

Bioindicadores de los sistemas acuáticos mexiquenses

Por Patricia; Boris Miguel Balderas Hernández; López Rebollar (Coords)

CANTIDAD DE PALABRAS 16139

HORA DE ENTREGA

10-DIC-2025 10:22A. M.

NÚMERO DE
IDENTIFICACIÓN DEL
TRABAJO

119407106



**COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA** PUBLICACIONES
ARBITRADAS

Plantilla para integrar el libro

TÍTULO:

BIOINDICADORES DE LOS SISTEMAS ACUÁTICOS MEXIQUENSES

COORDINADORES

Patricia Balderas Hernández

Boris Miguel López Rebollar

AUTORES

Ana Elisa Alcántara Valladolid

Moisés Tejocote Pérez

Tonantzín Díaz Alvarado

Índice

1. Los sistemas acuáticos	7
1.1 Concepto y clasificación de los sistemas acuáticos	10
1.2 Importancia de los sistemas acuáticos	10
1.3 Distribución y extensión de los sistemas acuáticos en México	11
1.4 Normatividad mexicana para el control de descargas y calidad de agua.....	12
1.5 Descripción de los principales sistemas acuáticos en el Estado de México	13
2. Diversidad biológica en los sistemas acuáticos.....	23
3. Amenazas actuales de los sistemas acuáticos mexiquenses.....	24
3.1 Principales fuentes de contaminación química y orgánica	24
3.2 Riesgos toxicológicos y bioacumulación en organismos acuáticos.....	25
3.3 Limitaciones y desafíos de los sistemas de tratamiento de aguas.....	25
4. Bioindicadores de los sistemas acuáticos	26
4.1 Definición y criterios de selección de bioindicadores	26
4.2 Clasificación de bioindicadores	26
4.2.1 Fauna.....	27
4.2.2 Vegetación.....	31
4.2.3 Microbiota.....	34
4.3 Caso de aplicación de bioindicadores y calidad de agua en México	34
5. Tolerancia y mecanismos de adaptación en especies bioindicadoras	35

5.1 Condiciones ambientales toleradas por las especies bioindicadoras	35
5.2 Mecanismos fisiológicos y celulares de tolerancia.....	42
6. Estudios de caso en el Estado de México	43
6.1 Manejo y conservación de humedales en Estado de México.....	44
6.2 Monitoreo de Ambystoma spp. como indicadores de salud ecosistémica	44
6.3 Defensa de los derechos ambientales y participación ciudadana.....	47
6.4 Acciones de protección para los bioindicadores en Estado de México	47
7. Análisis de la calidad del agua y uso de bioindicadores en los sistemas acuáticos mexiquenses.....	49
7.1 Panorama actual de la calidad del agua	49
7.2 Evaluaciones ecológicas y biológicas	50
7.3 Casos representativos en el Estado de México	51
7.4 Mecanismos biológicos de tolerancia y adaptación	51
8. Perspectivas y desafíos	51
9. Conclusiones.....	56
10. Referencias	58

Sobre los autores

Bioindicadores de los sistemas acuáticos mexiquenses

Resumen

En esta obra, se comparte conocimiento científico a todos los públicos, estudiantes, investigadores, autoridades ambientales y ciudadanos interesados en comprender y proteger los sistemas acuáticos del Estado de México. Se analiza una visión integral de los sistemas acuáticos mexiquenses, las amenazas que enfrentan y el papel fundamental de los bioindicadores como herramientas para su evaluación y conservación. La diversidad de ríos, lagos, presas y humedales, representa un escenario único para enfrentar presiones ambientales como la contaminación, perturbación y reducción de cuerpos de agua. Se describe el papel importante que juegan las especies bioindicadoras como *Ambystoma granulosum*, macroinvertebrados acuáticos, algas, hongos, bacterias y plantas como *Salvinia mínima* y *Salix babylonica*, quienes muestran la calidad del agua y los efectos del impacto humano. Se analizan metodologías, políticas y estrategias de gestión ambiental enfocadas al control y preservación de los sistemas acuáticos de la entidad.

Palabras clave: Bioindicadores, sistemas acuáticos, mexiquense.

Presentación

El objetivo de la obra es analizar el estado actual de los sistemas acuáticos del Estado de México y su relación con las especies de organismos bioindicadoras de contaminación y perturbación que aún existen en dichas áreas, con la intención de aplicar y mejorar estrategias de protección y manejo sustentable que permitan garantizar su calidad y diversidad de especies. Este análisis se hace mediante la presentación de datos y resultados de investigaciones y evaluaciones ambientales que se han realizado por la comunidad científica de la entidad y por dependencias oficiales a nivel estatal y federal. Esta obra invita a reflexionar sobre nuestra relación con el agua y la vida que habita en ella. Entender a los bioindicadores es también aprender a escuchar al ambiente, reconocer sus señales y actuar antes de que el daño sea irreversible.

Prólogo

El agua ha sido, desde siempre, la base de la vida. En ella surgieron los primeros organismos, y de ella depende el equilibrio de todos los ecosistemas del planeta. Sin embargo, en las últimas décadas, la actividad humana ha transformado drásticamente los paisajes acuáticos: los ríos se han convertido en receptores de descargas industriales, los lagos se llenan de sedimentos y los humedales desaparecen bajo el avance urbano. En medio de estos cambios, los organismos que habitan estos ambientes se han convertido en los mejores testigos de lo que ocurre.

Hablar de bioindicadores es hablar del lenguaje de la naturaleza. Son las señales que nos envían los seres vivos para advertirnos que algo está cambiando en su entorno. Cuando una rana deja de cantar, un alga cambia de color o una planta acuática se marchita antes de tiempo, no solo es un fenómeno biológico, es un mensaje sobre la salud del ecosistema que compartimos.

El Estado de México, con su diversidad de ríos, lagos, presas y humedales, representa un escenario único para observar cómo la vida responde a las presiones ambientales. En estos cuerpos de agua, especies como *Ambystoma granulosum*, los macroinvertebrados acuáticos o las plantas como *Salvinia minima* y *Salix babylonica*, nos muestran, a través de su presencia o ausencia, la calidad del agua y los efectos del impacto humano. Su estudio no solo tiene un valor científico, sino también ético y cultural; nos recuerda que el bienestar humano depende directamente de la salud del ambiente.

Este libro nace con la intención de acercar el conocimiento científico a todos los públicos, estudiantes, investigadores, autoridades ambientales y, sobre todo, ciudadanos interesados en comprender y proteger los sistemas acuáticos de su entorno. A través de su temática, el lector encontrará una visión integral de los sistemas acuáticos mexiquenses, las amenazas que enfrentan y el papel fundamental de los bioindicadores como herramientas para su evaluación y conservación.

Más allá de los datos y las metodologías, esta obra invita a reflexionar sobre nuestra relación con el agua y la vida que habita en ella. Entender a los bioindicadores es también aprender a escuchar al ambiente, reconocer sus señales y actuar antes de que el daño sea irreversible.

Proteger nuestros ríos, lagos y humedales no es solo una tarea técnica, es un acto de responsabilidad con el futuro. Si los bioindicadores hablaran, este libro busca ayudarnos a comprender su mensaje.

Introducción

Los sistemas acuáticos representan una de las bases más importantes para el equilibrio ecológico y el sostenimiento de la vida en el planeta. Estos ecosistemas, ya sean de aguas dulces, salobres o marinas, conforman redes biológicas complejas donde interactúan factores físicos, químicos y biológicos que determinan su estructura y funcionamiento (SEMARNAT, 2008). Su importancia radica no solo en su papel ecológico, sino también en los servicios ambientales que proveen, como la regulación del clima, la purificación del agua y el mantenimiento de la biodiversidad (Newton et al., 2023; Matt y Whiles, 2010).

En México, los sistemas acuáticos abarcan una amplia diversidad de ambientes que incluyen ríos, lagos, humedales y acuíferos subterráneos. El país cuenta con 37 regiones hidrológicas que concentran la mayor parte del agua superficial nacional, entre ellas las cuencas del Bravo, Lerma, Balsas y Grijalva-Usumacinta, que sustentan tanto la biodiversidad como la economía agrícola e industrial (SEMARNAT, 2015). Sin embargo, estos ecosistemas enfrentan un deterioro progresivo debido a la contaminación, la sobreexplotación de recursos hídricos y los efectos del cambio climático, que han reducido significativamente la extensión y calidad del agua disponible (FAO, 2022; SADER, 2022).

El Estado de México constituye un ejemplo emblemático de la vulnerabilidad hídrica del país. En esta entidad, los ecosistemas lénticos y lóticos se encuentran sometidos a presiones antrópicas crecientes, reflejadas en altos niveles de demanda química y bioquímica de oxígeno, coliformes fecales y sólidos suspendidos (CONAGUA, 2024). La degradación de ríos y presas (como el Río Lerma, la Presa Madín y la Laguna de Zumpango) ha desencadenado procesos de eutrofización, pérdida de hábitats y disminución de especies acuáticas nativas (López-López et al., 2023; Sosa Rodríguez et al., 2022).

Ante este panorama, el uso de bioindicadores surge como una herramienta científica esencial para evaluar la salud de los ecosistemas acuáticos. Los bioindicadores son organismos sensibles a cambios ambientales que permiten identificar la presencia de contaminantes, el grado de eutrofización y el impacto de las actividades humanas en el medio acuático (Castán-Aquino et al., 2020; Tejocote-Pérez et al., 2021). Entre ellos destacan los anfibios del género *Ambystoma*, las diatomeas, los macroinvertebrados bentónicos y las plantas acuáticas como *Salvinia mínima* y *Salix babylonica*, cuyas respuestas fisiológicas y ecológicas proporcionan información valiosa sobre la calidad del agua y los procesos de resiliencia ambiental (Heredia-Bobadilla y Sunny, 2021; Gómez-Hernández et al., 2023).

En el contexto mexiquense, el estudio de bioindicadores permite no solo el monitoreo biológico de la contaminación, sino también la implementación de estrategias de conservación y restauración ecológica. Específicamente, especies como *Ambystoma granulosum* se proponen como modelos pioneros de evaluación ambiental debido a su sensibilidad ante variaciones fisicoquímicas y su valor como patrimonio biológico endémico (Aguilar-Miguel et al., 2009; Ávila Akerberg et al., 2020).

Así, este libro busca integrar el conocimiento científico y normativo sobre los sistemas acuáticos mexiquenses, sus amenazas actuales y la aplicación de bioindicadores en la gestión ambiental. A través de un enfoque interdisciplinario, se pretende fortalecer la comprensión de los procesos ecológicos y promover acciones sustentables que garanticen la conservación del agua y la biodiversidad en el Estado de México

Los sistemas acuáticos

1.1 Concepto y clasificación de los sistemas acuáticos

Un sistema acuático es una comunidad biológica que se desarrolla en ambientes dominados por el agua (dulce, salobre o salada) y que incluye sus componentes físicos, químicos y biológicos y las interacciones entre ellos. Los sistemas acuáticos, se pueden clasificar por su tipo de ambiente como en aguas quietas denominados lénticos (lagos, lagunas, embalses y presas), y de aguas corrientes llamados lóticos (ríos y arroyos); a estos se suman los humedales (zonas saturadas temporal o permanentemente) y los sistemas marinos y estuarinos (SEMARNAT, 2008).

1.2 Importancia de los sistemas acuáticos

Los sistemas acuáticos son esenciales para la vida en el planeta. En ellos habita una gran diversidad de organismos y ocurren procesos ecológicos que mantienen el equilibrio natural. Además, brindan servicios indispensables, como el suministro de agua, la regulación del clima y la purificación del ambiente (Newton et al., 2023).

Los ecosistemas acuáticos albergan una diversidad biológica excepcional. En ellos habita una gran proporción de las especies conocidas de plantas, animales y microorganismos, muchos de ellos endémicos o con funciones ecológicas críticas. Estos ecosistemas desempeñan un papel clave en los ciclos biogeoquímicos del carbono, nitrógeno y fósforo, al facilitar el intercambio de gases, la transformación de nutrientes y la descomposición de materia orgánica. A través de procesos como la fotosíntesis acuática y la sedimentación, contribuyen al almacenamiento de carbono y a la regulación natural del clima (Matt y Whiles, 2010).

