Capítulo 3

Indicadores de evaluación y seguimiento para la atención

de sitios contaminados	139
A. Introducción.....	141
B. ¿Qué es un indicador de evaluación de la contaminación?.....	142
I. El Desarrollo de los indicadores de calidad del agua	142
II. Criterios de selección de indicadores	145
C. Indicadores fisicoquímicos	147
I. ¿Cómo se construyen los índices fisicoquímicos de calidad del agua?	148
II. Importancia de los índices de calidad del agua	152
III. Limitaciones de los índices de calidad del agua	154
IV. Ejemplos de índices de calidad del agua	157
1. Índice de Calidad del Agua Nacional (ICA-N)-México	157
2. Índice de Calidad del Agua ICA-México	159
3. Índice de Calidad de Agua de acuerdo con las Normas de Uso Internacional	161
4. Índice de calidad subjetivo-Internacional	162
D. Criterios de selección de bioindicadores	164
E. Estudios ecotoxicológicos como base para el diagnóstico ambiental.....	170
I. Bioensayos en laboratorio y estudios <i>in situ</i>	173
II. Biomarcadores de exposición, de efecto y de susceptibilidad.....	179
III. Indicadores de integridad ecológica	183
IV. Criterios de protección a la biota en los sistemas acuáticos	185
Conclusiones.....	189
Agradecimientos.....	190
Bibliografía	190
Glosario	195
Conclusiones.....	211

Presentación

El saneamiento de los ríos representa uno de los mayores desafíos ambientales y sociales de nuestro tiempo. Atenderlo implica comprender procesos ecológicos, hidrológicos y químicos altamente dinámicos, así como dimensionar sus impactos diferenciados en la salud humana y en la biodiversidad. También requiere articular políticas públicas con mecanismos efectivos de control y remediación. En México, donde los casos de contaminación hídrica se han multiplicado con consecuencias directas para comunidades, ecosistemas y economías locales, resulta fundamental contar con una herramienta que cierre el vacío existente entre el conocimiento científico-técnico y su aplicación jurídica en la remediación de los ríos.

La *Guía para casos de contaminación de ríos* fue desarrollada precisamente con este propósito. Se concibió como un instrumento especializado que integra, de manera sistemática, la ciencia, la técnica, la normatividad y los derechos humanos, para servir de apoyo tanto en el fortalecimiento de decisiones judiciales como en la formulación de estrategias para la protección ambiental. Su meta es proveer insumos claros, verificables y fundados que permitan a jueces y defensores contar con bases técnicas sólidas frente a los retos que supone ejecutar sentencias y garantizar el derecho a un medio ambiente sano.

La guía se estructuró bajo una lógica progresiva que aborda, primero, las bases para el monitoreo de cuerpos de agua, definiendo cómo diseñar e implementar

programas que diagnostiquen la magnitud y características de la contaminación. Posteriormente, se detallan las herramientas analíticas para identificar contaminantes, explicar su transporte, transformación y acumulación en matrices como el agua, los sedimentos y los organismos vivos, así como sus efectos tóxicos y repercusiones en la salud. Finalmente, se presentan criterios para medir el avance en la restauración o control de la contaminación, mediante indicadores fisicoquímicos, biológicos y de toxicidad ecológica, así como índices que permiten evaluar la integridad de los sistemas fluviales a lo largo del tiempo.

Este enfoque integral fue diseñado para que los conceptos técnicos aparezcan desde el inicio vinculados con su pertinencia jurídica, de modo que la evidencia científica no quede como un dato aislado, sino que pueda emplearse directamente para proteger derechos como el acceso al agua, la salud y la vida digna. La guía busca, así, ofrecer explicaciones, ejemplos y criterios que faciliten a quienes tienen la responsabilidad de tomar decisiones legales o administrativas avanzar desde la caracterización del ecosistema afectado y la identificación de fuentes de contaminación, hasta el uso de las herramientas legales necesarias para remediar o sancionar los daños.

En suma, esta guía combina rigor técnico con una orientación práctica, para servir como referencia tanto en la documentación de los impactos de la contaminación en los ríos como en el sustento de las acciones que permitan su saneamiento efectivo.

La estructura de la guía responde a esta visión.

La introducción ofrece una visión integral del sistema fluvial mexicano, al exponer su caracterización física, ecológica y normativa. A través de un recorrido que aborda desde la definición legal de los ríos hasta los problemas asociados a la contaminación. México se distingue por una notable diversidad climática y fisiográfica, lo que influye directamente en el comportamiento de sus ríos y que ha dado lugar a una compleja red de flujos superficiales y subterráneos con propiedades fisicoquímicas particulares. En este contexto, la introducción examina los factores determinantes, como el origen geohídrico y el clima, que explican la distribución

del agua superficial, la morfología de los cuerpos de agua y la biodiversidad que los habita.

Además, esta sección articula los conceptos científicos con los marcos jurídicos vigentes. Entre ellos, destaca el concepto de “estado base” de un ecosistema, clave para evaluar el daño ambiental y definir acciones de intervención. Sin embargo, la escasez de estudios históricos y datos cuantitativos sobre el estado base de muchos ríos contaminados, representa un obstáculo importante para su recuperación efectiva. Esta aproximación constituye un punto de partida necesario para comprender cómo eran los ecosistemas acuáticos antes del deterioro provocado por la contaminación, la fragmentación ecológica, la modificación de cauces y la introducción de especies exóticas.

Así, la introducción invita a pensar más allá del saneamiento tradicional y propone entender los ríos como sistemas ecológicos complejos con características independientes. Solo a partir de un conocimiento profundo de sus condiciones originales y de los múltiples factores de presión que enfrentan será posible desarrollar estrategias técnicas y jurídicas acordes con los desafíos hídricos y ecológicos de este siglo. En los capítulos siguientes, el lector encontrará herramientas conceptuales y metodológicas para avanzar en esa dirección.

El capítulo 1 presenta una herramienta para el diagnóstico ambiental de cuerpos de agua superficiales, centrada en la implementación de Programas de Monitoreo de la Calidad del Agua (PMCA). Estos programas constituyen herramientas esenciales para generar información técnica que permita identificar el grado de contaminación, conocer sus causas y efectos, y ejecutar medidas orientadas a la protección, uso sustentable y restauración de los sistemas hídricos.

Como etapa central para la implementación del PMCA, se describen y analizan en detalle las principales fuentes de contaminación generadas por actividades humanas (como la industria, agricultura o descargas urbanas), así como las vías mediante las cuales los contaminantes ingresan y se distribuyen en los ecosistemas acuáticos. El capítulo describe cómo estas sustancias se comportan en tres matrices clave: la columna de agua (donde circulan o se disuelven), los sedimentos

(donde pueden acumularse y persistir) y la biota (organismos vivos que pueden verse afectados o incorporar contaminantes en su estructura). Se examinan también los impactos tóxicos en los organismos acuáticos y las alteraciones que estos generan en los procesos ecológicos, con potenciales consecuencias sobre la salud humana.

Para la operación del PMCA, se describen las características relevantes a ser consideradas para el diseño de redes de monitoreo eficaces como es la ubicación estratégica de los sitios de muestreo, la periodicidad con la que deben hacerse las tomas de muestras y la selección de parámetros ambientales. Estos incluyen indicadores fisicoquímicos, microbiológicos y biológicos. En particular, se destaca la incorporación del monitoreo biológico como una herramienta fundamental para detectar cambios estructurales y funcionales en los ecosistemas acuáticos.

El capítulo concluye con la presentación de herramientas operativas para garantizar la calidad del proceso de monitoreo y del análisis de datos. Estas herramientas permiten estandarizar metodologías, asegurar la comparabilidad de resultados y generar información útil para la toma de decisiones. El contenido del capítulo proporciona los elementos necesarios para realizar un diagnóstico ambiental que ayude en la toma de decisiones judiciales en casos de contaminación de los ríos.

En el capítulo 2 se analiza el denominado ciclo de vida de los contaminantes, con el objetivo de entender, en primer lugar, qué se considera un contaminante desde una perspectiva técnica, identificando los puntos en común con el ámbito legal. También se aborda la manera en la cual los contaminantes se pueden mover a través del agua, aire, suelo o los organismos. El análisis parte de un enfoque físico y químico de las distintas fuentes de contaminación, y se ejemplifica cómo es que sustancias comunes empleadas en diferentes procesos, como en la industria o en la agricultura, generan diversos tipos de contaminantes.

Además, se propone una clasificación sobre los distintos tipos de contaminantes y su impacto en la salud humana, en la calidad del agua y en los ecosistemas. Esto permite comprender mejor las principales afectaciones que suelen enfrentar los diferentes cuerpos de agua: ríos, lagos y aguas subterráneas. El capítulo incluye

una sección detallada sobre los parámetros que pueden obtenerse a través de pruebas técnicas con la finalidad de cuantificar la calidad del agua y así poder caracterizar los contaminantes específicos en cada contexto.

A partir de ello, se aborda el control de calidad de los análisis químicos, aspecto clave para entender cuáles son los criterios por considerar para solicitar o dar seguimiento a evaluaciones sobre la calidad de un cuerpo de agua. Además, se señalan cuáles son los parámetros mínimos en los que se debe basar un análisis de calidad del agua, desde las preguntas básicas que hay que hacer sobre las características y acreditaciones que pueden tener los laboratorios, hasta la ruta que hay que seguir para la validación de los métodos, considerando aspectos como la precisión, la exactitud, la linealidad, así como los límites mínimos de detección y cuantificación de contaminantes. Adicionalmente, se incluye un apartado sobre la selección del método para el análisis de las muestras, enfatizando la importancia del seguimiento de estándares establecidos en las leyes y normas nacionales e internacionales o, en caso de ser necesario, de los estándares válidos para pruebas específicas.

Finalmente, el capítulo presenta una recapitulación de distintos instrumentos jurídicos nacionales, así como ejemplos de otros países, que están relacionados con métodos de análisis y de los niveles permitidos de contaminantes en el agua. Este capítulo ofrece una tabla resumen que sirve como guía para conocer cómo evaluar ciertos parámetros específicos, así como el equipo requerido y la normatividad aplicable.

El capítulo 3 aborda los temas relacionados con indicadores de evaluación para el seguimiento de sitios contaminados. En este capítulo se hacen expresos algunos de los puntos esenciales para el monitoreo de intervenciones en cuerpos de agua. Para ello, las personas expertas proponen un enfoque basado en indicadores de la calidad del agua, señalando que en la actualidad no es suficiente únicamente priorizar la disponibilidad. Esto debido a que en las últimas décadas el nivel de contaminación que ha alcanzado el agua es tal que ha llegado a hacerse inutilizable para ciertos usos debido al gran costo y complejidad que implica remover ciertos contaminantes. En una primera sección se analiza la necesidad de hacer una

selección de indicadores de acuerdo con su relevancia, sensibilidad, facilidad de medición y estabilidad temporal, remarcando la importancia de que todos los indicadores tengan un sustento científico. Así, se desarrollan los diferentes tipos de indicadores categorizados como fisicoquímicos, biomonitores y pruebas ecotoxicológicas, siendo estas últimas las de más reciente creación e implementación.

Dentro de este capítulo se enfatiza la importancia no solo de los indicadores fisicoquímicos, sino también de la utilización de índices, esto principalmente para el monitoreo de la calidad del agua. Además, se explica la manera en cómo la utilización de índices puede ser útil para evaluar, a lo largo del tiempo, la asignación de recursos, la priorización espacial de las acciones a realizar, así como el cambio que ha habido en los parámetros de calidad del agua y poder contrastarlos con los establecidos en las normas. Adicionalmente se enfatiza la importancia de los índices como un medio de transparencia y comunicación de la información. Para finalizar la parte de índices de calidad del agua se explican diferentes índices de calidad del agua, destacando el Índice de Calidad del Agua Nacional como una herramienta a través de la cual las autoridades mexicanas han establecido un estándar de evaluación para los diferentes tipos de cuerpos de agua.

Otra sección del capítulo está dedicada a los indicadores de índole biológico, es decir, los bioindicadores. En esta parte del capítulo las personas expertas proponen el uso de indicadores biológicos debido a la gran relevancia que han adquirido en las últimas décadas para evaluar la calidad del agua más allá del componente en materia de salud humana. Para ello, se explica la naturaleza de este tipo de indicadores, así como el sustento que tiene por parte de la comunidad internacional. Adicionalmente, se proponen los estudios ecotoxicológicos como una medida de diagnóstico de la calidad ambiental ante la existencia de efectos por contaminantes que aún no han podido ser caracterizados. Los autores profundizan al respecto ofreciendo ejemplos de pruebas ecotoxicológicas, así como rutas guía a seguir para poder aplicar este tipo de herramientas en el monitoreo de la calidad del agua. Finalmente, en esta misma lógica, se proponen otro tipo de indicadores y criterios para la evaluación de la biodiversidad asociada a cuerpos de agua contaminados, haciendo énfasis en su utilidad técnica como medio de evaluación del progreso de intervenciones realizadas sobre cuerpos de agua.

En su conjunto, los tres capítulos presentan una guía técnica y científica con la cual se busca acercar a defensores ambientales, personas juzgadoras, así como cualquier persona interesada en la protección de los ríos y del agua, a un conocimiento que permite integrar herramientas de planeación, evaluación, monitoreo y seguimiento para intervenciones sobre cuerpos de agua, más específicamente sobre ríos. El presente texto pretende incentivar el uso de herramientas técnicas como una manera de evidenciar el tipo y nivel de contaminación que pueden presentarse en los diferentes ríos mexicanos, al mismo tiempo resalta los impactos de la contaminación del agua en la salud humana, así como en la calidad del medioambiente.

*Subdirección General de
Conocimiento Científico para los Derechos Humanos*

Reseñas curriculares

Arellano-Aguilar, Rodolfo Omar. Es licenciado en Biología por la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y doctor en Ciencias Biológicas por la UNAM. Ha realizado investigaciones posdoctorales con los temas: Evaluación de los efectos en el ciclo de vida del pez cebra (*Danio rerio*) por exposición al desinfectante estericide; Evaluación de riesgo por la degradación ambiental en el sistema hídrico mexicano; Monitoreo de la calidad del agua del río Atoyac y su capacidad genotóxica, en la zona de corredores industriales, limítrofe entre Tlaxcala y Puebla.

Rodolfo Omar Arellano-Aguilar se ha desempeñado dentro de la UNAM como coordinador de la Licenciatura en Ciencias de la Tierra, Profesor Asociado C de tiempo completo por artículo 51, coordinador de Proyectos en el Programa Universitario de Medio Ambiente, profesor de asignatura en la División de Estudios Profesionales de la Facultad de Ciencias y como asesor de Departamento de la Dirección de Áreas Naturales Protegidas en la Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural.

Actualmente se desempeña como profesor Titular A de Tiempo Completo Definitivo en la Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra y forma parte del Sistema Nacional de Investigadores nivel 1 siguiendo como principales líneas de investigación: la evaluación del riesgo ecológico y el desarrollo sustentable.

Vanegas Pérez, Ruth Cecilia. Es licenciada en Biología por la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), es licenciada en Arquitectura y Decoración por la Corporación Universitaria de la Costa, Barranquilla, Atlántico, Colombia, es maestra en Biología por la Facultad de Ciencias de la UNAM y doctora en Biología por la Facultad de Ciencias de la UNAM. Sus campos de especialidad son: ecofisiología de organismos acuáticos y ecotoxicología de organismos acuáticos.

Ha impartido cursos como docente a nivel licenciatura y posgrado en instituciones como la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y la UNAM. Cuenta con participación en congresos nacionales e internacionales, así como publicaciones en autoría y coautoría.

Actualmente se desempeña como Profesora de Carrera A y B de tiempo completo en el Departamento de Biología de la Facultad de Ciencias de la UNAM. Ha sido Técnica Asociada “C” de tiempo completo en el laboratorio de química atmosférica, estudios del agua y aerobiología en el Centro de Ciencias de la Atmósfera, hoy, Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático. Profesora de asignatura A Interina en el Laboratorio de Ecofisiología, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias de la UNAM, Profesora de Carrera Asociado C, Tiempo completo, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias UNAM, Coordinadora del Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, Secretaría de Integración Académica y Vinculación en la Facultad de Ciencias de la UNAM, Coordinadora del Laboratorio de Ecofisiología, Miembro del Sub-Comité de Admisión del Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología, Miembro del Comité Académico de la Licenciatura en Ciencias de la Tierra, Consejera Universitaria representante del profesorado de la Facultad de Ciencias ante el Consejo Universitario de la UNAM para el periodo 2022 a 2024.

Ponce de León Hill, Claudia. Es licenciada en Química, por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), maestra en Química Analítica por University of East Anglia, Norwich, Gran Bretaña, doctora en Ciencias por University of Cincinnati, Cincinnati, Ohio, EUA, realizó estudios posdoctorales en University of Cincinnati.

Claudia Alejandra Ponce de León Hill se ha desempeñado como jefa del Departamento de Ecología y Recursos Naturales del área de Biología, Profesora de tiempo completo Titular A en la Facultad de Ciencias de la UNAM, Investigadora Asociada C con el programa de Repatriación UNAM-CONACYT y ha realizado labores docentes impartiendo diversas asignaturas.

Actualmente se desempeña como coordinadora del programa de Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, profesora Titular B en la Facultad de Ciencias de la UNAM, responsable del Área de Análisis Físicos y Químicos y Control de Calidad en la Unidad de Análisis Ambiental, Coordinadora para el proyecto GEF (Global Environmental Facility) de Autobuses de Celdas de Combustible y un Sistema Asociado de Hidrógeno para México.

Introducción

Sistema fluvial mexicano: caracterización, naturaleza y biodiversidad



Introducción. Sistema fluvial mexicano: caracterización, naturaleza y biodiversidad. A. Definición de los ríos y la contaminación. B. Origen geohidrológico del sistema fluvial mexicano. C. Incidencia climática y pluvial en la morfogénesis de los ríos. D. Biodiversidad ancestral y presente de los ríos y lagos de México. E. Alteraciones ecohidrológicas de ríos y lagos de México. F. Pérdida de la calidad del agua por contaminación. Conclusión. Bibliografía.

La presente introducción tiene como objetivo revisar de manera general cuál es el origen y los procesos naturales que inciden en el sistema fluvial mexicano, así como destacar algunos aspectos relevantes de la biodiversidad de los principales ríos del país, se hace mayor énfasis en peces dulceacuícolas y plantas acuáticas presentes en los cuerpos de agua superficiales. Lo anterior representa el punto de partida para comprender las características físicas y biológicas originales previas a los cambios y/o alteraciones ocasionadas por los procesos de contaminación, fragmentación, introducción de especies exóticas y alteración de los cauces naturales de los ríos del país. Dicha información es indispensable para entender la importancia de conceptos como el caudal ecológico, la integridad eco-hidrológica, restauración o incluso saneamiento y calidad de agua que se expresan en instrumentos de política ambiental. Además, son conceptos que siempre aparecerán en casos de denuncias, controversias o inclusive en programas y planes de gestión de los recursos hídricos en la legislación mexicana. Por lo anterior, vale la pena conocer cuál debería ser el estado de conservación natural de los ríos del país que permite la existencia y evolución natural de la vida acuática y el equilibrio ecológico. Asimismo, es esencial conocer los factores determinantes que mantienen la condición de la calidad y cantidad de agua en los ríos para cumplir las funciones ecológicas, así como para permitir el abastecimiento o acceso de agua tanto para las poblaciones humanas como para todos los seres vivos, particularmente, aquellos que habitan los ecosistemas acuáticos o están asociados a éstos.

A. Definición de los ríos y la contaminación

En el marco legal mexicano, los ríos son considerados cuerpos de agua superficiales que corresponden a las aguas nacionales, referidos en el párrafo quinto del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. En este sentido, es responsabilidad del gobierno mexicano promover mayores políticas para el cuidado del agua y evitar la contaminación.¹ Sin embargo, en los últimos años, ha sido evidente que los problemas de contaminación de los ríos del país han llegado a niveles insostenibles que están generando descontento social y reclamos recurrentes a las autoridades encargadas de la protección del ambiente y de los recursos hídricos sin que por ello se haya revertido o frenado dicha situación.

En todo el país, los casos de contaminación se reproducen como lo ocurrido durante el accidente minero en el río Sonora y Bacanuchi en el Estado de Sonora o casos de contaminación persistente de los ríos Atoyac en Puebla y Tlaxcala, el río Atoyac del Estado de Oaxaca, el río Lerma en el Estado de México, el río Tula en el Estado de Hidalgo, el río Grande de Santiago en Jalisco o el río Coatzacoalcos en Veracruz, entre otros.

El problema ya no solo suscribe a la mala calidad del agua que causa malos olores, proliferación de especies patógenas, la pérdida de la fauna y flora acuática o la mala imagen por la acumulación de basura o residuos en los cauces. El problema se ha convertido en una emergencia sanitaria y ambiental que está provocando que los ríos del país sean focos de enfermedades y padecimientos entre las comunidades.² De hecho, existen antecedentes en donde se reconoce la relación que guarda la contaminación de los ríos con el brote de enfermedades no transmisibles como la insuficiencia renal, la leucemia aguda y diversos tipos de

¹ Góngora Pimentel, Genaro, “Tesis y jurisprudencia en materia de aguas”, Instituto de Investigaciones Jurídicas de la UNAM. Disponible en: «<https://archivos.juridicas.unam.mx/www/bjv/libros/6/2598/7.pdf>» [Consultado el 18 de septiembre de 2024].

² CONAHCYT, Primer Informe Estratégico. Cuenca del Alto Atoyac (Tlaxcala y Puebla), versión octubre de 2023, Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, Gobierno de México. Disponible en: «<https://cdn.conahcyt.mx/enis/toxicologia/resa-atoyac/inicio/descargables/informe-caa.pdf>» [Consultado el 18 de septiembre de 2024].

padecimientos como cáncer y enfermedades gastrointestinales o crónico respiratorias.^{3 y 4}

Recientemente, la tesis de la Primera Sala en materia administrativa (2023)⁵ determina que, en el derecho humano al agua, el Estado mexicano tiene la obligación de adoptar estrategias y programas amplios e integrados para la eliminación de la contaminación. De igual manera, tiene que garantizar y facilitar el acceso al agua pura y a su saneamiento, eliminando los efectos perjudiciales para el medio ambiente y las actividades que se realicen.

I. Definición de río y sus elementos de acuerdo con las leyes mexicanas

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) define a los ríos como corrientes de agua natural, perenne o intermitente, que desemboca a otras corrientes, o a un embalse natural o artificial, o al mar.⁶ Asimismo, la LAN establece un espacio de ribera o zona federal de 10 metros de anchura contiguas al cauce de las corrientes o al vaso de los depósitos de propiedad nacional, medidas horizontales a partir del nivel de aguas máximas ordinarias. Igualmente, la LAN define como:

Cuerpo receptor: corrientes o depósitos naturales de agua, presas, cauces, zonas marinas o bienes nacionales donde se descargan aguas residuales, así como los terrenos en donde se infiltran o inyectan dichas aguas.

³ CNDH, Recomendación No. 10 /2017 Sobre la Violación a los Derechos Humanos a un medio ambiente sano, saneamiento del agua y acceso a la información, en Relación con la Contaminación de los Ríos Atoyac, Xochiac y sus afluentes, en agravio de quienes habitan y transitan en los municipios de San Martín Texmelucan y Huejotzingo, en el Estado de Puebla, y en los municipios de Tepetitla de Lardizábal, Nativitas e Ixtacuixtla de Mariano Matamoros, en el Estado de Tlaxcala, Comisión Nacional de Derechos Humanos, 21 de marzo de 2017.

⁴ CIDH, OEA, Resolución 7/2020 Medida Cautelar No. 708-19 Pobladores de las Zonas Aledañas al Río Santiago respecto de México, Comisión Interamericana de Derechos Humanos, Organización de los Estados Americanos, 5 de febrero de 2020.

Primera Sala (2023), Derecho humano al agua. Contenido y alcance de las obligaciones generales del Estado mexicano en materia de este derecho, *Gaceta del Semanario Judicial de la Federación*, Libro 26, Tomo IV, junio de 2023, pp. 3562.

⁵ Primera Sala (2023), Derecho humano al agua. Contenido y alcance de las obligaciones generales del Estado mexicano en materia de este derecho, *Gaceta del Semanario Judicial de la Federación*, Libro 26, Tomo IV, junio de 2023, pp. 3562.

⁶ Ley de Aguas Nacionales, artículo 3, *Diario Oficial de la Federación* de 8 de mayo de 2023.

De esta manera, todo cuerpo de agua se convierte de facto en “cuerpo receptor” si se vierten aguas residuales. Dicho vertimiento de “aguas residuales” están definidas como:

Aquellas aguas que presentan una composición variada provenientes de las descargas de usos público urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento y en general, de cualquier uso, así como la mezcla de ellas.

De esta manera, la misma Ley desnaturaliza, por decirlo así, a los componentes y procesos que han permitido la evolución de un sistema de escurrimiento natural de agua en condiciones de calidad, resultado de las interacciones de procesos geológicos, climáticos, meteorológicos y biológicos. De igual manera, cosifica a los ríos como elementos físicos por donde escurre el agua y el concepto de agua residual omite el hecho de que es la vía directa por la cual los contaminantes afectan la composición, calidad y/o características naturales del agua de ríos, arroyos, lagos y zonas costeras.

En contraste, la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente⁷ reconoce como concepto de contaminación “a toda aquella presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico”.⁸ Asimismo, define como contaminante:

A toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural.

Tomando en consideración los conceptos anteriores, la composición de las aguas residuales es una fuente de contaminación y, dependiendo del volumen y la concentración de los componentes de dicha agua residual, puede generar el

⁷ SEMARNAT, Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, artículo 3o., *Diario Oficial de la Federación* de 1o. de abril de 2024.

⁸ Desequilibrio ecológico: alteración de las relaciones de interdependencia entre los elementos naturales que conforman el ambiente, que afecta negativamente la existencia, transformación y desarrollo del hombre y demás seres vivos (LGEEPA, 2024).

desequilibrio ecológico de los ríos. Para evitar dicho desequilibrio, también existen conceptos que se aplican para referirse a llevar a cabo acciones para recuperar el estado o condición de un río que sufre contaminación.

Por ejemplo, cuando un cuerpo de agua se encuentra contaminado, es frecuente que las dependencias o instituciones responsables recomienden realizar acciones de “saneamiento”. Sin embargo, la CONAGUA⁹ define este concepto como:

Recogida y transporte del agua residual y el tratamiento tanto de ésta como los subproductos generados en el curso de esas actividades, de forma que su evacuación produzca el mínimo de impacto en el medio ambiente.

En contraste, para la LGEEPA,¹⁰ lo adecuado sería aplicar el concepto de “restauración”, definido como:

Conjunto de actividades tendientes a la recuperación o restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales.

Además, la LGEEPA toma en cuenta que los recursos naturales,¹¹ como los ríos, prestan “servicios ambientales”, entendidos como los beneficios de los ecosistemas tangibles e intangibles que son necesarios para la supervivencia del sistema natural y biológico en su conjunto, y que propician beneficios al ser humano.

La disyuntiva respecto a la restauración ecológica está en determinar cuál es la condición natural o las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales. De igual manera, la pregunta recurrente es cuál debería ser el estado deseable de un río en el que se realizaron acciones de restauración o saneamiento. Para dilucidar la condición natural de los ríos en México, debemos conocer el origen de éstos, los procesos que inciden o han incidido en las características naturales, así como en el estado actual, cuyo resultado deriva de

⁹ CONAGUA, Estadísticas del Agua en México 2023, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2023.

¹⁰ SEMARNAT, Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, artículo 3o., *Diario Oficial de la Federación* de 1o. de abril de 2024.

¹¹ Recurso natural: elemento natural susceptible de ser aprovechado en beneficio del humano.

las interacciones entre factores ambientales y los impactos de las actividades humanas. Aunque es claro que un río contaminado no podrá restaurarse a su estado prístino, idealmente debería buscarse alcanzar una condición que permita el mantenimiento y evolución de la vida, así como la restitución de los servicios ambientales que presta.

A continuación, se presenta una revisión de las características y eventos que dieron origen al actual sistema de ríos, arroyos y lagos del territorio mexicano.

B. Origen geohidrológico del sistema fluvial mexicano

Las características morfológicas del sistema fluvial mexicano tienen su origen en los eventos geológicos ocurridos durante el Cretácico Tardío, hace 65 millones de años, siendo el periodo más importante entre el Oligoceno y el Plioceno (~30 millones a ~2 millones de años). Durante este lapso se generaron las características morfológicas de los ríos, cuencas y lagos que actualmente albergan una importante biodiversidad acuática y que constituyen el soporte vital para el establecimiento de asentamientos humanos, los cuales permitieron posteriormente el desarrollo de culturas asociadas a los sistemas hídricos.¹²

Durante estos periodos, las placas tectónicas de Norteamérica y del Pacífico colisionaron, elevando las tierras en lo que hoy se conoce como el sistema montañoso de las Sierras Madre Occidental y Oriental al norte, la Sierra Madre del Sur y la de Chiapas al sureste, la formación de la Mesa Central y uno de los rasgos más importantes: la Faja o Eje Neovolcánico Transversal (o Transmexicano) en el centro del país. Como resultado, el relieve conforma elementos fisiográficos denominados cuencas y microcuencas endorreicas, serranías, montañas, lomeríos y cañadas, que favorecen la acumulación de agua y escorrentías internas y hacia ambos flancos de las zonas costeras: el Océano Pacífico y el Golfo de México y mar Caribe del Océano Atlántico.

¹² Miller R. (2005), *Freshwater fish of Mexico*, The University of Chicago Press.

Al mismo tiempo, la actividad volcánica y el periodo interglacial¹³ contribuyeron significativamente con la gran diversidad orográfica y biológica que inciden en la compleja red de flujos hídricos (superficiales y subterráneos), así como a zonas de transición entre las nueve provincias que dan la fisiografía actual (Tabla 1). Dichas características han sido ampliamente estudiadas en los ámbitos geohidrológico, hidrológico, biogeográfico y, finalmente, desde el punto de vista del ciclo hidrosocial.

La importancia de conocer los rasgos de las provincias está en que permite comprender aspectos clave para entender las características hidrogeológicas de dichas provincias hidrográficas. Lo anterior es importante porque la caracterización ambiental en todo diagnóstico ambiental en casos de contaminación debe aportar información de las características ambientales, tipos de suelo, fuentes naturales de agua, presencia y características hidrogeológicas que pudieran interactuar con las rutas y dispersión de contaminantes presentes en los cuerpos de agua.

Por ejemplo, de manera general, las cuencas aluviales del norte son zonas fuertemente dependientes de la precipitación, por lo que, aunque los cuerpos de agua superficiales sean escasos, la lluvia puede ser un factor determinante de la movilización de los contaminantes atrapados en el suelo hacia los flujos de agua subterránea. Por el contrario, las zonas pertenecientes a la Sierra de Chiapas en general son abundantes en escurrimientos de grandes volúmenes de agua como el sistema del río Usumacinta por lo que, en caso de fuentes de contaminación, el factor de dilución debe ser considerado en casos de contaminación en la región (Tabla 1).

Dependiendo de la ubicación del río en la provincia fisiográfica se podrá deducir algunos de los factores que intervienen en la acumulación, dispersión o reducción de los contaminantes. Claramente, el comportamiento de la contaminación de los ríos está influenciado por las características geológicas y fisiográficas de la región.

¹³ El periodo interglaciario se refiere al lapso entre el fin de un periodo glaciario y el inicio de un segundo periodo glaciario.

Tabla 1
Características generales de las 11 provincias
fisiográficas e hidrogeológicas de México

Provincias	Características	Hidrogeología / Sistema fluvial
Península de Baja California	Constituido por terrazas de depósito marino con montañas de hasta 1,785 m, dominadas por granito, rocas sedimentarias y metamórficas del mesozoico y volcánicas del cenozoico. Extensión 1,450 km.	Bajo potencial de infiltración y baja permeabilidad de las rocas. Constituido por pozos someros y arroyos cuyas corrientes son pequeñas e intermitentes. Ejemplo: el río San José del Cabo, Río Colorado.
Planicie costera del Pacífico	De origen por el tectonismo del Oeste de Norteamérica conforma depresiones compuestas de sedimentos arenosos de rocas intrusivas y metamórficas del mesozoico e ígneas del cenozoico. Superficie 104,491 km ² .	Acuíferos asociados a la zona costera de acuíferos profundos. Sedimentos arenosos aluviales con buena porosidad y permeabilidad. Los flujos superficiales de agua vierten al Pacífico. En la Mesa Central del Norte se caracteriza por los ríos Bravo, Conchos, Nazas-Aguanaval.
Cuencas aluviales del Norte (cuencas y sierras)	Formado por cordilleras y cuencas se elevan extensas planicies aluviales rellenas por depósitos sedimentarios. Presenta rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias del Cenozoico. Las rocas sedimentarias carbonatadas, areniscas, limolitas y lutitas, así como rocas ígneas intrusivas y extrusivas del Cretácico Superior. Superficie de 205,000 km ² .	Drenajes endorreicos y exorreicos, con flujos con poco volumen, pero llenados por la precipitación pluvial. Dominan los flujos subterráneos cuyos flujos están determinados por cambios litológicos y de permeabilidad.

Sierra Madre Occidental	Cadena montañosa paralela a la costa occidental. Afloran rocas de baja permeabilidad. En la parte occidental se constituye de densos bloques de lava inclinados, así como fallas derivadas de los fuertes eventos tectónicos. Superficie 358,845 km².	Los ríos descargan en el Pacífico de manera perenne cuya longitud es grande. Ejemplo de ello son los ríos Culiacán, Yaqui y Sonora. Asimismo, las masas de agua fluyen hacia las cuencas aluviales del norte y la Mesa Central de manera intermitente.
Sierra Madre Oriental	Se divide en tres subregiones: Sierra del Burro, Sector Ojinaga-La Pila y Sector Sierra Madre Torreón-Monterrey-Tamazunchale. Constituida por rocas calcáreas plegadas de edad cretácica. Tiene una secuencia de rocas carbonatadas permeables, empaquetadas entre dos secuencias arcillo-calcáreo y arcillo-arenoso en la cima con depósitos del Jurásico Superior. Superficie 250,096 km².	Los suelos altamente permeables cuyo contenido de agua subterránea es importante e interconectado. Presenta flujos de lentos a rápidos, así como lagos de origen volcánico someros, salados y dulceacuícolas. En el sector Ojinaga-La Pila se pueden encontrar dos tipos de acuíferos: sedimentarios y calizas. Cerca de los pisos de los Valles los acuíferos dan lugar a grandes manantiales. En el Sector Torreón-Monterrey-Tamazunchale el agua se infiltra y se descarga a través de grandes manantiales.
Mesa Central	Región más importante de transición Tropical-Subtropical. Con un promedio de elevación de 1,500 m. Cuenta con valles relativamente planos con depósitos aluviales gruesos de rocas sedimentarias e ígneas. Limitada al sur	Por la complejidad hidrográfica comprende pequeñas cuencas endorreicas y flujos alimentados por precipitación pluvial, así por grandes lagos y ríos con gradientes bajos.

	por el Balsas, al este por la sierra Madre Oriental y al oeste por la sierra Madre Occidental.	
Eje Neovolcánico	Es una región de 900 km de largo, orientada en dirección este-oeste, se localiza al centro del país. Con una variedad de formas montañosas irregulares producto del vulcanismo, identificadas por una diversidad de conos volcánicos, calderas y depósitos piroclásticos. En esta provincia se ubican las montañas más altas del país con 5,675 m y el volcán Pico de Orizaba. Superficie 130,000 km².	Se caracteriza por una alta permeabilidad de amplio rango, controlado por fracturamientos e intercalación de material escoráceo. Cuerpos de agua superficial medianos y grandes tales como el Río Lerma y tributarios con presencia de lagos como Chapala, Cuitzeo y Pátzcuaro. Amplio depósito de suelos lacustres que forman acuitardos. Las Gravas, arenas y sedimentos finos forman acuíferos someros. La heterogeneidad y cargas hidráulicas inciden en la temperatura y calidad del agua en línea vertical.
Sierra Madre del Sur	Limita con la Faja Volcánica Transmexicana y al sur de la Planicie costera del Pacífico. Cadena montañosa con elevación máxima de 4,200 m de basamentos de rocas metamórficas y un batolito que constituye en Macizo de Oaxaca. Dominan las formaciones impermeables de dolomías, calizas recristalizadas y lechos rojos compuestos de arcilla, arena y limo. Superficie 258,274 km².	Las corrientes fluyen en dirección del Océano pacífico. Los acuíferos son de baja producción y hacia la planicie hay un número importante de lagunas de materiales de grano fino y abundantes detritos orgánicos. El río Balsas es el flujo más importante cuyo desplazamiento de materiales aporta gran material en el delta del Océano Pacífico. Asimismo, hay presencia de pequeños lagos como el Lago de Tequesquitengo.

Sierra de Chiapas	Limita al norte con la Planicie costera del Golfo, al sur con el Océano Pacífico y al occidente con la Sierra Madre del Sur y oriente con la frontera México-Guatemala. Al este se encuentra la planicie costera del Istmo de Tehuantepec. Tectónicamente activa mantiene el vulcanismo en la zona. Superficie: 84,280 km ² .	De las provincias con mayor volumen de agua y escurrimientos superficiales. En la zona montañosa los flujos de agua son rápidos y en la planicie son lentos con grandes volúmenes. El Macizo granítico chiapaneco forma la vertiente del Atlántico y del Pacífico donde drenan dos grandes ríos El Grijalva y El Usumacinta.
Costa del Golfo de México y Yucatán	Planicie formada por carbonatos marinos. Alto grado de carstificación, incluyendo calizas, dolomías y ligero grado de silicificación. Superficie de 136,240 km ² .	Acuífero altamente permeable que descarga en la costa. No existen corrientes superficiales de importancia. Existen depresiones en la costa caribeña como caletas, pequeños pantanos y lagunas costeras.

Fuentes: Velázquez y Ordaz (1992),¹⁴ García Calderón y De la Lanza (2002),¹⁵ Miller (2009).

Además de los procesos geológicos antes mencionados, se suman otros factores que han contribuido en las características actuales de los ríos y embalses. La ubicación geográfica de México determina las condiciones climáticas y meteorológicas que propician un régimen de precipitación a lo largo del año. Además, de manera regional, se presentan fenómenos cíclicos que impactan los patrones meteorológicos, así como la influencia en la humedad del océano Pacífico y el Golfo de México. Adicionalmente, también debe considerarse que en México convergen dos regiones biogeográficas (la Neártica y la Neotropical), lo que genera condiciones que han determinado la estructura de los ecosistemas, así como la biodiversidad y la presencia de especies endémicas acuáticas y terrestres.

¹⁴ Velázquez Aguirre, L. y Ordaz Ayala, A., *Provincias hidrogeológicas de México*, Ingeniería Hidráulica en México 1992, pp. 36-55.

¹⁵ García, J., de la Lanza G., "Las aguas epicontinentales de México", en *Lagos y Presas de México*, de la Lanza, Guadalupe y García Calderón, José Luis (comps.), AGT Editor, México, 2002, pp. 5-26.

C. Incidencia climática y pluvial en la morfogénesis de los ríos

El clima de México es igual de diverso que sus rasgos fisiográficos y tiene un impacto destacado en relación con los cuerpos de agua superficiales. De hecho, es importante comprender que, debido a las características climáticas del territorio, los ríos presentan un régimen cíclico de aumento y reducción en el volumen de agua que escurre. También en algunos casos el período de precipitación incide en la presencia de agua superficial, es decir, en México existen ríos perennes, ríos intermitentes y otros que reducen considerablemente el cauce durante la época de estiaje.

Enriqueta García (1996)¹⁶ menciona que en México convergen dos zonas: la tropical y la subtropical, que prevalecen de manera general, lo que permite identificar las siguientes características:

1. Altas temperaturas de aire y del suelo.
2. Escasa oscilación anual de la temperatura y gran oscilación diurna.
3. Gran intensidad de la precipitación pluvial.
4. Diversidad de regímenes de precipitación.
5. Variabilidad interanual de las precipitaciones.
6. Presencia de canícula o sequía de medio verano.

Lo anterior se explica porque el territorio mexicano se ubica en una zona de transición entre las latitudes medias y tropicales, dominadas por fenómenos meteorológicos de ambas zonas. Dichos fenómenos presentan corrimientos estacionales hacia el norte en verano y hacia el sur en invierno (García 1996).

En el norte del país, los estados de Sonora, Coahuila, Durango, Zacatecas, Nuevo León, Baja California y Sinaloa dominan las zonas áridas por ausencia de nubosi-

¹⁶ García, Enriqueta, "Diversidad climático vegetal en México", en *Biodiversidad, taxonomía y biogeografía de artrópodos de México*, Llorente, Jorge, García, Alfonso y González, Enrique (eds.), Universidad Nacional Autónoma de México, 1996.

dades, una fuerte insolación y una alta temperatura, mientras que la zona tropical al sur-sureste de estados tales como Veracruz, Tabasco, Chiapas y la Península de Yucatán, las temperaturas se mantienen sin mucha variación durante todo el año. No obstante, las oscilaciones diurnas en las zonas altas de las montañas se acentúan el intemperismo¹⁷ de las rocas, por ejemplo, en los estados del Eje Neovolcánico Transversal en los Estados como Guerrero, Morelos, Querétaro, Hidalgo por mencionar algunos. Además, durante la temporada de lluvias, se presentan precipitaciones torrenciales esporádicas que erosionan aún más el suelo y transportan materiales a través de los escurrimientos.

Pluviométricamente se ha constatado que los regímenes diversos en el territorio nacional: intermedio entre verano e invierno y durante invierno las precipitaciones esporádicas propician un ciclo hídrico intermitente que influye significativamente en los flujos de agua en las cuencas, particularmente en el centro-norte del país (García, 1996).

Durante el verano, México se encuentra bajo en dominio de vientos alisios del hemisferio norte, originados en el margen sur de la celda de alta presión Bermuda-Azores, localizada en el océano Atlántico, lo que introduce humedad por el Golfo de México. En esta época del año se presentan ciclones tropicales que descargan gran cantidad de agua sobre la región sur-sureste del país. García (1996) menciona que el calentamiento del altiplano en verano provoca zonas de baja presión que contrastan con las de alta de los océanos, generando movimientos monzónicos del mar hacia el continente.

En invierno (la mitad fría del año), el territorio se encuentra bajo la influencia de celdas de alta presión, tanto en el Pacífico del norte como en la zona Bermuda-Azores, que al correrse hacia el sur se oponen a toda clase de precipitación debido al carácter descendente del aire. Durante esta época, las masas de aire polar chocan con el altiplano mexicano, liberando algo de precipitación en forma de nieve que al incursionar al Golfo de México aumenta la humedad, lo que provoca lluvias en la Sierra Madre Oriental (García, 1996).

¹⁷ Intemperismo: efecto de erosión de las rocas causado por los cambios de temperatura (calor-frío).

De esta manera, existen lluvias esporádicas durante invierno, al mismo tiempo de que en las partes altas, el agua se almacena en forma de nieve y hielo que al aumentar la temperatura en los meses de marzo-abril permiten la infiltración y los escurrimientos permanentes dando origen a arroyos que fluyen por las montañas y serranías del país. Así la compleja orografía de México, su ubicación geográfica y la convergencia de regiones climáticas dan como resultado características particulares y morfógenesis¹⁸ a la red hidrológica (Fig. 1).



Figura 1. Red hidrológica de México. Fuente: CONABIO (<http://geoportal.conabio.gob.mx/>)

Es conveniente considerar que, si bien en nuestro territorio la temporada de lluvias ocurre en verano y existe influencia de ambos océanos —que durante este periodo

¹⁸ Morfogénesis: origen y evolución de los rasgos de la forma. En el caso de los ríos nos referimos a cuáles son los factores que modelan la forma de los ríos.

es muy activo respecto a huracanes—, gran parte del territorio presenta condiciones secas. De acuerdo con la CONAGUA (2021), dos terceras partes del territorio son áridas o semiáridas, con precipitaciones anuales de 500 mm, mientras que una tercera parte es húmeda con precipitaciones que superan los 2,000 mm por año. Lo anterior genera diferencias marcadas en la distribución de agua que se precipita y se conserva en la superficie.

Para una gestión administrativa del territorio en términos hídricos, se consideraron las 757 cuencas hidrológicas constituidas en 37 regiones y se agruparon desde 1997 en 13 regiones hidrológico-administrativo (García y de la Lanza 2002). Es así como se fundamentó en parte la estructura que actualmente rige la administración regional de las fuentes de agua.

Como se ha revisado, la historia natural de los recientes eventos geológicos ha favorecido la formación de cuencas hidrológicas en donde los sistemas lóticos (arroyos y ríos) erosionan y arrastran materiales, aportando grandes cantidades de nutrientes y minerales a los sistemas lénticos (lagos y lagunas), así como en los deltas costeros. En consecuencia, las características fisicoquímicas tanto del agua superficial como del agua subterránea están dadas por la historia geológica de las regiones. Se trata de un sistema fluvial joven, fuertemente dependiente del régimen de precipitación (que es intermitente) y condiciones limnológicas determinadas por el arrastre de los materiales geogénicos como los limos, arcillas, rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas dominantes, así como un enriquecimiento de materia orgánica que aportan los bosques tropicales y subtropicales.

Adicionalmente, dicho sistema está compuesto de humedales y cuerpos de agua superficial en forma de lagos de origen volcánico como los lagos de Alchichica, Texcoco, Zirahuén, Pátzcuaro, Cuitzeo, Chapala, Zempoala, entre otros. Particularmente, en la Faja Volcánica Transmexicana, los cuerpos de agua someros se encuentran en un gradiente altitudinal de 737 a 4,283 msnm, cuyas profundidades van de < 6 m a 25 m, presentando características dulceacuícolas a alcalinas ($\text{pH} > 7.5$)¹⁹ debido a la presencia de iones de calcio (Ca^{2+}), cloro (Cl^-), sodio (Na^+),

¹⁹ pH: potencial hidrógeno es un parámetro cuya escala establece la acidez o alcalinidad de una solución o sustrato.

potasio (K^+), magnesio (Mg^{2+}) y bicarbonato (HCO_3^-) que fomentan lagos subsalinos e hiposalinos, así como eutróficos a hipertróficos (asociado a lagos poco profundos y al clima cálido-húmedo).²⁰

D. Biodiversidad ancestral y presente de los ríos y lagos de México

I. Diversidad de peces dulceacuícolas

Es frecuente que en ciertas temporadas se presenten mortandades masivas de peces dulceacuícolas en lagos o ríos del centro del país, particularmente en aquellos con cierto grado de contaminación. En general, estos eventos están asociados a cambios en las condiciones de calidad del agua, a la falta de oxigenación o a floraciones algales tóxicas. En la mayoría de estas muertes masivas están involucradas especies tales como la tilapia africana (*Oreochromis aureus*) y la carpa asiática (*Cyprinus carpio*), ambas consideradas especies exóticas.²¹

Sin embargo, la biodiversidad de peces dulceacuícolas en México es de gran importancia para la ictiología, ya que es muy diversa y con una gran variedad de especies endémicas.²² Por lo anterior, es importante repasar la información base de la biodiversidad de especies acuáticas y que actualmente se encuentran amenazadas por los cambios que han sufrido los ríos del país, incluyendo los impactos negativos de la contaminación.

Para comprender la naturaleza original de los cuerpos de agua superficiales en México, se puede recurrir al registro fósil de la ictiofauna²³ e invertebrados acuáticos, pues permite aproximarnos con mayor claridad respecto a las condiciones

²⁰ Sigala, I., Caballero, M., Correa-Metrio, A., Lozano-García, G., Vazquez, G., Pérez, L., Zawisza, E., *Basic limnology of 30 continental waterbodies of the Transmexican Volcanic Belt across climatic and environmental gradients*, Bol. Soc. Geol. Mex., 2017, pp. 313-370.

²¹ Especie exótica: es una especie que fue introducida en el medio natural, pero evolutivamente no se originó en la región.