Además de su valor ecológico, los sistemas acuáticos proporcionan servicios esenciales para la humanidad. Los ríos, lagos, humedales y acuíferos son fuentes directas de agua para consumo, riego y uso industrial, además de sustentar la pesca y la acuicultura, actividades fundamentales para la seguridad alimentaria global. Estos ecosistemas también regulan procesos naturales como las inundaciones, la erosión y la recarga de acuíferos, y contribuyen a mantener la calidad del agua mediante la filtración y depuración natural. En regiones urbanas, los cuerpos de agua y sus zonas ribereñas actúan como amortiguadores frente a los efectos del cambio climático, moderando temperaturas locales y favoreciendo la infiltración (Newton et al., 2023).

En el plano cultural, los sistemas acuáticos son espacios de recreación, contemplación y espiritualidad. Lagunas, ríos y manantiales han sido centros de asentamiento, inspiración y sustento

cultural a lo largo de la historia humana. Su conservación asegura no sólo el bienestar material, sino también la continuidad de la identidad y del patrimonio natural de las comunidades (Ferreira et al., 2023).

1.3 Distribución y extensión de los sistemas acuáticos en México

En México existen 37 regiones hidrológicas, que se delimitan a partir de los grandes parteaguas del país, es decir, las divisiones naturales donde el agua de lluvia toma diferentes caminos hacia los ríos y mares, esto se puede observar en la figura 1. Cada región agrupa una o más cuencas hidrográficas, que funcionan como sistemas interconectados de ríos, lagos y acuíferos. La Región Bravo–Conchos, ubicada en el norte del país, es la más extensa, mientras que la del Río Huicicila, en el occidente, es la más pequeña. Las diferencias en clima también son notables: la Costa de Chiapas es la zona más lluviosa con más de dos metros de precipitación al año, mientras que el Centro Este de Baja California apenas recibe 100 milímetros (SEMARNAT, 2015).

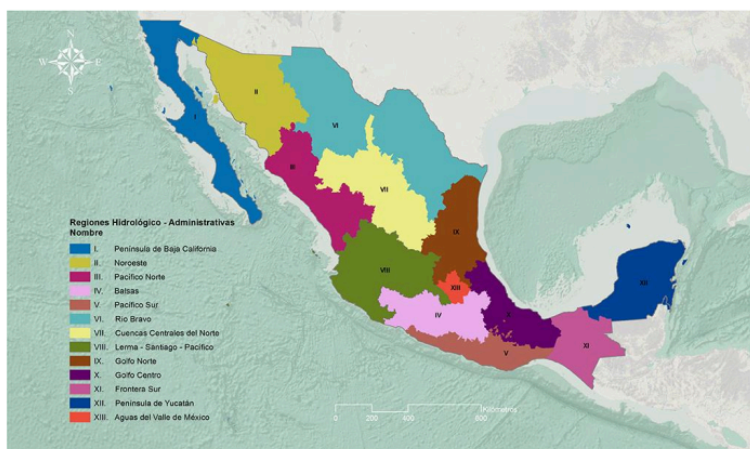


Figura 1. Regiones hidrológicas administrativas en México (SEMARNAT, 2015).

En la figura 2 se muestran los principales ríos de México, los cuales cubren cerca del 65% del territorio nacional y concentran la mayor parte del agua superficial del país. Entre los más importantes se encuentran el Bravo, Grijalva-Usumacinta, Lerma, Balsas, Papaloapan y Coatzacoalcos. El Lago de Chapala destaca como el cuerpo lacustre más grande, seguido por el Lago de Cuitzeo, ambos esenciales para la biodiversidad y el abastecimiento de agua en sus regiones (SEMARNAT, 2015).



Figura 2. Principales ríos y lagos de México (SEMARNAT, 2015).

Además de los sistemas superficiales, México cuenta con una amplia red de acuíferos subterráneos, en total 653, que representan una fuente vital de agua para la población y la agricultura. Sin embargo, muchos enfrentan problemas de sobreexplotación: en 2014, más de cien acuíferos ya estaban en esta condición, principalmente en las regiones del Lerma-Santiago-Pacífico, Cuencas Centrales del Norte y Río Bravo. En contraste, las regiones de la Frontera Sur y la Península de Yucatán aún conservan una buena disponibilidad de agua subterránea (SEMARNAT, 2015).

De acuerdo con los datos reportados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, México cuenta con una superficie total de sistemas de agua de 196,437.50 hectáreas. Para el 2022 se extrajo 89.81 km³, donde se tomó 53.94 km³ de aguas superficiales y 35.86 km³ de aguas subterráneas. Del total de la extracción se usó 68.52 km³ para el sector agrícola, 7.95 km³ para el sector industrial y 13.33 km³ para el sector municipal (FAO, 2022).

1.4 Normatividad mexicana para el control de descargas y calidad de agua

En México existen procedimientos para determinar la calidad de agua basándose en la normatividad mexicana como son: pH (NMX-AA-008-SCFI-2016), conductividad eléctrica (NMX-AA-093-SCFI-2001), acidez y alcalinidad (NMX-AA-036-2001), dureza total (NMX-AA-072-SCFI-2001), nitratos (NO₃⁻) (NMX-AA-079-SCFI-2001), sólidos disueltos totales (SDT), sólidos suspendidos totales (SST), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) (NMX-AA-028-SCFI-2001), Nitrógeno total (N_{tot}) (NMX-AA-026-SCFI-2010), Demanda Química de Oxígeno (DQO) (NMX-AA-030/1-SCFI-2012), turbidez (NMX-AA-038-SCFI-2001), color, oxígeno disuelto, entre otros. En la figura

3, se muestra el resumen de los procedimientos generales que la normatividad mexicana aplica a sistemas acuáticos.

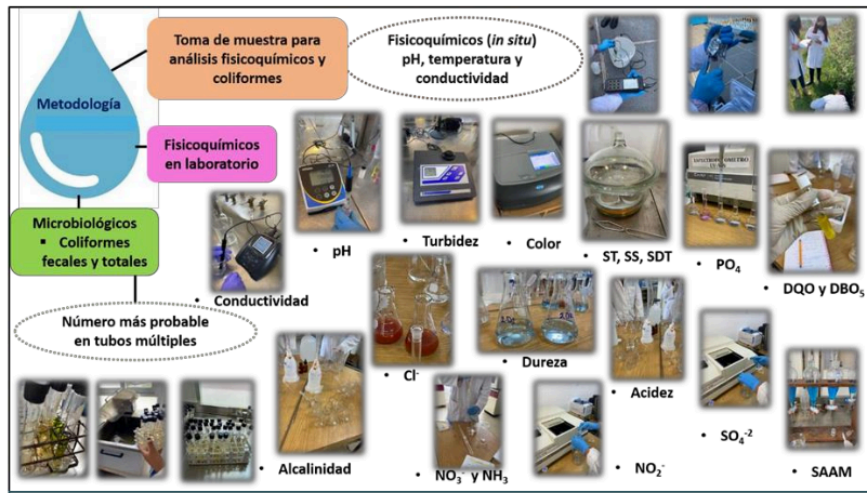


Figura 3. Metodología apegada a la normatividad para determinar parámetros fisicoquímicos y microbiológicos (Elaboración propia).

Con este tipo de evaluaciones, se obtienen valores que permiten visualizar si los sistemas acuáticos cumplen con los límites máximos permisibles de los parámetros fisicoquímicos conforme a la regulación vigente, así como por procedencia del agua, forma de captación y almacenamiento temporal en la entidad (Montoya et al., 2023).

La NOM-001-SEMARNAT-2021 se aplica en el Estado de México para fijar límites de contaminantes en descargas a cuerpos receptores, mientras que la NOM-002-SEMARNAT-1996 regula descargas a alcantarillado, su aplicación es clave para reducir presiones sobre comunidades bioindicadoras (SEMARNAT, 2021).

1.5 Descripción de los principales sistemas acuáticos en el Estado de México

En el Estado de México, predominan ecosistemas acuáticos de agua dulce, como ríos, lagos y humedales, que son importantes para la biodiversidad local y el abastecimiento hídrico, pero están sujetos a sobreexplotación y contaminación, requiriendo acciones de conservación. Para ello la Gerencia de Calidad de Agua de la CONAGUA ha utilizado herramientas cuantitativas, como lo son los indicadores de calidad de agua para determinar el estado de este recurso en distintos puntos de

cuerpos de agua, los cuales se clasifican en lóticos, lénticos, costeros o subterráneos (CONAGUA, 2025). Dichos indicadores se muestran en la tabla 1, donde se ve indicador, criterio y su descripción.

Tabla 1. Indicadores de calidad de agua superficial (CONAGUA, 2025).

Indicador	Criterio	Descripción
Toxicidad		
No tóxico	menor a 1	Agua no contaminada. Toxicidad no detectable.
Toxicidad baja	mayor o igual a 1 y menor o igual a 1.33	Toxicidad baja.
Toxicidad moderada	mayor de 1.33 y menor a 5	Toxicidad moderada.
Toxicidad alta	mayor o igual a 5	Toxicidad alta.
Sólidos Suspendidos Totales		
Excelente	menor o igual a 25	Clase de excepción, muy buena calidad.
Buena calidad	mayor de 25 y menor o igual a 75	Aguas superficiales con bajo contenido de sólidos suspendidos, generalmente condiciones naturales. Favorece la conservación de comunidades acuáticas y el riego agrícola irrestricto.
Aceptable	mayor de 75 y menor o igual a 150	Aguas superficiales con indicio de contaminación. Con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente. Condición regular para peces. Riego agrícola restringido.
Contaminada	mayor de 150 y menor o igual a 400	Aguas superficiales de mala calidad con descargas de aguas residuales crudas. Agua con alto contenido de material suspendido.
Fuertemente contaminada	mayor de 400	Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales con alta carga contaminante. Mala condición para peces.

Escherichia coli

Excelente	1 menor o igual a 126	Agua no contaminada o condición normal. No hay evidencia de alteración en los valores de la calidad bacteriológica para el cuerpo de agua superficial.
Buena calidad	mayor de 126 y menor o igual a 576	Aguas superficiales con calidad satisfactoria para la vida acuática y para uso recreativo con contacto primario, así como para otros usos. Indicios de alteración de la calidad bacteriológica.
Aceptable	mayor de 576 y menor o igual a 850	Aguas superficiales con calidad admisible como fuente de abastecimiento de agua potable y para riego agrícola. Muestra bajos niveles de alteración como resultado de la actividad humana.
Contaminada	mayor de 850 y menor o igual a 1000	Aguas superficiales con contaminación bacteriológica. Indica alteración substancial con respecto a la condición normal.
Fuertemente contaminada	mayor de 1000	Aguas superficiales con fuerte contaminación bacteriológica. Alteración severa.

Demanda Química de Oxígeno

Excelente	menor o igual a 10	Agua no contaminada.
Buena calidad	mayor de 10 y menor o igual a 20	Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable.
Aceptable	mayor de 20 y menor o igual a 40	Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente.
Contaminada	mayor de 40 y menor o igual a 1 200	Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal.

Fuertemente contaminada	mayor de 200	3 Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales.
7 Demanda Bioquímica de Oxígeno		
Excelente	menor o igual a 3	Agua no contaminada.
Buena calidad	mayor de 3 y menor o igual a 6	Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable.
Aceptable	mayor de 6 y menor o igual a 30	Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente.
Contaminada	mayor de 30 y menor o igual a 120	Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal.
Fuertemente contaminada	mayor de 120	Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales.
Coliformes Fecales		
Excelente	menor o igual a 100	Agua no contaminada o condición normal. No hay evidencia de alteración en los valores de la calidad bacteriológica para el cuerpo de agua superficial.
Buena calidad	mayor de 100 y menor o igual a 200	1 Aguas superficiales con calidad satisfactoria para la vida acuática y para uso recreativo con contacto primario, así como para otros usos. Indicios de alteración de la calidad bacteriológica.
Aceptable	mayor de 200 y menor o igual a 1000	1 Aguas superficiales con calidad admisible como fuente de abastecimiento de agua potable y para riego agrícola. Muestra bajos niveles de alteración como resultado de la actividad humana.

Contaminada	mayor de 1000 y menor o igual a 10000	Aguas superficiales con contaminación bacteriológica. Indica alteración substancial con respecto a la condición normal.
Fuertemente contaminada	mayor de 10000	Aguas superficiales con fuerte contaminación bacteriológica. Alteración severa.

De acuerdo con reportes de indicadores de calidad de agua de CONAGUA para el año 2024, que llevo 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. Para indicadores de agua superficiales en Estado de México se midieron 6 parámetros: Demanda bioquímica de oxígeno a cinco días, demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos totales, coliformes fecales, *Escherichia coli* y Toxicidad aguda. Los resultados de los indicadores de calidad de agua en cuencas superficiales del Estado de México se muestran en la Tabla 2, donde la Presa del Valle de Bravo, Presa de Villa Victoria y Planta Potabilizadora lo Berros, pertenecen al organismo de cuenca de Balsas, Tanque Pericos y Cruz de Misión al organismo de cuenca de Lerma Santiago Pacífico y los demás al organismo de cuenca de Aguas del Valle de México. Para la Presa de Valle de Bravo y Presa de Villa Victoria son cuentas tipo léntico y los demás son tipo lótico (CONAGUA, 2025).

Tabla 2. Calidad de agua de cuencas superficiales del Estado de México (CONAGUA, 2024).

Sitio	Municipio	Cuenca	COLI_FE		E_COLI		TOX	Semáforo	Contaminantes
			DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	C (NMP 100mL)			
Presa Valle de Bravo	Valle de Bravo	Río Cutzamala	35.4	73.155	20	13687,244	---	Rojo	DBO, DQO, CF,
Presa Villa Victoria	Villa Victoria	Río Cutzamala	11.4	27.13	12	4 7500	---	---	CF,
Toma Cero la Mina	Huixquilucan	Ciudad de México	2.55	5.765	6	---	---	Verde	---
Tanque Pericos	San Pablo Autopan	Río Lerma 1	4.5	7.68	8	---	---	Verde	---
Cruz de la Misión	Xonacatlán	Río Cutzamala	3.6	7.87	6	---	---	Verde	---
Planta Potabilizadora los Berros	Villa de Allende	Río Cutzamala	10.2	19.1	13	14822,839 7	---	Amarillo	CF
Puente Xochiaca Río de la Compañía	Nezahualcóyotl	Texcoco	286.5	624.95	170	1	---	Rojo	DBO, DQO, SST
Los Reyes Lechería San Juan Teotihuacan	Tezoyuca	Texcoco	212.1	337.3	84	1	---	Rojo	DBO, DQO
San Juan Ixhuatepec Río de los Remedios	Tequixquiac	Río Salado	436.8	890.85	246	1	---	Rojo	DBO, DQO, SST
Presa Guadalupe Río Cuautitlán	Cuautitlán Izcalli	Río Cuautitlán	54.5	86.7	16	1	---	Rojo	DBO, DQO
Presa Concepción Río Tepotzotlán	Tepotzotlán	Río Cuautitlán	55.2	83.54	22	1	---	Rojo	DBO, DQO

San Lorenzo (Hidrométrica)	Cuautitlán Izcalli	Río Cuautitlán	30.95	78.355	29	1	---	---	Rojo	DBO,DQO
Portal de Salida Emisor del Puente	Cuautitlán Izcalli	Río Cuautitlán	214.05	415.54	63	1	---	---	Rojo	DBO,DQO
Km 27+500 Gran Canal	Tecámac	Ciudad de México	179.4	429.84	54	1	2419600	---	Rojo	DBO,DQO,E_CO LI
Canal de Santo Tomas	Coyotepec	Río Cuautitlán	378.45	645.215	75	1	---	---	Rojo	DBO,DQO
Entrada Lago de Texcoco	Nezahualcóyotl	Ciudad de México	467.1	730.44	55	1	---	---	Rojo	DBO,DQO,
Puente de Vigas Río de los Remedios	Tlalnepantla de Baz	Ciudad de México	271.2	421.3	94	1	---	---	Rojo	DBO,DQO,
San Lucas (Puente de Chalco)	Chalco	Río de la Compañía	202.05	388.105	88	1	---	---	Rojo	DBO,DQO,
Propuesta 9, Río Salado antes Grupo	Apaxco	Río Salado	61.8	268.45	760	---	>2419600	---	Rojo	DBO,DQO,E_CO LI,SST,
Apaxco										
Propuesta 6, Río Salado adelante libramiento	Tequixquiac	Río Salado	65.4	224.856	420	---	>2419600	42.2 53	Rojo	DBO,DQO,TOX_ V,E_COLI,SST,
Tequixquiac										
Propuesta 4 Aguas arriba de la propuesta	Tequixquiac	Río Salado	62.7	252.389	366.667	---	>2419600	52.0 56	1 Rojo	DBO,DQO,TOX V,E COLISST,
6 salida Gran Canal Pte. San José										

Propuesta 5 Salida a 200 m Aguas Abajo Av. Emiliano Zapata	Tequixquiac	Río Salado	63.9	284.511	270	---	>2419600	4.62 9	Rojo	DBO,DQO,E_CO LI,SST,
Propuesta 8, Río Salado Aguas Abajo Derivación	Apaxco	Río Salado	54.3	231.739	440	---	>2419600	---	Rojo	DBO,DQO,E_CO LI,SST,
Propuesta 6, Río Rosas	Agua Fria	Presa Endhó	4.6	26.2	<16	---	15000	---	Amarillo	E_COLI,
Hidrométrica Túnel Viejo	Tequixquiac	Río Salado	189.6	497.895	136	---	>2419600	6.67 2	Rojo	DBO,DQO,TOX_ V,E_COLI,
Gran Canal	Zumpango	Ciudad de México	195.6	495.6	170	---	>2419600	18.4 4	Rojo	DBO,DQO,TOX_ V,E_COLI,SST,
Túnel de interconexión Tacubaya - Tecamachalco	Naucalpan de Juárez	Ciudad de México	---	247.7	---	---	---	---	Rojo	DQO,
Tecamachalco	Naucalpan de Juárez	Ciudad de México	---	278.4	---	---	---	---	Rojo	DQO,
Mezcla (Puente)	Naucalpan de Juárez	Ciudad de México	---	274	---	---	---	---	Rojo	DQO,
Interconexión Tacubaya-Río San Joaquín	Naucalpan de Juárez	Ciudad de México	---	287.2	---	---	---	---	Rojo	DQO,
Confluencia Gran Canal y túnel viejo	Tequixquiac	Río Salado	185.4	511.661	284.615	---	>2419600	8.17 1	Rojo	DBO,DQO,TOX_ V,E_COLI,SST,

Propuesta túnel nuevo	Zumpango	Ciudad de México	8.46	<10	7.5	---	9110	<1	Amarillo	E_ COLI,
Propuesta Río de las Arenillas (Colector)	Zumpango	Ciudad de México	177	516.25	123.81	---	>2419600	21.7	Rojo	DBO,DQO,TOX_V,E_ COLI,
Clariant Productos Químicos, S.A. DE C.V. (Aguas arriba)	Ecatepec de Morelos	Ciudad de México	82.5	263.861	113.636	---	37400	---	Rojo	DBO,DQO,E_CO LI,

3 DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días, DQO: Demanda Química de Oxígeno, SST: Sólidos Suspendedos Totales, CF: Coliformes fecales, E_ COLI: *Escherichia coli* y TOX: Toxicidad aguda.

La evaluación de la calidad del agua también se realiza mediante un sistema de semaforización, el cual permite clasificar las condiciones del recurso hídrico en un punto de monitoreo determinado, con base en los intervalos de concentración establecidos para cada parámetro indicador. Este sistema utiliza una escala cromática que refleja el grado de cumplimiento de los parámetros: verde, que corresponde a una calidad óptima; amarillo, que indica una calidad intermedia; y rojo, que representa una calidad deficiente.

En el caso de las aguas superficiales, el color rojo se asigna cuando ³ uno o más de los parámetros demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno o toxicidad exceden los valores permisibles. Si estos parámetros se encuentran dentro de los límites, pero alguno de los siguientes: sólidos suspendidos totales, coliformes fecales y/o *Escherichia coli* presenta incumplimiento, el semáforo se clasifica como amarillo. Finalmente, el color verde se otorga cuando todos los parámetros cumplen con los criterios de calidad establecidos. En la figura 4 se muestra mediante un sistema de semaforización la calidad de agua del 2024 del Estado de México (CONAGUA, 2024), estos sistemas acuáticos enfrentan múltiples amenazas derivadas también de la presión antrópica y de las condiciones climáticas actuales

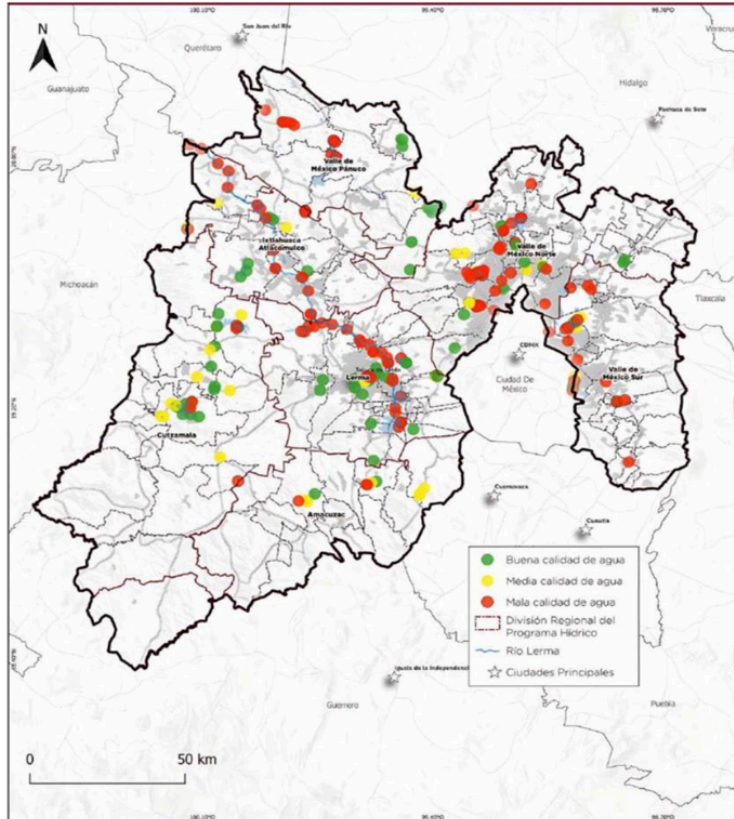


Figura 4. Semáforo de calidad del agua y riesgo por contaminación en cuerpos superficiales del Estado de México (CONAGUA, 2024).

2. Diversidad biológica en los sistemas acuáticos

La diversidad biológica de los sistemas acuáticos del Estado de México se estudia analizando cómo interactúan los organismos con su entorno. Para entender estas relaciones, primero se consideran las necesidades de espacio de la fauna, los tipos de hábitat disponibles y el papel que cumplen las especies dentro del ecosistema. También se observa la vegetación presente y cómo los sistemas acuáticos se conectan con otros ambientes cercanos como bosques de pino-encino, pastizales y zonas agrícolas.

A nivel de comunidad, se evalúa qué especies están presentes, cómo se organizan, cuáles dominan y qué tan diversa es la comunidad usando índices como el de Shannon. Además, se estudian las cadenas

y redes de energía para comprender cómo circula la materia y la energía en el ecosistema (Krebs, 2010). Para obtener esta información, se realizan recorridos de campo en ríos, cuerpos de agua, bosques y cultivos, lo que permite delimitar zonas y diseñar muestreos más representativos (Alcántara, 2024).

El análisis de las interacciones biológicas incluye aspectos poblacionales como la proporción entre machos y hembras, la tasa de nacimientos y muertes, la densidad de organismos, su dieta, sus estrategias de reproducción, así como su distribución y abundancia (Alcántara et al., 2024). En ríos, arroyos, presas y bordos también se consideran el volumen y el tamaño del cuerpo de agua, ya que estos datos ayudan a conocer su estado hidrológico y la vegetación acuática presente. Asimismo, se toman en cuenta factores ambientales como la temperatura, el viento, la presión atmosférica, la humedad y la precipitación, que influyen directamente en el funcionamiento del sistema (Montoya et al., 2023).

Para comprender el suelo asociado a estos sistemas, los estudios edafogénicos y edafológicos analizan las propiedades físicas del suelo en diferentes profundidades. Finalmente, el componente geológico y del relieve incluye la descripción del material parental y de las formas del terreno, lo cual permite entender el origen, la evolución y la diversidad de los ambientes acuáticos (Montoya et al., 2023).

El Estado de México cuenta con una gran variedad de sistemas acuáticos como ríos, humedales, ciénegas y lagos de alta montaña en el Nevado de Toluca. Estos lugares son hogar de una gran diversidad de organismos, tales como algas microscópicas (diatomeas), plantas acuáticas, insectos, crustáceos, moluscos, anfibios y peces. Se han registrado alrededor de 25 especies de peces, sin embargo, varias de estas se encuentran en riesgo por los cambios en el ambiente y la contaminación (CONABIO, 2011).