²² Especie endémica: especie que tiene su origen y diversidad evolutiva en un lugar o región específica o es propia de una región.

²³ Ictiofauna: grupos de animales que corresponden a peces.

biogeoquímicas²⁴ naturales del sistema fluvial mexicano y que actualmente se encubren debido a la influencia de las actividades humanas tales como la extracción de agua, contaminación o fragmentación por la construcción de presas y diques de los últimos 100 años como veremos más adelante.

Los registros paleozoogeográficos del norte y centro del país muestran un alto endemismo y especiación alopátrica que se puede interpretar como resultado de un sistema de drenado altamente diversificado y fragmentado, causado por la actividad volcánica. Asimismo, como consecuencia de la formación de regiones endorreicas, es decir, regiones donde el agua no tiene salida al mar, los efectos climáticos durante el Pleistoceno tardío causaron la reducción de los escurrimientos y una baja capacidad de erosión de los ríos.²⁵

Caballero y colaboradores (2010)²⁶ describen que el retroceso del último máximo glacial (~25,000 años) afectó los sistemas lacustres del centro-oriente de México. Provocó primero: un mayor aporte de agua dulce a los lagos someros y, segundo: una posterior reducción del nivel lacustre, asociado a condiciones de marcada sequía y la reducción de lluvia invernales. Lo anterior se refuerza con los registros de los suelos ancestrales (paleosuelos) y vegetación terrestre fósil que indica un clima ancestral (paleoclima) cuyas condiciones de humedad hace ~10,700 años permitieron extensas zonas boscosas (árboles de galería y pastizales), y hace ~7,000 años, las condiciones se tornaron más áridas y secas en el centro-norte, persistiendo hasta la actualidad.²⁷

²⁴ Se refiere al estado que guarda un cuerpo de agua en términos de condiciones biológicas, geológicas y químicas. Una manera de entender este concepto es a través de considerar que un cuerpo de agua en estado natural presenta características que le permiten sostener la vida acuática, transformar la materia orgánica, así como las interacciones entre el agua y los sedimentos que favorecen las características particulares.

²⁵ Aranda-Gómez, J., Carranza-Castañeda, *et al.*, (2018), "Notes on the origin of extensive endohreic region in central and northern Mexico, and some implications for paleozoogeography", *Journal of South American Earth Science*, 83 (2018), pp. 55-67.

²⁶ Caballero, M., Lozano-García, S., Vázquez-Selem, L., Ortega, B., "Evidencias de cambio climático y ambiental en registros glaciales y en cuencas lacustres del centro de México durante el último máximo glacial", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 2010, 62(3), pp. 359-377.

²⁷ Pérez-Crespo, Víctor Adrián, *et al.*, "Paleoambiente en cuatro sitios mexicanos del Pleistoceno tardío con actividad humana inferidos a partir de la fauna", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 2019, 71(2), pp. 343-358.

A partir de estas evidencias se puede decir que las condiciones climáticas de México han mantenido una tendencia a la sequía, teniendo impacto en la cantidad de agua que precipita y evapora.

Basado en el registro fósil, es posible reconstruir parte de la biodiversidad original de los principales grupos de peces dulceacuícolas de los ríos y lagos de México que evolucionaron hasta nuestros días. Se tienen registros de 10 localidades de la época del Plioceno que en su mayoría pertenecen a las cuencas hidrológicas más extensas del país (Pánuco, Balsas y Lerma-Chapala-Santiago). Guzmán., (2015)²⁸ reportó la presencia de fósiles de las familias de peces catostómidos, ictalúridos, goodeidos, ciprinodontiformes (Fig. 1).

En el norte, en la cuenca del río Yaqui también este autor ha reportado la presencia de especies de las familias ciprínidos y ciprinodontiformes. En cuanto al periodo del Pleistoceno, se han identificado 20 localidades desde Sonora hasta el río Moctezuma en donde los ciprínidos, catostómidos, poecílidos e ictalúridos son los más abundantes (Fig. 2). Con base en esta información, se puede comprender que la diversidad de peces mexicanos es importante y antes de la introducción de especies exóticas, los ríos del país contaban con una alta diversidad de peces en casi todas las regiones.

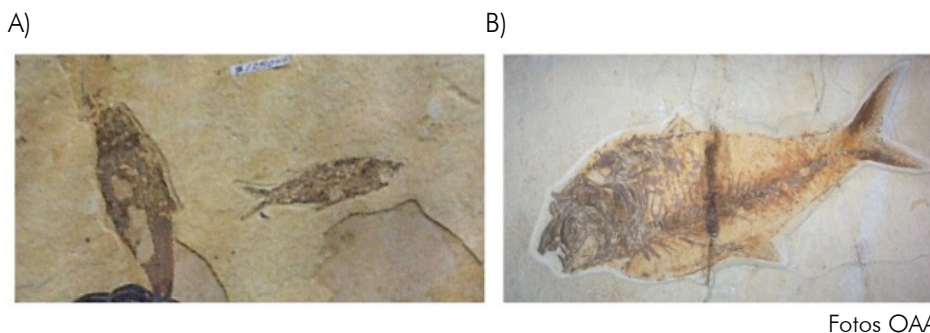


Figura 1. Registro fósil de peces teleósteos impresos en roca caliza. Se nota la forma fusiforme y estructura ósea, así como la bifurcación de la aleta caudal.

²⁸ Guzmán, Ana Fabiola, “El registro fósil de los peces mexicanos de agua dulce”, *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 2015, 86, pp. 661-673.

A) Río Sonora, Sonora



B) Arroyo, Durango



Fotos OAA

Figura 2. Se muestran el río Sonora (A) y un arroyo en Durango (B) como ejemplo del tipo de cuerpos de agua característicos del norte del país. Los ríos del desierto típicamente presentan sedimentos rocosos y arenosos con una alta permeabilidad. Durante la época de estiaje se pierde el espejo de agua y el lecho del cauce queda expuesto. Sin embargo, se mantienen los sedimentos húmedos manteniendo la vida acuática y el bosque ripario.

Además, la reconstrucción de la ictiofauna sugiere rutas migratorias desde las zonas bajas hacia las altas en la cuenca del Pánuco, mientras que basado en el registro de la familia Goodeidae sugiere migraciones desde el occidente hacia el oriente de México, a través del río Lerma y de una conexión antigua entre el río Pánuco y el Lerma. Con lo anterior, se puede constatar que la diversidad de peces se debió a movimientos migratorios entre regiones y que los peces actuales colonizaron las zonas altas de las cuencas, generando la biodiversidad que aún se puede registrar.

Cabe destacar que se han registrado fósiles de las familias de Salmónidos, que solo se distribuye en el noroeste en la cuenca del río Bravo, cuyo registro muestra que su distribución llegaba hasta el lago de Chapala. Dicha especie se encuentra hoy extinta, lo que sugiere que pudieron ocurrir cambios en las condiciones de la calidad de agua en términos de temperatura, oxigenación, transparencia y vegetación riparia hacia finales del Pleistoceno (Guzmán, 2015).

En general, se conoce el grupo de especies de salmones que habita los ríos de Norteamérica en Alaska o Canadá. Sin embargo, es común que se desconozca que en México existieron estas especies y que actualmente solo hay una que nada

más se distribuye en la zona fronteriza del río Bravo. La extinción del grupo de Salmónidos al parecer respondió a cambios climáticos o cambios en la calidad del agua de acuerdo con el registro fósil. No obstante, en la actualidad aún están representadas varias familias de peces dulceacuícolas y es importante conocer sus características generales de hábitat, ya que es un indicativo de las condiciones propicias para su supervivencia (Tabla 2). Asimismo, la presencia de especies nativas en los ríos, aun cuando presenten condiciones de contaminación, permite estimar que las condiciones aún no han comprometido la existencia de los peces originarios de los ríos mexicanos.

Tabla 2
Características de las familias de peces dulceacuícolas ancestrales

Familia	Características generales
Salmonidae	Grupo de peces eurihalinos de agua dulce y de mar, actualmente distribuido en el norte del océano Pacífico y Atlántico. En México aún existen dos especies nativas.
Cyprinidae	Peces teleósteos de agua dulce, aunque algunas especies pueden encontrarse en estuarios. La talla alcanza de 30 a 75 mm de longitud. En México, existen al menos 90 especies.
Catostomidae	Peces dulceacuícolas succionadores ampliamente distribuidos en lagos y arroyos. La forma de boca ventral y extensible con labios gruesos y carnosos es el rasgo más característico.
Ictaluridae	Bagres de agua dulce. Existen cerca de 50 especies distribuidas en Norteamérica. En México hay al menos nueve especies.
Goodeidae	Mexicalpíques o tiros. Son peces dulceacuícolas endémicos con reproducción vivíparas, distribuidas en la Mesa Central y faja Volcánica Transmexicana. Constituye a 40 especies y habitan manantiales, arroyos, lagos y ríos.
Atherinopsidae	Pez con la línea lateral plateada (pescado blanco, charales). Existen al menos 170 especies tanto marinos como dulceacuícolas. Abundante en los lagos de Chapala y Pátzcuaro.

Centrarchidae	Los peces sol son una familia endémica de Norteamérica. Comprende 30 especies distribuidas desde las Rocallosas hasta la Sierra Madre Occidental. El único género distribuido en el norte de México es <i>Lepomis</i> .
Poeciliidae	El grupo más dominante de peces de agua dulce. La característica física más destacada es el gonopodio en machos. El tamaño promedio es de 30 a 70 mm. Ampliamente distribuidos en los cuerpos de agua epicontinentales de México.
Fuente: Miller, Robert R., <i>Freshwater Fishes of México</i> , The University of Chicago Press, 2005.	

A partir de la información antes presentada, podemos reconstruir parte de las condiciones originales del sistema fluvial mexicano, particularmente en las cuencas hidrológicas más extensas en el territorio.

Por un lado, en los últimos siete mil años, los cuerpos de agua superficiales mexicanos experimentaron una contracción debido a un aumento de temperatura y reducción de los periodos de lluvias invernales. El deshielo en las zonas altas permitió que escurrimientos superficiales se mantuvieran, aunque con poca capacidad de erosión, formando cuerpos de agua moderadamente caudalosos, estrechos y someros, que en algunas zonas se extendieron en grandes humedales como ciénegas (p. ej., las Ciénegas del Lerma, la Ciénega de Atoyac, Cuatro Ciénegas, Laguna de Tecocomulco, etc.).

Por otro lado, la diversidad de vegetación riparia (bosque de galería)²⁹ estaba extendida y se combinaba con elementos del bosque subtropical y las zonas áridas. Además, el registro fósil muestra que las principales familias de peces se distribuyeron por gran parte del sistema fluvial y lacustre, lo que sugiere que los ríos tenían pocos obstáculos que imposibilitaran la colonización en las cuencas altas. Sin embargo, a partir de los datos paleolimnológicos es probable que las barreras

²⁹ El bosque ripario se refiere al arbolado y vegetación que crece al margen de los ríos o arroyos. La principal característica es que está compuesto en su mayoría de especies como los ahuehuetes, álamos, sauces, carrizo, etc.

fueran más bien fisiológicas, es decir, que las características biológicas de las especies les impidiera colonizar algunas zonas, y que los cambios en la calidad del agua, derivado de la alcalinidad, salinidad y la presencia de carbonatos fueron factores determinantes. Lo anterior es muy relevante porque muestra que las especies de peces mexicanos en los ríos son sensibles a los cambios en la condición de salinidad, pH y carbonatos en el agua y que se han adaptado a las condiciones naturales propias de los ríos mexicanos.

Actualmente, el sistema fluvial mexicano conserva algunas de las características originales a pesar de la intervención humana y a la contaminación que se ha causado a los ríos del país. Los lagos del altiplano mexicano en su mayoría son someros y aún conservan algunos de los rasgos que debieron existir a la llegada de las primeras migraciones y asentamientos humanos. Por otro lado, los arroyos y ríos que han formado la orografía de las cuencas en México presentaban altos niveles de oxigenación, con arrastre de minerales producto de la erosión de las rocas, siendo sistemas continuos hasta la desembocadura en las costas. Igualmente, en el altiplano los ríos y arroyos alimentaban sistemas poco profundos: ciénegas o pantanos en donde la materia orgánica se acumulaba en sustratos enriquecidos por el depósito de minerales proveniente de la actividad de la Faja Volcánica Transmexicana. Lo anterior, generó suelos fértiles enriquecidos con materia orgánica (Fig. 3).

A) Llano Grande, Michoacán



B) Lago, Durango



C) Lago de Tláhuac-Xico, CDMX



D) Lago de Chapala, Durango



Fotos OAA

Figura 3. Paisajes lacustres representativos de los ecosistemas acuáticos del centro-norte y occidente del país. En general se trata de cuerpos de agua superficiales poco profundos, de origen volcánico y ricos en nutrientes, debido a que son alimentados por múltiples ríos y arroyos que arrastran materia orgánica y sedimentos.

II. Biodiversidad de la vegetación acuática

Actualmente, se cuenta con una alta riqueza y abundancia de especies acuáticas. La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) estima que existen alrededor de 1,000 especies de plantas acuáticas (747 hidrófitas³⁰ y 118 especies de plantas con flor). En su mayoría dominan los tules y zacates de laguna, pastos acuáticos, así como los árboles que constituyen los

³⁰ Hidrófitas: plantas acuáticas.

bosques riparios (Tabla 3). Estos últimos son de gran importancia para reducir la contaminación difusa, así como mantener refugios de fauna y flora asociados a los ecosistemas acuáticos.

Asimismo, se han registrado 500 especies de vertebrados dulceacuícolas, de las cuáles según la CONABIO el 54% son endémicas. Las diez más comunes en ríos y arroyos son: *Poeciliopsis gracilis*, *P. mexicana*, *Astyanax aeneus*, *A. mexicanus*, *Xiphophorus helleri*, *Pseudoxiphophorus bimaculatus*, *Goodea atripinnis*, *Herichthys cyanoguttatus*, *Rhamdia guatemalensis* y *Mayaheros urophthalmus*.³¹

Respecto a la vegetación o flora acuática, los ríos, humedales y cuerpos de agua en general conservan ecosistemas muy particulares, ya que guardan una interacción con ésta, la cual contribuye con la calidad del agua al proveer una buena oxigenación, absorción de nutrientes y mantener las funciones ecológicas que permiten el establecimiento de poblaciones de fauna, así como de reciclaje y ciclaje de nutrientes (Fig. 3).

³¹ SNIB, Ejemplares. Metadatos de bases de datos financiadas, versión 2018-11, Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. México. Disponible en: «<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>» y «<http://www.snib.mx/ejemplares/docs/CONABIO-SNIB-DescripcionMetadatosSNIB.pdf>» [Consultado el 19 de septiembre de 2024].

A) Arroyo Los Azufres, Michoacán



B) Río Yautepec, Morelos



C) Río Zahuapan, Tlaxcala



D) Río Zula, Jalisco



Fotos OAA

Figura 3. Los ríos mexicanos son sistemas fluviales con características de flujo, coloración y vegetación diversa. Predomina la vegetación riparia que constituye el paisaje ribereño en donde habita una biodiversidad importante, asociada a ecosistemas acuáticos. En los últimos años se ha perdido gran parte de la cobertura natural de la vegetación riparia por el desconocimiento de la función ecológica que aporta a la calidad del agua. (A) arroyo en la zona de bosque de encino y oyamel en Michoacán, (B) río Yautepec en Morelos tiene origen de manantiales y escurrimientos naturales de la Sierra del Chichinautzin, (C) el río Zahuapan en Tlaxcala prevalece el bosque de sauce y ahuehuete a pesar de los problemas de contaminación que lo afecta y (D) el río Zula en Jalisco presenta durante la temporada de lluvia un color rojizo por el arrastre de sedimento rico en hierro.

Las especies más comunes presentes en los ríos del país están representadas, por al menos, 16 grandes grupos entre especies arbóreas, arbustivas y las que habitan flotando o sumergidas en los ríos (Tabla 3). Desafortunadamente, en general hay

un rezago respecto al conocimiento para la conservación de los cuerpos de agua a pesar de que hay casi 110 regiones hidrológicas prioritarias.³²

Es frecuente que se omitan los efectos en la vegetación riparia en los estudios de casos de contaminación de ríos. Sin embargo, por ejemplo, en el caso del derrame de sulfato de cobre acidulado en el accidente de la mina de Buenavista del Cobre en 2014, el impacto de la solución ácida sobre la vegetación ribereña y plantas acuáticas fue evidente afectando a 11 especies, así como aquellas que habitan en la planicie de inundación natural del río.³³ En este sentido, la vegetación cobra relevancia al tratarse de organismos presentes a largo plazo que permiten describir procesos pasados de factores de perturbación con el paso del tiempo.

En general, las especies más abundantes en los ríos de manera natural son los juncos, sauces, lentejas de agua, los ahuehuetes, álamos, áiles, entre otros (Tabla 3). Las perturbaciones como la contaminación, la fragmentación por deforestación o la pérdida de las zonas de inundación natural de los ríos por invasión urbana impactan la cobertura de la vegetación riparia y acuática. Con ello se empieza a perder gran parte de la integridad de los ecosistemas, incidiendo también en la calidad del agua.

³² CONABIO-CONAP, *Vacíos y omisiones en conservación de la biodiversidad acuática epicontinental de México: cuerpos de agua, ríos y humedales*, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad y Comisión natural de Áreas Naturales protegidas, 2010, México. Disponible en: «<https://bioteca.biodiversidad.gob.mx/janium-bin/detalle.pl?id=20240918124939>» [Consultado el 18 de septiembre de 2024].

³³ LANCIS 2016, Informe Final. Evidencias de las afectaciones a la integridad funcional de los ecosistemas del Río Bacanuchi y el Río Sonora por el derrame de la mina Buenavista del Cobre: avances del diagnóstico ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México.

Tabla 3. Lista de flora acuática representativa de México

Nombre común	Especie	Nombre común	Especie
Tule	<i>Schoenoplectus americanus</i> , <i>S. californicus</i> , <i>Typha domingensis</i> , <i>T. latifolia</i>	Tepapalacate	<i>Limnobium</i> sp.
Berros	<i>Cardamine</i> sp., <i>Rorippa</i> sp.	Lenteja de agua	<i>Lemna</i> sp., <i>Spirodela</i> sp., <i>Wolffia</i> sp.
Juncos	<i>Pontederia</i> sp., <i>Sparganium</i> sp., <i>Triglochin</i> sp.	Lechuguilla de agua	<i>Pistia</i> sp.
Carricillo	<i>Cyperus</i>	Bejuquillos	<i>Ceratophyllum</i> sp.
Cuchereros	<i>Echinodorus</i>	Azumiate	<i>Baccharis salicifolia</i>
Perritos de agua	<i>Utricularia livida</i>	Toloache	<i>Datura ceratocaula</i>
Cabomba	<i>Cabomba</i> sp.	Escoba de arroyo	<i>Heimia salicifolia</i>
Algodoncillos de los pantanos	<i>Isoetes</i> sp.	Ahuehuate	<i>Taxodium mucronatum</i>
Najas	<i>Najas</i> sp.	Álamos	<i>Populus</i> sp.
Lamas	<i>Potamogeton</i> sp.	Sicomoros	<i>Platanus</i> sp.
Ocoshales	<i>Ruppia</i> sp.	Sauce	<i>Salix</i> sp.
Granzas	<i>Stuckenia</i> sp.	Negundo	<i>Acer negundo</i>
Pastos de agua dulce	<i>Tristicha</i> sp.	Ailes	<i>Alnus</i> sp.
Pastos de cinta	<i>Vallisneria</i> sp.	Amate negro	<i>Ficus cotinifolia</i>
Flotantes nenúfares	<i>Nymphaea</i> sp.	Guatope	<i>Inga vera</i>

Helechos mosquito	<i>Azolla sp.</i>	Plumillo	<i>Schizolobium parahyba</i>
Fuente: CONABIO (https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/ecosismex/rios-y-lagos , Consulta agosto, 2024). ³⁴			

E. Alteraciones ecohidrológicas de ríos y lagos de México

Actualmente, las características morfológicas, biogeoquímicas y la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos epicontinentales³⁵ han sufrido fuertes alteraciones como efecto de las actividades antrópicas tales como la infraestructura hídrica (presas, diques, bordos, canales), la agricultura, la ganadería, la urbanización y la descarga de aguas residuales. La pérdida de la biodiversidad de flora y fauna acuática es solo el síntoma del deterioro causado por múltiples factores antrópicos, sumado a los fenómenos meteorológicos de los últimos 50 años que se han exacerbado debido a los efectos del calentamiento global.

Uno de los pocos estudios de campo que ha documentado la pérdida de las especies de peces nativos, muestra que la reducción ha sido de 63.82%.³⁶ Además, los mismos autores destacan que la pérdida de la biota (y de hábitat) de manera definitiva alcanzó un 15.6%. De acuerdo con Gesundheit y Macías (2006), las principales causas del declive generalizado se explican por los efectos de factores de estrés como la degradación del hábitat, la contaminación, la desecación y la introducción de especies exóticas. Lo mismo se ha reportado en el 50% de los lagos del país, donde además de presentar una disminución del volumen de agua,

³⁴ CONABIO, Ecosistemas de México, Ríos y Lagos, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Disponible en: «<https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/ecosismex/rios-y-lagos>». [Consulta agosto, 2024].

³⁵ Ecosistemas acuáticos epicontinentales: cuerpos de agua que se encuentran en el continente y se distribuyen de las zonas altas a las zonas bajas.

³⁶ Gesundheit, Pablo, Macías García, Constantino, *Distribución de peces dulceacuícolas introducidos en las cuencas del México central, con especial atención a las localidades dentro del área de distribución de los peces endémicos de la familia Goodeidae*, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ecología, Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. CEO14. México D.F., 2007.

también presentan altos niveles de contaminación.³⁷ Todos estos factores tienen un origen antrópico, es decir, son resultado de las actividades de las poblaciones humanas y son determinantes para entender el estado actual y futuro de los cuerpos de agua superficiales y en consecuencia deben ser considerados en cualquier investigación.

Cabe mencionar que está previsto en la Ley de Responsabilidad Ambiental el estudio del “Estado base” que se refiere a la condición en la que se habría hallado los hábitats, los ecosistemas, los elementos y recursos naturales, las relaciones de interacción y los servicios ambientales, en el momento previo inmediato al daño y de no haber sido producido.³⁸ Lo anterior resulta difícil cuando no existen muchos estudios o datos cuantitativos del Estado base de los ríos contaminados en el país, incluso los que son afectados por accidentes industriales o derrames. Por ello resulta importante recurrir a toda la historia natural posible que ayude a comprender la fase de los procesos que dieron origen y mantienen las condiciones ecosistémicas para el sostenimiento de la vida acuática. Al mismo tiempo, comprender que tanto el registro fósil como los inventarios de flora y fauna acuática son de gran valor para determinar el grado de daño ambiental³⁹ que se puede estar produciendo por la incorporación de contaminantes.

Es posible conocer algunos factores determinantes en los ríos que actualmente sufren contaminación severa. Los primeros efectos de deterioro en el sistema fluvial mexicano fueron producto de la construcción de infraestructura hidráulica (p. ej., acueductos, hidroeléctricas, diques y desecación de las ciénegas y humedales) desde el siglo XV y que ha continuado hasta nuestros días.

Los procesos de desecación de los cuerpos de agua superficial tuvieron lugar desde 1607 con el acueducto conocido como Tajo de Nochistongo para drenar el agua de la Ciudad de México, pero hacia finales del siglo XIX se acentuó la política de desecación de humedales debido en gran parte a políticas sanitarias para controlar

³⁷ Franco, Celia *et al.*, “Análisis del impacto de las políticas ambientales en el lago de Cuitzeo (1940-2010)”, *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, UNAM, 2011, 75, pp. 7-22.

³⁸ Ley de Responsabilidad Ambiental, artículo 2.

³⁹ Daño ambiental: pérdida. Cambio, deterioro, menoscabo, afectación o modificación adversos y medibles de los hábitats.

los brotes epidémicos de cólera y dengue que cobraron la vida de 12,647 personas entre 1876 y 1877 (Perló y González, 2006).⁴⁰

Desde el periodo del Porfiriato y hasta la etapa posrevolucionaria, los gobiernos de México impulsaron varias obras hidráulicas que han afectado ecohidrológicamente a los cuerpos de agua superficiales. Además de la infraestructura destinada para desecar lagos y ciénegas en el altiplano, al mismo tiempo se han construido grandes hidroeléctricas para generar electricidad en respuesta a la demanda energética de las zonas industrializadas del último tercio del siglo XX.⁴¹ Actualmente existen al menos 730 centrales hidroeléctricas en 16 estados de la república.⁴² De las consideradas como grandes centrales se contabilizan 12, ubicadas en los estados de Chiapas (4), Michoacán (2), Nayarit (2), Guerrero (1), Oaxaca (1), Jalisco (1) e Hidalgo (1).⁴³

Por otro lado, el impacto de las sequías de los últimos 100 años ha detonado la construcción de presas y bordos como infraestructuras de almacenamiento, fragmentando los ríos y arroyos, así como el entubamiento de manantiales y arroyos. Entre 1900 a 1991 se presentaron al menos 21 eventos de sequía intensa, de los cuales destacan al menos seis, asociados a una ciclicidad de 25, 39, 50, 70 y 117 años, correspondientes con el fenómeno de El Niño y la actividad solar que han afectado particularmente el oeste de México.⁴⁴ Dichas anomalías también se

⁴⁰ Perló, Manuel y González Reynoso, Arsenio Ernesto, “Del agua amenazante al agua amenazada. Cambios en las representaciones sociales de los problemas del agua en el Valle de México”, capítulo 2 pp. 47-64, en Urbina Soria, Javier y Martínez Fernández, Julia (comp.), *Más allá del cambio climático: Las dimensiones psicosociales del cambio ambiental global*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Psicología, 2006, pp. 11-283.

⁴¹ García, Calderón, José Luis y de la Lanza, Guadalupe, “Las aguas epicontinentales de México”, en de la Lanza, Guadalupe y García Calderón, José Luis (comps.), *Lagos y presas de México*, AGT Editor, México, 2002.

⁴² SENER, *Datos sobre el parque de generación hidroeléctrica en México*, Secretaría de Energía, Presidencia de la República EPN, 27 de marzo de 2014. Disponible en: «<https://www.gob.mx/epn/articulos/datos-sobre-el-parque-de-generacion-hidroelectrico-en-mexico>» [Consultado el 18 de septiembre de 2024].

⁴³ Palacios, Ana Alicia *et al.*, “Energía hidroeléctrica de pequeña escala social y ambientalmente sustentable”, capítulo 2.5, pp. 421-451, en Ferrari, Luca *et al.* (coords.), *Transición energética justa y sustentable*, Colección Ciencias y Humanidades para México, CONAHCYT, 2024, pp. 9-796.

⁴⁴ Sosa-Nájera, Susana *et al.*, “Registros de sequías históricas en el occidente de México con base en análisis elemental de sedimentos lacustres: el caso del lago de San María del oro”, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 2010, 62(3), pp. 437-451.

presentan en periodicidades de 22, 24, 32, 39 y 89 años en el centro de México y de 24 a 27, 39 y 50 años en la península de Yucatán.⁴⁵ y ⁴⁶ Estos periodos de sequía han impactado económicamente y, entre 1910 y 1977, los estados más afectados han sido Coahuila, Nuevo León, Chihuahua, Sonora y Tamaulipas (Florescano *et al.*, 1980). Destaca el año de 1977 como el más seco de los últimos 100 años y que afectó dramáticamente los estados de Oaxaca, Guerrero, Veracruz, Chiapas, Tabasco, Sinaloa, Sonora y la región del altiplano, es decir, casi todo el país.⁴⁷ En las últimas décadas, las sequías con eventos extremos han ido en aumento, siendo 2007, 2012, 2021 y 2024 los años más secos.⁴⁸

Estos periodos de sequía extrema han detonado en los gobiernos y comunidades la construcción de presas, bordos, aljibes e infraestructura para asegurar la disponibilidad de agua y mitigar los efectos de la reducción de la precipitación. Actualmente, existen 6,500 presas y bordos de almacenamiento (Fig. 2), más de 3,000 km de acueductos y 363,749 concesiones de extracción de agua subterránea, así como el entubamiento de 155,892 manantiales y escurrimientos de arroyos y pequeños ríos (CONAGUA, 2023;⁴⁹ IMTA 2024).⁵⁰ Como resultado, la infraestructura hidráulica es la principal causa de la pérdida de la conectividad de los flujos de agua, ciénegas y escorrentías de las zonas altas de las cuencas, así como la reducción y pérdida de la cobertura de los bosques riparios y vegetación acuática. El deterioro y pérdida ecohidrológica de los ríos y lagos de México es notable y hasta el momento no parece que se revierta a mediano plazo.

⁴⁵ Mendoza, Blanca *et al.*, "Historical droughts in Central Mexico and their relation with El Niño", *Journal of Applied Meteorology*, 2005, 44, pp. 709-716.

⁴⁶ Hodell, David A. *et al.*, "Climate change on Yucatán Peninsula during the Little ice Age", *Quaternary Research*, 2005, 63, pp. 109-121.

⁴⁷ Florescano, Enrique *et al.*, "Las sequías en México: historia, características y efectos", *Comercio Exterior*, 1980, 30(7), pp. 747-757.

⁴⁸ MSM, Monitor de Sequía en México, 2024. Disponible en: «<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>» [Consultado el 18 de septiembre de 2024].

⁴⁹ CONAGUA, Estadísticas del Agua en México 2023, Comisión Nacional del Agua, SEMARNAT. Disponible en: «https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/port_publicaciones.html» [Consultado el 18 de septiembre de 2024].

⁵⁰ IMTA (2024), De pozos, norias, aljibes y otros aprovechamientos de agua (3 de agosto de 2021), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Gobierno de México. Disponible en: «<https://www.gob.mx/imta/es/articulos/de-pozos-norias-aljibes-y-otros-aprovechamientos-de-agua>» [Consultado el 18 de septiembre de 2024].

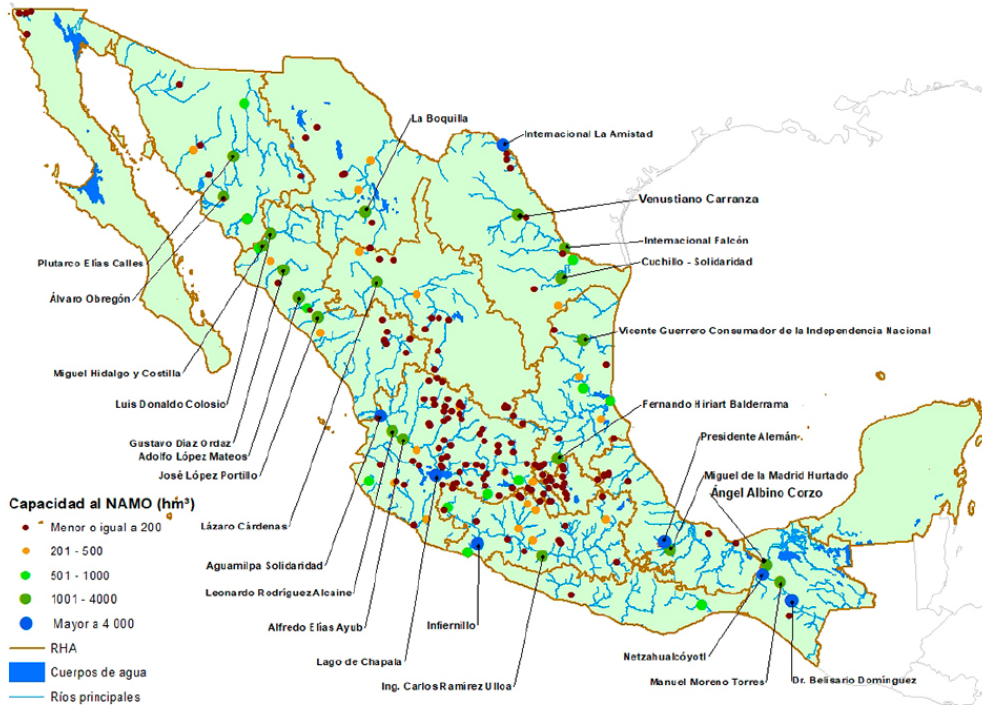


Figura 2. Principales presas del país, etiquetadas las que cuentan con una capacidad de almacenamiento de 1,000 hm³. Fuente. CONAGUA (2023).

F. Pérdida de la calidad del agua por contaminación

Si bien la contaminación de los cuerpos de agua ha sido un aspecto de importancia sanitaria por las enfermedades que provoca, la respuesta inicial fue entubar y expulsar las aguas residuales de los centros urbanos, y posteriormente instalar plantas de tratamiento para eliminar materia orgánica, nutrientes y reducir la exposición a patógenos.

Actualmente, el país cuenta con una capacidad de tratamiento de aguas residuales municipales de 149.76 m³/s (con 2,774 plantas) y para aguas residuales de tipo industrial de 58.11 m³/s (con 3,809 plantas; CONAGUA 2023). Cabe hacer notar

que el reporte de la CONAGUA (2023) muestra que existe un menor caudal tratado de aguas residuales industriales que municipales, aunque las industrias reportan 1,000 plantas más que las de los centros urbanos. Desde 2011, la CONAGUA reconoció que el 73% del sistema acuático se encuentra contaminado debido a que el 62.9% de las aguas residuales municipales y el 80.7% de las industriales se vierten directamente sin ningún tipo de tratamiento a los sistemas acuáticos en el país.⁵¹

Lo anterior se ha convertido en una crisis hídrica y sanitaria en el primer cuarto del siglo XXI. Los niveles de contaminación han eliminado las características físico-químicas originales de los principales ríos del país, y en las regiones más densamente pobladas y con la presencia de clúster industriales, los vertimientos de aguas residuales han alterado profundamente la integridad de los ecosistemas.

En los últimos 25 años, los ríos del país han experimentado una reducción generalizada de oxígeno disuelto,⁵² un incremento en la materia orgánica, nutrientes (nitrógeno y fósforo), contaminantes inorgánicos, compuestos clorados, patógenos (*i.e.* coliformes fecales, protozoarios, virus), hidrocarburos, metales pesados, agroquímicos, fármacos, microplásticos, etc.^{53, 54, 55, 56, 57 y 58} El cóctel de sustancias químicas tóxicas en ríos, arroyos y embalses es un problema prevalente a

⁵¹ Mendoza Cariño, Mayra *et al.*, “Estado ecológico de ríos y vegetación ribereña en el contexto de la nueva Ley General de Aguas de México”, *Revista internacional de contaminación ambiental*, 2014, 30(4), pp. 429-436.

⁵² Oxígeno disuelto: es la concentración de las moléculas libres de oxígeno en el agua. Se expresa en miligramos por litro.

⁵³ Sedeño-Díaz, Jacinto Elías *et al.*, “Water quality in the Río Lerma, México: an overview of the last quarter of the twentieth century”, *Water Resource Management*, 2007, 21, pp. 1797-1812.

⁵⁴ Arellano-Aguilar Omar *et al.*, “Use of the zebrafish embryo toxicity test for risk assessment purpose: case study”, *Fisheries Science*, 2015, 9 (4), pp. 52-62.

⁵⁵ Arellano-Aguilar Omar *et al.*, “Agrochemical loading in drains and rivers and its connection with pollution in coastal lagoons of the Mexican Pacific”, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, pp. 189-270.

⁵⁶ López-Vargas Rocío *et al.*, “Oxidative stress index increased in children exposed to industrial discharges and is inversely correlated with metabolite excretion of VOC”, *Environmental. Molecular. Mutagenesis*, 2018, 50, pp. 639-652.

⁵⁷ Chakraborti, Lopamudra y Shmichack P. Jay, “Environmental disparities in urban Mexico: evidence from toxic water pollution”, *Resource and Energy Economic*, 2022, 67, pp. 101-281.

⁵⁸ Espira, Leon, M. *et al.*, “A comparative analysis of regional infection risk due to wastewater recontamination in the Mezquital Valley”, *Science of the Total Environment*, México, 2024, 919: 170615.

pesar de que existen normas ambientales mexicanas que regulan los límites permisivos de contaminantes en aguas residuales.

La situación de emergencia está reconocida desde 2021 por el gobierno mexicano, que identificó como regiones de emergencia sanitaria y ambiental (comúnmente conocidos como “Infiernos Ambientales”) en las principales cuencas hidrológicas del país: alto río Santiago (Jalisco), cuenca Independencia (Guanajuato), río Tula (Hidalgo y Estado de México), río Atoyac (Tlaxcala y Puebla), acuífero Libres Oriental (Puebla), río Coatzacoalcos (Veracruz), río Lerma (Estado de México, Guanajuato, Michoacán y Jalisco).⁵⁹

El deterioro ambiental ha desencadenado conflictos socioambientales entre las comunidades y poblaciones ribereñas que ven la pérdida no solo de la salud, sino de sus modos de vida. Lo anterior ha motivado denuncia ante tribunales e instancias nacionales e internacionales tales como la Comisión Nacional de Derechos Humanos, la Suprema Corte de Justicia de la Nación, el Tribunal Latinoamericano del Agua, el Tribunal Permanente de los Pueblos, la Comisión Interamericana de Derechos Humanos, así como se ha recurrido a los Relatores Especiales de las Naciones Unidas y Grupos Parlamentarios de la Unión Europea para poner de manifiesto que la situación es cada vez más grave.

Lo anterior es una situación urgente que requiere implementar medidas en las que se estandaricen metodologías de inspección más robustas, nuevos instrumentos de regulación y sanción, incrementar las capacidades técnico-analíticas de monitoreo y vigilancia ambiental, así como nuevos criterios que permitan atender y revertir los daños ecológicos, causados en los ríos del país. Todo lo anterior como se verá en los próximos capítulos, permite contar con herramientas y metodologías indispensables para realizar diagnósticos ambientales robustos, a partir de los cuales se generen las acciones de restauración ambiental que puedan ser validadas y monitoreadas a mediano y largo plazo.

⁵⁹ SEMARNAT, 2021, Convenio marco entre Conahcyt y las secretarías de Salud y de Medio Ambiente y Recursos Naturales RR13738/22. Disponible en: «<https://conahcyt.mx/el-conahcyt-la-secretaria-de-salud-y-la-semarnat-suscriben-convenio-en-favor-de-la-salud-y-el-equilibrio-ecologico/>» [Consultado el 18 de septiembre de 2024].

Conclusión

La contaminación y degradación ambiental de los ríos del país se ha atendido históricamente desde la perspectiva del saneamiento y recuperación de la calidad del agua, cumpliendo las normas ambientales como acciones mínimas. Sin embargo, el reto está en que para revertir los daños ambientales en el sistema fluvial mexicano es necesario comprender la naturaleza y características originales, identificar las causas de fondo y los factores de estrés que al interactuar precipitan los procesos de deterioro ecohidrológico.

Los principales factores que han colapsado los ecosistemas acuáticos de los ríos en México son la interrupción de los flujos naturales de agua, mediante presas y diques, la extracción de agua y desecación de arroyos y manantiales, así como las intervenciones hidráulicas, revistiendo de concreto el cauce o alterando la morfología natural. Sobre esta destrucción paulatina de las características físicas, las descargas de aguas residuales con contaminantes han precipitado el colapso ecológico del sistema fluvial.

Para poder prevenir, mitigar o revertir los daños ocasionados se requiere de una comprensión amplia sobre los ríos como sistemas ecológicos complejos en donde no solamente importa el volumen de agua o la calidad de ésta, las interacciones ecológicas que se han establecido por cientos de años han dado como resultado las características para el mantenimiento de la vida acuática. En los próximos capítulos se ampliará información y metodologías que se pueden aplicar en el estudio, conocimiento y monitoreo de estos sistemas.

Bibliografía

- Aranda-Gómez José Jorge *et al.*, “Notes on the origin of extensive endorheic region in central and northern Mexico, and some implications for paleozoogeography”, *Journal of South American Earth Science*, 2018, 83, pp. 55-67.
- Arellano-Aguilar Omar *et al.*, “Use of the zebrafish embryo toxicity test for risk assessment purpose: case study”, *Fisheries Science*, 2015, 9 (4), pp. 52-62.

- Arellano-Aguilar, Rodolfo Omar *et al.*, “Agrochemical loading in drains and rivers and its connection with pollution in coastal lagoons of the Mexican Pacific”, *Environmental Monitoring and Assessment* (2017), pp. 189-270.
- Arellano-Aguilar, Rodolfo Omar *et al.*, “Use of the zebrafish embryo toxicity test for risk assessment purpose: case study”, *Fisheries Science*, 2015, 9 (4), pp. 52-62.
- Caballero M., Lozano-García S., Vázquez-Selem L., Ortega B., “Evidencias de cambio climático y ambiental en registros glaciales y en cuencas lacustres del centro de México durante el último máximo glacial”, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 2010, 62(3), pp. 359-377.
- Chakraborti, Lopamudra *et al.*, “Environmental disparities in urban Mexico: evidence from toxic water pollution”, *Resource and Energy Economic*, 2022, 67(2022), pp. 101-281.
- CIDH, OEA, Resolución 7/2020 Medida Cautelar No. 708-19 Pobladores de las Zonas Aledañas al río Santiago respecto de México, Comisión Interamericana de Derechos Humanos, Organización de los Estados Americanos, 5 de febrero de 2020.
- CNDH, Alamán, Rafael Pacchiano *et al.*, Recomendación No. 10 /2017 Sobre la Violación a los Derechos Humanos a un medio ambiente sano, saneamiento del agua y acceso a la información, en relación con la Contaminación de los Ríos Atoyac, Xochiac y sus afluentes; en agravio de quienes habitan y transitan en los Municipios de San Martín Texmelucan y Huejotzingo, en el Estado de Puebla; y en los Municipios de Tepetitla de Lardizábal, Nativitas e Ixtacuixtla de Mariano Matamoros, en el Estado de Tlaxcala, Comisión Nacional de Derechos Humanos, 21 de marzo de 2017.
- CONABIO, Ecosistemas de México, Ríos y Lagos, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Disponible en: «<https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/ecosismex/rios-y-lagos>» [Consulta agosto, 2024].

CONABIO-CONAP, Vacíos y omisiones en conservación de la biodiversidad acuática epicontinental de México: cuerpos de agua, ríos y humedales, 2010. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad y Comisión natural de Áreas Naturales protegidas, México. Disponible en: «<https://bioteca.biodiversidad.gob.mx/janium-bin/detalle.pl?Id=20240918124939>» [Consultado el 18 de septiembre de 2024].

CONAGUA, Estadísticas del Agua en México 2023, Comisión Nacional del Agua, SEMARNAT. Disponible en: «https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/port_publicaciones.html» [Consultado el 18 de septiembre de 2024].

CONAHCYT, Primer Informe Estratégico. Cuenca del Alto Atoyac (Tlaxcala y Puebla). Versión octubre de 2023, Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, Gobierno de México. Disponible en: «<https://cdn.conahcyt.mx/enis/toxicologia/resa-atoyac/inicio/descargables/informe-caa.pdf>» [Consultado el 18 de septiembre de 2024].

Espira, Leon M. *et al.*, A comparative analysis of regional infection risk due to wastewater recontamination in the Mezquital Valley, Mexico. *Science of the Total Environment*, 2024, 919: 170615.

Florescano, Enrique *et al.*, “Las sequías en México: historia, características y efectos”, *Comercio Exterior*, 1980, 30(7), pp. 747-757.

Franco, Celia *et al.*, “Análisis del impacto de las políticas ambientales en el lago de Cuitzeo (1940-2010)”, *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, UNAM, 2011, 75, pp. 7-22.

García, Enriqueta, “Diversidad climático vegetal en México”, en Llorente, Jorge, García, Alfonso y González, Enrique (eds.), *Biodiversidad, taxonomía y biogeografía de artrópodos de México*, Universidad Nacional Autónoma de México, 1996.

García, Calderón, José Luis y de la Lanza, Guadalupe, “Las aguas epicontinentales de México”, en De la lanza, Guadalupe y García Calderón, José Luis (comps.), *Lagos y Presas de México*, AGT Editor, México, 2002.

- Gesundheit, P., Macías García, C., Distribución de peces dulceacuícolas introducidos en las cuencas del México central, con especial atención a las localidades dentro del área de distribución de los peces endémicos de la familia Goodeidae, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ecología. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. CEO14, México D.F., 2007.
- Góngora Pimentel Genaro, “Tesis y jurisprudencia en materia de aguas”, Instituto de Investigaciones Jurídicas de la UNAM. Disponible en: «<https://archivos.juridicas.unam.mx/www/bjv/libros/6/2598/7.pdf>» [Consultado el 18 de septiembre de 2024].
- Guzmán, Ana Fabiola, “El registro fósil de los peces mexicanos de agua dulce”, *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 2015, 86, pp. 661-673.
- Hodell, David A., *et al.*, “Climate change on Yucatán Peninsula during the Little ice Age”, *Quaternary Research*, 2005, 63, pp. 109-121.
- IMTA (2024), De pozos, norias, aljibes y otros aprovechamientos de agua (3 de agosto de 2021), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Gobierno de México. Disponible en: «<https://www.gob.mx/imta/es/articulos/de-pozos-norias-aljibes-y-otros-aprovechamientos-de-agua>» [Consultado el 18 de septiembre de 2024]
- LANCIS 2016. Informe Final. Evidencias de las afectaciones a la integridad funcional de los ecosistemas del Río Bacanuchi y el Río Sonora por el derrame de la mina Buena vista del Cobre: avances del diagnóstico ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Ecosistemas acuáticos epicontinentales: cuerpos de agua que se encuentran en el continente y se distribuyen de las zonas altas a las zonas bajas.
- López-Vargas Rocío *et al.*, “Oxidative stress index increased in children exposed to industrial discharges and is inversely correlated with metabolite excretion of VOC”, *Environmental and Molecular. Mutagenesis*, 2018, 50, pp. 639-652.

- Mendoza Cariño, Mayra *et al.*, “Estado ecológico de ríos y vegetación ribereña en el contexto de la nueva Ley General de Aguas de México”, *Revista internacional de contaminación ambiental*, 2014, 30(4), pp. 429-436.
- Mendoza, Blanca *et al.*, “Historical droughts in Central Mexico and their relation with El Niño”, *Journal of Applied Meteorology*, 2005, 44, pp. 709-716.
- Miller, Robert Rush, *Freshwater fish of Mexico*, 2005, The University of Chicago Press.
- MSM, Monitor de Sequía en México, 2024. Disponible en: «<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>» [Consultado el 18 de septiembre de 2024].
- Palacios, Ana Alicia *et al.*, “Energía hidroeléctrica de pequeña escala social y ambientalmente sustentable”, Capítulo 2.5, pp. 421-451, en Ferrari, Luca *et al.* (coords.), *Transición energética justa y sustentable*, Colección Ciencias y Humanidades para México, CONAHCYT, 2024, pp. 9-796.
- Pérez-Crespo, Víctor Adrián *et al.*, “Paleoambiente en cuatro sitios mexicanos del Pleistoceno tardío con actividad humana inferidos a partir de la fauna”, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 2019, 71(2), pp. 343-358.
- Perló, Manuel y González Reynoso, Arsenio Ernesto, “Del agua amenazante al agua amenazada. Cambios en las representaciones sociales de los problemas del agua en el Valle de México”, Capítulo 2, pp. 47-64, en Urbina Soria Javier y Martínez Fernández Julia (comp.), *Más allá del cambio climático: Las dimensiones psicosociales del cambio ambiental global*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Psicología, 2006, pp. 11-283.
- Primera Sala, Derecho humano al agua. Contenido y alcance de las obligaciones generales del Estado Mexicano en Materia de este Derecho, *Gaceta del Semanario Judicial de la Federación*, Libro 26, Tomo IV, junio de 2023, pp. 3562.

PROFEPA, Ley de Aguas Nacionales, artículo 3, *Diario Oficial de la Federación* de 8 de mayo de 2023.

Sedeño-Díaz, Jacinto Elías *et al.*, “Water quality in the Río Lerma, México: an overview of the last quarter of the twentieth century”, *Water Resource Management*, 2007, 21, pp. 1797-1812.

SEMARNAT, 2021, Convenio marco entre Conahcyt y las secretarías de Salud y de Medio Ambiente y Recursos Naturales RR13738/22. Disponible en: «<https://conahcyt.mx/el-conacyt-la-secretaria-de-salud-y-la-semarnat-suscriben-convenio-en-favor-de-la-salud-y-el-equilibrio-ecologico/>» [Consultado el 18 de septiembre de 2024].

SEMARNAT, Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, artículo 3o., *Diario Oficial de la Federación* 1 de abril de 2024.

SENER, Datos sobre el parque de generación hidroeléctrica en México, Secretaría de Energía, Presidencia de la República EPN, 27 de marzo de 2014. Disponible en: «<https://www.gob.mx/epn/articulos/datos-sobre-el-parque-de-generacion-hidroelectrico-en-mexico>» [Consultado el 18 de septiembre de 2024].

Sigala, Itzel *et al.*, “Basic limnology of 30 continental waterbodies of the Trans-mexican Volcanic Belt across climatic and environmental gradients”, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 2017, pp. 313-370.

Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB) - Ejemplares. Metadatos de bases de datos financiadas, versión 2018-11. México. Disponible en: «<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>» y «<http://www.snib.mx/ejemplares/docs/CONABIO-SNIB-DescripcionMetadatosSNIB.pdf>».

SNIB, Ejemplares, Metadatos de bases de datos financiadas, versión 2018-11, Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. México. Disponible en: «<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>» y «<http://www.snib.mx>».

mx/ejemplares/docs/CONABIO-SNIB-DescripcionMetadatosSNIB.pdf»
[Consultado el 19 de septiembre de 2024].

Sosa-Nájera, Susana *et al.*, “Registros de sequías históricas en el occidente de México con base en análisis elemental de sedimentos lacustres: el caso del lago de San María del oro”, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 2010, 62(3), pp. 437-451.

Velázquez Aguirre, L. y Ordaz Ayala, A., *Provincias hidrogeológicas de México*, Ingeniería Hidráulica en México, 1992, pp. 36-55.

Capítulo

1. Pruebas técnico-científicas para el diagnóstico y evaluación de cuerpos de agua superficiales



Capítulo 1. Pruebas técnico-científicas para el diagnóstico y evaluación de cuerpos de agua superficiales. A. Monitoreo ambiental: programa de monitoreo de la calidad del agua. B. Fuentes y destino ambiental del aporte de contaminantes a los cuerpos de agua. I. Fuentes de contaminantes. II. Destino ambiental de contaminantes en los sistemas acuáticos. III. Efectos tóxicos en los organismos acuáticos y procesos ecológicos afectados. C. Redes de monitoreo. I. Localización de los sitios de muestreo. II. Frecuencia y recurrencia del muestreo. III. Parámetros ambientales sujetos a monitoreo. IV. Herramientas operativas para el monitoreo. Conclusiones. Bibliografía.

En el marco del diagnóstico ambiental de los sistemas acuáticos, este capítulo aborda la evaluación de la calidad de los sistemas acuáticos superficiales a través de la implementación de Programas de Monitoreo de Calidad de Agua (PMCA), los cuales aportan herramientas sustantivas para la seguridad hídrica y la gestión de los recursos hídricos. Se definen los criterios, aspectos y actividades centrales para la planeación y programación secuencial del PMCA, a partir de la formulación del problema ambiental hídrico con la participación de los actores involucrados.

Como etapas centrales para la implementación del PMCA, se describen las fuentes de los contaminantes a los cuerpos de agua por las actividades antrópicas, así como sus destinos ambientales en las matrices receptoras (columna de agua, sedimentos y biota), los efectos tóxicos ocasionados en los organismos acuáticos y, en consecuencia, en los procesos ecológicos afectados, así como su implicación a la salud humana.

Para la operación del PMCA, se describen las características relevantes a ser consideradas en las redes de monitoreo y se aborda la integración de los parámetros e indicadores ambientales centrales a ser analizados. Finalmente, se aportan herramientas operativas encaminadas a garantizar controles de calidad del monitoreo ambiental y los procesos de análisis subsecuentes que sustenten un diagnóstico ambiental robusto para la gestión de los recursos hídricos.

A. Monitoreo ambiental: programa de monitoreo de la calidad del agua

La sostenibilidad del agua requiere una visión de sistemas, en donde se conozcan y se entiendan las interacciones entre los elementos que participan (aspectos ecológicos, sociales, políticos y económicos del uso del agua), los cuales deben ser integrados en los diagnósticos ambientales de los ecosistemas acuáticos. El diagnóstico ambiental es un método sistemático y científico que evalúa los impactos negativos del hombre en el ambiente y a la salud humana, en un área determinada, con el propósito de identificar y valorar la magnitud e incidencia de los problemas para proponer soluciones encaminadas a evitar y/o mitigar los daños a través de estrategias de regulación y/o prohibición de las fuerzas de presión negativas, encaminadas al manejo, recuperación y/o conservación del ambiente. A su vez, la gestión ambiental se enfoca en implementar estas soluciones a través de diversos mecanismos de acción por los tomadores de decisión. De tal manera, el diagnóstico ambiental es un paso previo y genera la base para la gestión ambiental, donde un diagnóstico ambiental preciso es fundamental para implementar estrategias efectivas. Estos estudios deben enmarcarse e integrarse en estudios de la evaluación del riesgo (ecológica y a la salud humana) por los contaminantes en los sistemas acuáticos.

Uno de los retos centrales es la evaluación adecuada de la calidad del agua superficial de los cuerpos de agua epicontinentales (ríos y lagos) a través de Programas de Monitoreo de Calidad del Agua (PMCA; WQMPs por sus siglas en inglés) a fin de que los tomadores de decisiones puedan entender, interpretar y utilizar la información generada para establecer los criterios adecuados que sustenten sus múltiples usos, sea para consumo humano, recreacional, industrial, agrícola, función ecológica o bien para su recuperación.⁶⁰

El monitoreo de la calidad del agua es un proceso complejo dada la multiplicidad de factores a ser considerados en la planeación, la medición estandarizada y el seguimiento a largo plazo del sistema acuático para establecer el estatus, la mag-

⁶⁰ Behmel, Sonja *et al.*, "Water quality monitoring strategies – A review and future perspectives", *Science of the Total Environment*, 2016, 571, pp. 1312-1329.

nidad de los problemas hídricos y las tendencias en los cambios de su calidad. Ello involucra a su vez las presiones e impactos que se ejercen sobre el ecosistema acuático y sus implicaciones a la salud humana. El monitoreo, implica la vigilancia y evaluación espacio-temporal de múltiples parámetros ambientales en las diferentes matrices ambientales que interactúan e inciden en los cuerpos de agua (i.e. suelo, atmósfera, agua, sedimentos) siguiendo protocolos estandarizados y con el conocimiento de las normativas ambientales relacionadas en materia hídrica. Esta evaluación es esencial para la toma de decisiones en lo ámbitos local, regional, nacional e incluso transfronterizo para lograr el cumplimiento de los objetivos establecidos en el programa de monitoreo e, incluso, los alcances establecidos en la agenda 2023 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, suscritos por México (DOS, ODS, por sus siglas en inglés).^{61, 62 y 63}

La evaluación del monitoreo de la calidad del agua aborda aspectos hidrológicos, morfológicos, fisicoquímicos, químicos, biológicos y microbiológicos en relación con condiciones de referencia, así como el impacto al ecosistema y a la salud humana o bien, a acciones dirigidas y planeadas (i.e. consumo humano, uso agrícola, industrial). En este contexto, es fundamental el conocimiento previo de las diferencias geológicas, fisiográficas, climatológicas y otras particulares de la zona bajo estudio (i.e. accesibilidad a los sitios de muestreo).

Para la planeación y establecimiento de un PMCA se requieren considerar diversos aspectos centrales (Figura 1):^{64, 65, 66 y 67}

⁶¹ NU, Naciones Unidas. Disponible en: «<https://www.un.org/es/common-agenda/sustainable-development-goals>» [Consultado el 25 de agosto de 2024].

⁶² UNECE (United Nations Economic Commission for Europe), *Updated Strategies for Monitoring and Assessment of Transboundary Rivers, Lakes and Groundwaters*, 2023, pp. 70.

⁶³ Bartram, Jaime y Balance, Richard (eds.), *Water Quality Monitoring: A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes*, 1996, pp. 383.

⁶⁴ Behmel, Sonja et al., "Water quality monitoring strategies – A review and future perspectives", *Science of the Total Environment*, 2016, 571, pp. 1312-1329.

⁶⁵ Strobl, Robert O., y Robillard, Paul D., "A water quality monitoring network design methodology for the selection of critical sampling points: Part II", *Environmental Monitoring Assessment*, 2006a, 122, pp. 319-334.

⁶⁶ Strobl, Robert O. et al., "A water quality monitoring network design methodology for the selection of critical sampling points: Part I", *Environmental Monitoring Assessment*, 2006b, 112, pp. 137-158.

⁶⁷ Strobl, Robert O., y Robillard, Paul D., "Network design for water quality monitoring of surface waters: A review", *Journal of Environmental Management*, 2008, 87, pp. 639-648.

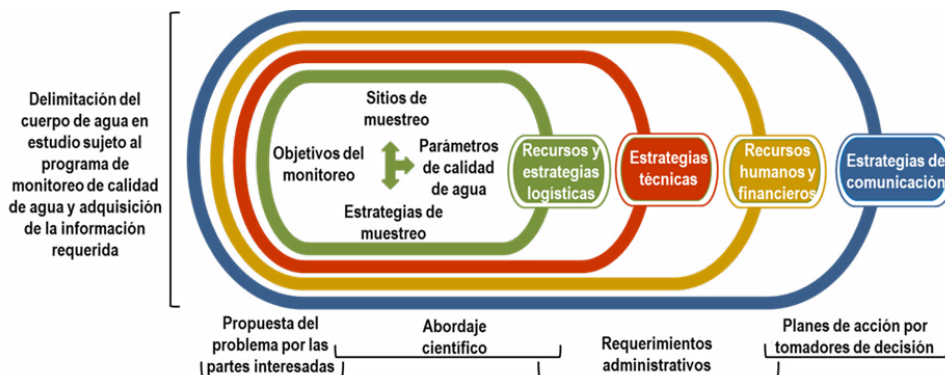


Figura 1. Diagrama de los procesos a considerar para la planeación, optimización y manejo de un programa de monitoreo de calidad de agua (PMCA; WQMP, por sus siglas en inglés).⁶⁸

1. La definición de los objetivos del monitoreo con la participación de los diversos actores involucrados (*i.e.* sociedad civil, academia, gobierno, industria), lo cual involucra a su vez el planteamiento del problema a ser abordado.
2. El establecimiento de una red de monitoreo que integre sitios representativos del impacto de variables críticas (*i.e.* fuente, descarga y destino de contaminantes).
3. La selección de los parámetros de la cantidad y calidad de agua en medición, de acuerdo con los objetivos planteados (*i.e.* parámetros hidrológicos, fisicoquímicos, contaminantes).
4. La integración de herramientas para la evaluación de los efectos biológicos y/o al ecosistema (*i.e.* evaluación de la toxicidad a través de bioensayos, biomarcadores de la exposición y del efecto biológico de los contaminantes).
5. Las variaciones espaciales y temporales (frecuencia) de los parámetros en medición.
6. La valoración de los recursos humanos, técnicos y financieros necesarios.

⁶⁸ Behmel, Sonja *et al.*, "Water quality monitoring strategies – A review and future perspectives", *Science of the Total Environment*, 2016, 571, pp. 1312-1329.

7. El establecimiento de los requerimientos y la logística requerida (i.e. trabajo de campo y laboratorio, equipos de monitoreo, capacidades analíticas, protocolos estandarizados de operación, manejo y análisis de datos, etc.)
8. La integración y evaluación de la información generada.
9. La comunicación y difusión de los resultados obtenidos.
10. Las acciones por los tomadores de decisión siguiendo los lineamientos y/o las normativas ambientales.

Es de resaltar que, en los sistemas acuáticos, los sedimentos constituyen una matriz de depósito, reserva y exportación de contaminantes a la columna de agua por la resuspensión de sedimentos a través de procesos naturales o antrópicos, lo cual a su vez ocasiona efectos tóxicos a la biota acuática.^{69 y 70}

Esta matriz ambiental, usualmente no es considerada en los PMCA, si bien, en los sistemas acuáticos impactados por contaminantes resulta indispensable su evaluación para un acertado análisis de la calidad del agua en los cuerpos de agua. De tal manera, en la planeación y establecimiento de un programa de monitoreo de la calidad del agua, es indispensable tener en consideración la incidencia tanto a las diferentes normativas ambientales en materia hídrica y los estándares en los ámbitos nacional e internacional establecidos de la calidad de agua para sus múltiples usos, como los criterios establecidos de la calidad de los sedimentos (CSQG, *Sediment Quality Guidelines for the Protection of the Aquatic Life*) y los criterios establecidos de la calidad de agua para la vida acuática (CWQC *Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*).^{71 y 72}

⁶⁹ Ortiz-Ordoñez, Esperanza *et al.*, “Liver histological changes and lipid peroxidation in the amphibian *Ambystoma mexicanum* induced by sediment elutriates from the Lake Xochimilco”, *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 46, pp. 156-164.

⁷⁰ Ke, Xin *et al.*, “Toxicity identification of sediments in Liaohe river”, *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 93, pp. 259-265.

⁷¹ CWQG, *Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*, Canadian Council of Ministers of the Environment, CCME, Canadá. Disponible en: «<https://ccme.ca/en/current-activities/canadian-environmental-quality-guidelines>» [Consultado el 21 de agosto de 2024].

⁷² CSQG, *Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*, Canadian Council of Ministers of the Environment, CCME, Canadá. Disponible en: «<https://ccme.ca/en/current-activities/canadian-environmental-quality-guidelines>» [Consultado el 20 de agosto de 2024].

En este contexto, los diversos aspectos señalados definen a su vez las particularidades de la estrategia del plan de monitoreo a implementarse.

La planeación, implementación y ejecución de un programa de monitoreo de la calidad de agua (PMCA) en cuerpos de agua epicontinentales, integra diversas actividades, interrelacionadas, las cuales deben establecerse de manera secuencial (Tabla 1).⁷³

Tabla 1.
Aspectos y/o actividades a considerar en la programación secuencial
de un programa de monitoreo de la calidad de agua (PMCA)
en cuerpos de agua epicontinentales.⁷⁴

N	Aspectos y/o actividades	Objetivos, acciones secuenciales e interacciones
1	Definir y delimitar el cuerpo de agua de interés	1. Obtener información de: - Actores y/o participantes en el planteamiento del problema (sector social, academia, gobierno, industria). - Programas de manejo hídrico locales y/o regionales. - Programas y/o registros del uso del suelo, locales y/o regionales. - Redes de monitoreo hidrometeorológicas existentes. - Accesibilidad a los sitios potenciales de muestreo. 2. Obtener información de: - Aspectos climáticos, geológicos, hidrológicos, topográficos, dinámica estacional, usos del suelo, modificaciones antrópicas (represas; fuentes directas y difusas de contaminantes).

⁷³ Behmel, Sonja *et al.*, "Water quality monitoring strategies - A review and future perspectives", *Science of the Total Environment*, 2016, 571, pp. 1312-1329.

⁷⁴ *Idem.*

2	Determinar y evaluar los objetivos del monitoreo	1. Precisar la información representativa, actualizada y necesaria del cuerpo de agua en análisis a fin de: - Determinar la formulación del problema con la participación de todos los actores involucrados (sector social, academia, gobierno, industria). - Establecer los canales de comunicación requeridos para establecer procesos de participación e interacción entre todos los actores de incidencia. - Formular las preguntas centrales que se buscan resolver. - Determinar los objetivos del monitoreo, generales y particulares. - Establecer las estrategias y/o ejes rectores para generar la información requerida para sustentar la formulación de políticas y la implementación de planes de acción.
3	Definición del cuerpo de agua bajo análisis	1. Definir el(los) cuerpo(s) de agua de interés: - Priorizar los cuerpos de agua a ser monitoreados. - Integrar la información de los aspectos climáticos, estacionales, geológicos, morfológicos, hidrológicos y usos del suelo. - Integrar las modificaciones antrópicas para seleccionar y caracterizar las fuentes directas (y en su caso difusas) de contaminantes. 2. Establecer los criterios de selección para: - Diseñar la red de monitoreo necesaria, los sitios de muestreo y la frecuencia del muestreo. - Seleccionar los parámetros de la calidad de agua a medir y los parámetros de la calidad de los sedimentos. - Seleccionar los indicadores biológicos que den cuenta del efecto de la exposición (toxicidad) de las matrices ambientales relevantes en estudio (agua y sedimentos).

4	Establecer la red de monitoreo	1. Realizar un muestreo prospectivo para: - Reconocer el área de estudio y la accesibilidad a los sitios de monitoreo. - Precisar problemáticas particulares que orienten los sitios definitivos a seleccionarse en la red de monitoreo. - Ubicar las influencias locales que modifican el curso de agua (i.e. represas) y la calidad del agua (fuentes directas y/o difusas de contaminantes). - Definir los alcances operativos y técnicos-científicos. 2. Seleccionar la red de monitoreo (sitios de muestreo finales) para: - Establecer la cobertura espacial y temporal de acuerdo con los objetivos propuestos. - Seleccionar y justificar los sitios de muestreos representativos a nivel de macro y micro localización. - Establecer la frecuencia del monitoreo que responda a los objetivos planteados.
5	Selección y clasificación de los parámetros de la calidad de agua	1. Seleccionar y clasificar los parámetros de la calidad de agua (y de los sedimentos) para: - Identificar los parámetros, índices e indicadores relevantes de la calidad de agua y de los sedimentos (físicos, químicos, biológicos). - Identificar los indicadores biológicos que den cuenta del efecto de la exposición (toxicidad) de las matrices ambientales relevantes en estudio (agua y sedimentos). 2. Integrar la información generada para: - Obtener las evidencias requeridas para la aplicación posterior de planes de acción (i.e. manejo, regulación, prohibición, rehabilitación). - Relacionar la información generada con la normatividad nacional y/o internacional en materia hídrica.

6	Establecimiento de controles de calidad	1. Planeación de los controles de calidad y evaluación para: - Reducir los márgenes de error en cada una de las etapas del PMCA desde la planeación, el monitoreo, transporte, análisis, validación de la información y reporte para garantizar la robustez de la información generada. 2. Definir y establecer los protocolos de los controles de calidad para: - Las rutas de obtención de la información en campo y laboratorio. - El manejo y calibración de los equipos de campo y laboratorio. - El transporte y resguardo de las muestras de las matrices ambientales bajo estudio. - La obtención de los datos de campo y los obtenidos de los análisis en laboratorio. - El análisis, interpretación y comunicación de los resultados generados.
7	Evaluación de los recursos humanos	1. Definir y evaluar los recursos humanos requeridos para: - Garantizar que se cuenta con el personal calificado en cada etapa del desarrollo e implementación del PMCA. - Delimitar los actores participantes y necesarios para llevar a cabo el PMCA. - Precisar las habilidades necesarias de los recursos humanos que participan en cada una de las etapas del PCMA. - Establecer estrategias y mecanismos para el entrenamiento adicional del personal participante. - Valorar la disponibilidad temporal de los participantes (requerimientos a largo plazo). - Establecer redes de colaboración con los sectores de incidencia (sociedad civil, academia, gobierno, industria).

8	Identificación de los recursos técnicos necesarios	1. Identificar los recursos técnicos necesarios para: - Realizar la adquisición de la información requerida (i.e. bases de datos) y las herramientas necesarias para el trabajo de campo de cada una de las etapas del PCMA. - Identificar las capacidades analíticas de los laboratorios requeridos para el análisis de las matrices ambientales consideradas en el PCMA (agua, sedimentos, biota, suelo). - Considerar los recursos técnicos necesarios para la operación y mantenimiento de las herramientas, materiales y equipos requeridos. - Optimizar el presupuesto requerido para llevar a cabo el PMCA.
9	Estimación de los recursos financieros	1. Establecer los costos relacionados con el desarrollo del PCMA para: - Optimizar los recursos financieros requeridos en cada una de las etapas del PCMA. - Garantizar la continuidad del PCMA de acuerdo con los objetivos planteados. - Garantizar la integración y el análisis de la información generada. - Garantizar la discusión, difusión y comunicación de los resultados obtenidos producto del PCMA.
10	Identificación de los canales de comunicación	1. Establecer los diferentes niveles de los canales de comunicación: - Entre los actores participantes en el PMCA. - Entre los generadores de la información y los usuarios. 2. Identificar y establecer los actores participantes en los diferentes niveles de los canales de comunicación para: - Establecer mecanismos claros y transparentes de comunicación de las actividades a desarrollar y de la información generada.

		- Coordinador de manera eficiente la ejecución del PCMA. - Identificar los actores usuarios de la información generada. - Aportar la información necesaria a los tomadores de decisión para la ejecución de planes de acción prioritarios.
--	--	--

Aspectos particulares de las actividades relacionadas con el muestreo de las matrices ambientales (agua, sedimento, biota) son abordados en el presente capítulo.

La integración de la estrategia general de los procesos involucrados en un programa integral de monitoreo de la calidad de agua, enmarcado en el diagnóstico ambiental de cuerpos de aguas superficiales, se visualiza en la figura 2. Como se mencionó previamente, se parte del planteamiento del problema y de la definición de los objetivos del monitoreo ambiental por los actores de incidencia (sector social, academia, gobierno e industria) que conducen, a través de una serie de actividades interrelacionadas establecidas de manera secuencial a dos procesos relacionados entre sí: la caracterización de la exposición a los contaminantes y la caracterización de los efectos biológicos.

El análisis del conocimiento generado determina la evaluación de la toxicidad de los contaminantes y, en lo global, de la calidad del agua del sistema acuático. La evaluación del conocimiento generado es la base para el diagnóstico ambiental del cuerpo de agua a partir de lo cual se proponen estrategias de acción a los tomadores de decisión hacia la gestión ambiental hídrica. Tales acciones pueden involucrar medidas de prohibición, de regulación y/o de rehabilitación ecohidrológica del sistema acuático bajo estudio.

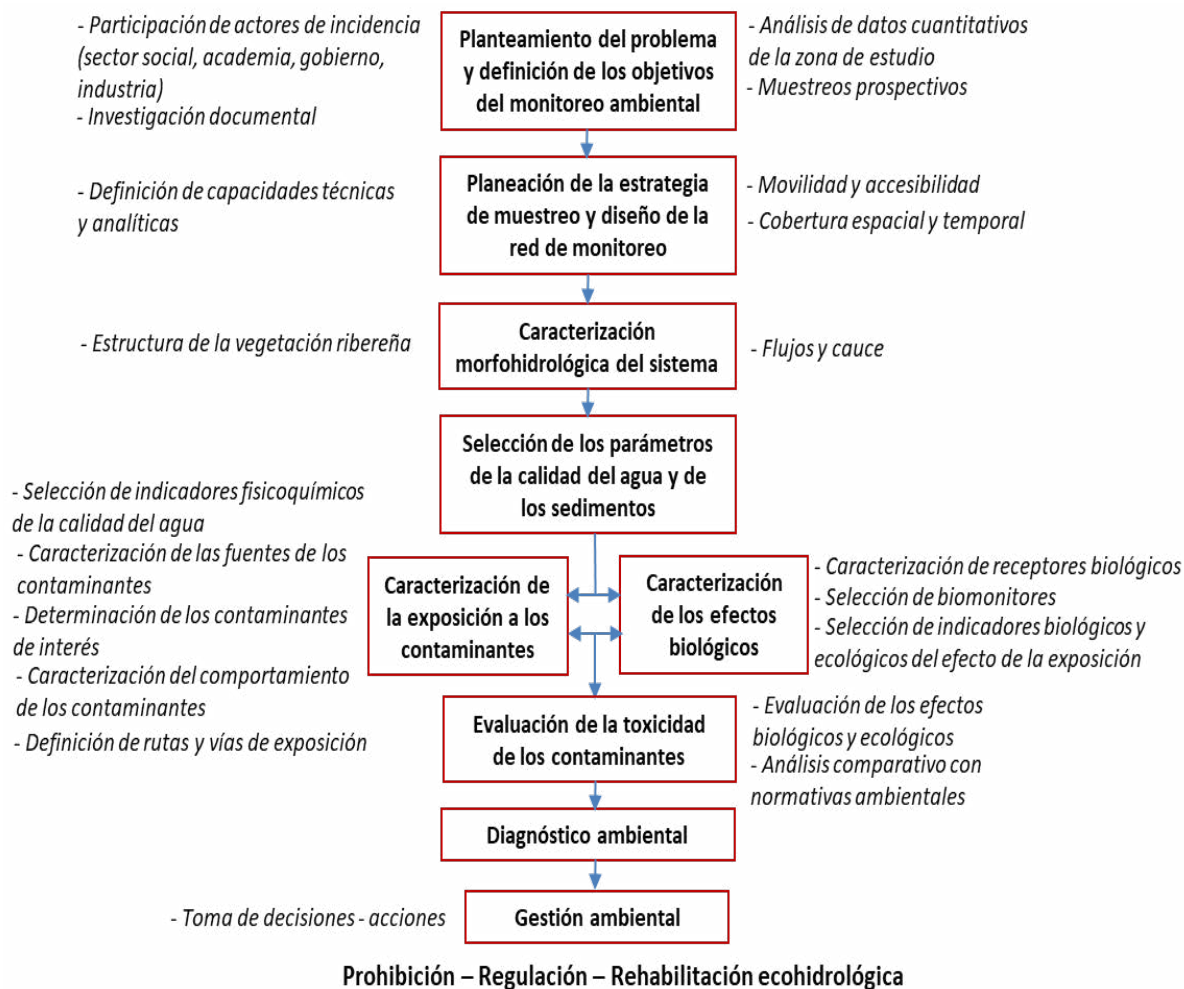


Figura 2. Diagrama de la estrategia general de un programa integral de monitoreo de la calidad del agua, enmarcado en el diagnóstico ambiental de cuerpos de agua superficiales.

B. Fuentes y destino ambiental del aporte de contaminantes a los cuerpos de agua

I. Fuentes de contaminantes

Los sistemas acuáticos se encuentran contaminados a nivel local, regional y global. La contaminación acuática se refiere a la introducción de sustancias y energía a los cuerpos de agua por actividades antrópicas en niveles que resulta perjudicial para los organismos vivos, deteriora la calidad del agua y constituye un riesgo para los ecosistemas y la salud humana. Estos cuerpos de agua pueden ser impactados por contaminación física, biológica y química.

La contaminación física incluye el aporte de material particulado por la erosión de los suelos aledaños o bien, al aporte de agua en temperaturas mayores al cuerpo de agua receptor —como es el caso de las plumas de descarga de enfriamiento de termoeléctricas—, referida también como contaminación térmica.

La contaminación biológica comprende el aporte de microorganismos patógenos, así como el exceso de materia orgánica como en el caso de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) urbanas e industriales, el aporte de aguas negras no tratadas o aportes fecales de origen animal, también referida como contaminación asociada a una mayor demanda de oxígeno disuelto.

La contaminación química (orgánica e inorgánica) se refiere a la miríada de elementos, sustancias naturales, productos sintetizados por el hombre y productos no intencionales, generados durante sus procesos de degradación, los cuales son utilizados en múltiples actividades humanas a nivel urbano, industrial, agrícola y pecuario entre otras. Integra productos del petróleo y petroquímica, la minería, la industria farmacéutica y alimentaria, la actividad agrícola, pesquera y de acuicultura, entre otros, e incluye plaguicidas (organoclorados y organofosforados), fertilizantes (nitrogenados y fosforados) y productos industriales (metales, hidrocarburos policíclicos aromáticos HPA, compuestos bifenilos policlorados PCBs). Integra además los denominados contaminantes emergentes (CE) que incluyen compuestos orgánicos persistentes (COP; productos farmacéuticos y hospitalarios —fármacos, antibióticos, de cuidado personal—, dioxinas, sustan-

cias perfluoroalquiladas PFAS, bisfenol A BPA), microplásticos, nanomateriales y compuestos disruptores endocrinos. Una descripción amplia de las características de estos contaminantes y su comportamiento en los sistemas acuáticos se describe en el capítulo 2.

Por otra parte, las fuentes de contaminación del agua pueden ser de tipo puntual o difusa.

Las fuentes puntuales se refieren a una fuente identificable de aporte directo al cuerpo de agua, como es el caso de las descargas de plantas de tratamiento urbanas o las descargas industriales a los cuerpos de agua. En contraste, las fuentes difusas o no puntuales son, por ejemplo, las derivadas de escorrentías que aportan agroquímicas de zonas agrícolas o la deposición atmosférica (húmeda y seca) de contaminantes industriales emitidos en zonas geográficas lejanas a los cuerpos de agua. Estos aportes pueden ser de carácter continuo, puntual, periódico o intermitente. De tal manera, las fuentes de los contaminantes (origen y tipo de los contaminantes) y las características de su emisión y descargas (directas o difusas) son aspectos cruciales para entender tanto su distribución y comportamiento en los cuerpos de agua como su destino ambiental.

II. Destino ambiental de contaminantes en los sistemas acuáticos

Los sistemas acuáticos son receptores de los contaminantes provenientes de la atmósfera (por depositación húmeda y seca), de los suelos adyacentes (por erosión y/o escorrentía) y por los aportes directos y difusos, donde el destino ambiental de los contaminantes incluye la columna de agua, los sedimentos y la biota. Estas matrices ambientales y la interacción por la transferencia de los contaminantes entre sí son relaciones que se requieren considerar en los estudios de diagnóstico ambiental para establecer los efectos adversos de los contaminantes en estos ecosistemas y su impacto a la salud humana.

Como se mencionó previamente, en los estudios del diagnóstico ambiental del efecto de contaminantes en los sistemas acuáticos, usualmente la atención se centra en el análisis de las concentraciones de contaminantes en la columna de agua.

Sin embargo, numerosos estudios han demostrado que los sedimentos constituyen una matriz de depósito, reserva y exportación de numerosos contaminantes a la columna de agua por la resuspensión de estos sedimentos a través de procesos naturales o antrópicos. De tal manera, los sedimentos desempeñan un papel relevante en el transporte, destino y biodisponibilidad de los contaminantes en los cuerpos de agua. A la vez, la contaminación asociada a los sedimentos puede ocasionar efectos adversos de largo plazo en los organismos, en sus poblaciones y en los ecosistemas acuáticos.^{75, 76 y 77}

Estudios recientes llevados a cabo por nuestro grupo de trabajo en el Río Grande de Santiago, Jalisco, han evidenciado que si bien las concentraciones en la columna de agua de diversos metales tóxicos como el cadmio, el plomo y el mercurio se encuentran en niveles menores a los que ejercen un efecto adverso en la biota acuática, sus concentraciones en los sedimentos exceden los niveles de protección para la vida acuática en escenarios de exposición crónica.⁷⁸

De igual manera, diversos estudios reportan que sedimentos contaminados por metales, residuos de pesticidas, hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPAs) y bifenilos policlorados (PCB, por sus siglas en inglés), alteran la abundancia y la biodiversidad de macroinvertebrados y de peces en cuerpos de agua dulceacuícolas.¹² A su vez, la acumulación de contaminantes emergentes como los microplásticos en los sedimentos, alteran procesos biogeoquímicos asociados con la degradación de la materia orgánica.^{79 y 80} Ello tiene repercusiones severas en la dinámica trófica de los sistemas acuáticos.

⁷⁵ Leppanen, Matti *et al.*, "Sediment toxicity tests: a critical review of their use in environmental regulations", *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2020, 43 (8), 202, pp. 1697-1716.

⁷⁶ Ortiz-Ordoñez, Esperanza *et al.*, "Liver histological changes and, pp lipid peroxidation in the amphibian *Ambystoma mexicanum* induced by sediment elutriates from the Lake Xochimilco", *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 46, pp. 156-164.

⁷⁷ Ke, Xin *et al.*, "Toxicity identification of sediments in Liaohe river", *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 93, pp. 259-265.

⁷⁸ Arellano, Omar *et al.*, *Incidencia para la regeneración ecohidrológica y la reapropiación comunitaria de la Cuenca Alta del Río Santiago –Resistencia ecohidrológica y vigilancia ambiental*, PRONACES CONAHCYT 318965, Informe Etapa 2, 2023, p. 99.

⁷⁹ Wazne, Mohammad *et al.*, "Microplastics in freshwater sediments impact the role of a main bioturbator in ecosystem functioning", *Environmental Science and Technology*, 2023, 57 (8), pp. 3042-3052.

⁸⁰ Zhang, Heran *et al.*, "Source, transport and toxicity of emerging contaminants in aquatic environments: a review on recent studies", *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30, pp. 121420-121437.

De tal manera, la contaminación de los sedimentos y los efectos biológicos adversos resultantes tienen consecuencias tanto en la dinámica de los ecosistemas como repercusiones socioeconómicas al impactar especies de relevancia ecológica y económica, deteriorar la calidad del agua para actividades productivas como las agrícolas, pesqueras e industriales o para consumo humano. Así, los estudios del diagnóstico ambiental por la presencia de contaminantes en los sistemas acuáticos deben considerar no solo el análisis de su comportamiento y toxicidad potencial en la columna de agua, sino también en los sedimentos.

De igual manera, adquiere particular importancia el monitoreo ambiental de la biota de los sistemas acuáticos como destino ambiental de los contaminantes. Este análisis biológico usualmente refleja los efectos de la exposición crónica a los contaminantes y de la calidad de agua de manera más integrativa que el monitoreo de variables fisicoquímicas y de contaminantes. A la vez, el monitoreo biológico integra los efectos de las mezclas de los contaminantes y sus interacciones con las variables fisicoquímicas del medio.⁸¹ De esta forma, es una matriz relevante de análisis en la gestión hídrica que sustenta estudios retrospectivos (qué ocurrió), prospectivos (qué está ocurriendo) y predictivos (qué puede ocurrir) de la integridad ambiental de los sistemas acuáticos.

III. Efectos tóxicos en los organismos acuáticos y procesos ecológicos afectados

La integración de las fuentes de contaminantes por las actividades antrópicas en los ambientes acuáticos, las variables que modulan el comportamiento de los contaminantes en las matrices ambientales del agua y de los sedimentos y los efectos adversos en la biota y el ecosistema, se integran en la figura 3. Así, producto de las actividades humanas, numerosos contaminantes impactan los sistemas acuáticos donde su comportamiento, distribución, biodisponibilidad y persistencia son modulados por diversas variables abióticas y bióticas (ligandos bióticos y

⁸¹ Strobl, Robert O., y Robillard, Paul D., "Network design for water quality monitoring of surface waters: A review", *Journal of Environmental Management*, 2008, 87, pp. 639-648.

abióticos). Ello determina su acción tóxica en diferentes niveles de organización biológica, desde el nivel molecular y bioquímico hasta el nivel de poblaciones, lo cual tiene repercusiones en numerosos procesos ecológicos con consecuencias en la estructura y función de los ecosistemas acuáticos.⁸²

En los organismos acuáticos, la acción tóxica de los contaminantes es consecuencia en primera instancia de alteraciones moleculares y bioquímicas a nivel celular y, su repercusión a nivel fisiológico. Los efectos adversos abarcan insuficiencias en la respuesta inmune de los organismos y mayor incidencia de enfermedades; cambios en el comportamiento y su incidencia en alteraciones en los patrones de actividad, alimentación, cortejo y escape a depredadores; alteración del desarrollo embrionario y presencia de deformidades, así como afectación del crecimiento y consecuencias adversas reproductivas. Todo ello reduce la abundancia y diversidad biológica y repercute en la estabilidad de las poblaciones afectadas.

Por otro lado, el incremento en el material particulado y de nutrientes, puede alterar la productividad del sistema al alterar tanto la dinámica fotosintética del fitoplancton como las comunidades bénticas participantes en procesos de degradación orgánica y mineralización, lo cual a su vez puede tener consecuencias en los flujos energéticos del sistema. De tal manera, la acción directa o indirecta de los contaminantes tanto sobre los productores primarios como sobre los consumidores, repercute en alteraciones en la estructura y función del ecosistema y por lo tanto en su dinámica trófica. Ello impacta a la vez servicios ecosistémicos al constituir un riesgo para la vida acuática, limitar sus usos y re-usos en actividades productivas como la agricultura o la pesca o, no ser apta para el consumo humano.

⁸² Ponce de León, Claudia *et al.*, *Modelos conceptuales para el análisis del impacto de contaminantes. Un estudio de caso: Xochimilco*, 2017, p. 76.

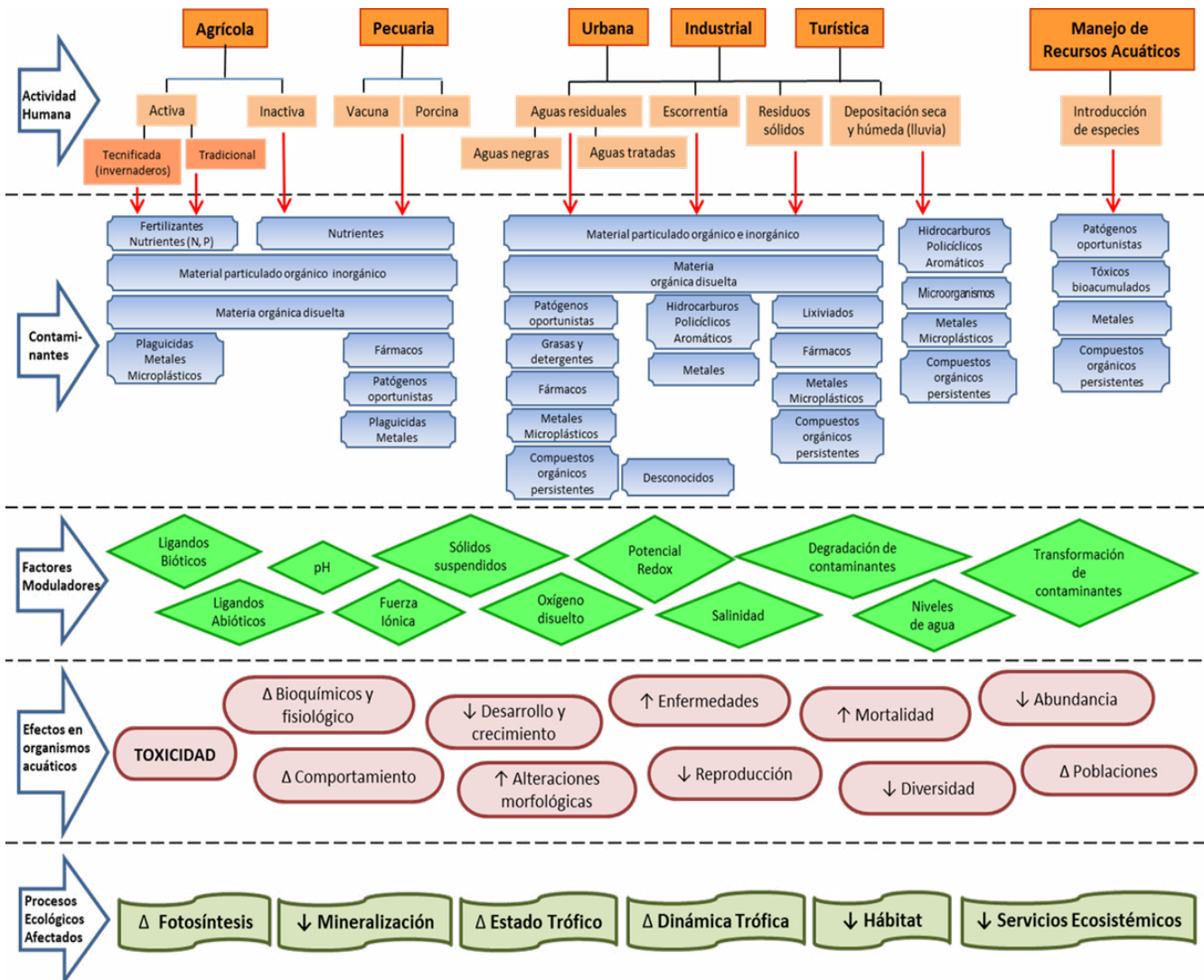


Figura 3. Diagrama conceptual de la dinámica de contaminantes de sistemas acuáticos.⁸³

⁸³ Ponce de León, Claudia et al., *Modelos conceptuales para el análisis del impacto de contaminantes. Un estudio de caso: Xochimilco*, 2017, p. 76.

C. Redes de monitoreo

Las redes de monitoreo deben estar diseñadas para alcanzar objetivos que busquen garantizar tanto la seguridad hídrica, como la gestión de la calidad de los recursos hídricos, en cumplimiento con las normas establecidas por la legislación nacional en materia hídrica.

Los objetivos específicos están encaminados a: 1) Evaluar tendencias a corto y largo plazo en la variación temporal de los parámetros de calidad del agua; 2) Monitorear violaciones normativas a estándares específicos en la cuenca o usos particulares del recurso; 3) Identificar las causas y fuentes externas que afectan la calidad del agua; 4) Analizar a corto plazo las variaciones en la calidad del agua para investigaciones específicas; 5) Dar seguimiento al ingreso y destino de contaminantes; 6) Evaluar medidas de control del agua de acuerdo con las normativas en materia hídrica y de impacto a los ecosistemas acuáticos y a la salud humana (i.e. regulación, prohibición, remediación, manejo); 7) Obtener información para la toma de decisiones y, 8) Planificar políticas de tasa retributiva.^{84 y 85}

El establecer e implementar una red de monitoreo implica el responder de manera integral el qué, por qué, para qué, cuándo y cómo, de acuerdo con los objetivos que se persiguen, así como el evaluar la efectividad de dicho monitoreo para considerar futuras necesidades de información.⁸⁶ Ello implica que diferentes objetivos, relacionados con los propósitos y/o demandas de diferentes usuarios o actores (i.e. sociedad civil, academia, industria, gobierno) resultan en el diseño de diferentes redes y programas de monitoreo que respondan a los objetivos propuestos y a la retroalimentación de la información generada.⁸⁷

⁸⁴ Valencia, Alejandro, *Propuesta de red de monitoreo y evaluación fisicoquímica de la calidad del agua en la cuenca de los ríos Atoyac-Zahuapan, Tlaxcala, México*, Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, UNAM, 2024, p. 141.

⁸⁵ Ríos-Moreno, Ana María *et al.*, “Revisión de criterios y metodologías de diseño de redes para el monitoreo de la calidad de agua en ríos”, *Avances en Recursos Hidráulicos*, 2008, p. 18.

⁸⁶ Strobl, Robert O., y Robillard, Paul D., “Network design for water quality monitoring of surface waters: A review”, *Journal of Environmental Management*, 2008, 87, pp. 639-648.

⁸⁷ *Idem.*

I. Localización de los sitios de muestreo

En una red de monitoreo, la selección y distribución de los puntos de muestreo representa un factor crítico y deben estar alineados a los objetivos propuestos. La ubicación de los sitios de monitoreo y/o de muestreo debe considerar parámetros espaciales de tal manera que integre el comportamiento del cuerpo de agua bajo estudio. Con esta premisa se consideran tres criterios incluyentes (Figura 4).^{88, 89 y 90}

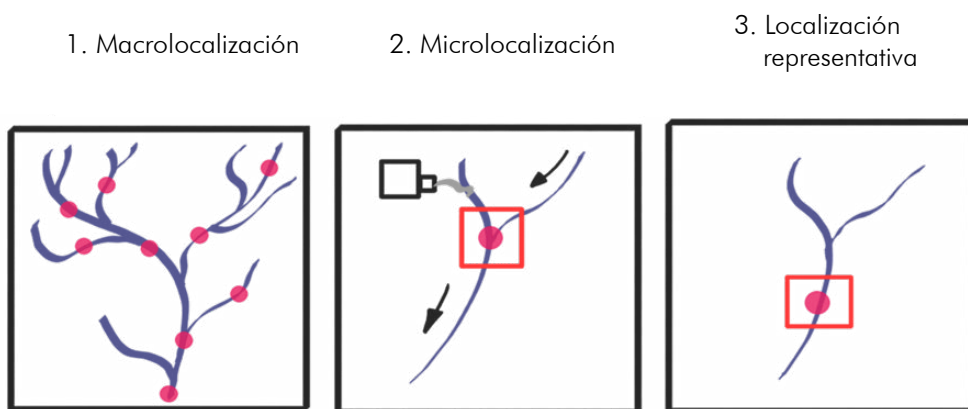


Figura. 4. Criterios para la localización de los sitios de muestreo en una red de monitoreo en cuerpos de agua.^{91, 92 y 93}

- 1. Macrolocalización** o tramo de la corriente en donde debe ubicarse la estación de muestreo y considera tanto la ubicación altitudinal siguiendo las características del flujo del cuerpo de agua como los registros

⁸⁸ *Idem.*

⁸⁹ Sanders, Thomas G. *et al.*, *Design of Networks for Monitoring Water Quality*, 1983, pp. 336.

⁹⁰ Harmancioglu, Nilgun B. *et al.*, *Water quality monitoring and network design*. Chapter IV, pp. 61-106, 1998, 27, pp. 312.

⁹¹ Strobl Robert O., y Robillard, Paul D., "Network design for water quality monitoring of surface waters: A review", *Journal of Environmental Management*, 2008, 87, pp. 639-648.

⁹² Sanders, Thomas G., *et al.*, *Design of Networks for Monitoring Water Quality*, 1983, pp. 336.

⁹³ Harmancioglu, Nilgun, B. *et al.*, *Water quality monitoring and network design*. Chapter IV, pp. 61-106, 1998, 27, pp. 312.

históricos existentes del caudal y la calidad del agua. La macrolocalización involucra los sitios de muestreo en cada río o cuerpo de agua en una cuenca.

2. **Microlocalización** o definición de sitios de muestreo que representan sitios críticos determinados en la macrolocalización. Tal es el caso de descargas puntuales o sitios de mezcla de contaminantes. En este criterio se define la longitud de la mezcla en el tramo de la corriente a partir de las entradas y salidas del caudal, así como de fuentes contaminantes, directas o difusas, para garantizar la representatividad de la muestra en la sección transversal de la corriente monitoreada.
3. **Localización representativa del muestreo**, esto es, en dónde y cómo debe tomarse una muestra de la matriz ambiental para ser analizada (i.e. agua, sedimentos, biota) en la sección transversal de la corriente en la estación seleccionada, la cual debe ser representativa de las características del sitio de muestreo.

II. Frecuencia y recurrencia del muestreo

Una vez establecida la ubicación geográfica de los sitios de muestreo, la frecuencia con que éste se realice puede ser definida de tal manera que sea representativa a nivel temporal. Establecer de manera correcta la frecuencia de muestreo es uno de los aspectos más importantes en la construcción e implementación de una red de monitoreo, ya que influye directamente sobre los objetivos propuestos. Así, un muestreo repetitivo puede generar información redundante en tanto que el muestreo insuficiente y sin un criterio temporal tendrá como consecuencia la pérdida de información relevante sobre la calidad del agua. De tal manera, la frecuencia del muestreo debe ser ajustada y definida para obtener la mayor información relevante de la calidad de agua con el menor esfuerzo de muestreo y en los costos de operación. Para ello, se debe tomar en consideración análisis estadísticos para estimar el número de sitios de muestreo y muestras colectadas

que reduzcan el error asociado a la variabilidad de los factores ambientales en medición.^{94 y 95}

Para establecer de manera acertada la frecuencia de muestreo resulta indispensable contar con información de monitoreos previos bajo un rango amplio de condiciones hidrológicas, lo cual apoyará las decisiones estadísticas sobre la población de datos a ser muestreada⁹⁶ y que incluye evaluación de tendencias temporales (*i.e.* estacionales, anuales), estimaciones del transporte de masas, evaluaciones de impacto ambiental y el cumplimiento de estándares de calidad del agua.⁹⁷

En escenarios de carencias de datos, la frecuencia de muestreo puede ser estimada inicialmente usando datos históricos del caudal, calidad de agua y actividades antrópicas que inciden en el cuerpo de agua implementando muestreos prospectivos para posteriormente utilizar los datos generados como base para el rediseño espacio-temporal de la red de monitoreo.^{98, 99 y 100}

De acuerdo con los objetivos del monitoreo, un muestreo de calidad del agua puede involucrar mediciones en un ciclo de 24 h para estimar variaciones en la calidad de agua (*i.e.* de descargas industriales y su impacto) o bien, muestreos temporales anuales y/o series de tiempo multianuales para caracterizar la variabilidad espacio-temporal de la calidad del agua. En el caso de México, y dada su ubicación fundamentalmente tropical, es recomendable considerar la variación climática anual para llevar a cabo monitoreos que caractericen las épocas

⁹⁴ Strobl, Robert O. y Robillard, Paul D., "Network design for water quality monitoring of surface waters: A review", *Journal of Environmental Management*, 2008, 87, pp. 639-648.