3. Amenazas actuales de los sistemas acuáticos mexiquenses

Los sistemas acuáticos del Estado de México pueden verse seriamente afectados cuando la contaminación altera las condiciones físicas o químicas del agua. Cuando alguno de estos parámetros sobrepasa los límites permisibles, se generan ambientes tóxicos que ponen en riesgo la biodiversidad.

Evaluar el nivel de toxicidad es fundamental, ya que permite identificar cómo estos cambios impactan a las especies acuáticas. Este análisis ayuda a entender el daño biológico que pueden sufrir los organismos a lo largo del tiempo, afectando procesos celulares, bioquímicos, fisiológicos, genéticos e incluso su desarrollo.

3.1 Principales fuentes de contaminación química y orgánica

La elevada industrialización en el Estado de México ha generado un incremento en la concentración de contaminantes químicos en los cuerpos de agua del Valle de Toluca, entre los cuales encontramos a los contaminantes orgánicos y derivados de hidrocarburos, solventes, colorantes, bases para pinturas, fármacos y plaguicidas. De igual forma los metales, sales inorgánicas, derivados de nitrógeno, fósforo, azufre y halógenos (De Oca-Jiménez et al., 2022).

3.2 Riesgos toxicológicos y bioacumulación en organismos acuáticos

En México se ha perdido cerca del 80% de los humedales y en el Estado de México la reducción ha sido de casi 20 mil hectáreas (Guerrero y Martínez, 2024). Los ríos, presas y lagunas de la región enfrentan problemas como contaminación por nutrientes, metales y químicos, además de la sobreexplotación urbana e industrial del agua. Esto ha provocado pérdida de hábitats y biodiversidad, así como riesgos para la salud humana por la proliferación de cianobacterias y otros contaminantes (Rueda, 2022).

Las Ciénegas del Lerma, refugio de flora y fauna, hoy en día presenta altos niveles de contaminación, así como un exceso anormal de nutrientes (López-López et al., 2023). Estos signos de eutrofización también están acompañados de una reducción en el oxígeno disuelto y de la proliferación de especies invasoras, afectando también la disponibilidad del recurso. Situaciones similares se observan en la presa Madín, el Lago de Zumpango y la Laguna La Piedad, donde el crecimiento urbano intensifica el deterioro (Sosa Rodríguez et al., 2022). En el río Lerma se han detectado contaminantes como plomo en suelos y agua, vinculados a la actividad industrial y ganadera, lo que refleja un fuerte impacto ambiental (De Oca-Jiménez et al., 2022).

3.3 Limitaciones y desafíos de los sistemas de tratamiento de aguas

Se ha reportado que para el tratamiento de aguas residuales se han aplicado tecnologías que incorporan a los sistemas acuáticos del valle de Toluca, tales como la oxidación de materia orgánica por consorcios de lodos activados en sistemas de reactores y lagunas de oxidación. De manera general, los lodos activos que se aplican para el tratamiento del agua contaminada de dichos sistemas están constituidos por bacterias, hongos, protozoarios y microorganismos filamentosos de tipo organográfico oxigénico en reactores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor) que, a pesar de ser tecnologías con una alta eficiencia, no han disminuido la contaminación del agua, al contrario, de 2010 a la fecha, existen registros donde la tendencia de la contaminación ha incrementado (Rueda, 2022). Esto se debe en mayor parte a la sensibilidad de los lodos activos frente a los contaminantes; es decir, el efecto tóxico de los contaminantes actuales en el Valle de Toluca, han inhibido la

capacidad oxidativa de los microorganismos y con ello, la disminución de la eficiencia de dicha tecnología (López-López et al., 2023).

4. Bioindicadores de los sistemas acuáticos

4.1 Definición y criterios de selección de bioindicadores

Los bioindicadores son organismos que proporcionan información sobre el estado de salud ambiental y calidad con la que interactúan en su ecosistema y hábitat (Castán-Aquino et al., 2020).

4.2 Clasificación de bioindicadores

Los bioindicadores se clasifican en dos niveles: el básico funcional y el organísmico. El nivel básico funcional de un bioindicador es un proceso fisiológico o bioquímico que ocurre al interior de una célula, tejido, órgano o sistema, por ejemplo, la fotosíntesis, glucólisis, respiración celular, división celular y síntesis de proteínas. Por otro lado, el nivel organísmico de un bioindicador es un individuo como tal que pertenece a una especie y se distribuye en un hábitat dentro de un ecosistema, con variables medibles como la tasa de reproducción, su distribución, alimentación, crecimiento, conducta, entre otros, todos ellos como parámetros de importancia biológica (Tejocote-Pérez et al., 2021).

Por lo tanto, cuando existen problemas de contaminación, los procesos celulares e individuos de una especie, entran en estrés, riesgo e intoxicación, es decir, su sobrevivencia y reproducción se afecta y pueden sufrir daño fisiológico, mutar, enfermarse, morir y llegar a nivel extinción. En este sentido, los organismos cuentan con mecanismos de defensa que les permiten tolerar el nivel de intoxicación, sobrevivir y heredar la resistencia a sus descendientes, sin embargo, la respuesta de defensa no es rápida, no todas las especies la tienen, se convierten en sensibles o vulnerables y finalmente terminan muriendo, poniendo en riesgo su población y especie (Heredia-Bobadilla y Sunny, 2021).

La principal ventaja que tienen los organismos ante esta problemática ambiental es la respuesta a la tolerancia a bajas dosis y a largo plazo, que cuando ocurre, los daños de la contaminación se ven reflejados en algún parámetro fisiológico u organísmico, haciendo resaltar una característica visible, estructural o funcional que nos permite identificar y cuantificar el daño por un agente tóxico, de tal manera que, nos da a conocer la existencia y el nivel de contaminantes en su hábitat o ecosistema (Heredia-Bobadilla y Sunny; 2021 Tejocote-Pérez et al., 2021).

También se ha registrado que plantas nativas ofrecen ventajas significativas en la fitorremediación *in situ*, ya que han evolucionado para sobrevivir y prosperar en las condiciones locales, lo que les

permite presentar una mejor adaptación al estrés ambiental en comparación con las especies no nativas (Wong-Argüelles et al., 2021).

4.2.1 Fauna

En Tompkins, Nueva York, EE. UU, utilizaron microsatélites para estimar la estructura de la población de salamandra manchada (*Ambystoma maculatum*), la cual se puede ver en la figura 5 y la dispersión entre 29 agregaciones de reproducción y los patrones de conectividad de la población que abarca 1272 km² para taxones con diferentes ecologías e historias de vida (Zamudio y Wiecezorek, 2007).



Figura 5. *Ambystoma maculatum* (IUCN, 2020).

En Colombia, los principales modelos vertebrados utilizados en biología del desarrollo y regeneración de tejidos incluyen embriones de pollo, ratón blanco y pez cebra. Aunque varios anfibios se utilizan con frecuencia como modelos de vertebrados para estudiar el desarrollo y la regeneración de tejidos, sólo algunas investigaciones electrofisiológicas reportan el uso de anfibios, tales como *Xenopus laevis*, lo podemos observar en la figura 6. Aunque los estudios representativos en esta área se han llevado a cabo en Colombia, existe una clara necesidad de seguir ampliando los conocimientos en esta disciplina. Por lo tanto, el uso de animales como modelo de implementación en la investigación de regeneración de tejidos y estadios de desarrollo es una tarea continua para la biología (Hincapié et al., 2021).



Figura 6. *Xenopus laevis* (Collins, 2014).

4.2.1.1 Especies del género *Ambystoma*

El género *Ambystoma* comprende 32 especies desde el sur de Canadá hasta el centro de México, siendo nuestro país el que alberga hasta 17 especies endémicas identificadas, es decir el 60%. El ajolote fue considerado como un organismo modelo desde hace más de 100 años y actualmente es uno de los más estudiados en el área de la biología del desarrollo debido a la notable regeneración tisular que presenta (Caballero-Pérez et al., 2018). Ramírez-Macal et al., (2022) describen las características morfométricas y rasgos biológicos más importantes para la identificación de *Ambystoma granulosum* a nivel de especie, siendo estas las que se presentan en la fase larvaria y en la fase de adulto. La figura 7 muestra la definición y ubicación de los rasgos anatómicos más importantes para su identificación.

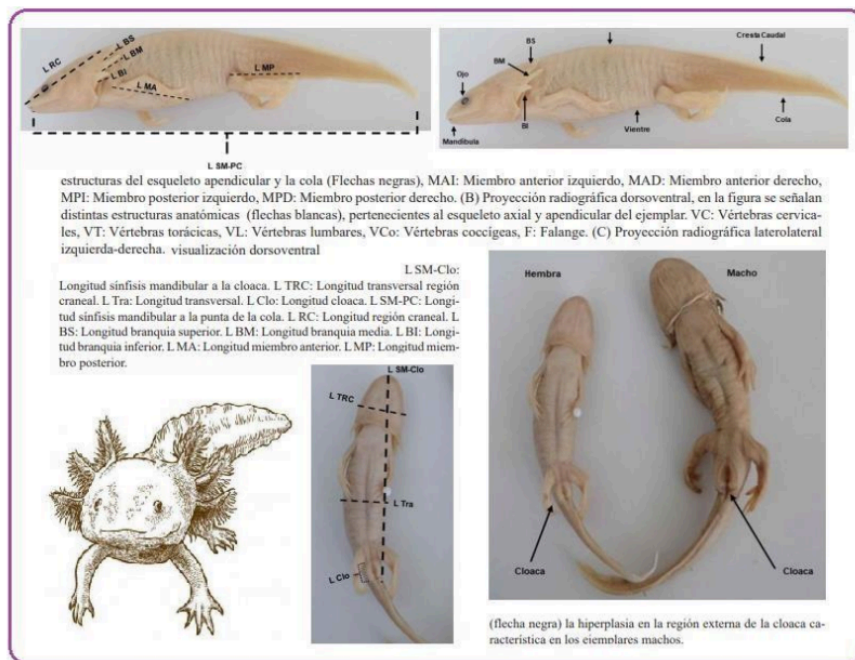


Figura 7. Descripción de rasgos anatómicos para la identificación de *Ambystoma granulosum* (Hincapie et al., 2021).

Diversos autores de México y Norteamérica han coincidido en que la descripción de los aspectos biológicos y ecológicos básicos de *Ambystoma granulosum*, son la base para identificar alteraciones en la calidad de su hábitat reflejadas en su morfología, anatomía y fisiología (Tellefson, 2019). Sin embargo, Everson et al., (2021), consideran una sinonimia importante para *Ambystoma granulosum* con *Ambystoma mexicanum* a partir de un análisis molecular con índices de similitud entre las regiones centrales de México en donde se distribuye la mayor parte de las especies de *Ambystoma*. Los estudios ecológicos más relevantes, son aquellos que han evaluado la relación con los índices de biodiversidad de las zonas de distribución. En ese sentido, Martínez-Silva, (2015), realizó muestreos combinados de fitoplancton en diez estaciones del Embalse de Betania (Colombia), evaluando de manera cualitativa-cuantitativa el efecto nocivo sobre los índices ecológicos de Shanon-Weaver, Índice de Equidad de Pielou, Whilm y Dorris. Los resultados mostraron una variación en los valores de los índices por efecto nocivo de la variación en la calidad del agua y nivel de contaminación del embalse.

En la figura 8 se muestra *Ambystoma granulosum*, este es un anfibio que puede ser un bioindicador de calidad ambiental ya que sus patrones biológicos y ecológicos dependen de la calidad del agua de los sistemas acuáticos, puede ser un bioindicador que proporcione información sobre los niveles de contaminación y valores de demanda química de oxígeno, color, turbidez, pH, concentración de nitrógeno, plaguicidas y metales principalmente, a través de su crecimiento, desarrollo, respiración, reproducción, alimentación, conducta, estímulos se ven modificados en su población en tiempo y espacio. A esta cualidad que tienen los organismos como *Ambystoma granulosum* se le denomina actualmente como bioindicador de ecotoxicidad (Heredia-Bobadilla y Sunny, 2021; Tejocote-Pérez et al., 2021).



Figura 8. *Ambystoma granulosum* (IUCN, 2019).