⁹⁵ Sanders, Thomas G. *et al.*, *Design of Networks for Monitoring Water Quality*, 1983, p. 336.

⁹⁶ Stansfield, Brett, "Effects of sampling frequency and laboratory detection limits on the determination of time series water quality trends", *Journal of Marine and Freshwater Research*, 2001, 35, pp. 1071-1075.

⁹⁷ Harmancioglu, Nilgun, B. *et al.*, *Water quality monitoring and network design*. Chapter IV, pp. 61-106, 1998, 27, pp. 312.

⁹⁸ Valencia, Alejandro, *Propuesta de red de monitoreo y evaluación fisicoquímica de la calidad del agua en la cuenca de los ríos Atoyac-Zahuapan, Tlaxcala, México*, Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, UNAM, 2024, pp. 141.

⁹⁹ Harmancioglu, Nilgun, B. *et al.*, *Water quality monitoring and network design*. Chapter IV, pp. 61-106, 1998, 27, pp. 312.

¹⁰⁰ Harmancioglu, Nilgun, B. *et al.*, *Water quality monitoring and network design*. Chapter IV, pp. 61-106, 1998, 27, pp. 312.

climáticas de secas, lluvias y fría. A su vez y de acuerdo con los objetivos del monitoreo, la recurrencia de los muestreos puede ser puntual, esporádica y/o continua. De tal manera, la acertada frecuencia y recurrencia del muestreo incide en las acciones de manejo en la gestión del recurso hídrico.

III. Parámetros ambientales sujetos a monitoreo

Los parámetros o variables que caracterizan la calidad de agua en sistemas acuáticos se clasifican de diversas maneras incluyendo sus propiedades físicas, químicas y biológicas. No obstante, la relevancia de cada parámetro deberá ser definida de acuerdo con las características particulares del cuerpo de agua, los usos propuestos y los objetivos que se persiguen en el PCMA.¹⁰¹ Una descripción amplia de las características de estos parámetros, así como los métodos de su medición en campo y el análisis en laboratorio de las matrices ambientales de agua y sedimentos, se aborda en el capítulo 2.

Las variables físicas de interés usualmente consideran el volumen y flujo de agua, los patrones de corriente, las características del cuerpo de agua (morfología), así como la medición en agua de la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto, la salinidad, la conductividad eléctrica, los sólidos disueltos totales, la turbidez, las partículas suspendidas, el color y el olor.

Las variables químicas usualmente son clasificadas en términos de categorías orgánicas e inorgánicas. En este rubro se incluye la demanda química de oxígeno, la demanda bioquímica de oxígeno, los iones mayoritarios (aniones y cationes), la alcalinidad, el carbono orgánico total, los nutrientes (amonio, nitrito, nitrato, fosfatos), asimismo, la materia orgánica. De igual manera se consideran contaminantes inorgánicos (i.e. metales) y orgánicos (i.e. plaguicidas, hidrocarburos policíclicos aromáticos, numerosos compuestos industriales y farmacéuticos), así como complejos emergentes como microplásticos y nanomateriales.

¹⁰¹ Strobl, Robert O. y Robillard, Paul D., "Network design for water quality monitoring of surface waters: A review", *Journal of Environmental Management*, 2008, 87, pp. 639-648.

En las variables biológicas comúnmente se incluye a la materia orgánica, indicadores de productividad primaria (i.e. Clorofila a), grupos microbiológicos bacterianos (i.e. Coliformes totales, *Escherichia coli*, Enterococos fecales) y huevos de helmintos.

Dada la multiplicidad de los parámetros que pueden ser evaluados, resulta fundamental seleccionar las variables que aportan la mayor información para caracterizar la calidad de agua. Para ello, es esencial el análisis de la información previa de los sitios de interés o el uso de herramientas estadísticas y técnicas de modelación de la calidad del agua, lo cual facilita la reducción del esfuerzo y los costos de la implementación de los PMCA.¹⁰² Asimismo, la selección de los parámetros a ser analizados debe tomar en cuenta la normatividad en materia hídrica nacional e internacional para establecer evidencias de los niveles de impacto y/o afectación que posibiliten el planteamiento de mecanismos de acción a los tomadores de decisión.

Por otro lado, es importante tener en cuenta los procesos naturales relevantes que modifican la calidad de agua al influir el comportamiento tanto de los parámetros ambientales, como de los contaminantes en estudio, para una interpretación robusta de la información obtenida (Tabla 2).^{103, 104, 105 y 106}

En la evaluación de los parámetros biológicos, resulta fundamental en un PMCA el monitoreo biológico que incorpore indicadores de implicación ecológica para la protección de los ecosistemas acuáticos. Como se mencionó previamente, el análisis de los indicadores biológicos y ecológicos reflejan el efecto subletal de largo plazo o crónico, no necesariamente detectado a través del monitoreo de parámetros

¹⁰² Sanders, Thomas G. et al., *Design of Networks for Monitoring Water Quality*, 1983, pp. 336.

¹⁰³ Bartram, Jaime y Balance, Richard (eds.), *Water Quality Monitoring: A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes*, 1996, p. 383.

¹⁰⁴ Strobl, Robert O. y Robillard, Paul D., "A water quality monitoring network design methodology for the selection of critical sampling points: Part II", *Environmental Monitoring Assessment*, 2006a, 122, pp. 319-334.

¹⁰⁵ Strobl, Robert O. et al., "A water quality monitoring network design methodology for the selection of critical sampling points: Part I", *Environmental Monitoring Assessment*, 2006b, 112, pp. 137-158.

¹⁰⁶ Strobl Robert O. y Robillard, Paul D., "Network design for water quality monitoring of surface waters: A review", *Journal of Environmental Management*, 2008, 87, pp. 639-648.

fisicoquímicos. Para ello resulta primordial la selección de especies (biomonitores) de acuerdo con su relevancia ecológica y/o económica, así como la selección de biomarcadores de exposición y de efecto a contaminantes y otros estresores ambientales a través de pruebas toxicológicas o ecotoxicológicas *in situ* o en laboratorio, información que es abordada en el capítulo 3.

Tabla 2.
Procesos naturales relevantes que afectan la calidad del agua^{107,108,109 y 110}

Proceso	Procesos relevantes en el cuerpo de agua	Cuerpo de agua
Hidrológico	- Dilución - Evaporación - Percolación y lixiviación - Suspensión y depósito	- Todos los cuerpos de agua - Aguas superficiales - Aguas subterráneas - Aguas superficiales
Físico	- Intercambio gaseoso con la atmósfera - Volatilización - Adsorción/ Desorción - Difusión - Cambios térmicos	- La mayoría de ríos y lagos - La mayoría de ríos y lagos - Todos los cuerpos de agua - Lagos y aguas subterráneas - La mayoría de ríos y lagos
Químico	- Fotodegradación - Reacciones ácido – base - Reacciones Redox - Disolución de partículas	- Lagos y ríos - Todos los cuerpos de agua - Todos los cuerpos de agua - Todos los cuerpos de agua

¹⁰⁷ Bartram, Jaime y Balance, Richard (eds.), *Water Quality Monitoring: A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes*, 1996, pp. 383.

¹⁰⁸ Strobl, Robert O. y Robillard, Paul D., "A water quality monitoring network design methodology for the selection of critical sampling points: Part II", *Environmental Monitoring Assessment*, 2006a, 122, pp. 319-334.

¹⁰⁹ Strobl, Robert O. et al., "A water quality monitoring network design methodology for the selection of critical sampling points: Part I", *Environmental Monitoring Assessment*, 2006b, 112, pp. 137-158.

¹¹⁰ Strobl Robert O. y Robillard, Paul D., "Network design for water quality monitoring of surface waters: A review", *Journal of Environmental Management*, 2008, 87, pp. 639-648.

	- Precipitación de minerales - Intercambio iónico	- Todos los cuerpos de agua - Aguas subterráneas
Biológico	- Producción primaria - Actividad microbiológica - Descomposición de la materia orgánica - Bioacumulación - Biomagnificación	- Aguas superficiales - La mayoría de ríos y lagos - La mayoría de ríos y lagos - La mayoría de ríos y lagos - La mayoría de ríos y lagos

IV. Herramientas operativas para el monitoreo

En el trabajo de campo resulta fundamental el uso de bitácoras de campo y de formatos estandarizados para la captura de información, como instrumentos de control en los procesos de análisis. Estas herramientas permiten homologar e integrar la información recabada, así como detectar información adicional requerida para sustentar un diagnóstico ambiental robusto. Se integran diversos formatos ejemplificativos para la captura de la información, así como formatos de seguimiento de la cadena de custodia, como estrategia de control de calidad de los procesos de seguimiento de los análisis de laboratorio (Formatos 1 a 6). Por otro lado, se integra una lista ejemplificativa de los materiales y equipos sugeridos para el levantamiento de la información (Formato 7). Una detallada información de los métodos de medición y de los análisis de parámetros ambientales en agua y sedimentos de los sitios de muestreo, así como de las normas ambientales aplicables que rigen su análisis y control, como marco de referencia para un monitoreo ambiental robusto, se integra en el capítulo 2.

Debe considerarse que cada etapa de generación de información, desde el registro de parámetros y variables ambientales en campo, así como los análisis que se llevan a cabo en el laboratorio, debe ser realizado por personal profesional calificado con amplio conocimiento en los procedimientos metodológicos a seguir, así como en los criterios y controles de calidad requeridos en cada una de las etapas. Ello es fundamental para generar información confiable que sustente un diagnóstico ambiental certero para la gestión de los recursos hídricos.

Conclusiones

En este capítulo se han abordado pruebas técnico-científicas para el diagnóstico ambiental y la evaluación del efecto de contaminantes en cuerpos de agua superficiales. Como eje central para el diagnóstico ambiental se ha abordado la relevancia de la implementación del Programa de Monitoreo de la Calidad de Agua y se han descrito los diferentes procesos involucrados en la planeación y programación secuencial del PMCA, partiendo de la formulación inicial del problema ambiental hídrico que involucra la participación de actores del sector gobierno, académico, industrial y de la sociedad civil.

Se resalta como etapa central para la implementación del PMCA la caracterización de las fuentes de contaminación (origen y tipo de los contaminantes) y las particularidades de su emisión o descargas (directas o difusas) como aspectos cruciales que determinan su distribución y comportamiento en los cuerpos de agua y sus destinos ambientales (columna de agua, sedimentos y biota), así como las interacciones que se establecen en estas matrices ambientales. Se resalta la integración de las variables ambientales que modulan el comportamiento de los contaminantes en las matrices de agua y sedimento, lo que determina a la vez su acción tóxica en la biota y sus implicaciones a nivel de poblaciones, comunidades y ecosistema, al alterar procesos estructurales y funcionales.

En la implementación del PMCA se puntualizan los criterios requeridos para el diseño adecuado de las redes de monitoreo de acuerdo con los objetivos que se persiguen, así como las características requeridas para la ubicación de los sitios de muestreo y la consideración de la frecuencia y recurrencia del muestreo. Se describen los parámetros ambientales sujetos al monitoreo y de manera relevante la incorporación del monitoreo biológico que incorpore indicadores de implicación ecológica para la protección de los sistemas acuáticos.

Finalmente, y con el propósito de garantizar controles de calidad tanto en el monitoreo ambiental como en los análisis subsecuentes, se aportan herramientas operativas que faciliten homologar, integrar y dar seguimiento al análisis de la información generada, para sustentar un diagnóstico ambiental robusto del sistema acuático bajo estudio.

Proyecto: _____

Muestreador(es):											
Formato 1. DATOS GENERALES											
Sitio/ Clave	Fecha	Hora	Zona – Paraje	GPS		Altitud msnm	Profun. cm	Transp. cm	Turbidez cm	Flujo cm/seg	Observaciones
				Latitud	Longitud						

Profund. Profundidad; **Transp.** Transparencia.

Proyecto: _____

Muestreador(es):										
Formato 2. AGUA SUPERFICIAL – MULTIPARÁMETRO										
Sitio/ Clave	Fecha	Hora	Zona – Paraje	Salin. Ups	Temp. °C	pH	OD mg O2/L	Conduc. µs/cm	TDS ppm	Observaciones

Salin. Salinidad; Temp. Temperatura; O.D. Oxígeno disuelto; Conduct. Conductividad; TDS. Sólidos disueltos totales.

Proyecto: _____

Muestreador(es):											
Formato 3. SEDIMENTOS – DATOS DE CAMPO											
Sitio/ Clave	Fecha	Hora	Zona – Paraje	GPS		Altitud msnm	pH	Potencial Redox	Temp. °C		Observaciones
				Latitud	Longitud						

Temp. Temperatura.

Proyecto: _____

Analista(s):													
Formato 4. AGUA SUPERFICIAL – DATOS LABORATORIO													
Sitio/ Clave	Fecha	Hora	Zona – Paraje	GPS		Altitud msnm	Sol.Susp. mg/L	TOC mg/L	SUVA mg/mL	DBO mg/L	DQO mg/L		
				Latitud	Longitud								

Sol. Susp. Sólidos suspendidos; TOC Carbono orgánico total; SUVA carácter orgánico de la materia orgánica natural; DBO Demanda bioquímica de oxígeno; DQO Demanda química de oxígeno.

Proyecto: _____

Analista(s):											
Formato 5. SEDIMENTOS – DATOS DE LABORATORIO											
Sitio/ Clave	Fecha	Hora	Zona – Paraje	GPS		Altitud msnm	M.O. %	Granulometría			
				Latitud	Longitud			Arcillas %	Limos %	Arenas %	Clasificación

M.O. Materia orgánica.

Proyecto: _____

Formato 6. CADENA DE CUSTODIA / MANEJO DE MUESTRAS							
Sitio de muestreo			Clave	Fecha de muestreo	¹ Matriz de la muestra	Cantidad	Análisis a realizar
MUESTRAS	ENTREGÓ	NOMBRE:	RESULTADOS	ENTREGÓ	NOMBRE:	FECHA:	
	RECIBIÓ	NOMBRE:		RECIBIÓ	NOMBRE:	FECHA:	

¹ Matriz de la muestra: agua, sedimentos.

Formato 7. Listado ejemplificativo de materiales y equipos requeridos para el análisis de algunos parámetros relevantes en las matrices de agua y sedimentos.

1. AGUA SUPERFICIAL				
Análisis	Material	Volumen	N	Equipo
Aniones y Cationes	Tubos Vacutainer	10 ml	2	Cromatografía de Líquidos (HPLC)
Metales	Tubos de polipropileno	50 ml	1	Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)
Plaguicidas	Botellas vidrio ámbar	1000 ml	2	Cromatografía de gases acoplado a cromatografía de masas de triple cuadrupolo (QQQ-MMR)
Carbono orgánico y sólidos suspendidos	Botellas vidrio ámbar	1000 ml	1	Analizador TOC
DBO	Botellas vidrio	300 ml	2	Oxímetro de mesa
DQO	Tubos vidrio	15 ml	2	Oxímetro de mesa
Compuestos nitrogenados (amonio, nitrito y nitrato)	Tubos Vacutainer	10 ml	2	Espectrofotómetro Vis-UV
Clorofila total	Filtros nitrocelulosa 0.22 mm	10 ml	2	Espectrofotómetro Vis-UV
Fosfatos	Tubos polipropileno	15 ml	1	Espectrofotómetro Vis-UV

[illegible]

Bibliografía

- Arellano, Omar *et al.*, *Incidencia para la regeneración ecohidrológica y la reapropiación comunitaria de la Cuenca Alta del Río Santiago – Resistencia ecohidrológica y vigilancia ambiental*, PRONACES CONAHCYT 318965, Informe Etapa 2, 2023.
- Bartram, Jaime y Balance Richard (eds.), *Water Quality Monitoring: A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes*, Taylor y Francis, Londres y Nueva York, 1996.
- Behmel, Sonja *et al.*, “Water quality monitoring strategies — A review and future perspectives”, *Science of the Total Environment*, 2016, 571, pp. 1312-1329.
- CWQG, *Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*, Canadian Council of Ministers of the Environment, CCME, Canadá. Disponible en: «<https://ccme.ca/en/current-activities/canadian-environmental-quality-guidelines>» [Consultado el 21 de agosto de 2024].
- CSQC, *Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*, Canadian Council of Ministers of the Environment, CCME, Canadá. Disponible en: «<https://ccme.ca/en/current-activities/canadian-environmental-quality-guidelines>» [Consultado el 20 de agosto de 2024].
- Harmancioglu, Nilgun B. *et al.*, “Water quality monitoring and network design”, Chapter IV, pp. 61-106, en Harmancioclu, N.B. *et al.*, (eds.), *Environmental data management*, Water Science and Technology Library, Springer-Sciences+Business Media, B.V., 1998, 27.
- Ke, Xin *et al.*, “Toxicity identification of sediments in Liaohe river”, *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 93, pp. 259-265.
- Leppanen, Matti *et al.*, “Sediment toxicity tests: a critical review of their use in environmental regulations”, *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2020, 43 (8), pp. 1697-1716.

NU, Naciones Unidas. Disponible en: «<https://www.un.org/es/common-agenda/sustainable-development-goals>» [Consultado el 25 de agosto de 2024].

Ortiz-Ordoñez, Esperanza *et al.*, “Liver histological changes and lipid peroxidation in the amphibian *Ambystoma mexicanum* induced by sediment elutriates from the Lake Xochimilco”, *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 46, pp. 156-164.

Ponce de León, Claudia *et al.*, *Modelos conceptuales para el análisis del impacto de contaminantes. Un estudio de caso: Xochimilco*, Las Prensas de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, 2017, pp. 76. ISBN 978-607-02-9069-5.

Ríos-Moreno, Ana María *et al.*, “Revisión de criterios y metodologías de diseño de redes para el monitoreo de la calidad de agua en ríos”, *Avances en Recursos Hidráulicos*, 2008, 18, Medellín, Colombia.

Sanders, Thomas, G. *et al.*, *Design of Networks for Monitoring Water Quality*, Water Resources Publications LLC, Highlands Ranch, CO, 1983, pp.336.

Stansfield, Brett, “Effects of sampling frequency and laboratory detection limits on the determination of time series water quality trends”, *Journal of Marine and Freshwater Research*, 2001, 35, pp. 1071-1075.

Strobl, Robert O. y Robillard, Paul D., “A water quality monitoring network design methodology for the selection of critical sampling points: Part II”, *Environmental Monitoring Assessment*, 2006a, 122, pp. 319-334.

Strobl, Robert O. *et al.*, “A water quality monitoring network design methodology for the selection of critical sampling points: Part I”, *Environmental Monitoring Assessment*, 2006b, 112, pp. 137-158.

Strobl, Robert O. y Robillard, Paul D., “Network design for water quality monitoring of surface waters: A review”, *Journal of Environmental Management*, 2008, 87, pp. 639-648.

- UNECE (United Nations Economic Commission for Europe), *Updated Strategies for Monitoring and Assessment of Transboundary Rivers, Lakes and Groundwaters*, United Nations Publications, Suiza, 2023.
- Valencia, Alejandro, *Propuesta de red de monitoreo y evaluación fisicoquímica de la calidad del agua en la cuenca de los ríos Atoyac-Zahuapan, Tlaxcala, México*, Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, UNAM, 2024.
- Wazne, Mohammad *et al.*, “Microplastics in freshwater sediments impact the role of a main bioturbator in ecosystem functioning”, *Environmental Science and Technology*, 2023, 57 (8), pp. 3042-3052.
- Xin, Ke *et al.*, “Toxicity identification of sediments in Liaohe river”, *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 93, pp. 259-265.
- Zhang, Heran *et al.*, “Source, transport and toxicity of emerging contaminants in aquatic environments: a review on recent studies”, *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30, pp. 121420-121437.

Capítulo

2. Herramientas y pruebas analíticas para la determinación de contaminantes



Capítulo 2. Herramientas y pruebas analíticas para la determinación de contaminantes. A. ¿Qué es y cómo se mueve un contaminante? B. Contaminación del agua. C. Impacto de la contaminación de los ríos, lagos y aguas subterráneas. D. Análisis químicos del agua. E. La matriz en el análisis químico. F. Control de calidad en los análisis químicos. G. Normas mexicanas e internacionales sobre los cuerpos de agua. Conclusiones. Bibliografía.

En este capítulo se explora una serie de temas críticos que abarca desde la comprensión básica de lo que es un contaminante y cómo se mueve en el medio ambiente, hasta los efectos específicos de la contaminación en diversos cuerpos de agua como ríos, lagos y aguas subterráneas. Se inicia con una definición clara de lo que constituye un contaminante y las dinámicas que determinan su dispersión y persistencia en el entorno acuático.

A continuación, se aborda la contaminación del agua, examinando las diversas fuentes de contaminantes y cómo éstas afectan la calidad del agua. Se analizan los impactos de esta contaminación en distintos cuerpos de agua, destacando las diferencias entre los efectos en ríos, lagos y aguas subterráneas.

El capítulo incluye también una sección dedicada al muestreo de aguas, un paso crucial para evaluar la calidad del agua y la presencia de contaminantes. Se discuten las técnicas y metodologías utilizadas en el análisis químico del agua, así como la importancia de la matriz en dichos análisis, es decir, cómo las características del agua misma pueden influir en los resultados.

Otro aspecto clave es el control de calidad en los análisis químicos, elemento imprescindible en la obtención de datos confiables. Finalmente, se revisan las normas mexicanas e internacionales que regulan la calidad de los cuerpos de

agua, proporcionando un marco normativo que guía tanto la protección ambiental como la salud pública. Este capítulo, por lo tanto, ofrece una visión integral del ciclo de vida de los contaminantes en los sistemas acuáticos y los estándares que deben seguirse para su monitoreo y control.

A. ¿Qué es y cómo se mueve un contaminante?

I. Sustancia contaminante

Una sustancia se considera contaminante cuando está presente en un entorno en niveles que pueden causar efectos adversos a la salud humana, la vida silvestre o el equilibrio ambiental. Esta determinación generalmente depende de varios factores:

Una sustancia se considera contaminante si su concentración supera los niveles naturales o los límites establecidos por normativas de salud y ambientales. Por ejemplo, un metal pesado en concentraciones superiores a las permitidas en agua potable es clasificado como contaminante.

Las normas locales e internacionales, como las establecidas por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) en los Estados Unidos, las Normas Mexicanas (NMX) en México, y las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS), definen los umbrales específicos a partir de los cuales una sustancia se considera contaminante. Además, una sustancia puede ser considerada contaminante si tiene el potencial de causar efectos adversos en la salud humana, como enfermedades o trastornos tóxicos; por ejemplo, niveles elevados de plomo en agua potable pueden provocar problemas neurológicos.

La bioacumulación y la toxicidad a lo largo de la cadena alimentaria también son factores que contribuyen a clasificar una sustancia como contaminante. Los efectos ambientales negativos, como el daño a ecosistemas acuáticos, terrestres o atmosféricos, y la desestabilización de procesos naturales y ciclos biogeoquímicos, también son indicadores de contaminación. La persistencia en el ambiente, donde la sustancia no se descompone fácilmente, y su movilidad a través de aire,

agua o suelo, pueden aumentar su impacto y considerar una sustancia como contaminante. Finalmente, comparar los niveles de una sustancia con los límites de seguridad establecidos por regulaciones y estándares internacionales ayuda a determinar su estatus de contaminante.

En resumen,¹¹¹ una sustancia es considerada contaminante si sus concentraciones superan los niveles naturales o regulados y si causa efectos adversos sobre la salud, los ecosistemas o los procesos ambientales, evaluándose su concentración, efectos, persistencia, movilidad y comparación con normas establecidas.

II. Movilidad de los contaminantes

Los contaminantes pueden moverse a través de diferentes medios y sistemas de transporte, dependiendo de su naturaleza y del entorno en el que se encuentren. Su movilidad se puede describir en términos de:

1. Medios de Transporte¹¹²

Aire. Los contaminantes pueden ser transportados por el aire en forma de partículas en suspensión, gases o vapores. Por ejemplo, los contaminantes atmosféricos pueden ser arrastrados por el viento y dispersarse a grandes distancias.

Agua. Los contaminantes pueden disolverse en el agua, ser transportados por corrientes y ríos, o adsorberse a partículas en suspensión. En cuerpos de agua, pueden moverse a través de la corriente y el transporte de sedimentos.

Suelo. Los contaminantes pueden infiltrar en el suelo y moverse a través del perfil del suelo por percolación o ser transportados por el agua de escorrentía. También pueden ser transportados a través de la erosión del suelo.

¹¹¹ Manahan, Stanley, *Environmental Chemistry* (9a. ed.), CRC Press, Boca Raton, FL, 2010, pp.783.

¹¹² Mackay, Donald *et al.*, *Handbook of Physical-Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals*, CRC Press Taylor & Francis Group, 2006, p. 919.

Biota. Los contaminantes pueden moverse dentro de los organismos vivos a través de la cadena alimentaria. Por ejemplo, los metales pesados pueden bioacumularse en organismos acuáticos y luego ser transferidos a otros animales o humanos.

2. Procesos de Transporte¹¹³

Difusión. La dispersión de contaminantes desde áreas de alta concentración hacia áreas de baja concentración ya sea en aire, agua o suelo.

Advección. El transporte de contaminantes por el movimiento de masas de aire o agua. Por ejemplo, los contaminantes en un río se trasladan con el flujo del agua.

Erosión. El transporte de contaminantes unidos a partículas sólidas en el suelo o sedimentos.

3. Transformación y Degradación¹¹⁴

Descomposición Química. Los contaminantes pueden ser transformados químicamente en el ambiente, lo que puede cambiar su movilidad. Por ejemplo, los contaminantes pueden ser descompuestos por la luz solar o por reacciones químicas en el agua o el suelo.

Biodegradación. Los organismos vivos, como bacterias y hongos, pueden descomponer contaminantes orgánicos, afectando su movilidad y persistencia.

La movilidad de los contaminantes determina cómo y dónde pueden afectar el medio ambiente y la salud. Los contaminantes en el agua son especialmente móviles, ya que el agua en la corteza terrestre está en constante movimiento.

De esta manera, se puede decir que la movilidad de los contaminantes está influenciada por sus propiedades químicas, los medios de transporte y los procesos

¹¹³ Schwarzenbach, Rene P. *et al.*, *Environmental Organic Chemistry*, Wiley-Interscience, Hoboken, New Jersey, 2016, p. 1313.

¹¹⁴ Pankow, James F., *Aquatic Chemistry Concepts* (2a. ed.), CRC Press Boca Raton, FL, 2019, p. 584.

ambientales. Comprender cómo se mueven los contaminantes es crucial para la gestión y mitigación de su impacto en el medio ambiente y la salud pública.

La Figura 1. muestra como un contaminante puede moverse a través de todos los medios ambientales y los procesos que éste puede sufrir.

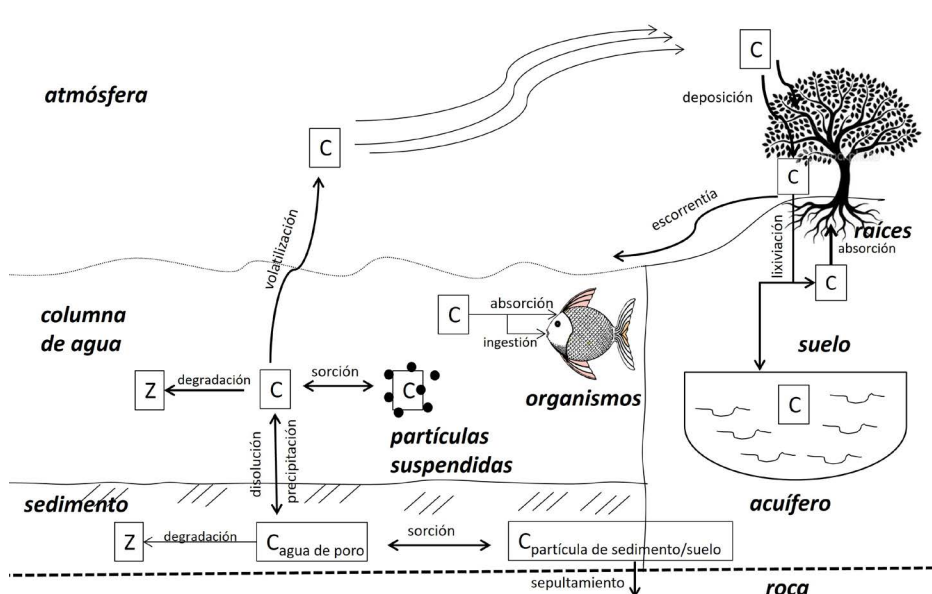


Figura 1. Movimientos y transformaciones que puede sufrir un contaminante en los diferentes medios ambientales. (C=contaminante; Z= subproductos de degradación)

B. Contaminación del agua

En el siglo pasado, la mayor preocupación por el agua era de carácter de salud pública, la preocupación era la fiebre tifoidea, diarrea endémica, salmonelosis, cólera, disentería y otras infecciones causadas por bacterias o virus. Sin embargo, aun cuando esto sigue siendo cierto para muchos países, la industrialización ha traído otro tipo de contaminación. A medida que los países se desarrollan, traen nuevas contaminaciones al agua como fertilizantes, estiércol, derrames petroleros,

contaminación radioactiva, y un sinfín de sustancias sintéticas cuyo impacto en la vida acuática ni siquiera se sabe.

I. ¿Agua contaminada?

Un cuerpo de agua se considera contaminado cuando los niveles de sustancias o contaminantes presentes en él exceden los límites establecidos por las normativas y estándares de calidad para ese tipo de agua, o cuando se observan alteraciones significativas en sus características fisicoquímicas y biológicas que afectan su capacidad para cumplir con sus usos previstos.

Estos estándares varían según el uso que se le dará al agua, como consumo humano, recreación, agricultura o industria. Es decir, se considera que el agua está contaminada si alguna sustancia o condición está presente al grado que el agua no pueda ser utilizada para un propósito específico,¹¹⁵ este propósito puede ser tan simple como para uso agrícola o tan complicado como para mantener la vida acuática original.

De este hecho derivan las complicaciones para determinar que es un agua contaminada.

II. Contaminantes en el agua

Los contaminantes del agua se pueden resumir en:¹¹⁶

- Contaminantes con demanda de oxígeno como aguas negras domésticas, estiércol animal y otros desperdicios
- Agentes causantes de enfermedades (bacteria, virus)
- Químicos inorgánicos y minerales
- Químicos orgánicos sintéticos y de petróleo

¹¹⁵ Chapman, Deborah (ed.) (1996), *Water Quality Assessments: A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*, publicado en nombre de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, la Organización Mundial de la Salud y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, p. 626.

¹¹⁶ Wetzel, Robert. G., *Limnology: Lake and River Ecosystems*, Academic Press, Londres, 2001, p.1006.

- Nutrientes de plantas (nitratos y fosfatos)
- Sedimentos por erosión de suelo
- Sustancias radioactivas
- Calor por industrias y plantas de energía

1. Contaminantes con demanda de oxígeno

Los contaminantes con demanda de oxígeno son sustancias en el agua que, al descomponerse por bacterias aeróbicas, consumen oxígeno durante el proceso. Esta biodegradación puede reducir la cantidad de oxígeno disponible en el agua, lo cual es crucial para la vida acuática. La medida de la cantidad de oxígeno que estos contaminantes requieren para su descomposición se conoce como “Demanda Biológica de Oxígeno” (DBO) y “Demanda Química de Oxígeno” (DQO).

En aguas tranquilas, las bacterias se reproducen hasta consumir todo el oxígeno disponible y una vez que esto sucede, sigue la descomposición por bacterias anaeróbicas (que no necesitan oxígeno) produciendo como subproductos varios gases que dan el característico olor a “huevo podrido”.

Los contaminantes que son degradados son la basura orgánica como aguas negras domésticas, estiércol animal, plantas en descomposición, desperdicio industrial como los productos de refinación de petróleo, procesadoras de comida, curtidoras, fábrica de textiles, aserraderos y fábricas de papel.

La reducción del oxígeno en el agua (hipoxia) puede provocar la muerte de peces y otros organismos acuáticos que dependen del oxígeno disuelto para sobrevivir. Asimismo, la disminución de oxígeno puede alterar las comunidades acuáticas, favoreciendo a especies que toleran bajas concentraciones de oxígeno, produciendo que se reduzca la biodiversidad.

Otros contaminantes que de manera indirecta producen la reducción del oxígeno en el agua, son los llamados nutrientes que resultan del exceso de desechos de fertilizantes y que puede llevar a un crecimiento excesivo de algas en el agua (característico color verde), lo que, a su vez, incrementa la demanda de oxígeno y contribuye a lo que se llama eutrofización.

2. Agentes causantes de enfermedades

Los contaminantes agentes de enfermedades son sustancias, microorganismos o compuestos que pueden causar enfermedades en humanos, animales o plantas al ingresar a los cuerpos de agua, suelos o al ambiente en general. Estos contaminantes pueden tener efectos graves en la salud pública y en el equilibrio de los ecosistemas. Son organismos infecciosos como bacterias, virus y protozoos que son llevados a aguas superficiales y subterráneas por las aguas negras animales y desechos industriales. Aun cuando ciertas enfermedades como la tifoidea han sido controladas en países industrializados, existen todavía virus persistentes como la hepatitis que además se acumulan en la cadena alimenticia.

3. Químicos inorgánicos y minerales

Comprende una vasta colección de ácidos, sales y polvos de metales o compuestos metálicos que pueden incrementar la acidez, salinidad o toxicidad del agua. Los contaminantes químicos inorgánicos y minerales son sustancias no orgánicas que pueden afectar negativamente la calidad del agua, el suelo y el aire. Estos contaminantes suelen proceder de actividades industriales, agrícolas, mineras y otras fuentes, y pueden tener efectos adversos en la salud humana, la vida animal y los ecosistemas.

Los contaminantes típicos de esta clasificación son los llamados metales pesados (plomo, cadmio, mercurio, etc.); los metaloides (arsénico, boro, silicio, etc.); los metales ligeros (sodio, potasio, etc.); los aniones (sulfuros, fluoruros, nitratos, nitritos, fosfatos, etcétera).

4. Químicos orgánicos sintéticos

Los contaminantes orgánicos de uso comercial son compuestos orgánicos que, aunque diseñados y utilizados para fines específicos en diversas industrias, pueden tener efectos negativos en el medio ambiente y la salud humana. Estos contaminantes suelen ser productos químicos empleados en la fabricación de bienes de consumo, procesos industriales y otras aplicaciones comerciales.

Estimar el número exacto de compuestos orgánicos diferentes de uso comercial en el mundo es un desafío debido a la vastedad y a la continua evolución de la química orgánica. Sin embargo, se pueden ofrecer algunas perspectivas generales, por ejemplo, la base de datos de compuestos químicos, como el Chemical Abstracts Service (CAS) el número de registros hasta la fecha supera los 200 millones, aunque no todos estos registros corresponden a compuestos comerciales.

El problema de los contaminantes orgánicos sintéticos no solo abarca la gran diversidad de compuestos, si no la gran cantidad que se producen de éstos. Por ejemplo, la producción de productos químicos básicos, que incluye muchos compuestos orgánicos sintéticos, supera los 2,5 mil millones de toneladas al año a nivel global; los plásticos, tienen una producción anual de aproximadamente 400 millones de toneladas y cifras similares son para la producción de fertilizantes y plaguicidas.

Aunado a la diversidad de compuestos orgánicos sintéticos y la gran cantidad que se produce en el mundo, se sabe muy poco de los efectos ambientales de estos químicos o los efectos sinérgicos en los ecosistemas o los efectos a largo plazo sobre la salud humana o de los ecosistemas. Algunos compuestos químicos son degradados por bacterias o procesos de tratamiento dando como resultados nuevos compuestos químicos con toxicidades variables; otros se degradan lentamente o se concentran en niveles superiores de la cadena alimenticia.

Otros compuestos, aunque inofensivos, son responsables del mal olor y sabor del agua, lo que da como resultado que las personas y animales no la utilicen. Otros son muy tóxicos a bajas concentraciones. Esta situación hace que sean insuficientes los estudios del impacto de estos contaminantes sobre el ambiente y esta falta de información hace difícil su regulación. El futuro no se ve bien para tratar o quitar estas sustancias del agua contaminada, la apuesta es más bien en la sustitución de estos materiales por unos biodegradables o de menor vida media.

Los contaminantes orgánicos sintéticos, a grandes rasgos se pueden clasificar en:

- **Compuestos Orgánicos Volátiles (COV):** Son sustancias químicas que se evaporan fácilmente en el aire. Ejemplos incluyen disolventes como

el benceno, tolueno y xileno, utilizados en pinturas, productos de limpieza y adhesivos. Los COV pueden contribuir a la contaminación del aire y tener efectos adversos en la salud.

- Plaguicidas y herbicidas: Estos compuestos se utilizan en la agricultura para controlar plagas y plantas no deseadas. Ejemplos incluyen el DDT, atrazina y glifosato. Aunque efectivos para su propósito, pueden contaminar el agua y el suelo, afectando ecosistemas y salud humana.
- Compuestos farmacéuticos: Medicamentos y productos farmacéuticos pueden ingresar al medio ambiente a través de desechos y excreciones. Ejemplos incluyen antibióticos y hormonas. Estos contaminantes pueden afectar a organismos acuáticos y alterar ecosistemas.
- Sustancias químicas industriales: Incluyen una variedad de productos químicos utilizados en procesos industriales, como plastificantes (ftalatos), retardantes de llama (bromados) y colorantes. Estos compuestos pueden ser liberados al medio ambiente durante la fabricación, uso o eliminación de productos.
- Contaminantes orgánicos persistentes (COP): Son compuestos que persisten en el medio ambiente durante largos períodos. Incluyen pesticidas como el DDT y compuestos industriales como los bifenilos policlorados (PCB). Estos contaminantes pueden bioacumularse en la cadena alimentaria y tener efectos a largo plazo en la salud y el medio ambiente.
- Productos de consumo: Muchas sustancias en productos de uso diario, como detergentes, cosméticos y productos de cuidado personal, contienen compuestos orgánicos que pueden actuar como contaminantes. Ejemplos incluyen fragancias sintéticas y conservantes.

5. Sedimentos de erosión

Incluyen partículas de suelos, arena y minerales que son arrastrados de la tierra por escurrimientos naturales, desarrollo agrícola, minería y actividades de cons-

trucción. La erosión natural de algunas zonas ya de por sí altas, se incrementa de 4 a 8 veces por prácticas agrícolas, de 10 a 15 por actividades desatendidas de construcción y de 50 a 500 veces por descuidadas y descontroladas prácticas de perforación. Estos sedimentos llenan canales, reservas, entre otros, reduciendo la cantidad de peces, ostras etc. También limitan la cantidad de sol que llega a las plantas acuáticas y disminuyen la capacidad de los ríos de asimilar los desechos con demanda biológica de oxígeno.

6. Desechos radiactivos

Los desechos radiactivos son materiales que contienen radionúclidos y emiten radiación ionizante, como alfa, beta o gamma, debido a la desintegración de átomos inestables. Estos desechos son resultado de diversos procesos y actividades que utilizan o producen materiales radiactivos. La gestión de estos desechos es crucial debido a los potenciales riesgos para la salud y el medio ambiente asociados con su radiactividad. Estos contaminantes incluyen los isótopos de torio 230, radio 226, estroncio 90, yodo 131 y son producto de desechos de actividades médicas, desechos de investigación, desechos de generación de energía nuclear, desechos industriales y hasta en algunos casos el resultado de las llamadas bombas sucias o dispositivos de dispersión nuclear utilizados en guerras.

Los desechos nucleares continúan aumentando y hasta la fecha no existe método aceptado para resguardarlos por cientos de años, que es la vida media de estos elementos. Debido a la peligrosidad de algunos isótopos y a que otros se bioacumulan en la cadena alimenticia debe haber estricto control.

7. Contaminación térmica

La contaminación térmica del agua se refiere al aumento de la temperatura del agua en cuerpos acuáticos debido a actividades humanas, como el vertido de aguas residuales industriales o la liberación de agua caliente utilizada en procesos de enfriamiento. El 90% del agua utilizada en la industria está destinada al enfriamiento. Este fenómeno puede tener varios efectos negativos en los ecosistemas acuáticos. El exceso de calor reduce la cantidad de oxígeno disuelto, por lo que decrece la capacidad

de supervivencia de algunas especies acuáticas y se alteran los ecosistemas. Con el calentamiento global este tipo de contaminación está en aumento, donde la temperatura del agua ha aumentado de 5 a 10 veces.

La contaminación térmica se puede minimizar con las torres de enfriamiento y los tanques de almacenamiento que son métodos costosos, pero efectivos, el uso controlado de agua caliente para promover el crecimiento de plantas y peces puede ofrecer una solución alternativa en ciertos contextos. La clave está en encontrar un equilibrio que minimice el impacto ambiental y maximice los beneficios ecológicos.

C. Impacto de la contaminación de los ríos, lagos y aguas subterráneas

Aunque la contaminación de ríos, lagos y aguas subterráneas comparte algunas similitudes, cada uno de éstos tiene características únicas que determinan el impacto de la contaminación sobre ellos. Es crucial abordar estos problemas de manera específica para cada tipo de cuerpo de agua, mediante políticas de gestión y conservación adecuadas que consideren estas diferencias. Los problemas de contaminación y sus probables soluciones difieren para los lagos y ríos.

I. Ríos

Los ríos son una parte esencial del ciclo hidrológico, pues recolectan agua de la lluvia, del deshielo y de las fuentes subterráneas, y la transportan a lo largo de la superficie terrestre. Estos cuerpos de agua superficiales fluyen continuamente por un cauce y están altamente expuestos a contaminantes provenientes de fuentes puntuales, como vertidos industriales y urbanos, así como de fuentes no puntuales, como la escorrentía agrícola.

En muchas partes del mundo, los ríos se han utilizado como canales de desagüe, en lugar de ser respetados por los importantes servicios ambientales que proporcionan. Además, los cortes de flujo o la disminución de su caudal representan un grave problema, ya que impiden que los ríos se recuperen fácilmente de la contaminación y los hacen comportarse más como lagos.

Los contaminantes más comunes incluyen productos químicos tóxicos, metales pesados, nutrientes excesivos y residuos plásticos. El flujo de los ríos puede ser disminuido por estancamientos de agua y por cambios de temporada. El uso extremo de agentes químicos no degradables puede causar muertes masivas a peces y bioacumularse en el último eslabón de la cadena alimenticia.

Para contaminación por calor, agentes de DBO y agentes químicos con corta vida media, la dilución puede ser la solución. La dilución no funciona para desechos radioactivos, metales y químicos con larga vida como DDT y PCB, por lo que debe evitarse su introducción a los ríos, evitando consecuencias muy serias. El saneamiento de los ríos se mide en semanas.

II. Lagos

Los lagos son cuerpos de agua dulce o salada que se encuentran rodeados de tierra y, a diferencia de los ríos, no fluyen de manera continua. Se forman en depresiones naturales del terreno y pueden ser alimentados por ríos, arroyos, aguas subterráneas, lluvia o deshielo. Los lagos desempeñan un papel crucial en el almacenamiento de agua, la regulación del clima local y el mantenimiento de la biodiversidad, ya que proporcionan hábitats para una gran variedad de especies acuáticas y terrestres.

Debido a su naturaleza estática, los lagos son especialmente vulnerables a la contaminación, que puede acumularse y persistir en el agua durante largos periodos, afectando la calidad del agua y la salud de los ecosistemas. Esta contaminación puede provenir de la escorrentía agrícola, aguas residuales, vertidos industriales y contaminación atmosférica que se deposita en el agua. La contaminación en los lagos puede ser especialmente severa debido a que el flujo de los lagos es bastante más lento que el de los ríos y, por tanto, tienen una capacidad limitada para diluir y renovar el agua. De esta manera, la renovación de lagos puede tomar décadas o cientos de años.

La eutrofización es un problema común, que puede causar zonas muertas donde la vida acuática no puede sobrevivir. Además, la sedimentación de contaminantes

en el fondo del lago puede tener efectos a largo plazo en el ecosistema. Son más susceptibles que los ríos a la magnificación biológica de ciertos químicos persistentes o no biodegradables.

Al igual que en los ríos, la contaminación de los lagos afecta la calidad del agua potable y puede llevar a brotes de enfermedades. Además, los lagos pueden sufrir la muerte de peces por químicos y la destrucción de la vida del fondo del lago, lo que puede afectar actividades recreativas y la pesca, que son importantes para muchas comunidades locales.

III. Aguas subterráneas

Las aguas subterráneas son aquellas que se encuentran bajo la superficie terrestre, almacenadas en espacios porosos y fisuras en rocas, suelos y sedimentos. Estas aguas se infiltran en el subsuelo desde la superficie, principalmente a través de la lluvia, la nieve derretida y otras formas de precipitación, y se acumulan en acuíferos, que son formaciones geológicas capaces de almacenar y transmitir agua.

Las aguas subterráneas son una fuente crucial de agua dulce para el consumo humano, la agricultura y la industria, especialmente en áreas donde los cuerpos de agua superficiales son escasos o estacionales. A pesar de estar protegidas por capas de suelo y roca, las aguas subterráneas pueden contaminarse por actividades humanas como la agricultura intensiva, el vertido de desechos industriales y las fugas de tanques de almacenamiento subterráneos, lo que puede tener consecuencias graves y a largo plazo para la calidad del agua y la salud humana.

Los mantos acuíferos son una fuente muy importante de agua fresca. Éstos se han visto amenazados por la creciente práctica de las industrias de inyectar sus desechos al subsuelo. En teoría estas inyecciones son seguras, pues se perforan hasta encontrar una capa de roca porosa o permeable aislada por rocas impermeables sin fisuras hasta una cierta distancia. Sin embargo, estas condiciones son raras y difíciles de encontrar, y aun cuando se encuentran, los contaminantes logran migrar a otras zonas. También es posible que las paredes de tubos industriales se rompan o corroan.

Otra práctica que amenaza las aguas subterráneas es el *fracking*. Esta técnica se utiliza en la extracción de petróleo y gas natural de formaciones geológicas subterráneas. Implica la inyección de una mezcla de agua, arena y productos químicos a alta presión en la roca subterránea para crear pequeñas fracturas. Estas fracturas permiten que el petróleo o el gas, atrapados en el interior de la roca, fluyan hacia la superficie, donde pueden ser capturados y almacenados.

D. Análisis químicos del agua

Los parámetros de rutina a medir en el agua¹¹⁷ son aquellos que permiten evaluar la calidad del agua de manera general y se utilizan comúnmente en estudios ambientales, de control sanitario y en el monitoreo de cuerpos de agua. Estos parámetros proporcionan una visión general de la calidad del agua y permiten identificar posibles problemas ambientales o de salud pública que puedan requerir medidas de mitigación.

Los parámetros pueden variar según el tipo de cuerpo de agua (río, lago, acuífero, etc.) y el propósito del análisis, pero los más comunes incluyen los siguientes:

I. Parámetros fisicoquímicos

- Temperatura: Influye en las reacciones químicas, la solubilidad del oxígeno y la actividad biológica en el agua.
- pH: Mide la acidez o alcalinidad del agua. Un pH fuera del rango óptimo (6.5-8.5) puede indicar contaminación o condiciones desfavorables para la vida acuática.
- Conductividad eléctrica (CE): Refleja la capacidad del agua para conducir electricidad, lo que está relacionado con la concentración de sales disueltas.

¹¹⁷ Chapman, Deborah (ed.) (1996), *Water Quality Assessments: A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*, publicado en nombre de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, la Organización Mundial de la Salud y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, p. 626.

- **Sólidos disueltos totales (TDS):** Mide la cantidad de sólidos disueltos en el agua, como minerales, sales y materia orgánica. El agua puede contener gran cantidad de material sólido tanto disuelto, como suspendido. Se dice que un material sólido está disuelto cuando puede pasar a través de un filtro de fibra de vidrio de aproximadamente un micrómetro de tamaño de poro. Este parámetro se relaciona con la conductividad eléctrica del agua.
- **Turbidez:** Indica la claridad del agua y la presencia de partículas suspendidas. Alta turbidez puede afectar la calidad del agua y la salud de los ecosistemas acuáticos al evitar el paso de la luz solar.
- **Oxígeno disuelto (OD):** Los gases se pueden disolver en agua y cada gas tendrá diferente solubilidad. El oxígeno no es muy soluble en agua. Una solución saturada de agua con oxígeno tiene 9 ppm en peso (9 mg/L). La temperatura puede aumentar o disminuir este valor. El oxígeno disuelto OD es esencial para varias formas de vida y como tiene tan poca solubilidad, con poco material que lo consuma, se acaba. Al terminarse, las bacterias anaerobias empiezan a funcionar, produciendo las sustancias de mal olor. Bajos niveles de OD pueden ser indicativos de contaminación orgánica o actividad biológica excesiva.

II. Parámetros químicos

- **Demanda bioquímica de oxígeno (DBO):** Es una prueba para medir la cantidad de materia orgánica biodegradable y se expresa en mg/L de OD que los microorganismos van a consumir al degradar estos materiales. Ya que esta prueba biológica toma 5 días, usualmente se utiliza una prueba más rápida que toma 2 días, la llamada demanda química de oxígeno.
- **Demanda química de oxígeno (DQO):** Mide la cantidad total de materia oxidable en el agua, proporcionando una estimación del nivel de contaminación.

- Nutrientes:
 - Nitratos (NO_3^-): Altos niveles pueden indicar contaminación por fertilizantes o aguas residuales.
 - Fosfatos (PO_4^{3-}): Contribuyen a la eutrofización, que puede causar proliferación de algas y deterioro de la calidad del agua.
 - Amonio (NH_4^+): Su presencia puede indicar la descomposición de materia orgánica o contaminación por aguas residuales.
- Cloruros (Cl^-): El cloro es el desinfectante más común para agua. Tiene efectos tóxicos y sus subproductos carcinogénicos como el cloroformo o cloraminas que se forman al reaccionar con materia orgánica. El cloruro es tóxico para la vida acuática. Pueden indicar contaminación salina, influencias marinas o descarga de aguas residuales. Existen varios métodos para la medición de cloro, algunos de los cuales pueden distinguir entre cloro libre y cloraminas.
- Alcalinidad: Capacidad del agua para neutralizar ácidos, influida por la presencia de carbonatos, bicarbonatos y otros compuestos.
- Aceites y grasas: Aceites y grasas son los nombres de un grupo de compuestos que pueden ser extraídos del agua usando solventes orgánicos. Pueden ser de origen biológico (grasa animal, aceite vegetal) o mineral (hidrocarburos de petróleo), o pueden ser compuestos sintéticos. Todos estos productos son un problema, ya que se forman 2 fases con el agua.

Las grasas de restaurantes y procesadores de comida pueden tapar tuberías y por el otro lado los productos del petróleo pueden ser tóxicos y flamables y/o adherirse a superficies e interferir con la biodegradación con microorganismos.

III. Parámetros biológicos

- Coliformes Totales y *Escherichia coli*: Indicadores de contaminación fecal y calidad sanitaria del agua. Su presencia puede señalar riesgos para la salud pública.

- Clorofila-a: Indicativa de la cantidad de fitoplancton en el agua, lo que puede mostrar la productividad del ecosistema acuático.

IV. Parámetros microbiológicos

- Bacterias Patógenas: Además de coliformes, otras bacterias como *Salmonella* o *Vibrio cholerae* pueden ser monitoreadas en aguas destinadas a consumo humano o recreación.

V. Metales pesados y contaminantes orgánicos

- Metales pesados: Pueden ser altamente tóxicos y acumularse en los organismos acuáticos, afectando tanto la vida acuática como la salud humana. En agua se encuentran mayormente como iones, aunque pueden estar ligadas a sustancias orgánicas. Los metales pueden ser esenciales como el hierro, magnesio, potasio o ser tóxicos como el plomo, cadmio y mercurio. La normatividad mexicana enlista 13 metales aproximadamente (dependiendo del tipo y uso del agua), mientras que la EPA lista 9 metales de origen industrial como prioritarios por su toxicidad (arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel, plata y zinc).
- Compuestos orgánicos: Pueden provenir de contaminación industrial o agrícola. Muchos compuestos orgánicos son biológicamente activos, pero la industria usa y produce miles de compuestos orgánicos que vienen de los plásticos, fibras sintéticas, hules, productos farmacéuticos, plaguicidas, productos del petróleo, etc. La normatividad mexicana exige el análisis de aproximadamente 46 compuestos orgánicos (dependiendo del tipo de agua a analizar). La EPA tiene una lista de 116 compuestos como contaminantes prioritarios, aunque algunos estados tienen listas más grandes.

E. La matriz en el análisis químico

El área de la química que estudia los constituyentes de cualquier sustancia, compuesto, sustrato, producto, material, entre otros, se conoce como química analítica.

La química analítica se enfoca en la identificación y cuantificación de los componentes químicos presentes en una muestra. Al componente que se desea analizar se le llama analito y al entorno o medio en el que están presentes el/los analito(s) se le llama matriz. En nuestro caso, los analitos son los contaminantes y las matrices de los cuerpos de agua continental son el agua en sí misma, los sedimentos y partículas suspendidas que la contienen y la biota que habita en estos entornos.

De esta manera, las matrices que se analizan en los cuerpos de agua son muy diferentes entre sí y pueden ser muy complejas, por la gran cantidad de elementos y sustancias que lo constituyen (por ejemplo, los seres vivos) o matrices más sencillas como al agua misma que tiene menor cantidad de compuestos que la constituyen. La matriz puede contener componentes que interfieren con la detección del analito, o pueden ser difíciles de separar, por lo que entender la matriz es esencial para asegurar que los métodos utilizados sean adecuados para la muestra analizada.

El tipo de matriz es uno de los problemas centrales en el análisis químico y muchas veces del que menos se habla.¹¹⁸ De esta manera, para extraer el analito que nos interesa de una cierta matriz, se deben realizar una serie de procesos químicos. A este conjunto de pasos, se le llama preparación de la muestra. La preparación de la muestra depende de la matriz ambiental de la que se trate y mientras más compleja sea ésta, más procesos químicos necesitará, por ende, más complicada es la preparación de la muestra.

La preparación de la muestra, aunque es un paso crucial en el análisis de cualquier compuesto en cualquier matriz, debe completarse con varios procedimientos adicionales antes de obtener la información sobre la cantidad de analito presente en la matriz. La Figura 2 nos muestra de manera simplificada, los pasos necesarios en un análisis químico.

¹¹⁸ Hartmann, Peter, "Environmental Analytic - From the Spot Analysis to the Continuous Monitoring", 1994, *Chemische Technik*, 46, pp. 71-74.



F. Control de calidad en los análisis químicos

Una mala planeación nos lleva a datos sesgados, sin sentido o sin valor. Siempre debe tenerse en mente para que se van a utilizar los resultados. Entonces, el objetivo de una buena planeación es definir el problema y el programa analítico lo suficiente como para que los resultados se obtengan de una manera eficiente y confiable. No se debe asumir que la persona que solicita un análisis será capaz de definir los objetivos del análisis adecuadamente.

Uno de los elementos más importantes en la planeación es la incorporación de criterios de decisión. Ejemplo, cuántas muestras se necesitan como mínimo, cuántas repeticiones mínimas, cuánto es el error que se va a aceptar, etc. Todos tenemos nociones de lo que es importante, pero por qué debe hacerse o cuándo o exactamente qué se debe hacer, es poco claro. Algunas de las preguntas que se deberían de considerar durante la planeación son:

- ¿Cuál es el nivel de confianza requerido en la identificación del analito?
- ¿Cuál es el nivel requerido en la medición cuantitativa?
- ¿Cuál es el nivel de confianza requerido?
- ¿Cuál es el nivel de validación del método que se requiere?
- ¿Cuál es el nivel requerido de aseguramiento de la calidad?

Cada laboratorio debe tener y usar su programa de aseguramiento de la calidad. Este programa puede ser tan sencillo o complicado como el laboratorio lo requiera. Puede ir desde correr una muestra cada vez que se enciende un equipo hasta sistemas mucho más complicados.

Tener los programas de aseguramiento de calidad incluye tener: 1) Los protocolos escritos; 2) Los criterios de aceptación o rechazo; 3) Las acciones a tomar en caso de rechazo; 4) La(s) persona(s) asignadas a realizar los protocolos; y 5) La revisión de los resultados de estos protocolos. Asimismo, los niveles requeridos en la calidad de los resultados van a depender en las concentraciones a las que se encuentre el analito; a menor concentración del analito mayor es el cuidado que debe tenerse al hacer los análisis, es decir, mayores controles de calidad.

II. Laboratorios acreditados

Un laboratorio acreditado es una entidad que ha sido evaluada y certificada por un organismo de acreditación independiente para garantizar que cumple con normas específicas de calidad y competencia técnica. Esta acreditación indica que el laboratorio opera de acuerdo con estándares internacionales reconocidos, como la norma ISO/IEC 17025, que es el estándar más común para laboratorios de ensayo y calibración. La acreditación de un laboratorio pretende ser una garantía de

que éste cumple con los más altos estándares de calidad y competencia técnica, lo que proporciona confianza en los resultados obtenidos. El organismo de acreditación de laboratorios en México es la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) que evalúa los procedimientos, la competencia del personal, el equipo y la infraestructura del laboratorio. La EMA junto con la CONAGUA proporciona una lista de laboratorios acreditados en México,¹¹⁹ así como los detalles sobre los tipos de análisis ambientales que realizan.

Existen también laboratorios que no son acreditados, pero que, sin embargo, también generan resultados confiables. Esta situación es común en, por ejemplo, los laboratorios de investigación, ya que la naturaleza de su trabajo y sus objetivos son diferentes de los laboratorios que requieren acreditación. Los laboratorios acreditados son generalmente laboratorios privados o públicos donde los análisis que se realizan son siempre los mismos. Los laboratorios de investigación necesitan flexibilidad para modificar, desarrollar y adaptar métodos según las necesidades de la investigación, lo que puede implicar el uso de procedimientos no estandarizados o en desarrollo que aún no han sido validados formalmente. Por el contrario, los laboratorios acreditados deben seguir métodos estandarizados y validados, con un enfoque en la precisión y la reproducibilidad de los resultados. Estos laboratorios están sujetos a estrictas normas de procedimiento y control de calidad que limitan la flexibilidad metodológica.

Sin embargo, es fundamental que cualquier resultado emitido por un laboratorio, ya sea acreditado o no, cumpla con los parámetros de validación del método utilizado. La validación de un método¹²⁰ es el proceso mediante el cual se verifica que un procedimiento de análisis es adecuado para el propósito previsto, asegurando que los resultados obtenidos sean precisos, confiables y reproducibles. Sin esta validación, los resultados obtenidos podrían ser cuestionables, lo que podría llevar a conclusiones incorrectas o decisiones inadecuadas, especialmente en contextos críticos en la industria, la salud, el medio ambiente y la investigación científica.

¹¹⁹ Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), *Laboratorios Acreditados para Análisis de Muestras Ambientales en México*, 2020, ONAM.

¹²⁰ Castillo Aguilar, Bernardo y González Hernández, Roberto, "Protocolo de validación de métodos analíticos para la cuantificación de compuestos", 1996, *Revista Cubana de Farmacia*, 30, pp. 1-5.

III. La validación de un método

La validación de un método es importante porque asegura la generación de datos confiables. Los costos de los análisis son altos y decisiones hechas con base en esos resultados son aún más costosas. La validación es el proceso por el cual se definen los requerimientos analíticos y confirma que la metodología estudiada tiene las capacidades de actuación consistentes con la aplicación requerida.

Está implícito que para hacer la validación de un método:

- 1) El analista sabe lo que está haciendo.
- 2) Los equipos a utilizarse están calibrados, tienen las especificaciones necesarias para el objetivo del análisis y están funcionando correctamente.

La validación de una metodología es la prueba de que el procedimiento desarrollado nos arrojará datos confiables. Algunos de los parámetros estadísticos de validación son:

- 1) Precisión.¹²¹ Es el grado en el que los resultados coinciden uno con otro al repetirlos en varias ocasiones. La precisión se determina a diferentes niveles: repetibilidad, precisión intermedia y reproducibilidad. Se puede expresar con la *Desviación Estándar Relativa* (DSR). La tabla 1 muestra las DSR aceptables dependiendo de la concentración del contaminante o parámetro que se esté determinando.

La repetibilidad. Las determinaciones llevadas a cabo por un solo operador en un mismo instrumento en un periodo corto de tiempo (en un día). Se debe determinar a concentraciones altas y bajas.

¹²¹ International Organization for Standardization, ISO/IEC 17025:2017: *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*, 2017.

Tabla 1
Repetibilidad aceptable para los
diferentes niveles de concentraciones

Concentración	Repetibilidad % ($DSR = S/\mu \times 100$)
100%	1
10%	1.5
1%	2
0.1%	3
0.01%	4
10 ppm	6
1 ppm	8
10 ppb	15

Precisión intermedia. La variabilidad de la medición a largo plazo en un mismo laboratorio. Toma en consideraciones las variaciones por el mismo operador, diferentes operadores, diferentes instrumentos, diferentes lotes de reactivos, estándares, etc., ¡esta precisión es la que más se utiliza!

Reproducibilidad. Precisión obtenida por diferentes laboratorios. Pueden variar grandemente en términos de equipo, adiestramiento del personal, suministros, etc.

Tabla 2
Precisiones en la validación y sus diferencias

Parámetro	Repetibilidad	Precisión intermedia	Reproducibilidad
Instrumento	Misma	Diferente	Diferente
Analista	Misma	Diferente	Diferente

Concentración	Diferente	Diferente	Diferente
Lotes de materiales	Misma	Diferente	Diferente
Condiciones ambientales ej. Temperatura, humedad	Misma	Diferente	Diferente
Laboratorio	Mismo	Mismo	Diferente

- 2) Exactitud.¹²² Indica que tan cerca se está del valor real en la medición. Se obtiene utilizando materiales de referencia (certificados o no). Por adición estándar a las muestras. Se expresa como porcentaje de recuperación.

Tabla 3
Valores de exactitud que se deben esperar
por rango de concentración

Concentración	% de Recuperación
100 %	98-101
10 %	95-102
1 %	92-105
0.1 %	90-108
0.01 %	85-110
10 ppm	80-115
1 ppm	75-120

- 3) Linealidad (intervalo de trabajo). Se define como el intervalo en el procedimiento analítico en el que la señal analítica es proporcional a la concentración del analito. La manera más común de determinar la linealidad está basada en la graficación de una señal de un cierto equipo de medición, contra una concentración.

¹²² *Idem.*

Esta gráfica debe tener al menos 6 puntos (usualmente con tres repeticiones en cada nivel). Los estándares utilizados para la construcción de la gráfica deben incluir concentraciones del 50 al 150% esperadas del analito. Los estándares de la calibración deben tener, en la medida de lo posible, la misma matriz en la que vienen las muestras. Si la matriz es complicada, para desechar sesgos por efectos de matriz, se debe hacer una adición estándar (Figura 3). Con ello se obtiene la regresión lineal de la recta.

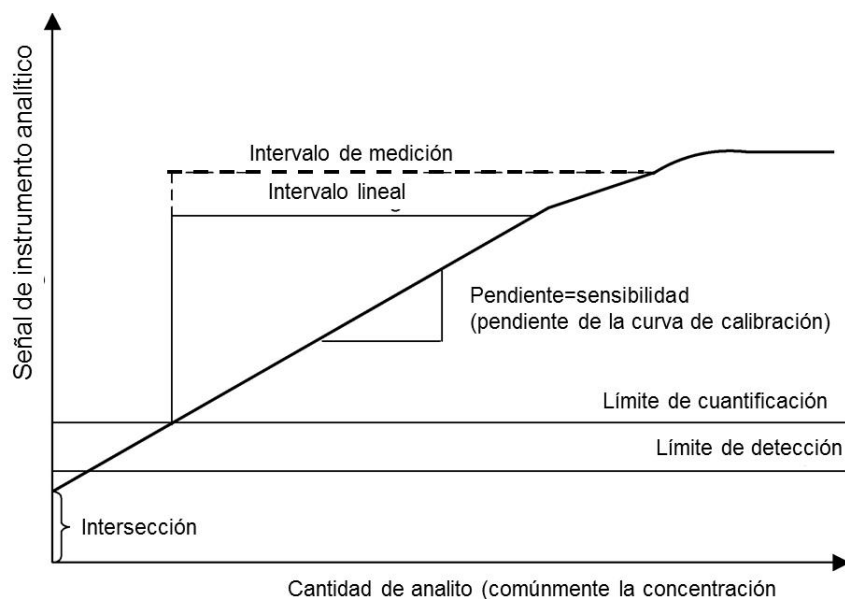


Figura 3. Curva de calibración para la cuantificación de un analito donde se muestra el intervalo de trabajo, límite de detección y cuantificación y la sensibilidad del método.

El coeficiente de correlación se puede usar como prueba de linealidad, solo en el caso de que las soluciones de calibración llenen lo requerimientos:

- El intervalo de concentraciones de los estándares abarque las concentraciones esperadas de las muestras.

- El intervalo de concentración no sea mayor a tres veces la concentración del analito.
 - Que abarque uniformemente el intervalo de concentraciones.
- 4) Límite de detección y límite de cuantificación.¹²³ El límite de detección se define como la concentración más pequeña del analito que se puede distinguir inequívocamente del ruido (cero). Es difícil establecer un solo método para la obtención del LD. Los estimados de LD son bastante inciertos y en realidad solo son aproximados. Los métodos estadísticos clásicos para obtener el LD o LC, asumen:
- el error aleatorio se distribuye normalmente;
 - que se está utilizando una metodología sin sesgo;
 - que el blanco que se utiliza es un blanco de campo, es decir, una muestra sin analito que pasa por todos los procesos del método;
 - que la varianza de las mediciones del blanco de campo es igual a la de las muestras con poco analito, y
 - que las matrices de blancos y muestras son idénticas.

En realidad, el límite de detección depende mucho de las condiciones de medición y sus incertidumbres asociadas.

El límite de detección definido como:

$$LD = YB + kSB$$

donde LD es el límite de detección, YB es la señal del blanco, k es la constante ($k=2$ o $k=3$ o $k=23/2$) (t Student para # repeticiones) y SB es la desviación estándar del blanco.

Para obtener un valor realista de la desviación de las mediciones, es necesario hacerlas no consecutivas (por ejemplo, cada 30 minutos).

¹²³ Miller, James C. y Miller, Jane N., *Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry*, (6a. ed.). Prentice Hall, 2010, p. 278.

En muchos casos no es posible encontrar blancos realmente representativos. La alternativa es hacerlo con bajas concentraciones en las muestras. La estimación de la desviación estándar de las concentraciones de la muestra dependerá de su comportamiento con respecto a la concentración.

- 5) Sensibilidad. La sensibilidad es la capacidad del método para cambiar la intensidad de la señal con respecto a la concentración. No existe parámetro estadístico en la validación que indique la sensibilidad.

La sensibilidad del método se integra dentro del límite de detección:

$$C_{LD} = kS_B / m$$

C es la concentración o masa límite de detectar.

m es la pendiente de la curva de calibración en las bajas concentraciones.

- 6) Selectividad y especificidad del método. Selectividad es la capacidad de un método de distinguir un cierto analito de otras sustancias. Un método se le puede llamar específico cuando alcanza la mayor selectividad. En términos prácticos, la selectividad de un método decrece con:

- la composición de la muestra es incierta;
- la complejidad de la matriz aumenta;
- los componentes de la matriz no difieren mucho del analito a determinar;
- se determinan un gran número de analitos;
- los analitos por determinar son similares, y
- decrece la concentración del analito.

La selectividad se puede incrementar usando métodos analíticos que son selectivos y/o eliminando la influencia de componentes interferentes por exclusión o encubrimiento.

Recapitulando, los parámetros de validación son para asegurar que se obtienen resultados certeros y confiables y poder demostrar que lo son.

Entonces, los resultados de una medición solo son confiables si se han determinado sus parámetros de validación, es decir, al aplicar un método validado que a su vez requieren de materiales de referencia, blancos y comparaciones inter-laboratorios.

IV. Selección de un método analítico

Para analizar un contaminante o determinar algún parámetro fisicoquímico, es fundamental utilizar un método estandarizado.

Un método estandarizado es aquel que ha sido validado por una entidad autorizada, lo que garantiza su precisión, reproducibilidad y aceptación en la comunidad científica y regulatoria. Entre estos métodos se encuentran las Normas Oficiales Mexicanas (NOM)¹²⁴ y otros métodos reconocidos en el ámbito internacional. La adopción de métodos internacionales es especialmente relevante en el contexto mexicano, dado que la influencia de normativas y estándares de países como Estados Unidos es evidente debido a la proximidad geográfica y las relaciones comerciales.

Instituciones como la AOAC (Association of Official Analytical Collaboration), el USDA (United States Department of Agriculture), la FDA (Food and Drug Administration) y la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) son algunas de las entidades que desarrollan y validan estos métodos, asegurando su fiabilidad y pertinencia. Además, en algunos casos, pueden utilizarse métodos publicados en literatura científica o, incluso, métodos desarrollados específicamente para un proyecto, siempre y cuando se hayan sometido a un proceso riguroso de validación.

Para seleccionar el método más adecuado, es esencial evaluar una serie de características que incluyen la aplicación del método (es decir, si es adecuado para el

¹²⁴ Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental, Dirección General Adjunta de Política Regulación Ambiental – SEMARNAT, *Prontuario Normas Oficiales Mexicanas*.

tipo de muestra y el contaminante o parámetro a analizar), las características específicas de la metodología (como el equipo necesario, el tiempo de análisis y la complejidad técnica), y las características de desempeño (precisión, exactitud, sensibilidad, límite de detección, etc.). La Figura 4 ilustra cómo deben considerarse estos aspectos para tomar una decisión informada sobre el método a emplear.

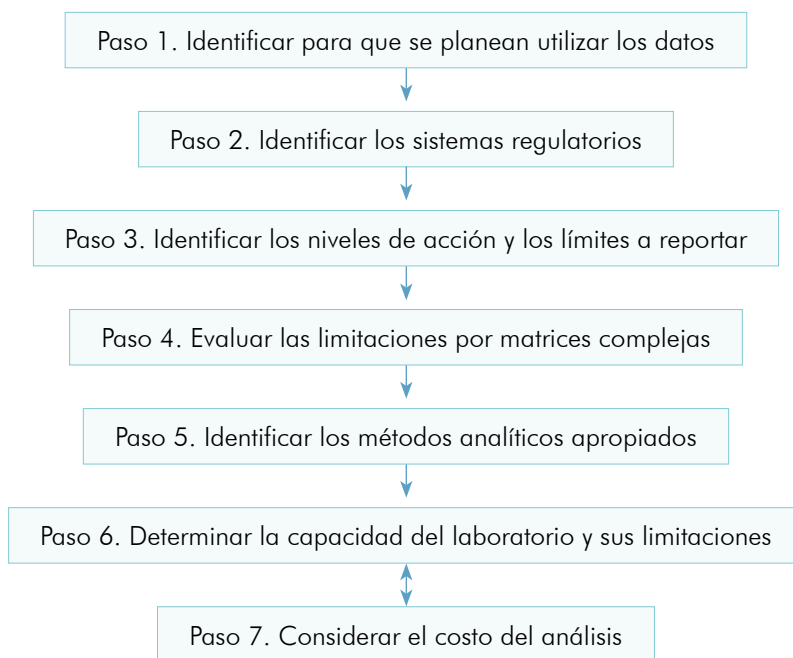


Figura 4. Proceso de selección de una metodología válida para el análisis de contaminantes.

V. Plan de Análisis y Muestreo (PAM)

Esta sección amplía y precisa aspectos particulares del muestreo integrados en el Programa de Monitoreo de la Calidad del Agua (PMCA) abordado en el capítulo 1. El Plan de Análisis y Muestreo (PAM) es un componente crucial en cualquier proyecto ambiental, ya que establece las directrices para la recolección, análisis y evaluación de datos relacionados con la calidad ambiental. Este documento es esencial para garantizar que las muestras obtenidas en el campo sean representativas y

que los análisis realizados cumplan con los estándares necesarios para producir resultados precisos y confiables.

El PAM define los objetivos específicos del muestreo, los parámetros a medir, las técnicas de recolección y análisis, así como los criterios de calidad que deben cumplirse en cada etapa del proceso. Su correcta implementación permite una evaluación rigurosa del impacto ambiental para facilitar la toma de decisiones informadas para la gestión y mitigación de riesgos ambientales. En resumen, el PAM no solo es una herramienta técnica, sino también una base sólida para la integridad y credibilidad de los resultados de un proyecto ambiental. Los componentes del PAM incluyen:

1. Administración del proyecto

- a. Introducción
- b. Antecedentes e historial del sitio
- c. Definición del problema
- d. Organización del proyecto
- e. Objetivos del proyecto y propósito de los datos

2. Obtención de datos de campo y de laboratorio

- a. Diseño del proceso de muestreo
- b. Métodos de muestreo
- c. Manejo y custodia de muestras
- d. Métodos analíticos
- e. Control de calidad
- f. Inspección, mantenimiento y prueba de equipos e instrumentos
- g. Calibración de equipos e instrumentos
- h. Aceptación, inspección de consumibles
- i. Mediciones indirectas
- j. Manejo de datos

3. Evaluación y revisión

- a. Evaluación y acciones a tomarse
- b. Reportes a la administración

4. Verificación y uso de datos

- a. Revisión de datos, verificación y validación
- b. Validación y verificación de métodos

Los elementos del grupo 1 se refieren a la administración del proyecto y control de la documentación y da una idea general de la historia y necesidad del proyecto, así como los alcances de éste. En esta sección se diferencia entre un proyecto con datos para examinar la región (prospectivo) o para obtener valores definitivos.

Los elementos del grupo 2 describen el tipo, cantidad y calidad de los datos a ser colectados, así como las actividades en campo y en el laboratorio que serán utilizados para obtener datos. El proceso de diseño de muestreo incluye la definición del tipo de muestras, puntos de muestreo y frecuencias de muestreo y, por supuesto, mapas mostrando los lugares de muestreo como pudiera ser cuadriculado de la zona. El mapa deberá mostrar particularidades de la región como pozos de agua, suelos con desprendimientos, etc.

En esta sección se generan gran cantidad de datos de laboratorio, por lo que el laboratorio deberá proporcionar los métodos y controles de calidad de estos. Esto se vuelve particularmente importante cuando los datos están cerca de los límites de detección o cuando los análisis no sean rutinarios.

Las mediciones indirectas son cuando se utilicen datos obtenidos anteriormente para la toma de decisiones.

En la sección 3 se considera la evaluación y auditorías del proyecto, así como auditorías de los métodos (se pueden utilizar muestras problema al laboratorio). La evaluación de los datos permite identificar problemas en el campo o en el laboratorio e implementar acciones correctivas antes de la generación del reporte, las cuales también son reportadas.

En el grupo 4 se reevalúan los métodos y calidad de los datos, dependiendo de las conclusiones y acciones que se tomarán con los datos generados.

G. Normas mexicanas e internacionales sobre los cuerpos de agua

Las normas mexicanas ambientales (NOM) pueden dividirse en diferentes categorías, y una forma común de hacerlo es en métodos de análisis y niveles permitidos.

Las normas de métodos analíticos¹²⁵ establecen los procedimientos técnicos y científicos que deben seguirse para medir la concentración de contaminantes o la calidad ambiental en distintos medios como el agua, el aire, el suelo, etc. Por ejemplo, una NOM puede especificar cómo debe realizarse un análisis químico para determinar la presencia de ciertos contaminantes en el agua.

Las normas de niveles permitidos definen los límites máximos permisibles de contaminantes en diferentes medios ambientales.^{126 y 127} Estos niveles están diseñados para proteger la salud humana, la flora, la fauna y el medio ambiente en general. Dentro de la normatividad mexicana existen dos tipos que desempeñan funciones clave, las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y las Normas Mexicanas (NMX).^{128 y 129}

La principal diferencia entre ellas radica en su obligatoriedad: las NOM tienen carácter obligatorio, mientras que las NMX son de carácter voluntario y funcionan como recomendaciones. Las NOM son regulaciones técnicas emitidas por dependencias gubernamentales y su función es establecer reglas, especificaciones y requisitos aplicables a productos, procesos, instalaciones, sistemas, actividades, servicios o métodos. Por su parte, las NMX están diseñadas para especificar las características que deben cumplir ciertos productos o servicios que podrían representar un riesgo para la seguridad o afectar la salud humana, animal, vegetal, o el medio ambiente.

¹²⁵ Secretaría de Economía, *Catálogo Mexicano de Normas*.

¹²⁶ CMIC, *Medio Ambiente y Sustentabilidad: NOM y NMX*.

¹²⁷ SEMARNAT, *Normas Mexicanas*, 2021.

¹²⁸ Villalobos, Néstor, *Las 4 Grandes Diferencias entre NOM y NMX*, 2020.

¹²⁹ United States Environmental Protection Agency (EPA), *Our Mission and What We Do*, 2021.

Ambas normativas, implementadas desde 1993 en el marco del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN), comparten un objetivo común: garantizar la calidad y seguridad en la producción de bienes y la prestación de servicios en México.

De esta manera, las diferentes categorías de las normas mexicanas ayudan a estructurar y aplicar las regulaciones ambientales en México, asegurando que tanto los métodos de evaluación como los estándares de calidad ambiental sean claros y efectivos.

Por su parte, las normas ambientales en Estados Unidos y Canadá también pueden dividirse en categorías similares a las de México, como métodos de análisis y niveles permitidos, aunque la estructura y terminología pueden variar según el país y la agencia reguladora.

En Estados Unidos, la Environmental Protection Agency (EPA) es la principal agencia encargada de regular las normas ambientales.¹³⁰ La EPA establece métodos estandarizados para el análisis de contaminantes en diferentes medios (agua, aire, suelo, etc.). Estos métodos son publicados en manuales y guías técnicas, y se utilizan para asegurar que las mediciones sean consistentes y confiables. Asimismo, la EPA también establece límites máximos permisibles de contaminantes en el aire (National Ambient Air Quality Standards - NAAQS),¹³¹ en el agua potable (National Primary Drinking Water Regulations),¹³² y en otros medios. Estos niveles están diseñados para proteger la salud pública y el medio ambiente.

En Canadá, las normativas ambientales son reguladas tanto en el ámbito federal como provincial. El Environment and Climate Change Canada (ECCC)¹³³ es la agencia federal responsable. Canadá también tiene métodos estandarizados para el

¹³⁰ United States Environmental Protection Agency (EPA), *National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)*, 2021.

¹³¹ United States Environmental Protection Agency (EPA), *National Primary Drinking Water Regulations*, 2023.

¹³² Environment and Climate Change Canada, *Environment and Climate Change Canada*, 2023, Government of Canada.

¹³³ Canadian Council of Ministers of the Environment, *Canadian Environmental Quality Guidelines*, 2022, CCME.

análisis de contaminantes, que son utilizados por las agencias reguladoras y las industrias para asegurar que las mediciones de contaminantes sean precisas. Canadá establece estándares de calidad ambiental a través de diversos instrumentos, como las Canadian Environmental Quality Guidelines,¹³⁴ que incluyen límites para la calidad del agua, aire y suelo. También se establecen límites permisibles de contaminantes en normas específicas, similares a las NOM en México.

I. Normas ambientales en México y Estados Unidos

Las normas ambientales de México y Estados Unidos comparten el objetivo común de proteger el medio ambiente y la salud pública, pero difieren en varios aspectos clave, incluyendo su estructura, enfoque regulatorio, nivel de detalle y el proceso de creación y aplicación de las normativas.¹³⁵ A continuación, se destacan algunas de las principales diferencias.

1. Estructura regulatoria

Las normas ambientales en México se conocen como “Normas Oficiales Mexicanas (NOM)”. Estas normas son emitidas por diferentes secretarías de gobierno, pero las relacionadas con el medio ambiente son principalmente responsabilidad de la *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)* y sus agencias, como la *Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA)*. Las NOM cubren una amplia gama de temas, desde los métodos de análisis hasta los niveles permitidos de contaminantes en el aire, agua, suelo y otras áreas.

En Estados Unidos, la *Environmental Protection Agency (EPA)* es la principal agencia encargada de la regulación ambiental en el ámbito federal. Las normas ambientales se implementan bajo una variedad de leyes, como la “Clean Air Act”, “Clean Water Act” y la “Resource Conservation and Recovery Act (RCRA)”. Las regulaciones son codificadas en el “Code of Federal Regulations (CFR)”, particularmente en el título 40 (40 CFR), que contiene la mayoría de las normativas ambientales.

¹³⁴ Mumme, Stephen P., “The 1944 Water Treaty and the Incorporation of Environmental Values in U.S.-Mexico Transboundary Water Governance”, *Environmental Science & Policy*, 2020, 112, pp. 126-133.

¹³⁵ Ponce Nava, Diana, “Comparación de la Legislación Ambiental de México, Estados Unidos y Canadá”, *Revista de Administración Pública*, 1987, pp. 11-137.

2. Proceso de creación y aplicación

El proceso de creación de las NOM es bastante formal y requiere la participación de múltiples partes interesadas, incluidos expertos, la industria y el público. Las NOM deben ser revisadas y actualizadas periódicamente. Son de cumplimiento obligatorio una vez publicadas, la PROFEPA se encarga de su supervisión y cumplimiento.

En Estados Unidos, la EPA desarrolla regulaciones a través de un proceso detallado que incluye investigaciones científicas, revisiones públicas, y a menudo un proceso legislativo. Una vez propuestas, las regulaciones están sujetas a un periodo de comentarios públicos antes de su implementación. La aplicación es estricta, con la EPA y otras agencias federales y estatales supervisando el cumplimiento. Las regulaciones pueden ser actualizadas o cambiadas dependiendo de los avances científicos, cambios en la legislación o decisiones judiciales.

3. Enfoque y detalle de las normas

Las NOM tienden a ser más específicas en cuanto a los métodos de análisis y niveles permisibles de contaminantes. Sin embargo, en algunos casos, pueden ser más generales en comparación con las normativas de Estados Unidos, especialmente en términos de aplicación. Las regulaciones de la EPA suelen ser muy detalladas, con un enfoque riguroso en el cumplimiento. Esto incluye especificaciones técnicas muy precisas y criterios de desempeño claros.

En muchos casos, las regulaciones de la EPA son más estrictas y amplias que las normas equivalentes en México. Estados Unidos también cuenta con un sistema legal que permite el litigio ambiental, lo cual influye en la creación y aplicación de normativas más detalladas.

4. Enfoque en la protección y responsabilidad

Las normas ambientales en México se han centrado tradicionalmente en el cumplimiento de límites permisibles y la prevención de daños ambientales. La legislación ambiental ha evolucionado para incluir más enfoque en la sostenibilidad y

el cambio climático. Por el otro lado, Estados Unidos ha desarrollado un enfoque más integral que incluye no solo la regulación y control, sino también la responsabilidad ambiental, permitiendo demandas y acciones legales para la reparación de daños ambientales (Superfund Sites). Las regulaciones de la EPA incluyen mandatos estrictos para la remediación de sitios contaminados y pueden imponer fuertes multas y sanciones por incumplimiento.

5. Perspectiva en el cambio climático

México ha avanzado en la creación de políticas y normativas específicas sobre cambio climático, como la Ley General de Cambio Climático, pero la implementación aún enfrenta desafíos. Mientras tanto, la política climática de Estados Unidos ha variado con las administraciones presidenciales, pero la EPA ha implementado regulaciones específicas sobre emisiones de gases de efecto invernadero, y la política climática es una prioridad en el marco regulatorio.

En resumen, aunque tanto México como Estados Unidos tienen estructuras regulatorias sólidas, las normas ambientales en Estados Unidos tienden a ser más detalladas y estrictas, con un enfoque riguroso en la aplicación y un marco legal robusto que respalda la regulación. En contraste, las normas mexicanas pueden ser más generales en algunos aspectos y enfrentan desafíos en la implementación efectiva.

II. Relación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes estudiados en agua y normas aplicables

El estudio de los parámetros fisicoquímicos y contaminantes presentes en el agua es fundamental para evaluar su calidad y garantizar su seguridad para diversos usos, ya sea para consumo humano, agrícola, industrial o recreativo. Estos parámetros incluyen características como el pH, la conductividad eléctrica, la turbidez, la concentración de oxígeno disuelto, entre otros, que permiten identificar el estado general del agua. Además, la presencia de contaminantes específicos, como metales pesados, compuestos orgánicos e inorgánicos, y microorganismos patógenos, es crucial para determinar la contaminación del agua.

Para asegurar que el agua cumpla con los estándares de calidad necesarios, se aplican diversas normas y regulaciones nacionales e internacionales que establecen límites permisibles para estos parámetros y contaminantes. En México, las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y Normas Mexicanas (NMX) desempeñan un papel esencial en la regulación de la calidad del agua.

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) establecen los límites permisibles para diferentes parámetros y contaminantes. Estas normas varían en función del tipo de agua (residual, potable, natural) y el uso de la misma (consumo humano, agrícola, industrial). A continuación, se listan algunas de las Normas:

- NOM-001-SEMARNAT-2021: Establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores como ríos, lagos o zonas costeras, y que podrían ser utilizadas para el riego agrícola.
- NOM-127-SSA1-2021: Establece los límites permisibles de calidad del agua potable.
- NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012: Para la protección del suelo y el subsuelo, establece los límites de hidrocarburos y otros contaminantes orgánicos.
- La NOM-003-SEMARNAT-1997 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las aguas residuales tratadas que se reúsan en servicios al público.

Por su parte, las Normas Mexicanas (NMX) son documentos técnicos emitidos por organismos nacionales de normalización que establecen especificaciones, directrices, métodos de ensayo, características y estándares para diferentes productos, servicios, procesos o sistemas en México. Estas normas son de carácter voluntario, a diferencia de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), que son obligatorias. Las NMX son desarrolladas por consenso entre diferentes actores, como la industria, la academia y el gobierno, con el fin de garantizar la calidad, seguri-

dad y eficiencia en diversos sectores. A continuación, se presentan algunas de las NMX más relevantes relacionadas con el agua:

- NMX-CA-003-1980: Establece los métodos para la toma de muestras de agua con el fin de realizar análisis microbiológicos, asegurando que las muestras sean representativas y que se manejen correctamente para evitar la contaminación para agua para uso y consumo humano.
- NMX-AA-008-SCFI-2011: Especifica el método para determinar la demanda química de oxígeno (DQO) en aguas, que es un indicador importante de la contaminación orgánica en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- NMX-AA-014-1980: Describe los procedimientos para la determinación de aceites y grasas en muestras de agua, suelos y sedimentos, que son contaminantes comunes en aguas residuales.
- NMX-AA-029-SCFI-2010: Especifica el método para medir el cloro residual en el agua, que es crucial para asegurar la desinfección y la potabilidad del agua.
- NMX-AA-034-SCFI-2001: Proporciona el método para medir coliformes fecales y totales en el agua, que son indicadores bacteriológicos clave de la calidad del agua.
- NMX-AA-051-SCFI-2005: Describe el método para la medición de metales como plomo, cadmio, zinc, entre otros, en el agua mediante espectrometría de absorción atómica en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- NMX-AA-073-SCFI-2001: Establece el procedimiento para medir la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), que indica la cantidad de oxígeno requerido para la descomposición biológica de la materia orgánica en las aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

- NMX-AA-087-SCFI-2010: Define el método para medir los sólidos suspendidos totales y los sólidos disueltos totales en el agua, importantes para evaluar la calidad física del agua.

La Tabla 4 a 6 enumera la relación entre los parámetros fisicoquímicos y los contaminantes comúnmente estudiados en agua y sedimentos con las normas aplicables que rigen su análisis y control, proporcionando un marco de referencia para el monitoreo y gestión de los recursos hídricos.

Tabla 4
Métodos de medición y análisis de parámetros en agua de los sitios de muestreo

Parámetro	Método		Equipos	Normatividad
pH	Electrométrico	Electrodo combinado para uso con la sonda HI769828	Equipo portátil multiparamétrico HI9829 HANNA	NMX-AA-008-SCFI-2000; NOM-001-SEMARNAT-2021; NOM-127-SSA1-1994; y NOM-003-SEMARNAT-1997
Oxígeno disuelto, OD	Electrométrico	Sensor de membrana de oxígeno disuelto galvánico para uso con la sonda HI769828	Equipo portátil multiparamétrico HI9829 HANNA	NMX-AA-012-SCFI-2001
Temperatura, T	Electrométrico	Sensor de temperatura para uso con la sonda HI769828	Equipo portátil multiparamétrico HI9829 HANNA	NMX-AA-007-SCFI-2013; y NOM-001-SEMARNAT-2021
Conductividad Eléctrica, C.E.	Electrométrico	Celda de conductividad para uso con la sonda HI769828	Equipo portátil multiparamétrico HI9829 HANNA	NMX-AA-093-SCFI
Salinidad	Electrométrico	Celda de conductividad para uso con la sonda HI769828	Equipo portátil multiparamétrico HI9829 HANNA	NMX-AA-093-SCFI-2018
Turbidez	Óptico	Medición de la penetración luminosa, y por ello de la turbidez sensor para uso con la sonda HI769828	Medición de la penetración luminosa, y por ello de la turbidez sensor para uso con la sonda HI769828	NOM-127-SSA1-1994; y NOM-003-SEMARNAT-1997

Parámetro	Método		Equipos	Normatividad
Potencial Redox, ORP	Electrométrico	Sensor de platino para uso con la sonda HI769828	Equipo portátil multiparamétrico HI9829 HANNA	NMX-AA-008-SCFI-2011
Transparencia, T	Visibilidad	T disminuye con la presencia de partículas que pueden absorber o dispersar la luz. Materiales oscuros o negros absorben más longitud de onda mientras que materiales claros o blancos la reflejan. El promedio de profundidad a la cual desaparece y aparece el disco es la T	Disco Secchi	NOM-127-SSA1-1994; y NOM-245-SSA1-2010
Sólidos suspendidos y disueltos	Gravimétrica		Sistema de filtración	NMX-AA-034-SCFI-2015; NOM-001-SEMARNAT-2021; y NOM-003-SEMARNAT-1997
Amonio Total	Azul de Indofenol (método comparativo)	Colorimétrico	Espectrofotómetro de microplaca VIS-UV BioRad	Standard Methods: For the Examination of Water and Wastewater, 23th Edition. 2017.
Nitrito Total	Sulfanilamida -Diazotación (método comparativo)	Colorimétrico	Espectrofotómetro de microplaca VIS-UV BioRad	NMX-AA-099-SCFI-2006 Standard Methods: For the Examination of Water and Wastewater, 23th Edition. 2017. NOM-003-SEMARNAT-1997

Parámetro		Método	Equipos	Normatividad
Nitrato	Reducción por Cd y reducción enzimática-nitrato reductasa (método comparativo)	Colorimétrico	Fotometro HI 83099 HANNA; Espectrofotometro de microplaca VIS-UV BioRad	NMX-AA-079-SCFI-2001 Standard Methods: For the Examination of Water and Wastewater, 23th Edition. 2017.
Fosfatos	Método del aminoácido (método comparativo)	Colorimétrico	Fotómetro HI 83099 HANNA	APHA 1992. Standard Methods: For the Examination of Water and Wastewater, 18th Edition. NOM-003-SEMARNAT-1997
Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO	Medición del O ² para la oxidación de la materia orgánica en aguas naturales y residuales	Determinación de oxígeno disuelto	Oxímetro YSI-5100 con sensor para DBO YSI-5905	NMX-AA-028-SCFI-2001 NOM-003-SEMARNAT-1997
Demanda Química de Oxígeno, DQO	Medición del O ² para la oxidación de la materia orgánica aguas naturales y residuales por oxidación y reducción del dicromato	Determinación química del OD por reducción del Cr ²⁺ a Cr ³⁺	Reactor para DQO 839800 HANNA; Espectrofotómetro de microplaca VIS-UV BioRad	NMX-AA-030/2-SCFI-2011

Parámetro	Método		Equipos	Normatividad
Carbón orgánico total	Combustión a alta temperatura con detector de infrarrojo (IR)		Analizador de carbón Teledyne Tekmar, Lotix	NMX-AA-187-SCFI-2021; y NOM-001-SEMARNAT-2021
Aniones (PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- , Br^- , Cl^- , F^-)	Cromatografía iónica con detección conductimétrica.		Cromatógrafo de líquidos constituido por dos bombas binarias modelo 1525, con automuestreador modelo 717 plus y detector de conductividad Modelo 432 (marca Waters)	
Cationes (Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})	Cromatografía iónica con detección conductimétrica		Cromatógrafo de líquidos constituido por dos bombas binarias modelo 1525, con automuestreador modelo 717 plus y detector de conductividad Modelo 432 (marca Waters)	
Metales disueltos (V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Hg, Pb, Sn, As, Ba)	Muestras filtradas 0.25 μm y aciduladas		Espectrometría de masas con fuente de plasma acoplado inductivamente	NMX-AA-051-SCFI-2016; NOM-001-SEMARNAT-2021; y NOM-127-SSA1-1994

Parámetro	Método		Equipos	Normatividad
Plaguicidas organo- fosforados (Ethoprophos, Monocrotophos, Dimetoato, Diazinon, Chlorpyriphos, Chlorpyriphos metil, Metil Paratión, Malatión, Etil paratión, Merphos- Tributylphosphoro- trithioite, EPN)	plaguicidas organofo- forados (OF), extrac- ción en fase sólida C18		Cromatógrafo de gases Agilent Technologies 6890N con detector de nitrógeno-fósforo	NOM-AA-104-1988

Tabla 5
Métodos de medición y análisis de parámetros en sedimentos
de los sitios de muestreo

Parámetro	Método		Equipos	Normatividad
Textura	Bouyoucos (modificado).	Cuantificación de las fracciones arena, limos y arcillas	Densitómetro	NOM-021-SEMARNAT-2000
Materia orgánica	Calcinación a 480°C		Mufla, marca Felisa	NOM-021-RECNAT-2000
Metales (V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Hg, Pb, Sn, As, Ba)	Digestión de sedimentos en medio ácido asistido por horno de microondas		ICP-MS, modelo iCAP Qc, marca Thermo Scientific	NOM-117-SSA1-1994; y NOM-004-SEMARNAT-2002
Plaguicidas organofosforados (Ethoprophos, Monocrotophos, Dimetoato, Diazinon, Chlorpyrifos, Chlorpyrifos metil, Metil Paratión, Malatión, Etil paratión, Merphos-Tributylphosphorotrithioite, EPN)	Extracción asistida con microondas, Clean up en fase sólida SiOH		Cromatógrafo de gases Agilent Technologies 6890N con detector de nitrógeno-fósforo	NOM-AA-104-1988

Tabla 6
Métodos de medición y análisis de parámetros en biota (lirio acuático; *Eichhornia crassipes*)
de los sitios de muestreo

Parámetro	Método		Equipos	Normatividad
Clorofila de fitoplancton	Filtración y extracción con acetona	Espectrofotométrico VIS-UV	Espectrofotómetro de microplaca VIS-UV BioRad	
Área Foliar	Medición por escaneo; Imagen		Escáner HP C4480	
Peso Foliar	Pesado		Balanza analítica Sartorius	
Metales (V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Hg, Pb, Sn, As, Ba)	Digestión de biomasa seca en medio ácido asistido por horno de microondas		ICP-MS, modelo iCAP Qc, marca Thermo Scientific	NOM-117-SSA1-1994; y NOM-004-SEMARNAT-2002

Conclusiones

En este capítulo se ha abordado el complejo ámbito de la determinación de contaminantes en cuerpos de agua, destacando la importancia de las herramientas y pruebas analíticas en la evaluación de la calidad del agua.