4.2.1.2. Especies de invertebrados

La forma en que estudiamos la calidad del agua ha cambiado mucho con el tiempo. Antes se analizaban principalmente aspectos físicos y químicos, como el oxígeno, la acidez o la temperatura. Sin embargo, estos parámetros no siempre muestran claramente si un ecosistema está sano o no. Por eso, hoy se usan también bioindicadores, es decir, organismos vivos que reflejan los efectos acumulados de la contaminación y las alteraciones del ambiente (Kumari y Paul, 2020).

Un ejemplo son los macroinvertebrados bentónicos (pequeños animales como insectos acuáticos, larvas, caracoles o gusanos que viven en el fondo de ríos y lagos). Estos organismos resultan muy útiles para evaluar la salud de los ecosistemas, ya que diferentes especies reaccionan de manera distinta a la contaminación. En un estudio hecho en la presa Xhimojay, Estado de México, se usaron índices que clasificaron el agua entre “regular” y con signos de contaminación. Esto no habría sido evidente si solo se hubieran analizado parámetros químicos, que por sí mismos no reflejaban el daño provocado al cuerpo de agua (Rodríguez-Varela et al., 2018).

Además, algunos trabajos recientes identifican a los organismos con mayor detalle, como es a nivel de género o especie, para obtener una visión más precisa. Por ejemplo, la familia de insectos Chironomidae suele considerarse muy tolerante a la contaminación, pero dentro de ella hay géneros muy sensibles, como *Alotanypus*, que reaccionan negativamente incluso a cambios leves. Esto significa que mirar con más acercamiento la diversidad ayuda a detectar problemas ambientales más sutiles, gracias a las diferencias entre los organismos (Pérez-Munguía; Ponce-Saavedra, 2020).

El uso de fauna como bioindicador tiene varias ventajas: permite ver los efectos de la contaminación a largo plazo, identificar impactos indirectos como la acumulación de metales en moluscos y crustáceos, y suele ser más barato que un monitoreo químico constante. Además, muchos organismos responden a concentraciones muy bajas de contaminantes que los equipos de laboratorio no siempre pueden detectar (Kumari y Paul, 2020). Por ejemplo, los grupos Efemerópteros, Plecópteros y Tricópteros suelen encontrarse en aguas limpias, mientras que gusanos oligoquetos o ciertos quironómidos aparecen en aguas con alta contaminación orgánica.

Sin embargo, este enfoque también tiene retos: los ciclos naturales de los organismos pueden confundirse con efectos humanos, la identificación taxonómica requiere especialistas, y la interpretación debe hacerse considerando el ecosistema en conjunto. Por ejemplo, en la presa Xhimoja y se detectó un predominio de depredadores, lo que podría indicar un desequilibrio en la cadena alimenticia más que una contaminación directa (Rodríguez-Varela et al., 2018).

Por otro lado, los peces también son bioindicadores muy valiosos debido a que viven varios años y se mueven a lo largo del ecosistema, integran los efectos de la contaminación en el tiempo y en el espacio. Son especialmente útiles para detectar contaminantes que se acumulan en los sedimentos o en la grasa, como metales pesados y compuestos orgánicos persistentes (Chovanec et al., 2003). La acumulación de estas sustancias en sus tejidos depende no solo de la concentración presente en el agua, sino también de factores como el pH, la temperatura o la cantidad de materia orgánica disuelta.

4.2.2 Vegetación

4.2.2.1 *Salvinia mínima*

Una opción prometedora en la fitorremediación es el uso de plantas acuáticas, tal como, *Salvinia mínima*, es un helecho acuático flotante perteneciente a la familia Salviniaceae, esta se puede mostrar en la figura 9. Su hábitat se encuentra en ecosistemas de aguas tranquilas como lagos, estanques y arroyos lentos, se distribuye ampliamente en regiones tropicales y subtropicales (Gómez-Hernández et al., 2023). Asimismo, cumple funciones ecológicas esenciales, como proveer sombra, amortizar la temperatura del agua, protección y alimento para organismos acuáticos en su hábitat. Aunado a esto,

su capacidad de propagación vegetativa, tamaño reducido, facilidad de cosecha y amplia tolerancia, puede considerarse como candidato ideal de tratamiento primario para aguas contaminadas.

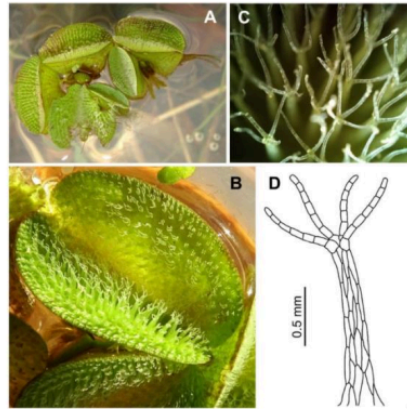


Figura 9. *Salvinia mínima*. A) Planta. B) Hoja superior flotante. C) Pelos de las hojas superiores flotantes no unidos en sus puntas. D) Papilas de las hojas superiores flotantes con pelos no unidos en sus puntas (Saez et al., 2025).

Gómez-Hernández y colaboradores (2023), han desarrollado múltiples estudios que demuestran la capacidad de esta especie para absorber metales pesados como plomo, níquel, zinc, cobre, arsénico y litio. Los resultados indican que *Salvinia mínima*, es altamente eficiente en la acumulación de plomo y níquel, con una tolerancia fisiológica significativa a concentraciones elevadas.

Se ha demostrado también que *Salvinia mínima* puede formar nanopartículas de plomo menores a 57 nm, las cuales se adhieren a la pared celular. Estos hallazgos abren nuevas posibilidades para su uso en la nanobiorremediación. (Tabernero et al., 2024).

4.2.2.2 *Salix babylonica*

En la figura 10 podemos ver *Salix babylonica*, esta especie Sánchez-Sánchez et al., (2018) demostraron una fitorremediación eficiente para remover contaminantes químicos persistentes provenientes de la industria textil, determinaron que los contaminantes orgánicos son oxidados, adsorbidos y traslocados por la planta a nivel de raíz, tallo y hojas sin afectar su tasa de respiración fotosintética, al contrario, tolera las altas concentraciones de contaminantes y llega a un estado fisiológico de euriorganotropismo, que significa, una adecuación fisiológica a las condiciones de contaminación, esto resultados se muestran en la figura 11.



Figura 10. *Salix babylonica* (Marchenko y Kuzovkina, 2023).

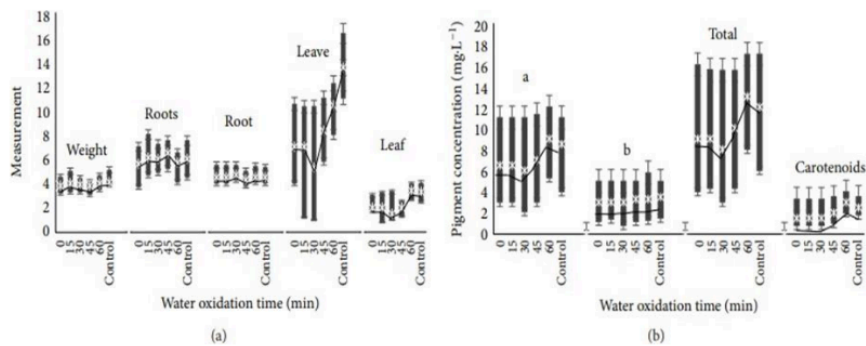


Figura 11. Tolerancia positiva y remoción de colorantes industriales por *Salix babylonica*, eficiencia en biomasa y pigmentos fotosintéticos (Sánchez-Sánchez et al., 2018)

Dado lo anterior, *Salix babylonica* se identifica como el primer organismo semiacuático de origen vegetal con alta capacidad para poder tratar agua de sistemas contaminados con descargas de origen industrial. La única desventaja que describen Sánchez-Sánchez et al., (2018) es la forma de propagación vegetativa que tiene la especie, situación que a largo plazo la lleve a perder variabilidad genética y resistencia a las condiciones adversas, que, de igual forma, muestra algunas otras especies ya utilizadas en procesos de fitorremediación avanzada.

4.2.3 Microbiota

El agua es un recurso vital, pero el crecimiento poblacional y la industrialización han provocado una crisis en su disponibilidad y calidad. Para monitorear este recurso, no basta con medir parámetros fisicoquímicos (pH, oxígeno disuelto y nutrientes). También necesitamos conocer cómo responde la vida microscópica que habita en ella.

Ahí es donde entran los bioindicadores microbiológicos, pequeños organismos que actúan como “sensores naturales” de contaminación. En la tabla 3 se muestran los principales bioindicadores microbiológicos.

Tabla 3. Principales bioindicadores microbiológicos (Jüttner et al., 2025).

Grupo	Ejemplo	Indicador
Bacterias coliformes	<i>Escherichia coli</i>	Contaminación fecal reciente
Enterococos	<i>Enterococcus faecalis</i>	Resistencia en ambientes salinos; aguas recreativas
Protozoos	<i>Giardia</i> , <i>Cryptosporidium</i>	Riesgo sanitario por parásitos intestinales
Microalgas	Diatomeas	Estado trófico y eutrofización (exceso de nutrientes)

El monitoreo microbiológico es una herramienta poderosa en la gestión del agua. Permite una visión más integral y realista del estado de los ecosistemas acuáticos, revelando tanto la presencia de contaminantes como la salud general del sistema. En un contexto de crisis hídrica, integrar bioindicadores a los programas de monitoreo facilita detectar problemas a tiempo y tomar decisiones basadas en evidencia científica.

4.3 Caso de aplicación de bioindicadores y calidad de agua en México

En 2016, Sánchez y colaboradores evaluaron los parámetros fisicoquímicos del agua subterránea en un acuífero ubicado al sur de Quintana Roo, con el propósito de determinar su calidad y compararla con los valores establecidos por la NOM-127-SSA1-2021. Entre los parámetros analizados se

incluyeron el pH, la temperatura (°C), los sólidos totales disueltos, la dureza total, el sodio (Na⁺), los sulfatos (SO₄²⁻), los cloruros (Cl⁻) y los nitratos (NO₃⁻).

Los resultados mostraron que varios constituyentes químicos excedieron los límites permisibles de la norma: los sólidos totales disueltos en un 22% de las muestras en 2002 y 42% en 2012, la dureza total en 60%, el sodio en 9.8%, los cloruros en 9.9%, y los nitratos en 3% de las muestras analizadas en 2012. No obstante, el Índice de Calidad del Agua (ICA) indicó que, en general, la calidad química del agua subterránea fue aceptable para consumo humano en la mayoría de los sitios evaluados.

En este estudio, los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1-2021 se consideraron como referencia para interpretar los niveles de concentración de cada parámetro, con el objetivo de determinar el estado actual del sistema acuático y su posible interacción con el ciclo de vida de *Ambystoma granulosum*. Este aspecto resulta particularmente relevante, ya que la calidad del agua puede influir directamente en los procesos biológicos, reproductivos y de desarrollo de esta especie dentro de su hábitat natural.

5. Tolerancia y mecanismos de adaptación en especies bioindicadoras

5.1 Condiciones ambientales toleradas por las especies

Dentro de la investigación ambiental, es importante conocer el estado actual que guardan los sistemas acuáticos con la calidad de sus condiciones espacio temporal ambientales ya que, permiten evaluar el nivel de condiciones de conservación o nivel de perturbación, que, a futuro, apoye en la toma de decisión para realizar manejo, preservación, resguardo o actividades de producción dentro de un área natural, desde un sistema hasta una unidad productiva.

En 2007 Zamudio y Wicczorek, realizaron un estudio del estado actual de un sistema integrador de parámetros biológicos y fisicoquímicos, cuantificando de manera directa la dispersión, conectividad poblacional y estructura genética de la población de la salamandra manchada (*Ambystoma maculatum*) en el condado de Tompkins, Nueva York, USA, esta especie se muestra en la figura 12. En este estudio encontraron que los sitios de reproducción adecuados están relativamente aislados entre sí y los estudios de campo sugerían una considerable fidelidad del sitio para adultos. Para complementar el estado actual de los parámetros, utilizaron microsátélites que facilitaron la estimación de la estructura poblacional y la dispersión entre 29 agregaciones de reproducción.



Figura 12. *Ambystoma maculatum* (IUCN, 2020).