Se ha comenzado con la definición de contaminante “una sustancia es considerada contaminante si sus concentraciones superan los niveles naturales o regulados y si causa efectos adversos sobre la salud, los ecosistemas o los procesos ambientales, evaluándose su concentración, efectos, persistencia, movilidad y comparación con normas establecidas”.

A continuación, se introduce el concepto de movilidad de los contaminantes, enumerando algunos de los factores que influyen en su comportamiento en el ambiente. Estos factores determinan cómo los contaminantes se desplazan y distribuyen en diferentes medios, como el aire, el agua y el suelo. La movilidad de un contaminante específico varía en función del entorno y las condiciones particulares del lugar.

En la descripción de un cuerpo de agua contaminado, se enumeran los grupos de contaminantes y cuáles son los efectos: contaminantes con demanda de oxígeno, agentes causantes de enfermedades, químicos inorgánicos y minerales, químicos orgánicos sintéticos y de petróleo, nutrientes de plantas (nitratos y fosfatos), sedimentos por erosión de suelo, sustancias radioactivas, calor por industrias y plantas de energía. Asimismo, se aborda la diferencia en la dinámica ambiental de los contaminantes en ríos, lagos y aguas subterráneas. En este contexto, se han discutido los parámetros que proporcionan una visión general de la calidad del agua y permiten identificar posibles problemas ambientales o de salud pública que puedan requerir medidas de mitigación.

La sección dedicada a la matriz ambiental en el análisis químico ha subrayado cómo los efectos de la matriz pueden influir en los resultados de los análisis, destacando la importancia de considerar estos efectos para garantizar la precisión y exactitud de los datos obtenidos. Además, se ha abordado el control de calidad

en los análisis químicos, proporcionando directrices sobre cómo asegurar la validez de los resultados a través de prácticas rigurosas y estandarizadas, incluyendo la descripción de Laboratorios Acreditados. Se enfatiza la necesidad de análisis químicos precisos y fiables para detectar y cuantificar los contaminantes, lo cual es fundamental para comprender la magnitud del problema y desarrollar estrategias efectivas de mitigación.

Finalmente, se han revisado las normas mexicanas e internacionales que regulan la calidad de los cuerpos de agua, reflejando los esfuerzos por establecer marcos normativos que garanticen la protección de los recursos hídricos. Estas normativas no solo proporcionan criterios para la evaluación de la calidad del agua, sino que también establecen directrices para la implementación de métodos analíticos y el cumplimiento de estándares internacionales. Dentro del capítulo se incluye un listado exhaustivo sobre las normas mexicanas relacionadas con el agua.

En resumen, este capítulo proporciona una comprensión integral de lo que significa que un cuerpo de agua esté contaminado; la correcta aplicación de herramientas y pruebas analíticas esenciales para la identificación y gestión de contaminantes en el agua. Se aborda la importancia de la generación de datos confiables, legalmente defendibles, que proporcionan datos cruciales para evaluar la calidad del agua y desarrollar estrategias de mitigación adecuadas. Por último, se abordan las normativas mexicanas e internacionales que suministran un marco regulatorio que guía la práctica analítica y regulan la calidad del agua.

Bibliografía

Manahan, Stanley, *Environmental Chemistry* (9a. ed.), CRC Press, Boca Raton, FL, 2010, pp. 783.

Mackay, Donald *et al.*, *Handbook of Physical-Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals*, CRC Press Taylor & Francis Group, 2006, pp. 919.

Schwarzenbach, Rene P. *et al.*, *Environmental Organic Chemistry*. Wiley-Interscience, Hoboken, New Jersey, 2016, pp. 1313.

Pankow, James F., *Aquatic Chemistry Concepts* (2a. ed.), CRC Press Boca Raton, FL, 2019, pp. 584.

Chapman, Deborah (ed.) (1996), *Water Quality Assessments: A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*, publicado en nombre de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, la Organización Mundial de la Salud y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, pp. 626.

Wetzel, Robert. G., *Limnology: Lake and River Ecosystems*, Academic Press, Londres, 2001, pp. 1006.

Allan, J. David y Castillo, Mari M., *Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters* (2a. ed.), Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2007, pp. 430.

Kalff, Jacob, *Limnology: Inland Water Ecosystems*. Prentice Hall, California, 2002, pp. 592.

9 National Research Council, *Groundwater Contamination*, The National Academies Press, Washington, DC, 1984, pp. 179.

Hartmann, Peter, “Environmental Analytic - From the Spot Analysis to the Continuous Monitoring”, 1994, *Chemische Technik*, 46, pp. 71-74.

Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), *Laboratorios Acreditados para Análisis de Muestras Ambientales en México*, 2020, ONAM. Disponible en: «<https://laboratorios.conagua.gob.mx:8446/LABORATORIOS/Pages/Laboratorios.aspx>» [Consultado el 11 de septiembre de 2024].

Castillo Aguilar, Bernardo y González Hernández, Roberto, “Protocolo de validación de métodos analíticos para la cuantificación de compuestos”, 1996, *Revista Cubana de Farmacia*, 30, pp. 1-5. Disponible en: «http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-75151996000100009&lng=es&tlng=es» [Consultado el 12 de septiembre de 2024].

International Organization for Standardization, *ISO/IEC 17025:2017: General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*, 2017. Disponible en: «<https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:66912:en>» [Consultado el 15 de septiembre de 2024].

Miller, James C. y Miller, Jane N., *Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry*, (6a. ed.), Prentice Hall, 2010, pp. 278.

Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental, Dirección General Adjunta de Política Regulación Ambiental – SEMARNAT, *Prontuario Normas Oficiales Mexicanas*. Disponible en: «<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PP03/ProntuarioNormas.pdf>» [Consultado el 11 de septiembre de 2024].

Secretaria de Economía, *Catálogo Mexicano de Normas*. Disponible en: «https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/435362/2.2.3.1_Cat_logo_Mexicano_de_Normas.pdf» [Consultado el 11 de septiembre de 2024].

CMIC, *Medio Ambiente y Sustentabilidad: NOM y NMX*. Disponible en: «<https://www.cmic.org.mx/sectores/medioambiente/normas.htm>» [Consultado el 11 de septiembre del 2024].

SEMARNAT, *Normas Mexicanas*, 2021. Disponible en: «<https://www.semarnat.gob.mx/gobmx/biblioteca/nmx.html>» [Consultado el 11 de septiembre de 2024].

Villalobos, Néstor, *Las 4 Grandes Diferencias entre NOM y NMX*, 2020. Disponible en: «<https://www.normasoficiales.mx/nom/diferencia-nom-nmx>» [Consultado el 11 de septiembre de 2024].

United States Environmental Protection Agency (EPA), *Our Mission and What We Do*, 2021. Disponible en: «<https://www.epa.gov/aboutepa/our-mission-and-what-we-do>» [Consultado el 11 de septiembre de 2024].

- United States Environmental Protection Agency (EPA), *National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)*, 2021. Disponible en: «<https://www.epa.gov/naaqs>» [Consultado el 11 de septiembre de 2024].
- United States Environmental Protection Agency (EPA), *National Primary Drinking Water Regulations*, 2023. Disponible en: «<https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations>» [Consultado el 11 de septiembre de 2024].
- Environment and Climate Change Canada, *Environment and Climate Change Canada*, 2023, Government of Canada. Disponible en: «<https://www.canada.ca/en/environment-climate-change.html>» [Consultado el 11 de septiembre de 2024].
- Canadian Council of Ministers of the Environment, *Canadian Environmental Quality Guidelines*, 2022, CCME. Disponible en: «<https://ccme.ca/en/current-activities/canadian-environmental-quality-guidelines>» [Consultado el 11 de septiembre de 2024].
- Mumme, Stephen P., “The 1944 Water Treaty and the Incorporation of Environmental Values in U.S.-Mexico Transboundary Water Governance”, *Environmental Science & Policy*, 2020, 112, pp. 126-133. Disponible en: «<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.05.001>».
- Ponce Nava, Diana, “Comparación de la Legislación Ambiental de México, Estados Unidos y Canadá”, *Revista de Administración Pública*, 1999, 87, pp. 11-137. Disponible en: «<https://revistas-colaboracion.juridicas.unam.mx/index.php/rev-administracion-publica/article/view/18844/16956>».

Capítulo

3.

Indicadores de evaluación y seguimiento para la atención de sitios contaminados



Capítulo 3. Indicadores de evaluación y seguimiento para la atención de sitios contaminados. A. Introducción. B. ¿Qué es un indicador de evaluación de la contaminación? C. Indicadores fisicoquímicos. D. Criterios de selección de bioindicadores. E. Estudios ecotoxicológicos como base para el diagnóstico ambiental. Conclusiones. Agradecimientos. Bibliografía.

A. Introducción

En el presente capítulo se presentan los denominados *endpoints* o indicadores de evaluación (p. ej. fisicoquímico, biomonitores o pruebas ecotoxicológicas) que permiten dar seguimiento a los proyectos de intervención de ríos contaminados en México. Dichos indicadores se definen por su alcance espacio-temporal, así como desde la perspectiva del principio de precaución. Asimismo, se reflexiona sobre los criterios para definir o determinar niveles de rehabilitación o restauración, metas de recuperación en la dinámica trófica.

Se propone el uso de métodos tales como el Índice de Calidad del Agua, entre otros. Además, se analiza la importancia de incluir en los trabajos de monitoreo de ríos contaminados los indicadores biológicos o bioindicadores como herramientas que tienen como ventaja censar los impactos de mezclas complejas de contaminantes en los seres vivos. Lo anterior permite evaluar de manera integral aspectos de función y estructura de los ecosistemas afectados por la presencia de contaminantes.

El uso de especies como bioindicadores en los distintos aspectos como biomonitores o biomarcadores de exposición requiere de la selección a través de criterios biológicos. Dichos criterios están establecidos en la vasta literatura científica que

respalda el uso de especies de manera estandarizada. No obstante, la investigación que abarca el desarrollo de nuevas pruebas y la incorporación de especies bioindicadoras continúa a través de las pruebas ecotoxicológicas. Dichas pruebas tienen como objetivo evaluar efectos subletales que afectan la función y estructura de los ecosistemas, así como procesos biológicos de los mecanismos adaptativos de las especies. Si bien estos ensayos biológicos de monitoreo pueden ser para estudios a mediano y largo plazo, éstos han permitido reclasificar o re-calibrar los límites permisibles de contaminantes que año con año se incrementan tales como los fármacos, nanomateriales, proteínas transgénicas y microplásticos por citar algunos.

B. ¿Qué es un indicador de evaluación de la contaminación?

I. El Desarrollo de los indicadores de calidad del agua

Desde el inicio de la era industrial, la noción de la calidad del agua comenzó a adquirir relevancia. El uso de indicadores químicos y biológicos para evaluar la calidad del agua comenzó a tomar forma a finales del siglo XIX, con el auge de la Revolución Industrial. El crecimiento de las ciudades y la proliferación de industrias provocaron un aumento significativo en la contaminación de los cuerpos de agua. Las enfermedades transmitidas por el agua, como el cólera y la fiebre tifoidea, fueron asociadas con la mala calidad del agua potable, lo que incentivó los primeros esfuerzos por medir y controlar la contaminación.

Inicialmente, los estudios se centraron en medir parámetros como la cantidad de materia orgánica presente en el agua, que podía descomponerse y causar la proliferación de bacterias patógenas. La demanda biológica de oxígeno (DBO), que mide la cantidad de oxígeno necesario para que las bacterias descompongan la materia orgánica, fue uno de los primeros indicadores químicos establecidos en el siglo XIX. A mediados del siglo XX, con el avance de la química analítica, los científicos empezaron a identificar y medir sustancias químicas específicas en el agua, como metales pesados, nitratos, fosfatos y compuestos orgánicos sintéticos (como pesticidas y detergentes). Estos avances permitieron un monitoreo más preciso de las fuentes de contaminación.

El desarrollo de los primeros espectrofotómetros y cromatógrafos (equipos de alta tecnología) facilitó la medición de concentraciones extremadamente bajas de contaminantes en el agua. La demanda química de oxígeno (DQO), un indicador que mide la cantidad de oxígeno necesario para oxidar completamente las sustancias orgánicas e inorgánicas presentes en el agua fue otro avance importante, ya que ofrecía una visión más amplia de la calidad del agua. En paralelo, comenzaron a establecerse normas y estándares de calidad del agua, como los niveles máximos permitidos de ciertos contaminantes, lo que facilitó la creación de políticas públicas más efectivas para la protección de los recursos hídricos.

Por su parte, la incorporación de indicadores biológicos en el monitoreo de la calidad del agua tiene sus raíces en la primera mitad del siglo XX, cuando se empezaron a estudiar los efectos de la contaminación en los organismos vivos presentes en cuerpos de agua. A partir de la observación de cambios en la biodiversidad y la abundancia de ciertas especies acuáticas, los científicos comenzaron a identificar bioindicadores, que son organismos o comunidades de organismos cuya presencia, ausencia o estado de salud puede indicar la calidad ambiental del agua.

Un ejemplo clásico es el uso de ciertos grupos de invertebrados acuáticos, como insectos, crustáceos y moluscos, que son sensibles a la contaminación. Estos organismos son utilizados como indicadores biológicos para evaluar la salud de un ecosistema acuático. La presencia o ausencia de especies tolerantes o sensibles a la contaminación permitió a los científicos establecer el llamado índice biótico, que clasifica la calidad del agua en función de la diversidad de especies presentes.

Con el tiempo, se integraron también pruebas ecotoxicológicas, que evalúan los efectos de los contaminantes en organismos vivos bajo condiciones controladas. Estas pruebas incluyen la exposición de peces, algas y bacterias a diferentes concentraciones de contaminantes para determinar sus efectos sobre el crecimiento, la reproducción y la mortalidad de las especies.

En las últimas décadas, el monitoreo de la calidad del agua ha experimentado una revolución con la incorporación de técnicas más sofisticadas como la secuenciación genética, que permite identificar la presencia de ADN ambiental (eDNA) en cuerpos de agua para detectar la biodiversidad y la presencia de organismos

patógenos o contaminantes biológicos. Esta tecnología ha mejorado significativamente la capacidad para monitorear cambios en las comunidades biológicas en respuesta a la contaminación. A nivel químico, la tecnología analítica moderna, como la espectrometría de masas y la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), ha permitido la detección de los llamados contaminantes emergentes, como fármacos, hormonas y microplásticos, en concentraciones mucho más bajas, lo que ha abierto nuevos desafíos para la regulación y control de la contaminación del agua.

De esta manera, en tan solo unas pocas décadas, la preocupación por disponer de agua limpia se ha intensificado hasta tal punto que, en la actualidad, la calidad del agua es tan importante como su cantidad. No obstante, la contaminación de los cuerpos de agua ha alcanzado niveles tan alarmantes que la humanidad ha tenido que aceptar que aquellos cuerpos de agua cristalinos, sin olores desagradables y llenos de vida, ya no coexisten con el desarrollo industrial y la urbanización.

Dado que el agua dulce disponible para las actividades humanas es limitada, la humanidad se ha visto obligada a reutilizar agua contaminada, ya que devolverla a su estado natural mediante tecnologías es extremadamente costoso y, en muchos casos, prácticamente imposible. Por ello, el concepto de “calidad del agua” ha evolucionado, dejando de referirse a su calidad original. Así, la calidad del agua se ha vuelto un concepto complejo y relativo, que depende del uso previsto.

Por ejemplo, el agua puede ser lo suficientemente buena para utilizarse en el enfriamiento industrial, pero no apta para consumo humano. Puede ser adecuada para regar ciertos cultivos, pero inadecuada para otros, o aceptable para el ganado, pero no para la piscicultura. Este carácter multifacético de la calidad del agua implica que su definición varía según el propósito para el cual se utilice. Sin embargo, incluso cuando se establece el uso deseado —ya sea agua potable, agua para agricultura o para mantener un ecosistema saludable— es crucial definir indicadores específicos que nos permitan evaluar si hemos alcanzado la calidad de agua requerida.

Una manera de describir la calidad del agua es identificar todas las sustancias y sus concentraciones que no son de origen natural, es decir, aquellas que provienen de actividades humanas (antrópicas). Estas sustancias se acumulan en el agua a

lo largo de su recorrido, desde su uso en una industria hasta el río donde se descarga, o desde el suelo agrícola regado hasta el cuerpo de agua donde termina escurriendo. Incluso el agua de lluvia, que viaja desde las nubes hasta la tierra, recoge compuestos en el proceso. Dado que el agua es considerada un “disolvente universal”, ¡recoge una gran variedad de sustancias! La lista de compuestos presentes en el agua podría ser tan extensa como el número de elementos analizados, abarcando desde unas pocas sustancias hasta miles. Sin embargo, una lista tan detallada tendría poco valor práctico para cualquiera que no sea un especialista altamente capacitado en calidad del agua.

Otra manera para describir la calidad del agua, como se hizo anteriormente, es utilizando organismos vivos específicos (biomonitores) para el cuerpo de agua. El uso de biomonitores para evaluar la contaminación del agua presenta numerosas ventajas, como proporcionar información sobre el impacto directo de los contaminantes en los ecosistemas acuáticos y reflejar los efectos a largo plazo de la exposición a diversos contaminantes. Sin embargo, también enfrenta una serie de desafíos, incluyendo la especificidad de los organismos, la disponibilidad de biomonitores adecuados, la interpretación de resultados, las condiciones ambientales variables, el costo y tiempo necesarios, y la falta de normas universales.

Para maximizar el potencial de los biomonitores, es necesario combinar su uso con otros métodos de evaluación, como el monitoreo químico y físico, y desarrollar una mayor comprensión de cómo los factores ambientales y la contaminación interactúan para afectar la salud de los ecosistemas acuáticos. Solo entonces se podrá utilizar de manera efectiva este enfoque para mejorar la gestión y protección de los recursos hídricos.

II. Criterios de selección de indicadores

Los indicadores deben seleccionarse en función de una serie de criterios para garantizar su utilidad y aplicabilidad en los proyectos de intervención:

- **Relevancia:** El indicador debe estar directamente relacionado con los contaminantes o condiciones que se pretenden remediar. Por ejemplo,

si el problema principal es la contaminación por metales pesados, las concentraciones de estos metales en el agua y los organismos serán los indicadores más relevantes.

- **Sensibilidad:** Deben seleccionarse indicadores que sean lo suficientemente sensibles para detectar cambios pequeños en las condiciones del cuerpo de agua, permitiendo identificar mejoras o deterioros en etapas tempranas del proyecto.
- **Facilidad de medición:** Los indicadores deben ser técnicamente factibles y económicos de medir. Por ejemplo, la medición de oxígeno disuelto o la presencia de macroinvertebrados son métodos accesibles en comparación con pruebas más avanzadas y costosas.
- **Estabilidad temporal:** Algunos indicadores, como los macroinvertebrados o la composición de las comunidades de peces, son más estables a largo plazo y permiten evaluar la recuperación del ecosistema tras la implementación de las medidas de intervención.
- **Base científica:** La selección debe estar respaldada por estudios científicos que demuestren la efectividad del indicador en situaciones similares. Por ejemplo, el uso de macroinvertebrados como bioindicadores ha sido ampliamente validado en estudios de contaminación hídrica.

La implementación de proyectos de intervención en cuerpos de agua contaminados en México requiere de un sistema integral de monitoreo que combine indicadores fisicoquímicos, biomonitores y pruebas ecotoxicológicas. Estos indicadores deben seleccionarse en función de su relevancia para los contaminantes presentes, su sensibilidad y su capacidad para reflejar las metas de reducción de la contaminación. Al utilizar estos biomonitores, los responsables de la gestión hídrica pueden tomar decisiones informadas y medir el progreso hacia la restauración de los cuerpos de agua.

C. Indicadores fisicoquímicos

Comparar la calidad de diferentes fuentes de agua no es una tarea sencilla, ya que no basta con revisar las listas de componentes que contiene cada muestra. Las sustancias presentes en el agua pueden tener diferentes niveles de peligrosidad, lo que complica el análisis directo de las listas de contaminantes. Por ejemplo, una muestra de agua que contiene seis componentes (pH, dureza, cloruros, sulfatos, hierro y sodio) en concentraciones de apenas un 5% superiores a los niveles permitidos puede no representar un peligro grave para el consumo humano, mientras que otra muestra con un solo contaminante, como mercurio, en un 5% por encima de los límites seguros, puede ser extremadamente peligrosa.

Para resolver este problema, se han desarrollado los índices de calidad del agua (ICA), que permiten convertir la lista de contaminantes y sus concentraciones en un único valor que representa la calidad del agua de una fuente. De esta manera, diferentes muestras de agua pueden ser comparadas utilizando ese valor índice, lo que simplifica el análisis y facilita la toma de decisiones.

El concepto de utilizar un índice para representar múltiples variables en un solo valor no es nuevo. En la economía, por ejemplo, se usa el “Índice de Precios al Consumidor”, que mide la variación en los precios de una cesta de productos básicos para determinar si el costo de vida ha aumentado o disminuido en un periodo determinado. Los índices bursátiles, como el “Índice Dow Jones” en Estados Unidos o el “Sensex” en India, combinan los precios de acciones clave para representar la salud general del mercado de valores, y por extensión, de la economía de un país. De manera similar, en ecología, índices como el “Índice de Shannon” o el “Índice de Simpson” se utilizan para representar la diversidad de especies en un ecosistema.

Los índices de calidad del agua siguen una lógica similar: combinan varias mediciones de contaminantes en un solo valor, facilitando la interpretación de la calidad del agua. Esto permite a las agencias reguladoras y a los gestores de recursos hídricos que puedan tomar decisiones informadas sobre el manejo de las fuentes de agua. Además, estos índices son útiles para comunicar la salud de los cuerpos de agua al público de manera comprensible.

I. ¿Cómo se construyen los índices fisicoquímicos de calidad del agua?

El primer índice de calidad del agua fue desarrollado en Alemania por el científico alemán Robert Koch en 1848. Koch utilizó la presencia o ausencia de ciertos organismos en el agua como un indicador de la calidad y potabilidad. Aunque este sistema no empleaba un enfoque numérico moderno como los índices actuales, sentó las bases para evaluar la calidad del agua a través de la biota presente, una práctica que posteriormente sería refinada y adoptada en diversos sistemas de clasificación en Europa.

Este enfoque inicial de Koch influyó en la manera en que se comenzó a entender la relación entre organismos y contaminación en cuerpos de agua, marcando un hito en la evaluación de la salud ambiental y la seguridad del agua. Desde entonces, se han desarrollado y aplicado diferentes sistemas para clasificar la calidad de las aguas en diferentes regiones.

Estos sistemas de clasificación suelen dividirse en dos tipos principales:

- Aquellos que evalúan la cantidad de contaminación presente en el agua.
- Los que se enfocan en las comunidades de organismos vivos, tanto macroscópicos como microscópicos, presentes en los cuerpos de agua.

A diferencia de los índices numéricos modernos, estos primeros sistemas no asignaban un valor numérico para representar la calidad del agua, sino que la clasificaban en varias categorías o niveles de contaminación. El uso de una escala numérica para representar gradaciones en los niveles de calidad del agua es un fenómeno más reciente, que comenzó con el “Índice de Horton” en 1965.¹³⁶ Este enfoque permitió un perfil más representativo y cuantificable de la calidad del agua, facilitando la comparación entre diferentes fuentes y niveles de contaminación.

¹³⁶ Horton, Robert K., “An index number system for rating water quality”, *Journal of Water Pollution Control Federation*, 1965, 37, pp. 300-306.

En este sentido, los criterios desarrollados por Horton, aún se mantienen para la mayoría de los ICA y son:

- El número de variables que manejará el índice debe ser limitado para evitar que el índice se salga de control.
- Las variables deben ser significativas en la mayoría de los cuerpos de agua.
- Solo deben incluirse aquellas variables de las que se disponga o se puedan obtener datos confiables.

Los indicadores fisicoquímicos son fundamentales para evaluar la calidad del agua y proporcionan información directa sobre las condiciones actuales del cuerpo de agua en términos de contaminación. Estos indicadores se refieren a los parámetros que se pueden medir en el agua y que indican la presencia o ausencia de contaminantes, así como las condiciones fisicoquímicas del cuerpo de agua.

Los ICA se construyen a partir de datos obtenidos de las mediciones de varios parámetros físicos, químicos y biológicos que indican la presencia y concentración de contaminantes. Cada uno de estos parámetros se evalúan individualmente y se les asigna un puntaje basado en su conformidad con los estándares de calidad del agua.

Posteriormente, los puntajes de los diferentes parámetros se combinan de acuerdo con un sistema de ponderación que refleja la importancia relativa de cada contaminante. Algunos contaminantes, como los metales pesados (mercurio, plomo), pueden tener mayor peso en el índice debido a sus riesgos significativos para la salud humana y los ecosistemas. El resultado es un valor único que representa la calidad global del agua de una fuente determinada.

Un ICA generalmente comprende cuatro procesos o componentes. Primero, se seleccionan los parámetros de calidad del agua de interés. Segundo, se leen los datos de calidad del agua y para cada parámetro de calidad del agua las concentraciones se convierten en un subíndice adimensional de valor único. En tercer lugar, se determina el factor de ponderación para cada parámetro de calidad del agua y,

en cuarto lugar, se calcula un índice final de calidad del agua de un solo valor mediante una función de agregación que utiliza los subíndices y los factores de ponderación de todos los parámetros de calidad del agua.

Los ICA se pueden clasificar en dos grandes categorías según los parámetros que se utilicen para evaluar la calidad: los índices basados predominantemente en características fisicoquímicas y los índices basados en la evaluación de organismos vivos.

El primer ICA moderno, conocido como el “Índice de Horton”, pertenece a la primera categoría, centrada en parámetros fisicoquímicos. Este índice fue recomendado por Horton desde 1965,¹³⁷ y posteriormente por Brown *et al.*¹³⁸ El Índice Horton transforma un grupo combinado de datos y proporciona un valor único a la calidad del agua de un cuerpo de agua, cuyo objetivo es proporcionar información sobre la idoneidad del agua para fines específicos.

Este índice, utiliza principalmente mediciones de variables químicas y físicas del agua para determinar su calidad. Sin embargo, el Índice de Horton, incluye un parámetro biológico, generalmente la presencia de coliformes fecales, un tipo de bacterias indicador de contaminación biológica por materia fecal de humanos o animales de sangre caliente, señal de riesgo sanitario. Varios ICA desarrollados posteriormente,¹³⁹ también incorporan uno o más parámetros biológicos, pero en todos los casos, el énfasis sigue siendo en las características fisicoquímicas del agua.

De esta manera, aunque los índices de calidad del agua pueden incluir parámetros biológicos, los índices fisicoquímicos se enfocan principalmente en medir aspectos como el pH, la concentración de oxígeno disuelto, la dureza del agua, entre otros, para evaluar su calidad general. Los índices basados en bioevaluación, por otro lado, dan mayor peso a indicadores biológicos como la presencia de

¹³⁷ Horton, Robert K., “An index number system for rating water quality”, *Journal of Water Pollution Control Federation*, 1965, 37, pp. 300-306.

¹³⁸ Brown, Raymond M. *et al.*, “A water quality index-Do we dare?”, *Water and Sewage Works*, 1970, 117, pp. 339-343.

¹³⁹ Abbasi, Tabassum y Abbasi, Sayarunami A., *Water Quality Indices*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 2012, pp. 384.

organismos sensibles a la contaminación, que proporcionan una medida más directa del impacto de los contaminantes en los ecosistemas acuáticos.

Los parámetros fisicoquímicos comúnmente utilizados en los ICA son:

- *pH*. El pH del agua es un indicador clave para la calidad de los cuerpos de agua, pues muchas reacciones químicas y procesos biológicos dependen de la acidez o alcalinidad del agua. El valor del pH en los ríos puede verse afectado por la descarga de aguas residuales industriales o agrícolas y puede tener un impacto directo en la salud de la fauna y flora acuáticas.
- *Conductividad eléctrica*. La conductividad eléctrica indica la cantidad de sales disueltas en el agua y es un buen indicador de la contaminación por efluentes industriales y agrícolas. Un aumento en la conductividad puede ser señal de la presencia de contaminantes como metales pesados, sales minerales, y otros compuestos disueltos que provienen de vertidos o lixiviados.
- *Oxígeno disuelto (OD)*. El oxígeno disuelto es uno de los parámetros más importantes para la vida acuática. Su disminución suele estar asociada con la presencia de materia orgánica en descomposición, que proviene de descargas de aguas residuales urbanas e industriales. Niveles bajos de oxígeno disuelto afectan a los organismos aeróbicos y pueden causar la muerte de peces y otros animales acuáticos.
- *Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)*. La DBO es un indicador de la cantidad de materia orgánica biodegradable presente en el agua. Valores altos de DBO implican que una gran cantidad de oxígeno se consume en la descomposición de materia orgánica, lo que reduce los niveles de oxígeno disponibles para los organismos acuáticos.
- *Metales pesados tóxicos (como plomo, mercurio, arsénico)*. La presencia de metales pesados en el agua es uno de los principales problemas de

contaminación en los ríos de México, en particular aquellos cercanos a zonas industriales y mineras. El monitoreo de metales pesados es esencial, ya que son tóxicos incluso en bajas concentraciones y se bioacumulan en los organismos acuáticos, afectando la salud del ecosistema y de los seres humanos que dependen de estos recursos.

- *Nutrientes (nitrógeno, fósforo)*. El exceso de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, provenientes de actividades agrícolas y descargas de aguas residuales, puede llevar a procesos de eutrofización, donde el aumento descontrolado de algas agota el oxígeno del agua y deteriora la calidad del hábitat acuático. Estos indicadores permiten detectar las fuentes de contaminación agrícola y su impacto en los ecosistemas acuáticos.

II. Importancia de los índices de calidad del agua

Los índices de calidad del agua cumplen varias funciones importantes. En primer lugar, permiten simplificar la gran cantidad de datos obtenidos en los análisis de calidad del agua, proporcionando un valor único que puede ser interpretado fácilmente por gestores, reguladores y el público en general. Esto ayuda a comunicar de manera clara y efectiva el estado de los cuerpos de agua y el impacto de las actividades humanas sobre ellos.

Los índices de calidad del agua son herramientas esenciales para el monitoreo y evaluación de políticas ambientales, ya que permiten a las autoridades evaluar de manera efectiva los resultados de intervenciones regulatorias y de gestión ambiental. Al analizar los cambios en los índices a lo largo del tiempo, se puede determinar el éxito de medidas como la implementación de normativas más estrictas sobre descargas industriales o la mejora en el tratamiento de aguas residuales. Además, los índices facilitan la toma de decisiones en diversos aspectos como los siguientes:

Asignación de recursos. Los índices permiten a los administradores de recursos naturales y a los responsables de políticas ambientales distribuir eficientemente

los fondos y determinar las áreas prioritarias para la intervención. Por ejemplo, si un índice revela que un cuerpo de agua tiene una calidad mucho más deteriorada en comparación con otros, se puede destinar mayor financiamiento y esfuerzos para remediarlo.

Clasificación de asignaciones. Los índices proporcionan una base para comparar la calidad del agua en distintas áreas geográficas o fuentes de agua. Esta comparación es útil para identificar regiones que requieren una atención más inmediata o medidas de intervención más estrictas. También puede servir para ajustar las políticas de manejo del agua entre distintas zonas, priorizando aquellas con problemas más agudos. Un ejemplo claro en México, son los llamados “Infiernos Ambientales”, zonas geográficas altamente contaminadas debido a la concentración de actividades industriales, urbanas o agrícolas que han generado graves problemas de contaminación en el suelo, el agua y el aire como son el río Lerma-Santiago, Zimapán, Hidalgo, Salamanca, Guanajuato, etc.

Cumplimiento de normas. Los índices son una herramienta clave para evaluar en qué medida se cumplen o exceden las normativas legislativas relacionadas con la calidad del agua. Al aplicar los índices en áreas específicas, se puede determinar si las medidas regulatorias existentes son efectivas o si se requieren ajustes, lo que contribuye al cumplimiento de los criterios establecidos para la salud ambiental y pública.

Análisis de tendencias. Los índices permiten un seguimiento temporal de la calidad del agua. Al observar los cambios en los valores del índice a lo largo del tiempo, se puede evaluar si la calidad del agua está mejorando o deteriorándose. Esto proporciona a las autoridades información crítica para adaptar sus políticas y estrategias a fin de prevenir o mitigar problemas emergentes y medir el impacto a largo plazo de las medidas de intervención.

Información pública. Los índices de calidad del agua, al traducir datos complejos en una medida comprensible, son valiosos para mantener al público informado. Al igual que los índices bursátiles permiten a los ciudadanos comprender la situación económica en términos sencillos, los índices de calidad del agua comu-

nican de manera clara y accesible la calidad del agua de una fuente específica. Esta transparencia es fundamental para fomentar la participación ciudadana y la confianza en las autoridades ambientales.

Investigación científica. La capacidad de los índices para condensar grandes cantidades de datos en un único puntaje es inmensamente útil en la investigación científica. Los investigadores pueden utilizar estos índices para analizar la efectividad de diferentes estrategias de restauración ecológica, tratamiento de agua o políticas ambientales. Además, los índices son valiosos para evaluar el impacto de actividades humanas, como el desarrollo urbano o agrícola, sobre la calidad del agua en un ecosistema determinado, lo que a su vez puede influir en la planificación de futuras intervenciones.

III. Limitaciones de los índices de calidad del agua

A pesar de su utilidad, los índices de calidad del agua no están exentos de limitaciones. Una de las principales críticas es que la “simplificación”¹⁴⁰ en un solo valor puede ocultar información crucial sobre la naturaleza de los contaminantes. Por ejemplo, un índice bajo puede indicar una mala calidad del agua, pero no revela qué contaminantes específicos están presentes ni en qué cantidades. Asimismo, algunos contaminantes pueden tener “efectos acumulativos o sinérgicos” que no se capturan adecuadamente en un índice simplificado. Por ejemplo, la presencia simultánea de varios metales pesados puede generar efectos tóxicos mucho más graves que los que cada metal produciría por separado. Los índices de calidad del agua no siempre reflejan estas interacciones complejas. Esto puede ser un problema para diseñar estrategias de remediación precisas, ya que cada contaminante requiere tratamientos específicos.

Otra limitante importante sobre los ICA, es que no existe un solo índice de calidad de agua basado en parámetros fisicoquímicos aceptado y estandarizado globalmente debido a varios factores que reflejan la complejidad del agua como

¹⁴⁰ Zuo, Qiting *et al.*, “A new method for water quality assessment: by harmony degree equation”, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190, pp. 162-169.

recurso y las diferentes realidades socioambientales, normativas y tecnológicas en cada región. Algunos de estos factores son:

Diversidad de usos del agua. El agua tiene múltiples usos, como el consumo humano, la agricultura, la industria, la recreación y el mantenimiento de ecosistemas. Cada uno de estos usos requiere diferentes estándares de calidad.

Variedad de contaminantes. El agua puede contener una amplia gama de contaminantes, tanto químicos como biológicos. Algunos cuerpos de agua pueden estar afectados principalmente por metales pesados, mientras que otros pueden estar contaminados por nutrientes, plaguicidas, microplásticos o microorganismos patógenos. La combinación y concentración de estos contaminantes es altamente variable. Los índices fisicoquímicos que priorizan ciertos contaminantes pueden ignorar o minimizar otros que pueden ser más importantes en diferentes contextos. Las fuentes de contaminación también varían geográficamente, lo que dificulta que un solo índice sea útil en todas partes.

Normativas y estándares locales. Las regulaciones sobre calidad del agua difieren de un país a otro y, a menudo, incluso entre regiones dentro de un mismo país. Los límites máximos permisibles para ciertos contaminantes, como el nitrato, el arsénico o el mercurio, varían según las normativas de cada lugar, lo que implica que un índice de calidad de agua debe ajustarse a estos estándares locales; un índice que es aceptable en un país puede no serlo en otro debido a las diferencias en sus estándares de salud pública y protección ambiental. Los niveles permitidos de ciertos contaminantes en agua potable o para usos recreativos pueden ser más estrictos en países con acceso a tecnologías avanzadas de tratamiento de agua.

Factores geográficos y ambientales. Las características físicas y ambientales de las regiones influyen en la composición del agua. Factores como la geología, el clima y el uso del suelo afectan la calidad del agua y los tipos de contaminantes presentes. Regiones áridas pueden tener problemas relacionados con la salinidad, mientras que en zonas agrícolas predomina la contaminación por plaguicidas y fertilizantes. Un índice que funcione bien en una región tropical puede no ser relevante en una zona con suelos volcánicos, donde los niveles de ciertos metales podrían ser naturalmente más altos.

Tecnologías de monitoreo y capacidades. La disponibilidad y capacidad para monitorear los parámetros fisicoquímicos del agua varía en función del desarrollo tecnológico y los recursos financieros de cada país o región. Los laboratorios de análisis de agua pueden no tener acceso a los mismos equipos ni la misma precisión en la detección de contaminantes. Un país con tecnología avanzada puede medir y controlar muchos más parámetros que otro con recursos limitados. La estandarización de índices requeriría que todos los países tuvieran el mismo nivel de capacidad técnica, lo cual no es factible en muchos casos.

Diferentes enfoques de cálculo. Los métodos para calcular los índices también varían. Algunos índices dan más peso a ciertos parámetros o contaminantes que otros, y los métodos para interpretar los resultados pueden ser diferentes. La ponderación de los parámetros, los sistemas de puntuación y los algoritmos de cálculo pueden hacer que un índice sea adecuado en una región, pero no en otra. Algunos países priorizan la minimización de contaminantes específicos que afectan la salud pública, mientras que otros pueden centrarse en la preservación de ecosistemas acuáticos. Esta diversidad de enfoques dificulta que se logre un consenso sobre qué parámetros y ponderaciones deben ser universales.

Dificultad para acordar un Índice Global. En el ámbito internacional, los organismos responsables de la calidad del agua (aunque no existe un organismo único que regule o estandarice globalmente los índices de calidad del agua) tienen dificultades para acordar un único estándar debido a las diferencias en las prioridades ambientales, económicas y de salud pública entre los países. Las negociaciones internacionales a menudo se complican por las diferencias en los recursos disponibles, las prioridades políticas y las condiciones ambientales.

Ningún índice de calidad puede proporcionar una evaluación completa de un cuerpo de agua y, la ausencia de un índice de calidad de agua unificado a nivel internacional o nacional refleja las complejidades inherentes a la evaluación del agua, la diversidad de los cuerpos de agua y sus usos, las normativas locales y la tecnología disponible para su análisis. Estos factores hacen que estandarizar y comparar los resultados de calidad del agua sea una tarea difícil.

IV. Ejemplos de índices de calidad del agua

1. Índice de Calidad del Agua Nacional (ICA-N)-México

Los indicadores de calidad del agua ICA-N son una herramienta cuantitativa que utiliza la Gerencia de Calidad de Agua de la CONAGUA para determinar cómo se encuentra la calidad del agua en diversos sitios de los cuerpos de agua nacionales, clasificados como lóticos, lénticos, costeros o subterráneos. Se determinan a partir de los resultados del monitoreo nacional que lleva a cabo la Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua (RENAMECA), operada por la Gerencia de Calidad del Agua, de la Subdirección General Técnica.

El ICA-N¹⁴¹ está ajustado a las normativas mexicanas, especialmente a las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), que definen los límites máximos permisibles para cada uno de los parámetros evaluados. Esto significa que el índice no solo evalúa los niveles de los contaminantes, sino que los compara con los estándares nacionales para determinar si el agua es apta para su uso en distintas actividades. Las normativas mexicanas contemplan distintos usos del agua, como el consumo humano, el riego agrícola o la conservación de la vida acuática, por lo que los valores umbrales de cada parámetro varían según el tipo de uso.

El ICA-N permite un diagnóstico rápido y comprensible del estado de la calidad del agua en diferentes cuencas y fuentes, contribuyendo así a la toma de decisiones informadas para la gestión de los recursos hídricos. El ICA-N incorpora una serie de parámetros fisicoquímicos esenciales para determinar la calidad del agua en función de sus posibles usos, como el consumo humano, la agricultura, el riego, la recreación o la vida acuática.

Los indicadores superficiales son 8 parámetros:

- Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO5);
- Demanda Química de Oxígeno (DQO);

¹⁴¹ SEMARNAT-CONAGUA, *Indicadores de la calidad del agua superficial y subterránea*, 2024.

- Sólidos Suspendidos Totales (SST);
- Coliformes fecales (CF);
- *Escherichia coli*, (E_COLI);
- Enterococos fecales (ENTEROC_FEC);
- Porcentaje de saturación de Oxígeno Disuelto (OD%) y
- Toxicidad aguda (TOX).

Los indicadores de aguas subterráneas son 14 parámetros:

- Fluoruros (Fluo);
- Coliformes fecales (CF);
- Nitrógeno de Nitratos (N_NO3);
- Arsénico Total (As_Tot);
- Cadmio Total (Cd_Tot);
- Cromo Total (Cr_Tot);
- Mercurio Total (Hg_Tot);
- Plomo Total (Pb_Tot);
- Alcalinidad (Alc_Tot);
- Conductividad eléctrica (Cond_elec);
- Dureza Total (Dur_Tot);
- Sólidos Disueltos Totales (SDT);
- Hierro Total (Fe_Tot) y
- Manganeseo Total (Mn_Tot).

El ICA-N se obtiene mediante una ponderación de los diferentes parámetros medidos, asignando un valor numérico que refleja la calidad general del agua. Este valor único facilita la interpretación de la calidad del agua y permite una comparación directa entre diferentes cuerpos de agua. Los valores del índice están clasificados en rangos que indican la calidad del agua.

Asimismo, se utiliza un “Semáforo de la Calidad del Agua”, que es una clasificación de la calidad en un determinado sitio de monitoreo, basada en intervalos de concentración de cada parámetro indicador, por lo que se establece una escala de cumplimiento que asigna un color: verde que representa la mejor calidad, amarillo calidad intermedia y rojo mala calidad.

El “Semáforo” para agua superficial considera lo siguiente: si uno o más de los siguientes parámetros: DBO5, DQO, ENTEROC_FEC, y/o TOX, incumplen, entonces el semáforo será de color rojo; si los parámetros anteriores cumplen, pero uno o más de los siguientes parámetros: SST, %OD, CF y/o E_COLI, incumplen, el semáforo será amarillo; y, cuando se da el cumplimiento de todos los indicadores, el semáforo será verde.

El semáforo para agua subterránea considera lo siguiente: si uno o más de los siguientes parámetros: Fluo, CF, N_NO3, As_Tot, Cd_Tot, Cr_Tot, Hg_Tot y Pb_Tot, incumplen, entonces el semáforo será color rojo; si los parámetros anteriores cumplen, pero uno o más de los siguientes parámetros: Alc_Tot, Cond_elec, Dur_Tot, SDT, Fe_Tot y Mn_Tot, incumplen, el semáforo será amarillo; y, cuando se da el cumplimiento de todos los indicadores, el semáforo será verde.

De esta manera, el ICA-N es una herramienta fundamental para las autoridades ambientales mexicanas, como la CONAGUA, en la toma de decisiones relacionadas con la protección y el manejo de los recursos hídricos. A través del monitoreo continuo de este índice en los cuerpos de agua del país, se pueden identificar áreas críticas que requieren intervención, priorizar inversiones en infraestructura de tratamiento y monitorear el cumplimiento de las normativas ambientales.

Además, el ICA-N también permite evaluar la efectividad de políticas ambientales, como el control de descargas industriales o la mejora en el tratamiento de aguas residuales. Al ser un indicador accesible y fácil de interpretar, también contribuye a informar a la sociedad sobre el estado de los recursos hídricos en México y la necesidad de su conservación y protección.

2. Índice de Calidad del Agua ICA-México

El “Compendio de Estadísticas Ambientales” de la SEMARNAT¹⁴² dice que:

A principios de los años setenta, ante la necesidad de encontrar un método uniforme y consistente para dar a conocer la calidad del agua de manera accesible a la

¹⁴² SEMARNAT, *Compendio de Estadísticas Ambientales*, edición 2013.

población, se desarrolló un sistema estimativo de calidad del agua que requirió la medición física de los parámetros de contaminación del agua y el uso de una escala estandarizada de medición para expresar la relación entre la existencia de varios contaminantes en el agua y el grado de impacto en los diferentes usos de la misma. Este sistema se denominó Índice de Calidad del Agua (ICA) y permitía hacer comparaciones de niveles de contaminación en diferentes áreas. El ICA se define como el grado de contaminación existente en el agua a la fecha de un muestreo, expresado como un porcentaje de agua pura. Así, agua altamente contaminada tendrá un ICA cercano o igual a 0% y de 100% para el agua en excelentes condiciones.

Este índice considera los 18 parámetros para su cálculo con distintos pesos relativos (W_i), según la importancia que se le concedía a cada uno de ellos en la evaluación total. Estos pesos son similares a los propuestos por Hort en su momento y se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1
Peso relativo asignado a los parámetros de calidad de agua
para el cálculo del ICA

Parámetro	peso (W_i)	Parámetro	Peso (W_i)
Demanda bioquímica de oxígenos	5.0	Nitrógeno de nitratos	2.0
Oxígeno disuelto	5.0	Alcalinidad	1.0
Coliformes fecales	4.0	Color	1.0
Coliformes totales	3.0	Dureza total	1.0
Sustancias activas al azul de metileno (detergentes)	3.0	Potencial hidrógeno (pH)	1.0
Conductividad eléctrica	2.0	Sólidos suspendidos	1.0
Fosfatos totales	2.0	Cloruros	0.5
Grasas y aceites	2.0	Sólidos disueltos	0.5
Nitrógeno amoniacal	2.0	Turbiedad	0.5

El ICA se calcula a través de la fórmula:

$$\text{ICA} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

Donde el subíndice i identifica a cada uno de los 18 parámetros antes presentados, por lo que $i = 1, 2, \dots, 18$, y $n = 18$

3. Índice de Calidad de Agua de acuerdo con las Normas de Uso Internacional

Su metodología de cálculo se basa en el número de veces que se exceden los límites máximos permisibles establecidos por las normativas para un uso específico del agua. Esto hace que el índice sea mucho más sensible y representativo frente a los resultados de los muestreos y las determinaciones analíticas que superen dichos límites.¹⁴³

Para el caso mexicano, se pueden utilizar, por ejemplo, las normas para uso y consumo humano NOM-127-SSA1-1994 (SSA 2000) NOM-041-SSA1-1993 (SSA 1994) y la norma para riego agrícola CE-CCA-001/89 (SEMARNAT 1989).

La fórmula para calcular el índice de calidad del agua¹⁴⁴ es la siguiente:

$$\text{ICA} = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \right)$$

¹⁴³ Puente Miranda, Diego G. *et al.*, “Determinación histórica de índices de calidad del agua en observatorios participativos en el norte de México”, *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 2023, 39, pp. 127-137.

¹⁴⁴ CCME, *Water Quality Index user's manual 2017 Update*. Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life, Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg, Manitoba, Canadá, 2017, p. 23.

Donde:

- Alcance (F1): porcentaje de parámetros que exceden la norma.
- Frecuencia (F2): porcentaje de pruebas individuales de cada parámetro que excede la norma.
- Amplitud (F3): magnitud en la que excede la norma cada parámetro que no cumple.

El resultado del ICA se lleva a una escala adimensional entre 0 y 100, donde el intervalo 95-100 se considera de calidad EXCELENTE, de 80-94 de calidad BUENA, de 65-70 de calidad ACEPTABLE, de 45-64 de calidad MARGINAL y de 0-44 de calidad POBRE.

4. *Índice de calidad subjetivo-Internacional*

Un Índice de Calidad del Agua (ICA) particularmente interesante fue propuesto por Pesce y Wunderlin,¹⁴⁵ quienes introdujeron un enfoque innovador al incluir, además de la ponderación de los distintos parámetros fisicoquímicos, una constante subjetiva: la impresión visual de la contaminación del cuerpo de agua, evaluada, por ejemplo, por los usuarios locales o pobladores que interactúan directamente con él, incluso si no tienen formación científica en temas ambientales.

Este enfoque destaca la importancia de la percepción social en la evaluación de la calidad del agua. En lugar de depender exclusivamente de datos técnicos y científicos, se integra una evaluación más intuitiva y accesible para aquellos que experimentan los efectos de la contaminación de manera cotidiana. Por ejemplo, un habitante cercano a un cuerpo de agua puede notar cambios en el color del agua, la presencia de espuma o desechos flotantes o malos olores, factores que no siempre se reflejan de manera directa en los análisis químicos, pero que sí son importantes para la comunidad. De esta manera, la constante subjetiva, puede toma los valores:

¹⁴⁵ Pesce, Silvia. F. y Wunderlin, Daniel A., "Use of water quality indices to verify the impact of Cordoba City (Argentina) on Suquia River", 2000, *Water Research*, 34, pp. 2915-2926.

- 1.00= agua sin contaminación aparente (clara o con sólidos suspendidos naturales).
- 0.75= agua ligeramente contaminada (aparentemente), indicada por un color no natural claro, espuma, turbidez leve debido a razones no naturales.
- 0.50= agua contaminada (aparentemente), indicada por un color no natural, olor ligero a moderado, turbidez alta (no natural), sólidos orgánicos suspendidos, etc.
- 0.25= agua altamente contaminada (aparentemente), indicada por un color negruzco, olor fuerte, fermentación visible, etc.

Así, el cálculo del Índice de Calidad del Agua Subjetivo (ICA_{sub}) es a través de la fórmula:

$$ICA_{sub} = k \frac{\sum_i C_i x P_i}{\sum_i P_i}$$

Donde:

k : constante subjetiva

C_i : el valor asignado a cada parámetro después de su normalización

P_i : es la ponderación asignada a cada parámetro. El rango de valores P_i va de 1 a 4, donde 4 representa un parámetro que tiene la mayor importancia para la preservación de la vida acuática (por ejemplo, el oxígeno disuelto), mientras que un valor de 1 significa que dicho parámetro tiene un impacto menor (por ejemplo, el cloruro).

Otra ventaja de este ICA es su flexibilidad, ya que puede aplicarse utilizando los 21 parámetros propuestos o un número menor, según las necesidades del estudio. Este ICA resulta particularmente útil cuando se busca comparar diferentes sitios sin la necesidad de emitir una evaluación basada en normativas específicas.

Un ejemplo de su aplicación, que además incluye un calculador en Excel para facilitar el cálculo del ICA, es el estudio realizado por Chaparro *et al.*¹⁴⁶

D. Criterios de selección de bioindicadores

La contaminación ambiental de los ríos en México se ha convertido en un problema que resulta no solo en el deterioro de los ecosistemas, sino técnicamente imposible monitorear y menos aún establecer los límites permisibles de residuos que puedan ser incorporados en reglamentos o normas ambientales.

Para dimensionar el problema de evaluación de contaminantes en el ambiente y, particularmente, en ríos contaminados debemos considerar que desde 2016, el número de sustancias químicas y materiales producidos en el mundo alcanzó 126.16 millones¹⁴⁷ según la *Chemical Abstracts Service* (CAS®)¹⁴⁸ y debe considerarse que la síntesis de nuevas moléculas químicas se ha acelerado en los últimos siete años; entre 1907 (año en que inició sus actividades el CAS®) y el 2009 por ejemplo se registraron 50 millones de sustancias, pero para 2015 el número de sustancias llegó a 100 millones, es decir, en tan solo seis años se produjo el mismo número de sustancias que en los 102 años anteriores.

Esto es preocupante considerando que de acuerdo con la base de datos CHEMLIST® del CAS®, hasta el momento únicamente 347 mil de esas sustancias están inventariadas o reguladas en algún país,¹⁴⁹ lo que indica que se desconocen los efectos adversos de la mayoría de las moléculas. Sin esa información es imposible establecer regulaciones que permitan proteger el ambiente y la salud. En México, en el Inventario Nacional de Sustancias Químicas de México¹⁵⁰ están registradas 5,852 sustancias y, al menos 3,523 establecimientos reportan al Registro de Emisiones y

¹⁴⁶ Chaparro-Herrera, Diego *et al.*, “Comprehensive health evaluation of an urban wetland using quality indices and decision trees”, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000, 193, pp. 2915-2926.

¹⁴⁷ Al 11 de enero de 2016; la cifra se actualiza en tiempo real en la página del Chemical Abstracts Service (www.cas.org).

¹⁴⁸ División de American Chemical Society (ACS) que tiene la revista *Chemical Abstracts* y la mayor base de datos publicada sobre sustancias químicas.

¹⁴⁹ Al 11 de enero de 2017; la lista es actualizada semanalmente por el CAS®.

¹⁵⁰ Listado de sustancias que se comercializan en el país. Dato tomado en SEMARNAT (2016a).

Transferencia de Contaminantes (RETC) 200 sustancias. En la Unión Europea, el programa denominado Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de Sustancias Químicas (REACH, por sus siglas en inglés) tiene registradas aproximadamente 12 mil 700 sustancias desde el año 2007 en que se implementó el programa.

La evaluación de los impactos de los contaminantes en el ambiente requiere de metodologías que permitan censar de manera más accesible y asequible con el objetivo de obtener diagnósticos o evaluaciones que respondan de manera global y certera de los riesgos o daños ambientales. La evaluación de riesgo ambiental, por ejemplo, tiene como objetivo la estimación de probabilidades y magnitudes de eventos no deseados como la morbilidad, mortalidad en los seres vivos empleando metodologías estándar que permita tomar decisiones (Suter, 1993).¹⁵¹ Pese a que la definición de riesgo implica necesariamente la probabilidad de ocurrencia de un efecto adverso, en lo referente al ambiente no siempre se expresa el riesgo en estos términos, de aquí que dentro de la legislación mexicana la evaluación de riesgo ambiental se define como el “proceso metodológico para determinar la probabilidad o posibilidad de que se produzcan efectos adversos, como consecuencia de la exposición de los seres vivos a las sustancias contenidas en los residuos peligrosos o agentes infecciosos que los forman” (DOF, 2003).¹⁵²

Dentro de las evaluaciones de riesgo ambiental se reconocen dos tipos de receptores o puntos de medición que más adelante se detallan, pero que aquí nos sirve como base para conocer que existen dos grandes procesos metodológicos reconocidos internacionalmente: a) si los organismos abordados son los seres humanos se aplica lo que se conoce como evaluación de riesgo para la salud humana y b) si los organismos expuestos son los recursos biológicos (organismos no humanos) se aplica lo que se conoce como evaluación de riesgo ecológico o ambiental. Como se vio en la definición dentro de la legislación mexicana, el término evaluación de riesgo ambiental establece ambos tipos de evaluaciones. No obstante, desde 2005, la Organización Mundial de la Salud adoptó como programa de trabajo el

¹⁵¹ Suter II, G. W., *Ecological Risk Assessment*. Lewis Publishers, Chelsea, 1993.

¹⁵² DOF (*Diario Oficial de la Federación*), Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, *Diario Oficial de la Federación*, 8 de octubre de 2003, México D.F.

Modelo de Interconexiones entre la Salud Humana y la Integridad de los Ecosistemas con el objetivo de determinar las relaciones por las que la salud pública se compromete debido al deterioro ambiental (Arellano-Aguilar *et al.*, 2013).¹⁵³ De tal manera que se busca integrar los estudios de riesgo desde un punto de vista ambiente-salud.

Históricamente, el interés por asignar probabilidades de ocurrencia de efectos adversos a los organismos humanos y no humanos por la exposición a sustancias químicas surgió en primer lugar como una necesidad de establecer si las concentraciones de los ingredientes activos presentes en medicamentos y cosméticos eran susceptibles de producir efectos secundarios adversos. A partir de la década de 1970, como una respuesta al problema de contaminación ambiental se buscó determinar qué tanto debe limpiarse o sanearse un sitio después de que ha sido contaminado.

En muchos países, actualmente se determina el nivel de saneamiento o restauración ecológica con base en un riesgo máximo aceptable para la población y los organismos no humanos. Esto implica que no se tiene que restaurar el sitio hasta un nivel cero de contaminación, sino hasta un nivel tal que no cause efectos a largo plazo. Entre las décadas de 1950 y 1970, las investigaciones avanzaron hacia el establecimiento de consumos diarios aceptables de contaminantes. Sin embargo, entre 1970 y 1990, se descubrió que existen ciertas sustancias químicas que inducen efectos adversos en concentraciones de exposición muy pequeñas (Paustenbach, 1989).¹⁵⁴ En la década de 1980 se integró la metodología para las evaluaciones de riesgo a la salud y a partir de la década de 1990 se ampliaron los criterios para incluir a los organismos no humanos, desarrollándose las metodologías para las evaluaciones de riesgo ecológico a través de indicadores biológicos o bioindicadores.

¹⁵³ Arellano-Aguilar, O., Ortega, L., Montero, R., “Daños a la salud por efecto de riesgos ambientales: morbilidad y mortalidad en la población mexicana”, en Castro, Juan Manuel, Palacios, Martha, Paz, María del Pilar, García, Guadalupe, Moreno, Laura (coords.), *Salud, Ambiente y Trabajo*, McGraw Hill Education, 2013, pp. 88-107.

¹⁵⁴ Paustenbach D., “A Survey of Health Risk Assessment”, en Paustenbach, D. (ed.), *The Risk Assessment of Environmental and Human Health Hazards, A Textbook of Case Studies*, Wiley Interscience, 1a. ed, New York, ISBN-13: 978-0-47184998-7, 1989, p. 27.

Los bioindicadores son especies naturales que, por sus características físicas, biológicas o ecológicas, responden de manera específica ante la presencia de estresores ambientales tales como la temperatura, salinidad, cambios en los nutrientes o cambios repentinos del ambiente que lo rodea. Dichos indicadores proveen de información de las condiciones ambientales y las especies indicadoras pueden apreciar dichos cambios por su presencia/abundancia o ausencia/rareza. En este sentido un indicador es una especie selecta que por su grado de sensibilidad o tolerancia a diversos tipos de contaminantes o a los efectos negativos. Como se ha visto en la sección de introducción, existe una diversidad de especies en los cuerpos de agua desde vertebrados, invertebrados y plantas acuáticas adaptadas a las condiciones naturales de dichos ecosistemas. Los cambios o perturbaciones que se pueden presentar generan en las especies múltiples respuestas a nivel biológico y reproductivo.

Algunas ventajas de emplear bioindicadores en estudios es contar con monitoreo que proveen de datos biológicos de manera fácil y accesible. Además, las respuestas se pueden expresar con datos cuantitativos y la colección de datos y evaluación de las respuestas biológicas se pueden seguir a corto, mediano y largo plazos. Las especies bioindicadoras abarcan desde organismos unicelulares hasta grandes vertebrados. Sin embargo, la selección de la especie bioindicadora debe reunir ciertas características tales como:

1. responder consistentemente ante la exposición a agentes tóxicos;
2. ocupar una posición clave en la estructura o función ecosistémica;
3. ser fácil de identificar en campo;
4. dar certeza respecto a la interpretación geográfica y temporal;
5. tener una distribución regional que permita contrastar localidades de referencia de aquellas que presentan algún tipo de impacto a factores de estrés;
6. ser especies, cuyo conocimiento de su biología y ecología sea amplia;
7. preferentemente, debe tener ciclos de vida cortos (menor a 12 meses), y
8. estar presentes la mayor parte del tiempo en un ciclo anual.

Estas ocho características son de cierta manera recomendaciones para quienes complementan estudios de monitoreo de calidad de agua con la evaluación

ecohidrológicamente mediante la respuesta de organismos expuestos, lo que permite determinar efectos a nivel de poblaciones, comunidades o ecosistemas. Asimismo, estos criterios pueden aplicarse a casos en los que se implementan estudios de riesgo ecológico o programas de restauración ecológica.

El primer aspecto importante que debe considerarse es la selección del grupo taxonómico¹⁵⁵ o especie. Es recomendable estimar el tipo de respuesta medible, por lo que dicha respuesta debe estar vinculada a la exposición y características fisicoquímicas del agente contaminante, expresado de acuerdo con la ecuación de Hansch (Focks *et al.*, 2018):¹⁵⁶

$$y=f_1(L) + f_2(E) + f_3(S)$$

Dicha ecuación toma en cuenta la respuesta biológica a la exposición de un agente tóxico (y) que se explica en función (f) de tres propiedades moleculares del agente: propiedades lipofílicas (L),¹⁵⁷ propiedades electrónicas (E)¹⁵⁸ y propiedades estéricas (S).¹⁵⁹ Esta ecuación está directamente vinculada con los mecanismos que inducen efectos adversos en los organismos (Focks *et al.*, 2018).¹⁶⁰

Cabe mencionar que a partir de esta ecuación se pueden incluir más parámetros fisicoquímicos de medición tales como el logaritmo del coeficiente de partición octanol-agua (*logKow*) y con ello desarrollar modelos predictivos respecto a los efectos de bioacumulación, persistencia o bioconcentración de los agentes contaminantes. De hecho, estas características son base teórica para los modelos de cuantificación de la relación estructura-actividad (QSAR, por sus siglas en inglés) o toxicocinética-toxicodinámica (TK-TD, por sus siglas en inglés). Ambos modelos son empleados de manera recurrente para la predicción de daños a nivel pobla-

¹⁵⁵ Grupo taxonómico: categoría o jerarquía en el que se clasifica una especie a nivel de Orden o Familia.

¹⁵⁶ Folcks *et al.*, 2018.

¹⁵⁷ Lipofilicidad: afinidad química con los lípidos.

¹⁵⁸ Propiedades electrónicas: estructura de bandas y densidad de estados electrónicos de las moléculas. Dichas propiedades determinan aspectos de conductividad óptica, funciones dieléctricas y fotorelectancia.

¹⁵⁹ Propiedades estéricas: orientación de los enlaces químicos moleculares.

¹⁶⁰ Focks A., Grisoni F., Barsi A., Vighi M., "Predictive models in ecotoxicology: bridging the Gap between scientific progress and regulatory applicability", *Special Series Integrated Environmental Assessment and Management*, 2018, pp. 1-3.

ciones de especies no-humanas y han sido parte de guías de evaluación de riesgo ecológico en agencias internacionales como la USEPA (Focks *et al.*, 2018).

Como segundo criterio de selección de la especie bioindicadora está la relevancia ecológica. En otras palabras, debe considerarse el lugar que ocupa la especie respecto a su función ecológica. Por ejemplo, las bacterias, invertebrados (insectos, anélidos, poliquetos, crustáceos, nemátodos) ocupan niveles en la base trófica de una comunidad y tienen funciones ecológicas importantes como el reciclado de nutrientes, la producción primaria y/o la descomposición y mineralización de la materia orgánica. En cambio, especies depredadoras en general tienen como función ecológica la regulación de las poblaciones de las cuales se alimentan, aportan una mayor biomasa en el ecosistema y cuentan con mayor movilidad, por lo que pueden desplazarse a diferentes regiones, promoviendo la movilidad de contaminantes mediante bioacumulación y biomagnificación. Otros aspectos de interés para seleccionar bioindicadores pueden basarse en su importancia económica, como especies emblemáticas, especies tolerantes a perturbaciones ambientales o especies abundantes. Todas estas características no son mutuamente excluyentes y más bien refuerzan la importancia de la especie o grupo taxonómico seleccionado (Fig. 1).

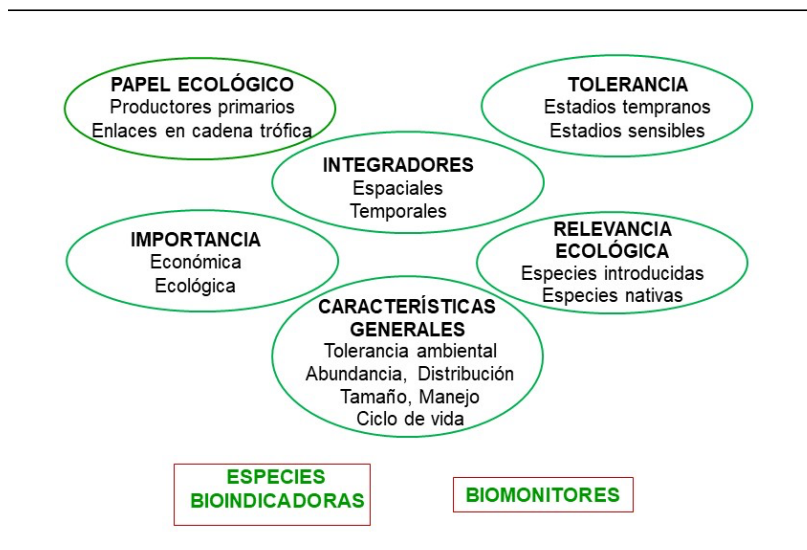


Figura 1. Clasificación por función ecológica y otros aspectos de importancia para la selección de especies bioindicadoras.

En cuanto a los demás criterios o características mencionadas arriba (incisos 3 al 8) son más de carácter logístico en cuanto a las mediciones o colecta en campo o gabinete.

E. Estudios ecotoxicológicos como base para el diagnóstico ambiental

Para llevar a cabo estudios del diagnóstico ambiental por contaminantes en sistemas acuáticos y del riesgo que representa para la biota y el ecosistema, es fundamental integrar el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos y de los contaminantes en el medio, los cuales determinan su biodisponibilidad y su destino ambiental, así como los efectos biológicos y ecológicos que ocasionan. Estos aspectos son integrados en los estudios ecotoxicológicos, los cuales son la base de un diagnóstico ambiental robusto encaminado a generar evidencias científicas que sustenten acciones para los tomadores de decisión en materia de protección, manejo y/o rehabilitación hídrica.

La ecotoxicología es una ciencia multidisciplinaria que integra las disciplinas de química, toxicología y ecología, al igual que fisiología y microbiología ambiental, y utiliza herramientas diversas para modelar el efecto de los xenobióticos en los organismos y los ecosistemas. Como ciencia, su objetivo central es la organización del conocimiento del destino y de los efectos de los tóxicos en los ecosistemas, basado en principios explicativos. De manera particular, los objetivos de los estudios ecotoxicológicos incluyen:¹⁶¹

- Evaluar y predecir los efectos ocasionados por los químicos y otros estresores ambientales del medio bajo condiciones realistas de exposición.
- Conocer el destino y los efectos de los tóxicos en los ecosistemas, basados en principios explicativos.
- Establecer las condiciones y límites de seguridad de la exposición a los tóxicos en la biota de los ecosistemas y a la salud humana.

¹⁶¹ Newman Michel C., *Fundamentals of Ecotoxicology*, The science of pollution, CRC Press, 2019, p. 708.

Los estudios ecotoxicológicos consideran que los efectos acumulados en el organismo, como unidad de estudio, tienen proyección a nivel de poblaciones, comunidades y ecosistemas. Como se mencionó anteriormente, los efectos adversos de los contaminantes son consecuencia de la acción tóxica inicial en procesos moleculares y bioquímicos a nivel celular que repercuten a nivel fisiológico. Estas alteraciones a nivel individual pueden afectar el desempeño, crecimiento, reproducción y sobrevivencia de los organismos y en la estructura de sus poblaciones, lo cual en última instancia tienen consecuencia en las comunidades y en el ecosistema. Así, la acción tóxica de los contaminantes a nivel celular puede repercutir a diferentes niveles de organización biológica de creciente complejidad desde lo molecular-bioquímico al de comunidades y ecosistema (Fig. 2).

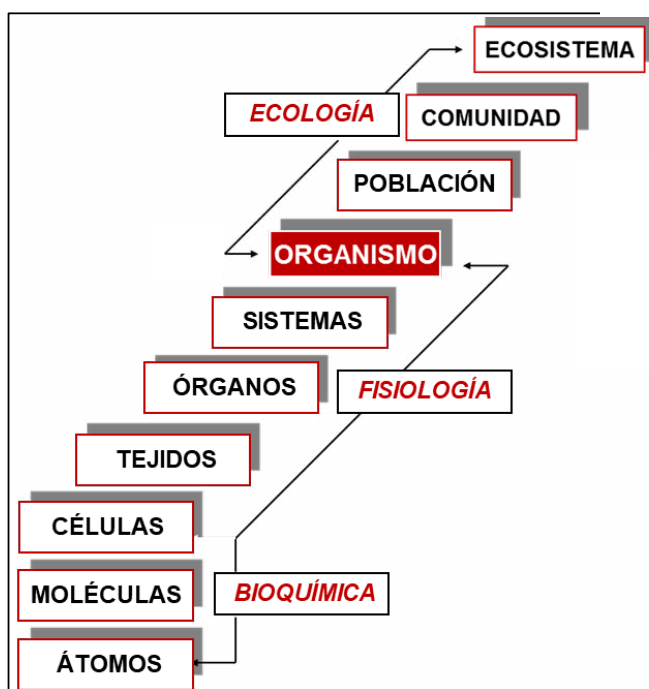


Figura 2. Niveles de organización biológica.

En los estudios ecotoxicológicos se integran tres aspectos centrales: la exposición a los contaminantes, su bioacumulación en la biota y los efectos biológicos que ocasiona (Fig. 3).^{162 y 163}

La *exposición* considera la concentración del(los) contaminante(s) en el medio y de manera relevante esencial su biodisponibilidad; esto es, la fracción del contaminante que ingresa al organismo a través de sus superficies permeables por las diferentes rutas de exposición (agua, sedimento, partículas suspendidas, alimento). En el interior del organismo ocurre la distribución del(los) tóxico(s), y pueden ser acumulados o excretados. La acumulación en los compartimentos celulares no necesariamente resulta en efectos tóxicos debido a procesos de inactivación. En el caso de los metales, pueden ser “secuestrados” en proteínas denominadas metalotioneínas, ocurrir procesos de biomineralización en inclusión celulares, los cuales pueden ser excretados o eliminados a través de la muda en los crustáceos (inactivación). Sin embargo, cuando se supera la capacidad de estos procesos, ocurre el efecto tóxico.

Por otro lado, en el caso de químicos orgánicos, pueden ser transformados por procesos enzimáticos, los cuales incrementan su toxicidad original (activación). La magnitud de la concentración de los contaminantes bioacumulados en su estado activo se relaciona con los efectos que ocasiona.

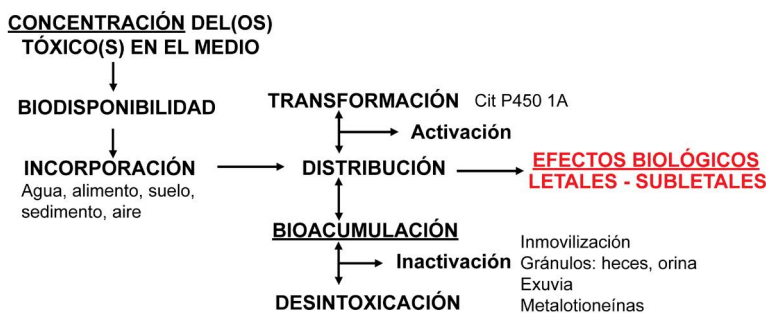


Figura 3. La triada de los estudios ecotoxicológicos^{164,165}

¹⁶² Newman Michel C., *Fundamentals of Ecotoxicology*, The science of pollution, CRC Press, 2019, pp. 708.

¹⁶³ Campbell, Peter et al., *Ecotoxicology*, Cambridge University Press, 2020, pp. 592.

¹⁶⁴ Newman Michel C., *Fundamentals of Ecotoxicology*, The science of pollution, CRC Press, 2019, pp. 708.

¹⁶⁵ Campbell, Peter et al., *Ecotoxicology*, Cambridge University Press, 2020, pp. 592.

I. Bioensayos en laboratorio y estudios *in situ*

El efecto adverso de los tóxicos ambientales se aborda considerando sus efectos, letales y subletales, los cuales dependen de dos componentes relacionados:^{166 y 167}

- *La intensidad de la exposición* se refiere al tiempo de la exposición al que están sometidos los organismos. Esto es, si es una *exposición aguda* por aportes puntuales o en periodos cortos de tiempo (horas) o, si es una *exposición a mediano y largo plazo* (meses, años, décadas), de tipo subcrónico o crónica (usualmente 1/10 del ciclo de vida de un organismo).
- *La magnitud de la exposición*, que se refiere al nivel o concentración de los tóxicos al que están expuestos los organismos, a bajas o elevadas concentraciones.

La interacción de estos dos componentes determina los efectos biológicos adversos; esto es, si la exposición tiene consecuencias *letales* ocasionando la muerte de los organismos o si los efectos son *subletales* donde no hay mortalidad, pero se alteran procesos desde lo molecular-bioquímico a lo fisiológico, lo cual compromete el desempeño, el desarrollo, el crecimiento y/o la reproducción de los organismos.

Por otro lado, la exposición subletal a los contaminantes puede ejercer efectos indirectos y directos (Fig. 4). Los *efectos indirectos* se refieren al efecto que estos contaminantes tienen en componentes del ecosistema (bióticos o abióticos) que interactúan con el organismo. Por ejemplo, la acción tóxica de los contaminantes puede reducir la disponibilidad de las fuentes y sustratos energéticos que requiere el organismo como alimento volviéndolo más susceptible a enfermedades, alterando sus respuestas conductuales en la búsqueda de alimento o escape a depredadores o limitando sus reservas de energía y nutrientes a respuestas centrales como el desarrollo, el crecimiento y la reproducción.

¹⁶⁶ *Idem*

¹⁶⁷ Adams, Marshall (ed.), *Biological indicators of stress in fish*, American Fisheries Society. Symposium 8, Bethesda, Maryland, 1990, pp. 191.

Los *efectos directos* se refieren a la acción directa del contaminante en un organismo por su incorporación y acción tóxica, y ocasiona efectos subletales a nivel molecular, bioquímico y fisiológico que impacta el crecimiento y la reproducción de los organismos. De tal manera, los efectos directos e indirectos a nivel organismo pueden repercutir en la estabilidad de las poblaciones, tener consecuencia en la biodiversidad de las comunidades y en última instancia tener consecuencias en la estructura y función del ecosistema.

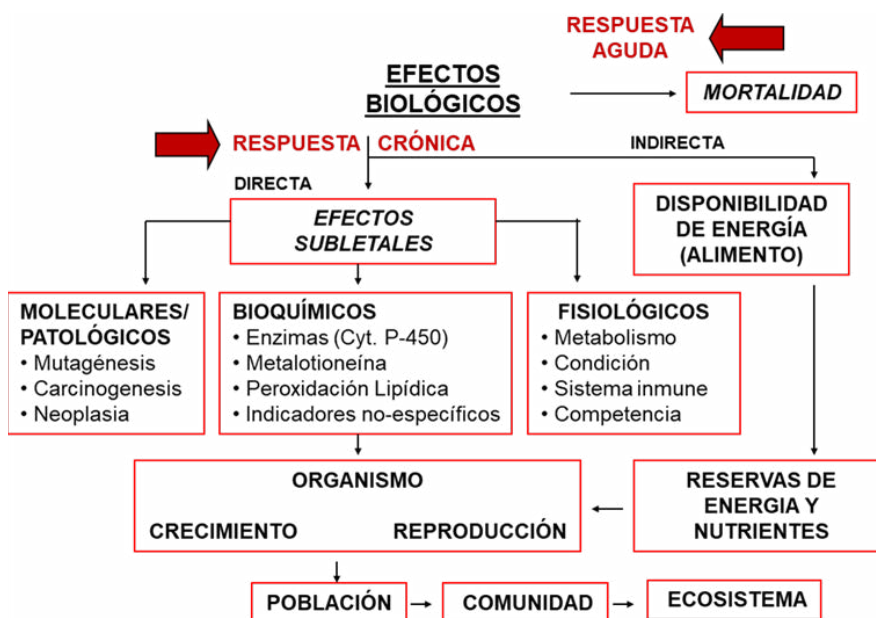


Figura 4. Influencia del efecto subletal crónico directo e indirecto en respuestas a nivel suborganismo y su efecto expresado a nivel de organismo, población, comunidad y ecosistema.^{168 y 169}

¹⁶⁸ Campbell, Peter *et al.*, *Ecotoxicology*, Cambridge University Press, 2020, pp.592.

¹⁶⁹ Adams, Marshall (ed.), *Biological indicators of stress in fish*, American Fisheries Society. Symposium 8, Bethesda, Maryland, 1990, pp.191.

En los sistemas acuáticos, los contaminantes suelen presentarse en mezclas y numerosas variables fisicoquímicas modulan a la vez el comportamiento y la biodisponibilidad de los contaminantes. Así, y como se describe en el capítulo 2, la salinidad, la materia orgánica (ligandos) y el pH, pueden modular las formas químicas de los metales, por ejemplo, haciéndolos más o menos disponibles para los organismos. Por otro lado, la exposición simultánea a las mezclas de dos o más contaminantes puede modificar el efecto tóxico de cada contaminante aislado, lo cual puede conducir a efectos aditivos, sinérgicos o antagónicos.¹⁷⁰

- *Efecto aditivo*: el efecto tóxico resultante constituye la sumatoria de cada uno de los efectos aislados de cada contaminante.
- *Efecto antagónico*. La interacción de uno de los contaminantes reduce el efecto de otro(s) contaminante(s).
- *Efecto sinérgico*. La interacción de uno de los contaminantes potencia el efecto de otro(s) contaminante(s).

La interacción de los contaminantes con numerosas variables ambientales que modulan tanto la biodisponibilidad de los contaminantes como su acción tóxica pueden a su vez ocasionar efectos aditivos, sinérgicos y/o antagónicos. De tal manera, las características particulares de cada contaminante, su biodisponibilidad, su comportamiento en mezclas y la interacción con otras variables fisicoquímicas que modulan su biodisponibilidad refleja la complejidad de la acción tóxica de los contaminantes que en última instancia puede repercutir en procesos estructurales y funcionales relevantes del sistema acuático.

Los eventos de la toxicidad aguda, de efecto letal a la biota, son ocasionados por descargas puntuales de niveles elevados de contaminantes en los cuerpos de agua, eventos cada vez menos frecuentes. En contraste, el problema de la exposición crónica, de largo plazo a contaminantes en concentraciones no letales, es una situación recurrente por las descargas constantes de numerosos contaminantes

¹⁷⁰ Liu, Shushen *et al.*, "Application of the concentration addition model in the assessment of chemical mixture toxicity", *Acta Chimica Sinica*, 2013, 71 (10), pp. 1335-1340.

a los cuerpos de agua, escenario común en los ecosistemas acuáticos, lo cual resalta la importancia de su evaluación. Si bien el efecto tóxico no ocasiona mortalidad inmediata en los organismos, ejerce efectos subletales que en última instancia altera el desarrollo, crecimiento y reproducción de los organismos con consecuencias en la estructura y función del ecosistema. De aquí la relevancia de llevarse a cabo estudios que prevean desde la exposición crónica de efectos subletales en condiciones de laboratorio a estudios ecotoxicológicos directamente en campo (Fig. 5).^{171 y 172}

Los estudios de laboratorio o bioensayos permiten discernir y profundizar en los mecanismos de la acción tóxica celular del xenobiótico bajo estudio, en condiciones controladas y estandarizadas (elevada relevancia toxicológica). En contraste los estudios en campo o *in situ*, aportan evidencia de la interacción de los contaminantes con las variables bióticas y abióticas que modifican su toxicidad y los efectos adversos biológicos y ecológicos (elevada relevancia ecológica). De tal manera, de acuerdo con los objetivos del estudio debe considerarse la realización de estudios ecotoxicológicos que contemplen desde bioensayos de laboratorio para entender los efectos particulares de los contaminantes a estudios de campo que integren la complejidad ambiental y los potenciales efectos a nivel estructural y funcional del ecosistema.

¹⁷¹ Campbell, Peter *et al.*, *Ecotoxicology*, Cambridge University Press, 2020, pp.592.

¹⁷² Adams, Marshall (ed.), *Biological indicators of stress in fish*, American Fisheries Society. Symposium 8, Bethesda, Maryland, 1990, pp.191.

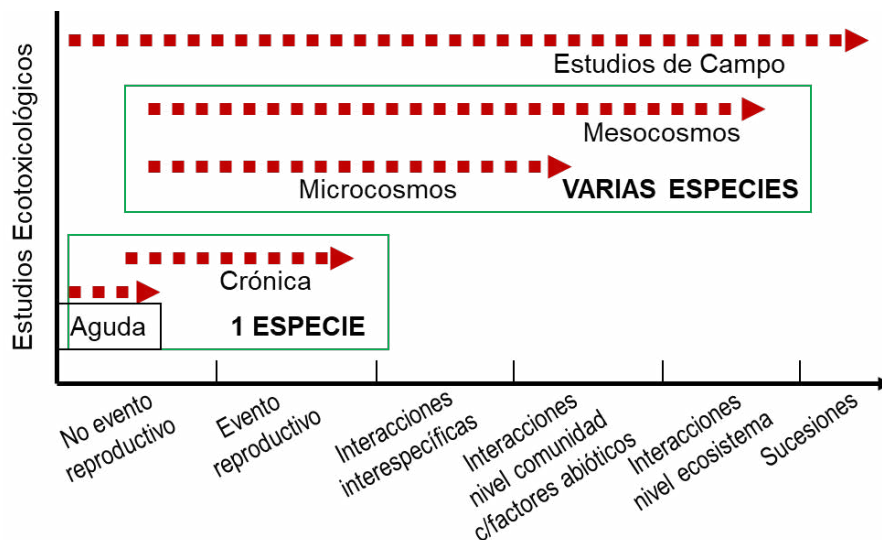


Figura 5. Tipos de pruebas y/o ensayos de toxicidad. Se integra la proporción del ciclo de vida del organismo y complejidad del sistema en evaluación.^{173 y 174}

Los estudios o bioensayos de toxicidad aguda se llevan bajo condiciones controladas de laboratorio en una sola especie y en periodos cortos de exposición aguda (horas), considerando una etapa del ciclo de vida de la especie, por ejemplo, la etapa juvenil. Usualmente no se consideran eventos reproductivos. La toxicidad aguda se expresa en términos de mortalidad como la concentración letal que ocasiona el 50% de la mortalidad en un tiempo determinado, por ejemplo, CL50-96h para un contaminante o Unidad de Toxicidad UT50 para mezclas de contaminantes.

Los bioensayos de toxicidad crónica, también se llevan a cabo con una especie y pueden considerar eventos reproductivos o de desarrollo, como la muda en crustáceos; el periodo de exposición oscila de semanas a 1/10 del ciclo de vida de un organismo o estudios de ciclo de vida completo. De igual manera y bajo condiciones controladas de laboratorio se llevan a cabo bioensayos de toxicidad en microcosmos

¹⁷³ Campbell, Peter *et al.*, *Ecotoxicology*, Cambridge University Press, 2020, pp.592.

¹⁷⁴ Adams, Marshall (ed.), *Biological indicators of stress in fish*, American Fisheries Society. Symposium 8, Bethesda, Maryland, 1990, pp.191.

en los que evalúa la interacción de dos o más especies considerando diferentes niveles tróficos; por ejemplo, la exposición simultánea de una especie de fitoplancton, una de zooplancton (que se alimenta del fitoplancton) y una especie de pez que se alimenta del zooplancton (zooplanctófago), estudios que aportan información de la transferencia trófica de contaminantes (interacciones interespecíficas). En estos bioensayos, la toxicidad crónica de un contaminante puede expresarse a través de la evaluación de diversos parámetros:

- *CE50 Concentración efectiva media*. Es la concentración de un contaminante que ocasiona un cambio bioquímico, fisiológico o conductual en el 50% de la población.
- *CS Concentración de seguridad o MCAT Concentración máxima aceptable de un tóxico*. Es la máxima concentración de un contaminante que no ocasiona efectos adversos a largo plazo, al menos para una generación de una población.
- *PNEC Concentración de no efecto predicha*. Se deriva al aplicar un factor de corrección a los valores obtenidos de la CL50-96 h. El factor de aplicación oscila de 0.01 a 0.001 en función de los grupos de tóxicos en evaluación y las especies bajo estudio.
- *NOEC Concentración de no efecto observable*. Máxima concentración del tóxico en la cual no se observan efectos biológicos.
- *LOEC Concentración menor de efectos observables*. Mínima concentración de un tóxico que ocasiona efectos observables.

Los ensayos crónicos en campo se realizan en mesocosmos, usualmente utilizando encierros en un área determinada, con varias especies tróficamente relacionadas. Con esta estrategia se considera la interacción de los contaminantes y parámetros fisicoquímicos, si bien pueden manipularse variables como la densidad de los organismos o la etapa del ciclo de vida de las especies (interacciones nivel comunidad con factores bióticos y abióticos). En los estudios de campo o *in situ* se analiza la interacción de los factores bióticos y abióticos con los contaminantes presentes e involucra la integración espacial y temporal de la acción tóxica de los contaminantes. Es el escenario de exposición de mayor complejidad ambiental, pero aporta información de sitio valiosa, del estado de las poblaciones, las comunidades y el ecosistema. En los estudios ecotoxicológicos de mesocosmos y de

campo, de exposición crónica a mediano y largo plazo, se analizan respuestas de implicación ecológica como cambios en la biodiversidad, abundancia, interacciones entre especies, historias de vida y diversos índices de integridad biótica, aspectos que se abordarán más adelante.

II. Biomarcadores de exposición, de efecto y de susceptibilidad

Como se mencionó en la sección anterior (sección C. Criterios para la selección de bioindicadores), la elección de las especies a ser analizadas en los estudios ecotoxicológicos es un paso fundamental a fin de esclarecer el riesgo y/o los impactos de los contaminantes y otros estresores ambientales en la biota, en sus comunidades y en la integridad del ecosistema acuático. En estas especies bioindicadoras se llevan a cabo bioensayos bajo condiciones controladas de laboratorio o estudios de campo *in situ* en los cuales se evalúan diversas respuestas biológicas y/o de proyección ecológica por el efecto de la exposición crónica, subletal, a los tóxicos y otros estresores ambientales, respuestas denominadas marcadores biológicos o biomarcadores. Actualmente, la implementación de los biomarcadores ha adquirido especial relevancia en los Programas de Monitores de la Calidad del Agua (PMCA) y en la Evaluación del Riesgo Ecológico por tóxicos ambientales, para valorar el impacto de la contaminación *in situ*.

Los biomarcadores, permiten la evaluación del efecto adverso de contaminantes y otros estresores ambientales a nivel sub-organismo (por ejemplo a nivel molecular y celular), a nivel individual (por ejemplo a nivel fisiológico, conductual) y a nivel supra-organismo (por ejemplo a nivel de población, comunidades), dando cuenta a la vez de los mecanismos de acción tóxica involucrados (relevancia toxicológica) y de la severidad del efecto a nivel de ecosistemas (relevancia ecológica)^{175,176 y 177} (Fig. 6).

¹⁷⁵ Adams, Marshall (ed.), *Biological indicators of stress in fish*, American Fisheries Society. Symposium 8, Bethesda, Maryland, 1990, pp. 191.

¹⁷⁶ Amiard-Triquet, Claude *et al.*, *Ecological Biomarkers: Indicators of ecotoxicological effects*, CRC Press, 2013, pp. 262.

¹⁷⁷ Ruiz, Ulises, *Guía técnica para orientar la elaboración de estudios de evaluación de riesgo ambiental de sitios contaminados*, SEMARNAT, 2006, pp. 314.

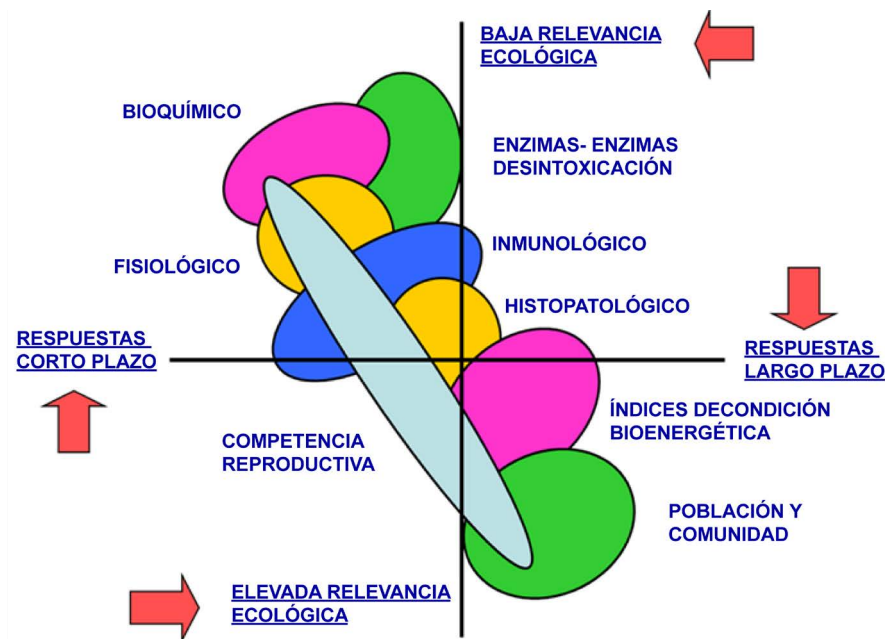


Figura 6. Respuestas biológicas de los organismos a los contaminantes y su relación con el tiempo de respuesta y su relevancia ecológica.

Los criterios de un biomarcador adecuado incluyen:

- Dar una respuesta temprana “de aviso” en los organismos al efecto del tóxico (por ejemplo a nivel bioquímico)
- Establecer relaciones de las causas (tipo y concentración de contaminantes) y el efecto biológico (respuestas biológicas medibles).
- Aportar información para valorar si se han excedido los umbrales fisiológicos o los límites de tolerancia del organismo.
- Los niveles de la modificación del biomarcador deben relacionarse con la condición de salud del organismo.
- Predecir efectos a niveles mayores de organización biológica (poblaciones, comunidades y ecosistemas).
- Ser sensibles, fáciles de implementar y preferentemente no destructivos.
- Indicar la presencia o ausencia de grupos específicos de contaminantes.

Los biomarcadores se han caracterizado como:

1. *Biomarcadores de exposición.* Estas respuestas biológicas integran las propiedades fisicoquímicas del compuesto tóxico y su toxicocinética en el organismo; esto es, reflejan la naturaleza química del tóxico y su mecanismo de acción (nivel molecular, bioquímico) en relación con su biodisponibilidad. Relativamente en bajas concentraciones de los tóxicos inducen de manera rápida estas respuestas en una relación causa-efecto (Tabla 2). No obstante, en muchas especies se desconocen los niveles base de estas respuestas biológicas y son modificadas por parámetros fisicoquímicos ambientales, así como por aspectos bióticos propios del organismo (estado del ciclo de vida y condición reproductiva).
2. *Biomarcadores de efecto.* Estas respuestas biológicas son generales y dan cuenta de los efectos adversos de los tóxicos a nivel sub-organismo, organismo y supra-organismo. La alteración ocasionada puede ser o no reversible dependiendo de la intensidad y la magnitud de la exposición. Los efectos iniciales ocurren a nivel molecular y bioquímico con la inducción de mecanismos de defensa celular, pero si éstos fallan pueden ocurrir alteraciones histopatológicas, fisiológicas y/o conductuales que pueden repercutir en el desarrollo, crecimiento y reproducción de los organismos (Tabla 2). Ello tiene consecuencia en última instancia en la alteración de la estructura y la función de las poblaciones y las comunidades y, por ende, en el ecosistema. Es de considerar que muchos de estos biomarcadores son inespecíficos a la acción tóxica de contaminantes particulares; esto es, no proveen información de la naturaleza del tóxico ambiental. No obstante, adquieren gran relevancia cuando son evaluados considerando las concentraciones de los contaminantes en el medio externo y los niveles bioacumulados en el organismo. Por otro lado, respuestas integrales como la disfunción reproductiva y bioenergética, aportan información valiosa de los potenciales efectos a largo plazo de las consecuencias biológicas y ecológicas de la exposición crónica a múltiples contaminantes.

3. *Biomarcadores de susceptibilidad.* Son respuestas evaluadas con herramientas genéticas, moleculares, que dan cuenta de las capacidades involucradas en la activación o inactivación de los mecanismos de acción de los tóxicos ambientales. Ejemplos de estos biomarcadores son la evaluación de genes involucrados en la activación metabólica o la desintoxicación de xenobióticos ambientales (enzimas Citocromo P450 1A (CYP1A) monooxigenasa; metalotioneínas) o de genes que controlan la reparación del daño a nivel del DNA o celular. Si bien estos biomarcadores pueden dar cuenta específica de la susceptibilidad de los organismos a contaminantes particulares y aporta información relevante sobre los mecanismos de acción de los tóxicos, su relevancia ecológica es limitada.

Tabla 2
Ejemplos de biomarcadores de exposición y de efecto

Biomarcadores de exposición		
Biomarcador	Acción	Tóxico
Citocromo P450 1A (CYP1A) monooxigenasa	Inducción	HPAs, PCBs
Vitelogenina hepática	Inducción	Estrógenos ambientales
Aductos específicos de DNA	Inducción	HPAs
Metabolitos, compuestos biliares	Presencia	HPAs
Actividad de la enzima Ethoxyresorufin O. deethylase EROD (catalizada por P450 1A)	Inducción	HPAs
Acetil/Butiril colinesterasa, Carboxilesterasa	Inhibición	Plaguicidas organofosforados
Metalotioneínas	Inducción	
Biomarcadores de efecto		
Enzimas en sangre indicadoras de daño hepático (transaminasas hepáticas)		

Daño Oxidativo. Parámetros antioxidantes: Glutación S transferasa; superóxido dismutasa, catalasa, glutación peroxidasa, glutación dismutasa, glutación. Oxidación de lípidos (lipoperoxidación), de proteínas (carbonilación proteicas) y de DNA.
Enzimas participantes en la osmoregulación: Na ⁺ -K ⁺ ATPasa, Anhidrasa Carbónica.
Proteínas de estrés
Liberación de Cortisol
Respuestas fisiológicas (metabolismo energético; crecimiento; reproducción; conducta)
Daños histopatológicos (neoplasias, tumores)

Como se ha señalado, algunos biomarcadores son indicadores de carácter general y sugieren la presencia de una condición de estrés en la población, mientras que otros aportan información específica sobre el mecanismo de acción y el potencial grado de impacto de un contaminante sobre una población. Por otro lado, las respuestas bioquímicas se expresan de manera rápida a la exposición al contaminante mientras que las respuestas a mayores niveles de organización biológica se visualizan a largo plazo. Así, en los estudios ecotoxicológicos se recomienda la selección de una batería adecuada de biomarcadores a diferentes niveles de organización biológica que permitan ofrecer una visión integral de los efectos adversos en el ecosistema.

III. Indicadores de integridad ecológica

La integridad ecológica es por definición el resultado de la estructura y función de un ecosistema. En este sentido, la determinación de indicadores necesariamente se requiere de la cuantificación del número y abundancia de especies que representan la red trófica de un ecosistema. Lo anterior se conoce como estructura en donde la presencia y ausencia de especies que ocupan un lugar en la red trófica es importante. El tipo de especies que están presentes por sus características e interacciones inciden en los procesos fisicoquímicos del metabolismo, es decir, del mantenimiento de ciclos biogeoquímicos esenciales. A partir de que se seleccionan especies indicadoras, se debe determinar la posición que guarda en la red trófica y la función ecológica que representa. En este sentido, se requiere

la evaluación cuantitativa que permita inferir el grado de conservación o alteración de un ecosistema, así como la condición ambiental en la que se encuentra. A lo largo de varios años se han desarrollado índices de medición a partir de la cuantificación de especies bioindicadoras o abundancias relativas de éstas que permite determinar el grado de integridad ecológica.