De acuerdo a los resultados de los parámetros fisicoquímicos del agua espacio-temporales y los resultados de los bioensayos con microtox, se identificaron los tiempos y espacios en donde existía un problema de intoxicación y daño sobre el ajolote proveniente de alguna fuente de contaminación dentro del sistema acuático, generado por la misma dinámica natural de los ambientes, escurrimientos pluviales, erosión, actividad biológica y humana, con la finalidad de realizar una propuesta de método de tratamiento del agua que permita disminuir el efecto nocivo que, en algún momento y futuro, afecte la dinámica poblacional de *Ambystoma maculatum*, tomando como base los sistemas de biorremediación por consorcios microbianos y por fitorremediación acoplada de manera mutua, usando *Salix babylonica* o *Thypha latifolia*.

Por otro lado, con la finalidad de conocer el estado de la calidad del agua subterránea de un sistema natural en el sur de Quintana Roo, relacionado con la distribución espacial y temporal de los parámetros fisicoquímicos que permitieran identificar las zonas con mejor potencial aptas para consumo humano, Sánchez et al., (2016) evaluaron el índice de calidad del agua (ICA), a través de un sistema de información geográfica, que integró las temporadas de lluvias de los años 2002 y 2012, con los parámetros fisicoquímicos como pH, temperatura, sólidos totales disueltos, dureza total, sodio, sulfatos, cloruros y nitratos. Obteniendo que existen condiciones de heterogeneidad espacial relacionadas con el estado actual del sistema generadas por las concentraciones de iones analizados a través del medio acuífero, debido a compuestos carbonatados, dolomías y evaporitas; mezcla de agua dulce-marina y una posible contaminación antropogénica, principalmente por aguas residuales domésticas y el uso de fertilizantes.

El estado actual negativo de la calidad del agua en México ha permitido que, en los últimos años, la población del ajolote *Ambystoma mexicanum* haya disminuido drásticamente en su hábitat natural en

los canales de Xochimilco y Chalco, entre otras causas como la pesca furtiva, la depredación y competencia con especies no nativas introducidas en su ambiente y los efectos adversos ocasionados por contaminantes. Con respecto a este último, hay una creciente preocupación a nivel mundial acerca de los efectos subletales de los plaguicidas organofosforados en humanos y animales, incluyendo su posible papel en la disminución global de las poblaciones de anfibios (Hernández-Quiroz et al., 2013).

Martínez-Silva (2015)⁶ observó que existe una fluctuación entre el nivel de contaminación del agua y la estacionalidad del año. Los resultados permitieron concluir que el embalse de Betania (Colombia), presenta niveles de eutrofización, que se ven reflejados en la composición de organismos planctónicos registrados en los puntos de muestreo, este proceso se intensifica cuando disminuyen las lluvias y coincide con una mayor mortandad de los peces.

Camacho et al., (2020), determinaron que *Ambystoma altamirani*¹⁰, es una especie en peligro de extinción, localizada en arroyos de alta montaña en las cercanías de la Ciudad de México, sus poblaciones podrían verse amenazadas por el crecimiento urbano. Dicha población no ha sido estudiada previamente en otros sitios y el nivel de impacto humano ha sido importante para su densidad ya que estos hallazgos son consistentes con las observaciones de otras poblaciones de *Ambystoma altamirani*¹⁰, lo que sugiere que estas características podrían ser importantes en su manejo y conservación.

Hincapié et al., (2021)⁸, determinaron la primera colonia establecida de ajolotes en Colombia, discutiendo perspectivas de *Ambystoma mexicanum* como organismo modelo en el país, enfatizando sus posibles usos en regeneración de tejidos y biología del desarrollo.⁸ *Ambystoma mexicanum* es un anfibio urodelo endémico del lago Xochimilco en México, perteneciente a la familia de salamandras Ambystomatidae. Esta especie se ha empleado frecuentemente como organismo modelo en laboratorios de biología del desarrollo y regeneración alrededor del mundo, dadas sus capacidades regenerativas y adaptabilidad en condiciones de laboratorio, en la figura 13 se muestra *Ambystoma mexicanum*.



Figura 13. *Ambystoma mexicanum* (Zambrano et al., 2010).

En 2013, Hernández-Quiroz y colaboradores, indicaron que, a diferencia de otros grupos de vertebrados, los anfibios presentan características que los hacen más vulnerables a los cambios ambientales como son la piel “desnuda”, glandular y permeable, lo cual determina que sean considerados buenos indicadores de la calidad del ambiente.

Por otro lado, Robles-Mendoza et al., (2009), observaron que *Ambystoma mexicanum*, se mantiene bajo ciertas condiciones de cultivo de acuerdo con las necesidades y los recursos disponibles. Particularmente, las características electrolíticas del agua de mantenimiento y condiciones iónicas y osmóticas son los factores que presentan mayor variación entre los diferentes sistemas de cultivo. Por lo tanto, es de suma importancia estandarizar las condiciones adecuadas de mantenimiento de los ajolotes para mantener el germoplasma de la especie y para garantizar organismos sanos con fines de investigación. Recientemente se ha obtenido que los ajolotes se mantienen en solución Holtfreter, medio en el cual registraron la mayor tasa de crecimiento (13 g /d) y un mayor índice de adecuación del 79% y solo un 21% de las especies no resistió. De acuerdo con estos resultados propusieron el uso de la solución Holtfreter para garantizar el adecuado desarrollo de estadios tempranos de *Ambystoma mexicanum* bajo condiciones de mantenimiento y/o cultivo controlado del laboratorio.

México cuenta con un registro amplio y continuo de organismos bioindicadores con propiedades fisiológicas y ecológicas que los hacen útiles para evaluar la salud de los ecosistemas. Estas especies presentan características distintivas que les permiten soportar ciertos niveles de contaminación y su presencia, ausencia o condición fisiológica indica la salud de los ecosistemas. En los humedales continentales y manglares existen plantas como *Pluchea indica*, *Avicennia marina* y *Sesuvium*

portulacastrum que actúan como acumuladores biológicos en medios con elevadas concentraciones de metales pesados como cobre, plomo y zinc, así mismo los moluscos, peces y reptiles, se han llegado a utilizar en estudios de toxicología ambiental (Vergara et al., 2024). En la tabla 4 se muestran diversas concentraciones de metales pesados que son bioacumulables en especies tolerantes.

Tabla 4. Concentraciones de metales pesados bioacumulables en especies tolerantes (Vergara et al., 2024).

Contaminante	Especie				
	Aves (mg/Kg)	Peces (mg/Kg)	<i>Pluchea indica</i> (mg/Kg)	<i>Avicennia marina</i> (mg/Kg)	<i>Sesuvium portulacastrum</i> (mg/Kg)
Arsénico (As)	0.07-3.0	0.04-4.22	ND	ND	ND
Cromo (Cr)	0.08-4.6	0.24-2.0	ND	0.12-1.12	0.1-0.45
Plomo (Pb)	1.3-15.49	8.5-109.2	0.24-31.27	ND	0.55-31.27
Zinc (Zn)	23.9-140.7	0.69-13.15	9.14-101.27	1.66-3.21	5.53-101.27
Manganeso (Mn)	22-45.3	0.23-2.3	ND	ND	ND
Mercurio (Hg)	0.65-6.65	0.023-0.31	ND	ND	ND
Cadmio (Cd)	0.02-4.7	0.02-0.42	ND	ND	ND
Cobre (Cu)	0.59-60.19	0.001-0.24	1.17-17.41	4.03-8.42	1.8-10.8
Hierro (Fe)	86.91-869.9	0.005-0.32	ND	4.08-6.44	63.4-210
Niquel (Ni)	ND	ND	ND	1.07-1.93	ND

Las diatomeas son algas microscópicas utilizadas como bioindicadores de la calidad hídrica debido a su sensibilidad a cambios en parámetros como nutrientes y materia orgánica. *Nitzschia palea* (Ver figura 14) indica eutrofización, alta contaminación orgánica, nitratos y alta Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), *Nitzschia inconspicua* (Ver figura 14 y 15) está asociada a contaminación orgánica moderada-alta, también *Surirella angusta* y *Planothidium lanceolatum* (ver figura 16 y 17 respectivamente) son dominantes en aguas de mala calidad y con altos niveles de sólidos suspendidos.

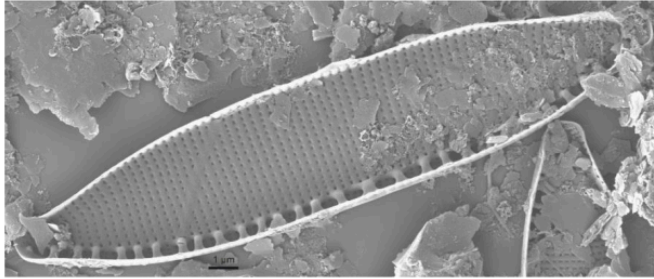


Figura 14. *Nitzschia palea* (Jüttner et al., 2025)

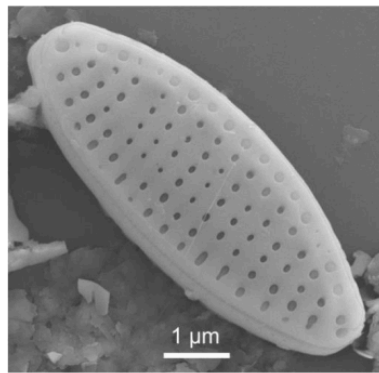


Figura 15. *Nitzschia inconspicua* (Jüttner et al., 2025)

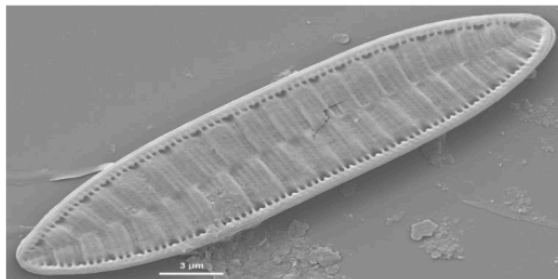


Figura 16. *Surirella angusta* (Jüttner et al., 2025)

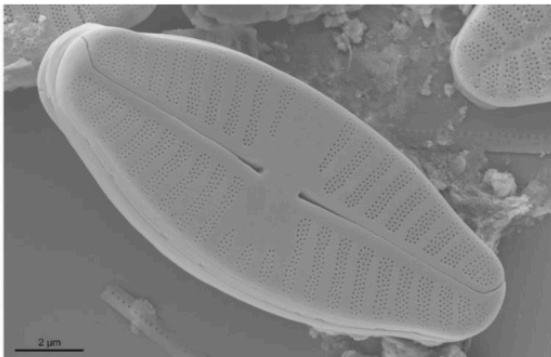


Figura 17. *Planothidium lanceolatum* (Jüttner et al., 2025)

De igual forma, la presencia o ausencia de estas comunidades de diatomeas permiten clasificar el nivel de contaminación de los cuerpos de agua como se observa en la tabla 5. (Godínez-Domínguez y González-Sansón, 2017; De La Lanza-Espino et al. 2011).

Tabla 5. Índice y condición biótica de los sitios y calidad del agua (Godínez-Domínguez y González-Sansón, 2017; De La Lanza-Espino et al. 2011).

Condición de calidad del agua	Valor del índice	Condición Biótica	% de referencia	Características de calidad de agua	Características de condición biótica
Excelente	95-100	Óptima (no impactada)	>79%	Calidad del agua sin deterioro o perturbación.	14 Composición trófica balanceada, y con una comunidad con dominancia y composición adecuada para el tamaño de la corriente, con habitat optimo.
Buena	80-94			Calidad del agua con menor grado de deterioro con respecto a la excelente.	

Favorable	65-79	Subóptima (moderadamente impactada)	29-72%	Calidad del agua con perturbación ocasional.	14 Pérdida de familias intolerantes, reducción del índice EPT.
Marginal	45-65			Calidad del agua con perturbación frecuente.	
Pobre	0-44	Pobre (severamente impactada)	<21%	Calidad del agua con perturbación permanente.	Solo familias tolerantes están presentes (1 o 2 generalmente)

5.2 Mecanismos fisiológicos y celulares de tolerancia

Los ecosistemas acuáticos están sometidos a condiciones muy variables: cambios bruscos de temperatura, bajos niveles de oxígeno, contaminación por descargas urbanas o industriales, exceso de nutrientes e incluso radiación solar intensa. Frente a estos retos, los organismos que habitan en lagos, presas y ríos han desarrollado mecanismos celulares de tolerancia, es decir, estrategias que les permiten resistir, adaptarse y sobrevivir en ambientes hostiles (García y Chávez, 2018)

Uno de los ejemplos más conocidos son *Chirostoma* spp., también conocidos como charales, peces endémicos que han aprendido a defenderse del calor y la contaminación produciendo proteínas de choque térmico o HSPs. Estas proteínas funcionan como pequeñas “reparadoras” celulares: estabilizan a otras proteínas cuando se dañan por el calor y ayudan a que recuperen su forma y función. Gracias a esta protección, los charales pueden resistir variaciones bruscas de temperatura y condiciones de estrés (Santos y Flores, 2021).

En 2020 Kumar y Singh, mencionaron que en el caso de las microalgas verdes del género *Chlorella*, su defensa principal son los antioxidantes. Estas moléculas, como los carotenoides o la enzima superóxido dismutasa, actúan como escudos contra los radicales libres que se generan por contaminación o exceso de radiación ultravioleta. Además, sus pigmentos funcionan como filtros naturales de la luz solar, lo que les permite sobrevivir en aguas con mucha radiación y exceso de nutrientes.

Otro ejemplo, son las larvas de quironómidos (*Chironomus* spp.), pequeños insectos acuáticos que poseen hemoglobina intracelular. Esto les da la capacidad de aprovechar el oxígeno incluso cuando casi no hay disponible en el agua, como ocurre en ambientes contaminados o eutrofizados. Su resistencia extrema los convierte en buenos bioindicadores, ya que su presencia revela el nivel de perturbación en un ecosistema. (Santos y Flores, 2021).

Finalmente, los anfibios acuáticos, como *Lithobates montezumae* la cual se puede observar en la figura 19, es también conocida como rana toro, ha desarrollado adaptaciones metabólicas muy interesantes. Cuando el oxígeno escasea o aparecen contaminantes, pueden reducir su metabolismo para ahorrar energía y activar enzimas que disminuyen el daño oxidativo en sus tejidos. Esto les da la capacidad de sobrevivir a condiciones extremas de manera temporal (Kumar y Singh, 2020).



Figura 18. *Lithobates montezumae* (Méndez et al., 2009).

En conjunto, todos estos casos muestran que la vida acuática ha encontrado diversas formas de resistir el estrés ambiental. Los mecanismos celulares de tolerancia no solo aseguran la supervivencia de especies nativas, sino que también nos ofrecen información valiosa sobre la salud de los ecosistemas. Observar cómo se adaptan los peces, algas, insectos y anfibios del Estado de México nos ayuda a comprender la fragilidad de estos ambientes y la importancia de su conservación (Santos y Flores, 2021).

6. Estudios de caso en el Estado de México

En el río Amanalco se han identificado 33 familias de macroinvertebrados con calidad del agua regular y con señales de contaminación moderada (Oliva-Martínez et al., 2005; Marín Ortega et al., 2022). En el caso de los lagos de alta montaña del Nevado de Toluca, la comunidad de invertebrados

permite evaluar aspectos como la cantidad de oxígeno y la productividad del ecosistema, siendo estos ambientes, los más frágiles y sensibles a cambios por su ubicación en zonas frías y elevadas (Oseguera et al., 2016). Las diatomeas y los macroinvertebrados son bioindicadores importantes para los ecosistemas acuáticos, su estudio ayuda a detectar contaminación, eutrofización o pérdida de oxígeno, por lo tanto, son una herramienta clave para proteger el agua y la biodiversidad del Estado de México.

Existen dos amenazas que acechan la calidad del agua del Valle de Toluca, así como su disponibilidad y recirculación en los sistemas aledaños, éstas amenazas son la contaminación por residuos químicos y la baja eficiencia de los sistemas de tratamiento que han generado islas de desecho (Rodríguez y Blázquez, 2024)

6.1 Manejo y conservación de humedales en Estado de México

En el Lago de Texcoco se documentan medidas de conservación y manejo, reconociendo su rol para aves acuáticas y anfibios; el expediente Ramsar detalla la protección jurídica y los criterios ecológicos que sustentan su manejo (CONANP, 2022). La Comisión del Agua (CONAGUA) ha encabezado obra hidráulica en la laguna de Zumpango y manejo hídrico que ha permitido recuperar el vaso (pasó de estar seco a 65% de su capacidad en 2024), así como trabajos previos de retiro de lirio solicitados por el Congreso local. Estas medidas buscan restablecer condiciones de hábitat para aves y peces (bioindicadores de integridad ecológica en lagos someros) (Gobierno del Estado de México, 2023).

El Congreso del Estado de México ha gestionado y exhortado la continuidad de recursos para la limpieza y retiro de lirio en Laguna de Zumpango; además, ha formalizado su figura de Parque Estatal–Santuario del Agua en 2023, reforzando la vía legal para su restauración. Jornadas municipales de “tres órdenes de gobierno” Atizapán–Naucalpan–Tlalnepantla han retirado decenas de toneladas de lirio para mantener el espejo de agua funcional. Estas intervenciones mejoran el hábitat para peces y macroinvertebrados sensibles. También se han detectado conducciones de descarga presuntamente irregulares, lo que detonó inspecciones y presión pública para su clausura (CNDH, 2023). (Gobierno del Estado de México, 2023).

El ayuntamiento y vecinos ribereños de la Laguna de Zumpango han realizado limpiezas y retiro de residuos/lirio para conservar el sitio como refugio de fauna. Si bien hubo periodos críticos con el lago prácticamente seco (enero 2024), las limpiezas y el manejo hídrico federal posterior apoyaron su recuperación, con miras a restablecer comunidades de aves y peces bioindicadores (Gobierno del Estado de México, 2023).

6.2 Monitoreo de *Ambystoma* spp. como indicadores de salud ecosistémica

En México, los estados, municipios y unidades de producción representan zonas que requieren especial atención para el estudio y mitigación de la contaminación ambiental. Frente a esta necesidad, resulta fundamental promover procesos de integración de variables ambientales que permitan mantener, proteger y asegurar la vida y el equilibrio ecológico de los organismos que habitan los ecosistemas acuáticos. Estos esfuerzos deben orientarse hacia una gestión sostenible y sustentable de los recursos naturales, que minimice la contaminación y garantice su disponibilidad para las generaciones futuras.

En este contexto, el Rancho “Los Ajolotes”, ubicado en Jiquipilco, Estado de México, constituye un espacio estratégico para desarrollar un modelo integral de caracterización ambiental. Este modelo contempla la evaluación de parámetros fisicoquímicos, microbiológicos, ecológicos, ambientales y toxicológicos del sistema acuático pluvial del sitio, con el propósito de determinar su estado actual y las interacciones biológicas que en él ocurren. La información generada permitirá preservar y aprovechar a *Ambystoma granulosum* como un bioindicador pionero de la calidad del agua en el Estado de México, en un modelo espacio-temporal de largo alcance. Este enfoque contribuirá a garantizar la salud del ecosistema y la calidad del agua dentro de un sistema productivo de alta relevancia social, ofreciendo tres beneficios principales:

1. Monitoreo constante de las condiciones ambientales en la unidad de producción.
2. Replicabilidad del modelo en otros sitios con características similares.
3. Aplicación innovadora de *Ambystoma granulosum* como bioindicador prioritario mexiquense, propuesto por primera vez como una herramienta biológica integral para la evaluación de la calidad del agua (Aguilar-Miguel et al., 2009).

Un poco más de la mitad de las especies conocidas del género *Ambystoma*, se encuentra en una categoría de riesgo a nivel nacional y todas a nivel internacional, de acuerdo a los estatus de conservación emitidos en la NOM-59-SEMARNAT-2010, el *Ambystoma granulosum* está sujeto a protección especial y en peligro crítico por la Unión Internacional para la conservación de la Naturaleza (IUCN por sus siglas en inglés). Se ha encontrado al *Ambystoma granulosum* en las zonas de Almoloya de Juárez, Villa Victoria, Zinacantepec y Toluca, Estado de México. El asunto de conservación de los *Ambystoma granulosum*, requiere de la participación conjunta de los diferentes sectores de la sociedad humana, el *Ambystoma granulosum* y dinámica poblacional (Ávila Akerberg et al., 2020).

Así como los ajolotes, los anfibios están desapareciendo a nivel mundial, varias especies se han perdido y miles más están en peligro de extinción. De las especies que están amenazadas, no se ha

logrado proteger en su medio natural, por lo que es urgente realizar acciones de conservación *ex situ* que aseguren su preservación. Dado lo anterior, *Ambystoma granulosum* y *Ambystoma lermaense* son especies prioritarias con las cuales se puede iniciar esta estrategia de conservación, ya que son especies endémicas de México y con un estatus de conservación preocupante (Aguilar-Miguel et al., 2009).

Ambas especies han sido poco estudiadas, sin embargo, se ha obtenido su reproducción en cautiverio de manera natural y espontánea, así como con la estimulación hormonal con Gonadotropina Coriónica (hCG). Los resultados obtenidos indican que no existen diferencias significativas en la morfología de machos y hembras en ambas especies, excepto por el engrosamiento de la región cloacal en los machos. De igual manera, el ciclo reproductivo es anual y sincrónico en machos y hembras, con actividad máxima entre los meses de mayo a septiembre. Cuando las parejas no son inducidas por hormonas, el porcentaje de fecundidad ha sido del 40 al 90%. En parejas de *Ambystoma granulosum* con inducción de hCG se han obtenido puestas variables entre 17 y 1182 huevos; esto indica que la fertilidad de los huevos inducidos es variable en estado natural, lo cual es importante para conocer su comportamiento en áreas de importancia para la conservación (Aguilar-Miguel et al., 2009).

Bajo este contexto, Heredia-Bobadilla y Sunny (2021), determinaron que los ajolotes de arroyos de alta montaña forman parte de las especies más vulnerables debido a la naturaleza de su distribución, la cual se restringe a pequeños arroyos permanentes en las montañas de la Faja Volcánica Transmexicana; estas especies, además, se conforman por poblaciones pequeñas y aisladas, lo cual incrementa su vulnerabilidad. En ese estudio se analizaron las amenazas potenciales para *Ambystoma rivulare*, *A. altamirani* y *A. leorae* con base a los criterios propuestos por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el Puntaje de Vulnerabilidad Ambiental desarrollado por Wilson y McCranie (2003), argumentando los autores que el estado de conservación de estas especies puede cambiarse a un nivel de mayor protección.

Un caso muy particular es *A. mexicanum*, una especie que presenta un alarmante declive como consecuencia del deterioro de su ambiente en Xochimilco, en donde el uso de plaguicidas organofosforados (OF) afecta la calidad del agua y es parcialmente responsable de dicho declive, lo cual puede deberse a la fragilidad del ajolote en etapas tempranas de su desarrollo, cuando se enfrenta a un medio contaminado con OF para sobrevivir en la etapa embrionaria y larval. En esta zona se ha demostrado que el malatión y dicloros aceleran el tiempo de eclosión y la mortalidad, aun después de remover los OF del medio. Finalmente, los OF de la zona también son causantes de mortandad y una morfología anormal en su cuerpo (Castán-Aquino et al., 2020).

6.3 Defensa de los derechos ambientales y participación ciudadana

La Comisión Nacional de los Derechos Humanos (CNDH) emitió en 2023 una recomendación a autoridades federales y estatales por la contaminación persistente de la Presa Madín, señalando fallas de control en descargas municipales. Esto genera medidas correctivas y vigilancia más estricta sobre fuentes de contaminación que impactan a los bioindicadores (CNDH, 2023).

La Comisión de Aguas del Estado de México (CAEM) hoy Secretaría del Agua, ha coordinado el retiro de lirio acuático y saneamiento en Presa Madín con maquinaria y brigadas (operadores, lanchas, retroexcavadoras), acciones que mejoran oxigenación y luz en la columna de agua, favoreciendo comunidades de macroinvertebrados y peces sensibles (Gobierno del Estado de México, 2023).

El voluntariado de la Secretaría del Agua organiza jornadas de limpieza en ríos y cuerpos de agua del Estado de México, retirando residuos sólidos que afectan hábitats bentónicos. Estas campañas disminuyen azolves y basuras que alteran sustratos y microhábitats de bioindicadores (Gobierno del Estado de México, 2023).

6.4 Acciones de protección para los bioindicadores en Estado de México

Los bioindicadores más usados en tecnología ambientales para problemáticas del Estado de México son: macroinvertebrados bentónicos (efímeros, tricópteros, quironómidos, principalmente), diatomeas y anfibios (género *Ambystoma*). Su presencia, ausencia y composición de comunidades reflejan un nivel determinado de calidad del agua y alteraciones del hábitat. Los principales ríos de la entidad como el Lerma, Amealco y Verdiguel, cuentan con vestigios de microbiota que formó parte de la composición de especies bioindicadoras de perturbación, tales como protozoarios, microalgas, hongos y bacterias, los cuales determinaron hace más de tres décadas, una buena calidad del agua (SEMARNAT, 2025).