De la Lanza Espino *et al.*, (2000)¹⁷⁸ resume la lista de índices que se emplean para determinar la condición ambiental de cuerpos de agua. Se emplean con mayor frecuencia macroinvertebrados y vertebrados del grupo de peces (Tabla 3). A partir de estos índices se puede estimar los niveles de calidad de agua, pero desde un punto de vista más de la condición ecológica del cuerpo de agua en tanto considera la presencia y diversidad de especies en sitios con cambios en la calidad del agua.

Tabla 3

Ejemplo de Índices aplicados para determinar la integridad de los ecosistemas, la calidad del agua y la presencia/ausencia de especies bioindicadoras

Índice	Características
Índice de Shannon y Weaver	Expresa la heterogeneidad de una comunidad biológica a partir de la presencia/ausencia de especies.
Índice de Simpson	Muestra la dominancia a partir de la probabilidad de aparición de especies en un muestreo. Al determinar la frecuencia de aparición identifica la diversidad de especies en un sitio.
Índice de Goodnight y Whitley	Se basa en la abundancia relativa de oligoquetos y otros organismos bentónicos.
Índice de Brinkhursts	Este se desarrolló específicamente para tubificidos en enriquecimiento orgánico.

¹⁷⁸ De la Lanza Guadalupe, Organismos indicadores de la calidad del agua y de la contaminación, de la Lanza Espino, Guadalupe, Hernández Pulido, Salvador y Carbajal Pérez, José Luis (comps.), Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, 2000, pp. 15-42.

Histograma de Patrick	Se utiliza como índice de diversidad y biótico. El histograma refleja cinco clases según el número de especies.
Índice de Graham	Se emplea como medición del incremento del deterioro de la calidad del agua a partir de la presencia y ausencia de macroinvertebrados. Los valores van de 1 a 6 donde 1 es la condición óptima para la presencia de invertebrados y el valor 6 como el indicador de mayor perturbación de la calidad el agua.
Marcador Biológico de Chandler	Se emplea el registro de macroinvertebrados a lo largo del año, contrastando zonas contaminadas y no contaminadas.
Índice de Chutter	El índice considera como medida de contaminación la composición de materia orgánica fácilmente oxidable y los subproductos de la descomposición. Se basa en comunidades de animales presentes en agua no contaminadas y el gradiente de cambio de la composición de las comunidades en cuerpos de agua contaminados.
Índice de Hilsenhoff	Establece una escala de 0 a 5 correspondiente al nivel de calidad de agua en donde la composición de especies es jerárquica en relación con la calidad del agua.
Índice Biótico	Permite identificar la proporción de especies de tolerancia en una comunidad de especies.

Por supuesto hasta el momento se han desarrollado los índices asociados a la calidad del agua. Sin embargo, es necesario también incorporar la presencia de especies terrestres asociadas a los ecosistemas acuáticos, ya que para obtener un diagnóstico desde la perspectiva ecohidrológica es necesario abarcar el mayor número de interacciones ecológicas que sean posibles.

IV. Criterios de protección a la biota en los sistemas acuáticos

Las Guías de la Calidad del Agua (WQGs, por sus siglas en inglés) y las Guías de la Calidad Sedimentaria (SQGs, por sus siglas en inglés) para la protección de

la vida acuática se implementaron inicialmente en Norte América, en Estados Unidos y en Canadá. Estas guías se han derivado de diversos parámetros de toxicidad en los que usualmente se establecen un intervalo de dos niveles de “disparo” de los efectos biológicos, uno de concentraciones en las cuales los efectos biológicos raramente ocurren y otro, de concentraciones en las cuales se presenta la probabilidad de que ocurran los efectos biológicos. Así, se establecen los intervalos de parámetros de toxicidad incluyendo ERL-ERM (efectos biológicos de rango bajo – efectos biológicos de rango medio), TEL-PEL (nivel de “disparo” de efectos biológicos – nivel de efectos probables), TEC – PEC (concentración de “disparo” de efectos – concentración de efectos probables) y AET (concentración de “disparo” aparente de efectos), así como la incidencia del efecto adverso biológico relacionado con la exposición en este intervalo de concentraciones.^{179, 180 y 181}

Estas guías son el resultado de estudios de campo, *in situ*, que han demostrado la asociación entre la exposición a diferentes químicos ambientales y los efectos biológicos ocasionados (relaciones causas-efecto) en organismos particulares, así como bioensayos de laboratorio bajo condiciones controladas, lo cual involucra la generación de grandes bases de datos para establecer e integrar criterios de calidad del agua y de los sedimentos para diversas especies acuáticas. Las especies consideradas incluyen grupos taxonómicos diferentes de invertebrados y vertebrados acuáticos, especies estandarizadas incorporadas en las normativas ambientales.

Estas guías de protección a la vida acuática contemplan los niveles de “seguridad” a la exposición a tóxicos individuales de químicos orgánicos e inorgánicos y a los límites máximos establecidos para exposiciones crónicas, de largo plazo, en la biota de ambientes dulceacuícolas y marinos. Algunas de estas guías han sido adoptadas por diversas agencias regulatorias de diferentes países, como herramientas de decisión para identificar sitios prioritarios por la exposición a contaminantes, así como para llevar a cabo acciones de remediación.

¹⁷⁹ CSQC, *Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*, Canadian Council of Ministers of the Environment, CCME EPC-98E, Canadá.

¹⁸⁰ CWQG, *Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*. Canadian Council of Ministers of the Environment, CCME, Canadá.

¹⁸¹ Burton, Allen, “Sediment quality criteria in use around the world”, *Limnology*, 2002, 3, pp. 65-75.

No obstante, estas guías presentan también limitaciones dado que no consideran la variabilidad espacial ni temporal, los efectos de las mezclas de tóxicos ambientales, propios de sitios impactados, o la transferencia de los tóxicos en la trama trófica. De igual manera, los parámetros de toxicidad considerados se han generado para relativamente pocos químicos tóxicos considerando la miríada de tóxicos que son aportados al ambiente. Por otro lado, estas guías han sido generadas para condiciones particulares de ambientes subtropicales, lo cual limita su aplicación en sistemas acuáticos y en especies nativas de países tropicales, como lo es México.

De tal manera, se ha propuesto el manejo precautorio de estas guías de calidad de agua y sedimentaria para la vida acuática y su uso como herramienta inicial (“screening”) para dirigir la evaluación de los efectos adversos de los contaminantes en los sistemas acuáticos. De tal manera, el diagnóstico ambiental por el efecto de contaminantes y sus consecuencias a largo plazo en los ecosistemas acuáticos, debe considerar una aproximación holística, integral, basado en los “pesos de las evidencias” considerando la evaluación de múltiples componentes como la hidrodinámica del sistema, el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos y de los contaminantes, la caracterización de las poblaciones y comunidades, así como pruebas de toxicidad *in situ* en la biota residente y en condiciones controladas de laboratorio, que a su vez aportará información valiosa para la validación de las guías de calidad de agua y calidad sedimentaria para la protección de la vida acuática en sistemas acuáticos. Estos estudios adquieren particular importancia en sistemas acuáticos tropicales de países como México, en los que se requiere generar la información requerida para la protección de la biota y de nuestros ecosistemas acuáticos. Ello permitirá el establecer acciones oportunas de largo alcance por los tomadores de decisiones para la protección, manejo y/o rehabilitación de nuestros sistemas acuáticos.

Cabe mencionar que, en México, la normatividad que integra pruebas de toxicidad como indicador biológico del efecto adverso de contaminantes a la biota acuática es la NOM-001-SEMARNAT-2021,¹⁸² que establece los límites permisibles de

¹⁸² Norma Oficial Mexicana, NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua receptores propiedad de la nación. En esta norma se incluyen los límites permisibles para ocho parámetros fisicoquímicos (temperatura, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno, carbono orgánico total, nitrógeno total, fósforo total, pH y color verdadero), contaminantes biológicos y microbiológicos (huevos de helmintos, *Escherichia coli* y enterococos fecales), compuestos contaminantes orgánicos (grasas y aceites) y químicos inorgánicos (arsénico, cadmio, cianuro, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo y zinc). Cabe destacar que a pesar de la reconocida contaminación de los cuerpos epicontinentales de agua mexicanos (ríos, lagos), no se encuentran incluidos compuestos orgánicos persistentes de reconocida toxicidad como plaguicidas (organoclorados y organofosforados) o productos industriales como los hidrocarburos policíclicos aromáticos, por mencionar algunos.

Por otro lado, y como indicador de la toxicidad biológica de las descargas de aguas residuales, en esta norma se incluye un ensayo de toxicidad aguda que utiliza como organismo de prueba a la bacteria marina *Vibrio fischeri*, bacteria marina luminiscente no patógena con forma bacilar, gram-negativa, anaerobia facultativa y halofílica (tolerante a la salinidad). Estos bioensayos de toxicidad aguda son conocidos y distribuidos comercialmente como prueba de Microtox® y examina la toxicidad aguda de muestras acuosas basándose en la reducción de la bioluminiscencia natural de *Vibrio fischeri* en presencia de contaminantes.

Es de destacar las limitaciones de esta prueba de toxicidad aguda para establecer inferencias del efecto tóxico adverso de contaminantes en los sistemas acuáticos donde la exposición recurrente de la biota a los contaminantes es de carácter crónico, subletal. De tal manera, esta prueba no permite inferir los efectos adversos a largo plazo que experimentan los organismos en escenarios de exposición a mediano y largo plazo; aún más, los resultados que se obtienen posibilitan concluir que las muestras en análisis no representan efecto tóxico adverso para la biota acuática, lo cual limita de manera evidente su relevancia biológica y ecológica.

Como se mencionó en el capítulo 2, las NOM mexicanas enfrentan desafíos para su implementación efectiva. En este escenario es fundamental la generación de

evidencias científicas, robustas, sustentadas en “pesos de evidencias” a través de la implementación de estudios de diagnóstico ambiental integrales que incorporen indicadores biológicos y ecológicos en especies nativas que permitan evidenciar los efectos subletales a mediano y largo plazo de los contaminantes en la biota y en los ecosistemas acuáticos. Esta información permitirá a la vez incidir en la propuesta de modificación de normas ambientales encaminadas a la protección de la vida acuática que apunte las acciones de los tomadores de decisión para la gestión hídrica nacional en términos tanto de prohibición y/o regulación de descargas de contaminantes a los sistemas acuáticos, como de protección, manejo y/o estrategias de rehabilitación ecohidrológica.

Conclusiones

Como se ha revisado en el presente capítulo, no existe índice o metodología única para obtener información de los efectos de la contaminación en organismos, poblaciones, comunidades o ecosistemas. Resulta indispensable la combinación de índices y métodos de medición que permita obtener diagnósticos ambientales que verdaderamente reflejen lo más cercanamente posible el estado de conservación o deterioro. De igual manera, estos métodos deben permitir dar continuidad a través de monitoreos continuos a mediano y largo plazos. Lo recomendable es que al emplear sensores biológicos de donde se obtienen índices de la condición del cuerpo de agua y las pruebas ecotoxicológicas, orienten la toma de decisiones y se lleven a cabo acciones encaminadas a frenar las fuentes de contaminación o la de restaurar ambientes contaminados.

Es igualmente recomendable que se tome en consideración que la obtención de información biológica dependerá de los objetivos y del contexto de cada caso en específico. Los casos de contaminación, aunque parecieran similares o que están involucrados los mismos contaminantes realmente no lo son. Cada caso es particular y los factores y variables tienen orígenes distintos, además, el grado de fragmentación del flujo y oxigenación de agua es uno de los determinantes más importante en el deterioro de la calidad de agua. Si bien, es cierto que existen indicadores contenidos en normas ambientales o instrumentos regulatorios que deben contemplarse en la evaluación de ríos contaminados, esto no debe limitar

el diagnóstico y las medidas que se puedan tomar. Cada vez es más pertinente y urgente que el manejo de los indicadores biológicos sea integral para la evaluación a largo plazo, ya que permiten determinar la funcionabilidad o recuperación de la funcionabilidad de los ecosistemas, así como permiten generar escenarios futuros.

Agradecimientos

Al maestro Sebastián Ricardo Zúñiga Lagunes por su valioso apoyo en la edición y revisión de los capítulos e integración del glosario de la presente obra. A la bióloga Carolina Patiño, por su apoyo en la revisión de literatura y edición de la misma.

Bibliografía

Abbasi, Tabassum y Abbasi, Sayarunami A., *Water Quality Indices*, Elsevier. Amsterdam, The Netherlands, 2012, pp.384.

Adams, Marshall (ed.), *Biological indicators of stress in fish*, American Fisheries Society, Symposium 8, Bethesda, Maryland, 1990, pp.191.

Amiard-Triquet, Claude *et al.*, *Ecological Biomarkers: Indicators of ecotoxicological effects*, CRC Press, 2013, pp.262.

Arellano-Aguilar O., Ortega L., Montero R., “Daños a la salud por efecto de riesgos ambientales: morbilidad y mortalidad en la población mexicana”, en Castro, Juan Manuel *et al.* (coords.), *Salud, Ambiente y Trabajo*, McGraw Hill Education, 2013, pp. 88-107.

Brown, Raymond M. *et al.*, A water quality index—Do we dare? *Water and Sewage Works*, 1970. 117(10), pp. 339-343.

Burton, Allen, “Sediment quality criteria in use around the world”, *Limnology*, 2002, 3, pp. 65-75.

Campbell, P. G., Hodson, P. V., Welbourn, P. M. y Wright, D. A., *Ecotoxicology*, Cambridge University Press, Cambridge, 2022.

Campbell, Peter *et al.*, *Ecotoxicology*, Cambridge University Press, 2020, pp. 592.

CCME, *Water Quality Index user's manual 2017 Update. Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*, Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg, Manitoba, Canadá, 2017, pp.23.

Chaparro-Herrera, Diego *et al.*, “Comprehensive health evaluation of an urban wetland using quality indices and decision trees”, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000, 193, pp. 2915-2926.

Chaparro-Herrera, Diego, Fuentes-García, Ruth, Hernández-Quiroz, Manuel, Valiente-Riveros, Elsa, Hjort-Colunga, Erick, Ponce de Leon-Hill, Claudia, “Comprehensive health evaluation of an urban wetland using quality indices and decision trees Environ Monit Assess, 2021, 193:183. Disponible en: «<https://doi.org/10.1007/s10661-021-08939-w>».

Chemical Abstracts Service. Disponible en: «www.cas.org».

CSQC, *Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*, Canadian Council of Ministers of the Environment, CCME EPC-98E, Canadá. Disponible en: «<https://ccme.ca/en/current-activities/canadian-environmental-quality-guidelines>» [Consultado el 20 de agosto de 2024].

CWQG, *Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*, Canadian Council of Ministers of the Environment, CCME, Canadá. Disponible en: «<https://ccme.ca/en/current-activities/canadian-environmental-quality-guidelines>» [Consultado el 21 de agosto de 2024].

División de American Chemical Society (ACS) que tiene la revista *Chemical Abstracts* y la mayor base de datos publicada sobre sustancias químicas.

DOF (*Diario Oficial de la Federación*), “Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos”, *Diario Oficial de la Federación*, 8 de octubre de 2003, México D.F.

DOF (*Diario Oficial de la Federación*), “Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos”, *Diario Oficial de la Federación*, 8 de octubre de 2003, México D.F.

Horton, Robert K., “An index number system for rating water quality”, *Journal of Water Pollution Control Federation*, 1965, 37, pp. 300-306.

Listado de sustancias que se comercializan en el país. Dato tomado en SEMARNAT (2016a).

Liu, Shushen *et al.*, “Application of the concentration addition model in the assessment of chemical mixture toxicity”, *Acta Chimica Sinica*, 2013, 71 (10), pp. 1335-1340.

Newman M. C. y Unger M. A. (2020), *Fundamentals of Ecotoxicology*, The science of pollution, CRC Press, pp.125. ISBN 13: 978-0-8153-5402-4.

Newman Michel C., *Fundamentals of Ecotoxicology*, The science of pollution, CRC Press, 2019, pp.708.

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación, *Diario Oficial de la Federación*, Ciudad de México, 11 de marzo de 2022, pp.30.

PAOT. Disponible en: «https://paot.org.mx/centro/inesemarnat/informe02/estadisticas_2000/estadisticas_ambientales_2000/03_Dimension_Ambiental/03_02_Agua/III.2.2/RecuadroIII.2.2.2.pdf» [Consultado el 7 de septiembre de 2024].

- PAOT, Índice de Calidad del Agua, «https://paot.org.mx/centro/inesemarnat/informe02/estadisticas_2000/estadisticas_ambientales_2000/03_Dimension_Ambiental/03_02_Agua/III.2.2/RecuadroIII.2.2.2.pdf» [Consultado el 7 de septiembre de 2024].
- Paustenbach D., “A Survey of Health Risk Assessment”, en Paustenbach, D. (ed.), *The Risk Assessment of Environmental and Human Health Hazards, A Textbook of Case Studies*, Wiley Interscience, 1a. ed, New York, 1989, ISBN-13: 978-0-47184998-7, pp.27.
- Paustenbach, D., “A Survey of Health Risk Assessment”, en: Paustenbach, D. (ed), *The Risk Assessment of Environmental and Human Health Hazards, A Textbook of Case Studies*, Wiley Interscience, 1989, pp. 283-301.
- Pesce, Silvia F. y Wunderlin, Daniel A., “Use of water quality indices to verify the impact of Cordoba City (Argentina) on Suquia River”, *Water Research*, 2000, 34, pp. 2915-2926.
- Puente Miranda, Diego G. *et al.*, “Determinación histórica de índices de calidad del agua en observatorios participativos en el norte de México”, *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 2023, 39, pp. 127-137.
- Puente Miranda, G. G., Valenzuela García, L. I. y Alarcón Herrera, M. T., Determinación histórica de índices de calidad del agua en observatorios participativos en el norte de México *Rev. Int. Contam. Ambie.* 2023, 39, pp. 127-137. Disponible en: «<https://doi.org/10.20937/RICA.54697>».
- Qiting Zuo, Q., Han, C., Liu y J., Ma, J., *A new method for water quality assessment: by harmony degree equation* *Environ Monit Assess*, 2018, 190:162. Disponible en: «<https://doi.org/10.1007/s10661-018-6541-6>».
- Ruiz, Ulises, *Guía técnica para orientar la elaboración de estudios de evaluación de riesgo ambiental de sitios contaminados*, SEMARNAT, 2006, pp.314.

SEMARNAT, *Compendio de Estadísticas Ambientales*, edición 2013. Disponible en: «https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2013/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServlet28b9.html» [Consultado el 7 de septiembre de 2024].

SEMARNAT-CONAGUA, Indicadores de la calidad del agua superficial y subterránea, 2024. Disponible en: «https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/925192/Generalidades_Indicadores_de_calidad_del_agua.pdf» [Consultado el 7 de septiembre de 2024].

Suter II, G. W., *Ecological Risk Assessment*, Lewis Publishers, Chelsea, 1993.

Zuo, Qiting *et al.*, “A new method for water quality assessment: by harmony degree equation”, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190: pp. 162-169.

Glosario

Acuífero. *sin.* Sistema hidrogeológico. Formación geológica bajo la superficie terrestre, subterránea, que alberga agua en espacios rocosos o suelos porosos o en los huecos de las formaciones rocosas. Los acuíferos permiten el paso del agua a la superficie terrestre y otras masas de agua superficiales por medio de fisuras y grietas en las rocas.

Advección. Transporte de contaminantes impulsado por el movimiento de masas de aire o agua, como el flujo de un río que transporta contaminantes río abajo.

Aguas subterráneas. Agua que se encuentra bajo la superficie terrestre en acuíferos. Este tipo de agua está expuesta a diferentes formas de contaminación que se filtran desde la superficie, como fertilizantes y productos químicos industriales.

Análisis químico del agua. Conjunto de técnicas utilizadas para identificar y cuantificar los contaminantes en el agua. Incluye la medición de parámetros como el pH, la concentración de metales, compuestos orgánicos e inorgánicos, y otros indicadores.

Analito. El componente o sustancia específico que se desea analizar dentro de una muestra. En este caso, los analitos son los contaminantes presentes en cuerpos de agua.

Aseguramiento de la calidad. Conjunto de procedimientos implementados en un laboratorio para garantizar que los resultados obtenidos son precisos, confiables y cumplen con los estándares establecidos.

Bioacumulación. Proceso por el cual los contaminantes se acumulan en los tejidos de los organismos vivos a lo largo del tiempo, a menudo en concentraciones mayores que en el medio ambiente circundante. Esto puede ocasionar efectos tóxicos a lo largo de la trama trófica.

Biodegradación. Descomposición de contaminantes orgánicos realizada por organismos vivos, como bacterias y hongos, lo que puede reducir la movilidad y persistencia de estos contaminantes en el entorno e incrementar sus efectos tóxicos.

Biogeografía. Disciplina científica que estudia la distribución de los seres vivos sobre la tierra, así como los procesos que la han originado, que la modifican y que pueden contribuir a su desarrollo.

Bioindicador. Especies o comunidades de organismos cuya presencia, ausencia o estado de salud indica la calidad ambiental de un ecosistema. En los sistemas acuáticos, ejemplos comunes incluyen diversas especies de fitoplancton, macrofitas e invertebrados acuáticos como poliquetos, insectos, moluscos y crustáceos.

Biomonitor: Organismo o conjunto de organismos utilizados para evaluar la calidad ambiental a mediano y largo plazo, de un ecosistema, a través del monitoreo de respuestas biológicas y ecológicas. Los biomonitores reflejan los efectos directos y acumulativos de la acción de contaminantes y otros estresores ambientales en un ecosistema.

Biota. Conjunto de organismos vivos que habitan un entorno determinado, como un cuerpo de agua. La biota es una matriz ambiental receptora de contaminantes, importante de ser analizada en los sistemas acuáticos.

Blanco reactivo. Muestra de referencia sin analito que se utiliza en el análisis para medir el nivel de interferencias o ruido de fondo.

Calidad de agua. Medida de la adecuación del agua basada en parámetros físicos, químicos y biológicos para un uso determinado como el consumo.

Calidad del agua. Características físicas, químicas y biológicas del agua que determinan su idoneidad para un uso específico, como el consumo humano, la agricultura, la recreación o la integridad estructural y funcional de los ecosistemas acuáticos. A nivel ambiental, un agua de buena calidad no contiene contaminantes en niveles que representen un riesgo para la salud humana o para la función del ecosistema acuático.

Caudal ecológico. Flujo de agua que corre en un río que tiene una capacidad de transporte de agua con un máximo correspondiente a su sección llena sin que se produzca desbordamiento en sus márgenes; en época de estiaje es alimentado exclusivamente por aguas subterráneas o manantiales.

Ciclo de vida de los contaminantes. Proceso que describe la trayectoria de los contaminantes desde su introducción en el ambiente hasta su eventual degradación, transformación o bioacumulación. Involucra la dispersión, persistencia y los impactos que pueden tener en los organismos y los ecosistemas.

Ciclo hidrosocial. El ciclo tradicional del agua (evaporación, condensación, precipitación y filtración) no es suficiente para explicar el desarrollo y comportamiento del recurso hídrico en la actualidad. El ciclo hidrosocial integra el papel del ser humano como actor principal en cuanto a la disponibilidad, cantidad y calidad del agua a nivel global.

Ciclo sociohídrico. Interacciones entre los procesos sociales y las condiciones socioambientales de un territorio, las cuales dan lugar a formas de interactuar en la gestión, administración o aprovechamiento de las fuentes de agua.

Contaminante. Sustancia o agente presente en el medio ambiente que, en concentraciones suficientes, puede ocasionar efectos nocivos en la biota, los ecosistemas o en la salud humana. En el contexto del agua, puede incluir metales pesados, compuestos orgánicos, nutrientes en exceso o microorganismos patógenos.

Contaminantes emergentes. Sustancias químicas, como fármacos, hormonas y microplásticos, que no están reguladas, pero se encuentran en el ambiente en concentraciones que pueden tener efectos adversos en los ecosistemas y la salud humana. Contaminantes que han sido detectados recientemente gracias a la aplicación de nuevas tecnologías analíticas.

Control de calidad en análisis químicos. Procedimientos aplicados durante el análisis por ejemplo del agua, para asegurar que los resultados sean precisos y reproducibles. Incluye el uso de estándares de referencia, calibración de equipos y la verificación de resultados mediante controles internos y externos.

Criterios de decisión. Factores y parámetros que se deben establecer en la planeación, como la cantidad mínima de muestras y repeticiones, y el margen de error aceptable.

Cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). Técnica analítica utilizada para separar, identificar y cuantificar compuestos en una mezcla, permitiendo la detección de contaminantes a concentraciones extremadamente bajas en el agua.

Cuenca. Territorio geográfico en el cual las aguas superficiales y subterráneas fluyen a través de una secuencia de cuerpos de agua (arroyos, ríos, lagos y aguas subterráneas) al mar o bien fluyen a otro cuerpo de agua reservorio como lago o desierto. Las cuencas en su conjunto (hidrológica e hidrográfica) deben ser consideradas en la implementación de un programa de monitoreo.

Cuenca hidrológica. Territorio continental drenado por un único sistema de drenaje natural superficial, donde sus aguas se vierten al mar a través de ríos.

Una cuenca hidrográfica integra las aguas subterráneas de este territorio continental.

Cuerpos de agua continentales. Ríos, lagos, acuíferos y otros sistemas acuáticos que contienen agua no salina y son receptores de numerosos contaminantes.

Curva de calibración. Gráfica que relaciona la concentración del analito con la respuesta del equipo de medición, utilizada para determinar la concentración en muestras desconocidas.

Descomposición química. Transformación de los contaminantes mediante reacciones químicas, que pueden alterar sus propiedades y su movilidad en el ambiente. La luz solar y las reacciones en el agua o suelo son ejemplos de descomposición química .

Desviación estándar relativa (DSR). Medida de la variabilidad en los resultados de un análisis, expresada como porcentaje en función de la media.

Difusión. Proceso de transporte en el que los contaminantes se desplazan desde áreas de alta concentración hacia áreas de baja concentración, ya sea en aire, agua o suelo.

Dilución. Proceso mediante el cual la concentración de un contaminante se reduce al mezclarse con grandes volúmenes de aire, agua o suelo, disminuyendo su impacto local.

Dispersión de contaminantes. Proceso por el cual un contaminante se mueve y se extiende a través de un cuerpo de agua, influyendo en su distribución y concentración. Factores como la corriente, la temperatura y la densidad del agua afectan este movimiento.

ECCC (Environment and Climate Change Canada). Agencia Federal de Canadá responsable de la regulación ambiental y cambio climático, que establece métodos de análisis y límites permisibles para la calidad del agua, aire y suelo.

Ecohidrología. Ciencia que estudia la interacción entre el ciclo hidrológico y los ecosistemas.

Ecosistemas acuáticos. Comunidades biológicas que habitan en ambientes de agua dulce o salada, como ríos, lagos y mares, y que son altamente sensibles a los cambios en la calidad del agua debido a la contaminación.

EPA (Environmental Protection Agency). Agencia de protección ambiental de Estados Unidos, responsable de regular y hacer cumplir las leyes ambientales, y establecer métodos estandarizados de análisis y niveles permisibles de contaminantes.

Equilibrio ecológico. Estado de balance y estabilidad que se alcanza en un ecosistema cuando las interacciones entre sus componentes (organismos, entorno físico y los recursos disponibles) se mantienen de manera dinámica y donde las poblaciones, los flujos de energía y los ciclos de nutrientes se encuentran sujetas a cambios graduales permitiendo la sostenibilidad del ecosistema.

Erosión. Desgaste y transporte de suelos y rocas por el paso de corrientes de agua, movimiento de glaciares, vientos y olas.

Escorrentía. Flujo de agua sobre la superficie del suelo que puede transportar contaminantes hacia cuerpos de agua como ríos, lagos o el mar.

Especiación alopatrica. Especiación causada por la presencia de barreras físicas o de aislamiento que favorece la evolución de nuevas especies.

Especificidad. Máximo nivel de selectividad que puede alcanzar un método, permitiendo identificar un analito sin interferencias de otras sustancias.

Espectrofotómetro. Instrumento que mide la intensidad de la luz adsorbida en una parte específica del espectro electromagnético, utilizado para determinar la concentración de sustancias disueltas en el agua.

Espectrometría de masas. Técnica analítica avanzada utilizada para identificar y cuantificar la composición de diferentes elementos y compuestos químicos en una muestra con gran precisión, como contaminantes en el agua en concentraciones muy bajas.

Eutrofización. Proceso de enriquecimiento de nutrientes en un cuerpo de agua, (especialmente compuestos de nitrógeno y fósforo) que lleva al crecimiento excesivo de algas y a la disminución del oxígeno disuelto, afectando la biodiversidad y la salud del ecosistema.

Exactitud. Proximidad de los resultados obtenidos al valor real o verdadero de la medición. Se expresa en términos de porcentaje de recuperación.

Evaluación. Involucra la determinación de fuentes, magnitud, confiabilidad y calidad de los recursos hídricos y de las actividades humanas para su uso, control, regulación y manejo.

Factores de ponderación: En un Índice de Calidad del Agua (ICA), son valores asignados a cada parámetro de calidad del agua para reflejar su importancia relativa en la evaluación de la calidad global del agua.

Fracking (fracturación hidráulica). Técnica utilizada para extraer gas natural y petróleo de formaciones subterráneas de rocas como el esquisto o pizarra. Consiste en inyectar una mezcla de agua, arena y productos químicos a alta presión en la roca para fracturarla y liberar los hidrocarburos atrapados. Esta técnica ha permitido acceder a reservas de petróleo y gas que anteriormente no eran económicamente viables, pero ha generado controversia debido a sus potenciales impactos ambientales como la contaminación de acuíferos, el uso intensivo de agua y la inducción de sismos en algunas áreas.

Fuente difusa de contaminación. Aportes no puntuales de contaminantes que provienen de múltiples fuentes y se dispersan por el ambiente, como los fertilizantes agrícolas o la escorrentía urbana, cuyas fuentes son difíciles de identificar y controlar de manera individual.

Fuente puntual de contaminación. Origen específico y localizado de contaminantes, como una fábrica o una planta de tratamiento de aguas residuales, que descarga contaminantes directamente en un cuerpo de agua.

Geohidrología. *sin.* Hidrogeología. Rama de la geología aplicada, dentro de la geodinámica externa, que estudia las aguas subterráneas en lo relacionado con su origen, su circulación, sus condicionamientos geológicos, su interacción con los suelos, rocas y humedales; su estado y propiedades y su captación.

Geomorfología. Rama de la geografía y de la geología que tiene como objetivo el estudio de las formas de la superficie terrestre enfocado en describirlas, entender su génesis y su actual comportamiento.

Ictiofauna. Grupo taxonómico de los peces. Conjunto de especies de peces que existen en una determinada región biogeográfica.

Índice biótico. Sistema que clasifica la calidad de un ecosistema basado en la diversidad de especies presentes, especialmente bioindicadoras. Se utiliza para evaluar la salud de un sistema acuático, por ejemplo.

Índice de Calidad del Agua (ICA). Sistema que clasifica la calidad del agua utilizando diferentes parámetros fisicoquímicos y biológicos. El ICA transforma los datos obtenidos de estos parámetros en un valor único para representar la calidad global del agua.

Índice de Horton. Primer índice moderno de calidad del agua, desarrollado en 1965. Utiliza mediciones de parámetros fisicoquímicos para determinar la calidad del agua, con énfasis en la idoneidad del agua para diferentes usos.

Integridad eco-hidrológica. Hace referencia al estado de salud y la funcionalidad de un ecosistema acuático y su cuenca asociada, en relación con la cantidad y calidad del agua que fluye a través de ésta. Implica además la interacción equilibrada entre los diferentes componentes ecológicos (biota) y los componentes hidrológicos (como los flujos de agua y niveles de humedad).

Intemperismo. Denominada también meteorización. Descomposición de minerales y rocas que ocurre sobre o cerca de la superficie terrestre cuando estos materiales entran en contacto con la atmósfera, hidrosfera y la biosfera.

Interferencias. Componentes de la matriz que pueden dificultar o alterar la detección del analito, afectando los resultados del análisis.

Laboratorio acreditado. Entidad evaluada y certificada por un organismo independiente que garantiza que cumple con normas de calidad y competencia técnica, como la norma ISO/IEC 17025.

Lagos. Cuerpo de agua continental, cerrados o de baja circulación donde el aporte del agua proviene de ríos, arroyos, aguas freáticas y precipitación. En estos sistemas los contaminantes pueden acumularse y persistir durante más tiempo que en cuerpos de agua con flujo, lo que puede afectar la biodiversidad, la calidad del agua y la dinámica trófica del sistema.

Límite de detección (LD). La concentración más baja de un analito que puede ser detectada de manera confiable, distinguiéndose del ruido de fondo.

Límites permisibles de contaminantes. Valores máximos permitidos de sustancias contaminantes en un medio (agua, aire, suelo), según lo establecido por normas y regulaciones para proteger la salud y los ecosistemas.

Limnología. Ciencia que estudia los lagos y embalses a cielo abierto, en particular los fenómenos hidrológicos en relación con el ambiente.

Linealidad. Relación directa entre la señal de un equipo de medición y la concentración del analito, representada por una curva de calibración.

Material de referencia. Sustancia o material estandarizado con una composición conocida que se utiliza para verificar la exactitud y precisión de un método analítico.

Matriz de análisis. Medio en el cual se encuentran los analitos a estudiar. Las matrices en los cuerpos de agua incluyen al agua misma, a los sedimentos, a las partículas suspendidas y a la biota que habita estos sistemas.

Medios de transporte. Los diferentes entornos a través de los cuales los contaminantes se movilizan; incluyen el aire, el agua, el suelo y la biota.

Micro-cuenca endorreica. Perteneciente a una zona de drenaje en una cuenca que no tiene salida al mar. El aporte de agua en una cuenca endorreica permanece allí, abandonando el sistema únicamente por infiltración o evaporación, lo cual contribuye a la concentración de sales.

Microplásticos. Pequeñas partículas plásticas (<5 mm) que se encuentran en cuerpos de agua como resultado de la degradación de productos plásticos. Son considerados contaminantes emergentes debido a sus efectos nocivos en el medio ambiente.

Monitoreo. Proceso sistemático de muestreo de matrices ambientales encaminados a la colección de datos en escalas espacio-temporales.

Monitoreo ecotoxicológico. Evaluación del efecto de contaminantes sobre organismos vivos evaluando su impacto adverso o riesgo potencial en diferentes niveles de organización biológica (desde el nivel molecular bioquímico, el fisiológico, poblaciones, comunidad y ecosistemas) a través de bioensayos controlados de laboratorio, pruebas en campo o estudios *in situ*. Los efectos ocasionados a nivel del individuo (alteración de la reproducción, crecimiento y reproducción) tienen consecuencias en la dinámica de las poblaciones, las comunidades y el ecosistema.

Morfogénesis. Proceso biológico que lleva a que un organismo desarrolle su forma. Es una de las tres ramas de estudio centrales de la Biología del Desarrollo, junto al Crecimiento celular y la Diferenciación celular.

Movilidad de contaminantes. Capacidad de un contaminante para desplazarse a través del ambiente, influenciada por sus propiedades químicas y físicas, así como por el medio en el que se encuentra.

Movimiento monzónico. Cambio estacional de la dirección del viento, desde el mar a la tierra o desde la tierra al mar, asociado con modificaciones extensas de la temperatura y la lluvia en regiones subtropicales.

Muestreo de agua. Proceso de recolección de muestras de agua para su análisis físico, químico y biológico, con el fin de caracterizar su composición, evaluar la presencia de contaminantes y determinar la calidad del agua.

NMX (Norma Mexicana): Documento técnico voluntario que establece especificaciones, directrices o métodos para productos, servicios o procesos, con el fin de garantizar calidad y seguridad, siendo opcional su cumplimiento.

NOM (Norma Oficial Mexicana). Regulación técnica obligatoria en México emitida por el gobierno, que establece criterios, procedimientos, especificaciones y límites permisibles de contaminantes en el agua, aire, suelo, entre otros.

Normas internacionales de calidad del agua. Estándares globales desarrollados por organismos internacionales, como la Organización Mundial de la Salud (OMS), que establecen criterios para la protección de la calidad del agua y la salud pública a nivel mundial.

Normas mexicanas de calidad del agua. Reglas y criterios establecidos por el gobierno mexicano para garantizar que el agua sea segura para su uso. Estas normas definen los límites máximos permisibles de contaminantes en agua destinada a diferentes usos, como consumo humano, riego o industrial.

Orografía. Parte de la geografía física que se encarga del estudio, descripción y representación del relieve terrestre.

Parámetros biológicos. Indicadores de la calidad del agua basados en la presencia de organismos vivos patógenos, como bacterias coliformes fecales o invertebrados acuáticos (huevos de helmintos), que reflejan el impacto de la contaminación microbiológica o biológica en los ecosistemas.

Parámetros fisicoquímicos. Indicadores de la calidad del agua que miden las características físicas y químicas, como el pH, la conductividad eléctrica, el oxígeno disuelto, la demanda bioquímica de oxígeno y la presencia de metales pesados, entre otros.

Percolación. Movimiento descendente de los contaminantes a través del suelo por acción de la gravedad, especialmente en presencia de agua subterránea o lluvias intensas.

Persistencia. Capacidad de un contaminante para permanecer en el ambiente durante largos periodos sin degradarse, lo que puede aumentar su potencial para ocasionar daño a los ecosistemas.

Placa tectónica. Gran sección de la litosfera terrestre que se desplaza sobre la astenosfera, una capa más blanda del manto terrestre. La teoría de la tectónica de placas explica cómo estas placas interactúan entre sí, lo que da lugar a fenómenos geológicos como terremotos, volcanes, montañas y la formación de océanos.

Pluviómetro. Instrumento para medir la altura de agua de precipitación en un punto.

Precisión. Grado en el que los resultados de un análisis coinciden cuando se repiten varias veces en condiciones similares. Se mide mediante la desviación estándar relativa (DSR).

Preparación de la muestra. Conjunto de procesos químicos necesarios para extraer el analito de la matriz que lo contiene antes de su análisis. La preparación varía según la complejidad de la matriz, siendo más complicada en matrices complejas.

Proceso químico. Serie de reacciones o tratamientos que se aplican durante la preparación de la muestra para separar o identificar los analitos dentro de una matriz.

Región biogeográfica. Áreas extensas de la superficie terrestre, delimitadas fundamentalmente a partir de la vegetación natural, que comparten características ecológicas distintivas.

Región neártica. El Neártico o Neoártico es una de las ocho ecozonas terrestres que dividen la superficie de la Tierra. La ecozona del Neártico cubre la mayoría de Norteamérica, incluyendo Groenlandia y las montañas de México.

Región neotropical. La Región fitogeográfica Neotropical es uno de los 7 grandes fitoterritorios globales, llamados también reinos fitogeográficos, imperios florales, o regiones fitogeográficas en que se divide a la tierra por presentar una vegetación en común, según la clasificación de Engler más aceptada, adaptada por Mattick. Por otro lado, México meridional, la Florida meridional, América Central y las islas del Caribe son parte de la ecozona Neotropical, junto con Sudamérica.

Repetibilidad. Grado de coincidencia de los resultados obtenidos al repetir una medición en un mismo instrumento y bajo las mismas condiciones a corto plazo.

Reproducibilidad. Grado en el que los resultados coinciden cuando se repiten en diferentes laboratorios, con variaciones en equipos, operadores y condiciones ambientales.

Restauración ecológica. Proceso para la recuperación y rehabilitación de los ecosistemas que han sido degradados, dañados o destruidos, llevando el ecosistema degradado hacia algún punto de referencia que represente una condición previa a la perturbación, sea esta natural o semi-natural, buscando restaurar la funcionalidad, la biodiversidad y la estructura de estos ecosistemas, permitiendo que vuelvan a operar de manera similar, teniendo en cuenta su propia capacidad de estabilización y autorregulación a corto, mediano y largo plazo.

Ríos. Corriente de agua de grandes dimensiones que drena una cuenca de forma natural. Estos cuerpos de agua pueden transportar y dispersar contami-

nantes desde su origen hasta su desembocadura, influyendo en la calidad del agua a lo largo de su curso.

Rocas ígneas. Denominadas también magmáticas son aquellas que se forman cuando el magma se enfría y se solidifica. Si el enfriamiento se produce lentamente bajo la superficie se forman rocas con cristales grandes denominadas rocas plutónicas o intrusivas, mientras que si el enfriamiento se produce rápidamente sobre la superficie, por ejemplo, tras una erupción volcánica, se forman rocas con cristales indistinguibles a simple vista conocidas como rocas volcánicas, efusivas o extrusivas.

Rocas sedimentarias. Son aquellas que se forman por la acumulación de partículas de diversos tamaños transportadas por el agua, el hielo o el viento y que son sometidos a procesos físicos y químicos, dando lugar a materiales consolidados. Pueden formarse a las orillas de los ríos, en el fondo de barrancos, valles, lagos, mares y en las desembocaduras de los ríos. Se hallan dispuestas formando capas o estratos.

Saneamiento. Recogida y transporte del agua residual y el tratamiento tanto de ésta como los subproductos generados en el curso de esas actividades, de manera que su evacuación produzca el mínimo de impacto en el medio ambiente

Secuenciación genética. Pruebas para caracterizar información particular del ADN. En estudios de la calidad del agua, permite identificar ADN ambiental (eDNA) en cuerpos acuáticos para detectar la biodiversidad y la presencia de organismos patógenos o contaminantes biológicos. Es una herramienta avanzada en el monitoreo de la calidad del agua.

Selectividad. Capacidad de un método para distinguir un analito específico entre otros componentes presentes en la muestra.

Sensibilidad. Capacidad de un método de detectar pequeños cambios en la concentración del analito, reflejada en la pendiente de la curva de calibración.

Sesgo. Error sistemático en los datos o resultados, que puede ocurrir debido a una mala planificación o ejecución del análisis.

Sistema fluvial. Un río y sus afluentes forman un sistema fluvial. También denominado cuenca hidrográfica de un río e incluye el río, todos sus afluentes y cualquier cuerpo de agua subterránea en el área.

Sostenibilidad. Disciplina emergente de investigación que estudia interacciones entre sistemas naturales y sociales, así como los mecanismos que inciden en satisfacción de necesidades de generaciones presentes y futuras, la reducción de la pobreza y la conservación de los sistemas de soporte de la vida en la tierra.

Tectonismo. Conjunto de movimientos que producen la transformación interna que experimenta la corteza terrestre por medio del acomodamiento de las capas tectónicas que la forman.

Transporte en sedimentos. Proceso por el cual los contaminantes se adhieren a partículas de sedimento y se trasladan con éstos en cuerpos de agua.

Validación del método. Proceso mediante el cual se verifica que un método de análisis es adecuado para su propósito y genera resultados precisos, confiables y reproducibles.

Vegetación riparia. Los hábitats vegetales y comunidades que se desarrollan a lo largo de las márgenes y orillas del río, y se caracteriza por la presencia de plantas hidrófitas.

Conclusiones

El problema de contaminación de los ríos en México es un tema multifactorial que en los últimos años ha adquirido mayor relevancia debido a los niveles críticos que han alcanzado los contaminantes y el impacto directo que han tenido. Esto se ve agravado debido al alto costo, tanto económico como en recurso, que requiere una adecuada gestión, así como intervención en los diferentes cuerpos de agua.

Históricamente, en México las políticas y acciones se han centrado en el saneamiento básico y la recuperación parcial de la calidad del agua bajo parámetros normativos mínimos, sin considerar la complejidad ecológica y la dinámica integral de los sistemas fluviales. Esta visión fragmentada ha limitado la eficacia de las intervenciones, permitiendo que los procesos de deterioro ecohidrológico continúen agravándose.

Esta guía ha documentado los elementos clave para entender y enfrentar la contaminación de los cuerpos de agua superficiales del país, subrayando que cualquier acción efectiva debe partir del reconocimiento de los ríos como sistemas ecológicos complejos e interdependientes, y no meramente como infraestructuras para el abastecimiento o desecho.

Este texto ofrece diferentes alternativas en cada una de las etapas que implica una intervención a un río. Ofrece algunos de los elementos mínimos que requiere el

establecimiento del estado base, ya sea a través del registro (por ejemplo, paleozoogeográfico y de paleosuelos) o mediante métodos de inferencia basados en datos (por ejemplo, geohidrológicos). Esto como una manera de poder establecer cuál debería ser la meta en caso de querer realizar una restauración integral del ecosistema.

En cuanto al estudio del río se estableció que, para conocer cuáles son los parámetros que permitan conocer el estado de salud del cuerpo de agua, se puede utilizar la perspectiva de la calidad del agua, pues el concepto de disponibilidad, el cual era utilizado desde décadas pasadas ya no es suficiente para poder hacer una adecuada gestión del recurso hídrico. En este sentido, se hizo hincapié en los parámetros fisicoquímicos y biológicos que deben servir como estándar para poder determinar el estado de un río.

En la presente guía se enfatizó la necesidad de incluir parámetros biológicos, como lo son los bioindicadores, así como pruebas ecotoxicológicas. Lo anterior debido a que la nueva cantidad de contaminantes que hay, así como otros materiales emergentes como los microplásticos, de los cuales aún no se conoce su impacto directo en la salud humana, están teniendo afectaciones sobre otro tipo de organismos, ya sea a través de la generación de espacios inhabitables o a través de la bioacumulación de estos productos y su integración en las cadenas tróficas.

Se reconoce que no existe una metodología única ni universal para evaluar los impactos de la contaminación, por lo que promueve el uso combinado y contextualizado de diferentes índices y métodos de diagnóstico que permitan reflejar fielmente el estado real de conservación o deterioro de los sistemas fluviales. Esta flexibilidad es vital para atender la heterogeneidad ambiental y socioeconómica de las cuencas mexicanas, así como la diversidad de contaminantes involucrados y las distintas dinámicas ecológicas.

El manejo integral de indicadores biológicos a mediano y largo plazo es clave para detectar tendencias, evaluar la efectividad de las acciones de mitigación y restauración, y generar escenarios futuros que orienten la planificación ambiental sostenible. Asimismo, se resalta que la calidad del agua y la salud de los ecosistemas

fluviales están indisolublemente vinculadas a procesos sociales, económicos y culturales, por lo que la gestión debe incluir estrategias participativas que fomenten la corresponsabilidad y el compromiso de todos los sectores involucrados.

Asimismo, se señala que el marco normativo nacional e internacional que regula la calidad del agua constituye un pilar fundamental para la práctica analítica y la evaluación ambiental, estableciendo criterios técnicos, legales y operativos que guían la protección de los recursos hídricos. No obstante, la aplicación efectiva de estas normativas requiere complementarse con un enfoque integral, basado en evidencia científica.

En ese sentido, esta publicación es un claro ejemplo de que, ante problemáticas complejas, es necesario acudir a los diferentes tipos de conocimiento, como lo es el técnico y científico. De esta manera es como se puede llegar a la toma de decisiones justas y mejor fundamentadas no solo desde lo legal, sino desde el estudio de los hechos en un contexto integral, conociendo no solo las afectaciones que se están causando por fenómenos puntuales como descargas de residuos, sino entender los impactos que pueden tener en el futuro a nivel de salud humana o medioambiental.

Esta guía es el reflejo del esfuerzo por parte de personas expertas en el tema para buscar integrar el mejor conocimiento disponible al servicio de las personas tomadoras de decisiones, particularmente de aquellos que se encargan de resolver asuntos jurídicos, así como una forma de defensa de su derecho a un medio ambiente sano para aquellos defensores ambientales que se encuentran impulsando un caso en la vía legal.

*Subdirección General de
Conocimiento Científico para los Derechos Humanos*

La formación editorial de esta obra fue elaborada por la Dirección General de la Coordinación de Compilación y Sistematización de Tesis. Se utilizaron tipos ITC Berkeley de 10 y 11 puntos, Futura 12, 13 y 19 puntos. Febrero de 2026.