Las especies bioindicadoras han favorecido al diagnóstico de las condiciones de los sistemas acuáticos en el Estado de México, ya que, describen de manera inmediata los niveles de contaminación, impacto ambiental, perturbación y deterioro. Se ha estimado que, para el Río Lerma, la presencia de *Sagittaria macrophylla* (papa de agua) es la especie bioindicadora más importante que en 1990 dio a conocer el elevado índice de contaminación química del río, debido a que sus poblaciones naturales disminuyeron drásticamente en un 95% durante 2 años (SEMARNAT, 2023).

De igual manera, la segunda especie bioindicadora en el Río Lerma que contribuyó con la descripción de contaminación severa por descargas industriales de origen químico fue *Chyrostoma riojai* (ver figura 20) con quien se obtuvo una tasa de declinación poblacional del 98% por año, manteniendo

una dinámica de deterioro biológico que lo llevó a su desaparición del sitio y a catalogarlo como especie en peligro de extinción por la NOM-059.SEMARNAT-2001.



Figura 19. *Chyrostoma riojai* (CONABIO, 2025).

El Área de Protección de Flora y Fauna Ciénegas de Lerma (APFF; 3,023 ha) protege remanentes de humedales del Valle de Toluca, es un hábitat de especies sensibles como el ajolote *Ambystoma lermaense* y aves acuáticas migratorias. La CONANP cuenta con un programa de manejo y acciones recurrentes hídricas, control de vegetación acuática y educación ambiental que se muestran en las figuras 21 y 22 (CONANP, 2014).

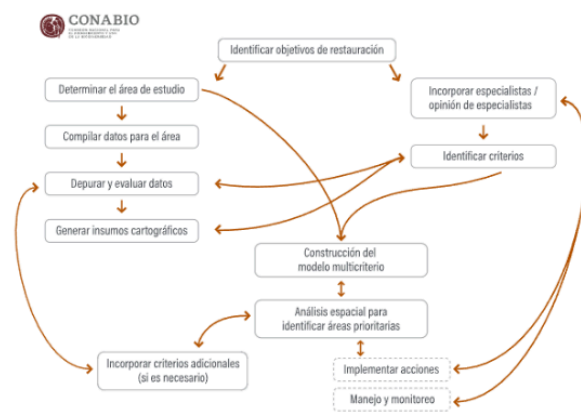


Figura 20. Esquema de restauración ambiental en el Estado de México (CONANP, 2014).

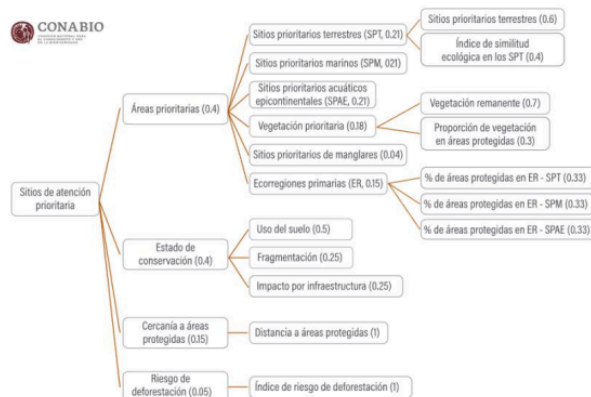


Figura 21. Esquema de acción prioritaria y ambiental en el Estado de México (CONANP, 2014).

7. Análisis de la calidad del agua y uso de bioindicadores en los sistemas acuáticos mexiquenses

7.1 Panorama actual de la calidad del agua

El agua es un elemento esencial para la vida y el funcionamiento de los ecosistemas. Sin embargo, los sistemas acuáticos del Estado de México enfrentan una situación crítica derivada del aumento de la contaminación y la sobreexplotación de sus cuerpos de agua. Los informes más recientes de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2024–2025) revelan que la mayoría de los ríos, lagunas y presas del estado presentan niveles elevados de materia orgánica, sólidos suspendidos y contaminación bacteriológica, lo que coloca a una gran parte de los sitios monitoreados dentro de la categoría de contaminados o fuertemente contaminados.

Entre los cuerpos más afectados se encuentran los ríos Cuautitlán, Lerma y Salado, así como el Gran Canal y la zona de Texcoco, donde los valores de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) superan ampliamente los límites establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021. En contraste, algunas áreas de montaña, como Tanque Pericos o Cruz de la Misión, mantienen valores dentro de parámetros óptimos, reflejando condiciones de baja alteración y mayor integridad ecológica.

El sistema de semaforización ambiental de CONAGUA, que clasifica la calidad del agua con colores verde, amarillo y rojo, muestra una tendencia preocupante: más del 70 % de los puntos de monitoreo

en la entidad se ubican en el nivel rojo, lo que implica riesgos significativos para la biodiversidad acuática, la salud pública y la disponibilidad del recurso. Esta situación se asocia principalmente con descargas urbanas e industriales no tratadas, uso intensivo de agroquímicos y deficiencias en los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

7.2 Evaluaciones ecológicas y biológicas

El análisis de la calidad del agua ya no se limita únicamente a parámetros fisicoquímicos. En la actualidad, los estudios ecológicos incorporan el uso de bioindicadores, organismos cuya presencia, abundancia o condición fisiológica reflejan el estado ambiental de su hábitat.

En el caso de los sistemas acuáticos mexiquenses, se han identificado tres grandes grupos de bioindicadores: fauna, vegetación y microbiota.

Dentro de la fauna, destacan los anfibios del género *Ambystoma* particularmente *A. granulosum* y *A. lermaense*, cuyas características fisiológicas y ecológicas los hacen sensibles a variaciones en la temperatura, pH, oxígeno disuelto y presencia de metales pesados o plaguicidas. Su vulnerabilidad los convierte en excelentes indicadores de ecotoxicidad.

Los macroinvertebrados bentónicos, como efemerópteros, plecópteros y tricópteros, también son ampliamente utilizados para detectar alteraciones en los ecosistemas lóticos. Su diversidad y composición permiten evaluar los efectos de la contaminación orgánica y la eutrofización, mientras que especies tolerantes como los oligoquetos o ciertos quironómidos reflejan degradación ambiental prolongada.

En cuanto a la vegetación acuática, especies como *Salvinia minima* y *Salix babylonica* han demostrado un notable potencial para la fitorremediación, gracias a su capacidad de absorber metales pesados, colorantes industriales y nutrientes en exceso, contribuyendo así a la mejora de la calidad del agua.

Finalmente, la microbiota, en particular las diatomeas (*Nitzschia palea*, *Surirella angusta*, *Planothidium lanceolatum*), constituye un grupo de alta sensibilidad a cambios en la concentración de nutrientes y materia orgánica, permitiendo clasificar los cuerpos de agua desde condiciones excelentes hasta severamente impactadas.

El uso conjunto de estos bioindicadores proporciona una visión más integral del estado ecológico de los sistemas acuáticos, ya que integra la respuesta biológica acumulada ante la contaminación, más allá de las mediciones puntuales de laboratorio.

7.3 Casos representativos en el Estado de México

Diversos estudios recientes muestran la aplicación práctica de bioindicadores en cuerpos de agua mexiquenses. En la presa Xhimojay, el análisis de macroinvertebrados permitió clasificar el agua como de calidad “regular”, con signos de contaminación orgánica moderada, resultados que no se habrían detectado únicamente con parámetros fisicoquímicos. En el río Amanalco, se registraron 33 familias de invertebrados que reflejan una condición ecológica intermedia, mientras que en los lagos de alta montaña del Nevado de Toluca se identificó una comunidad faunística altamente sensible a la alteración del oxígeno disuelto, mostrando la fragilidad de estos ecosistemas.

Por su parte, en el Rancho “Los Ajolotes”, Jiquipilco, se desarrolla un modelo de monitoreo integral que combina parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y ecológicos con el seguimiento poblacional de *Ambystoma granulosum* como bioindicador prioritario del Estado de México. Este enfoque busca generar un modelo replicable en otras unidades productivas, promoviendo la conservación de la especie y la evaluación continua de la calidad del agua.

Asimismo, los humedales de Zumpango y Texcoco, reconocidos como sitios Ramsar, han sido objeto de acciones de restauración que incluyen el retiro de lirio acuático y la mejora hidráulica de los vasos lacustres. Estas medidas buscan recuperar hábitats esenciales para aves, peces y macroinvertebrados, fortaleciendo el papel de estos organismos como indicadores de la integridad ecológica.

7.4 Mecanismos biológicos de tolerancia y adaptación

Los organismos bioindicadores no solo reflejan el estado de contaminación, sino que también ofrecen información sobre los mecanismos fisiológicos y celulares que les permiten sobrevivir bajo estrés ambiental.

Por ejemplo, los charales (*Chyrostoma*) producen proteínas de choque térmico (HSPs) que reparan el daño causado por altas temperaturas o contaminación; las microalgas del género *Chlorella* generan antioxidantes que neutralizan radicales libres; y las larvas de quironómidos (*Chironomus*) poseen hemoglobina intracelular, lo que les permite vivir en ambientes con bajo oxígeno disuelto. Estas adaptaciones explican la persistencia de ciertas especies en ambientes degradados y su utilidad para evaluar el grado de perturbación ecológica.

8. Perspectivas y desafíos

El estudio de bioindicadores en el Estado de México revela una necesidad urgente de integrar la información biológica y fisicoquímica en la toma de decisiones ambientales. A pesar de los avances

en monitoreo y restauración, persisten limitaciones asociadas a la falta de continuidad institucional, deficiencias en el tratamiento de aguas residuales y pérdida acelerada de hábitats acuáticos.

Los retos futuros incluyen:

- Consolidar redes permanentes de monitoreo biológico, incorporando a las universidades y comunidades locales en la vigilancia ambiental.
- Fortalecer las políticas de conservación de especies endémicas, como *Ambystoma granulosum* y *A. lermaense*, a través de estrategias *in situ* y *ex situ*.
- Fomentar el uso de tecnologías naturales de tratamiento, como la fitorremediación con especies nativas.
- Promover la educación ambiental y la divulgación científica, para generar conciencia sobre la importancia de la calidad del agua y la biodiversidad acuática.

Epílogo

Los sistemas acuáticos del Estado de México representan una pieza fundamental dentro de la estructura ecológica y social del territorio. En ellos convergen procesos biogeoquímicos esenciales, una elevada diversidad biológica y una fuerte dependencia humana para el abastecimiento de agua, la producción de alimentos y la regulación climática. Sin embargo, el diagnóstico integral presentado en este trabajo demuestra que la mayoría de estos cuerpos de agua atraviesan un estado crítico de deterioro ambiental, producto de la contaminación orgánica e industrial, la sobreexplotación, el crecimiento urbano y la deficiente gestión del recurso hídrico.

A partir del análisis de parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y ecológicos, se observa una tendencia general de contaminación moderada a alta en las cuencas del Valle de México, Lerma y Río Salado, con valores que exceden los límites establecidos por la normatividad nacional. Este escenario pone en evidencia la urgencia de fortalecer los sistemas de tratamiento, saneamiento y monitoreo ambiental, ya que el deterioro del agua repercute directamente en la pérdida de biodiversidad, en la calidad de los suelos y en la salud de las comunidades humanas que dependen de estos ecosistemas.

Frente a esta problemática, el presente trabajo resalta la relevancia de los bioindicadores como herramientas biológicas capaces de reflejar, con mayor precisión, el estado de salud de los ecosistemas acuáticos. Organismos como los ajolotes del género *Ambystoma*, los macroinvertebrados bentónicos, las microalgas diatomeas y las plantas acuáticas fitorremediadoras proporcionan

información integrada sobre los impactos ambientales a corto y largo plazo, permitiendo identificar los cambios sutiles que los análisis químicos por sí solos no pueden revelar. La respuesta fisiológica, conductual y poblacional de estas especies traduce en términos biológicos la magnitud de la contaminación y su persistencia en el tiempo.

En el Estado de México, la incorporación de especies emblemáticas como *Ambystoma granulosum* como bioindicador prioritario constituye un paso relevante hacia la construcción de modelos regionales de monitoreo ambiental. Estos enfoques permiten no sólo evaluar la calidad del agua, sino también promover la conservación de especies endémicas y sensibilizar a la sociedad sobre el valor ecológico de los humedales, ríos y presas. Los casos analizados, como la restauración de la Laguna de Zumpango, los estudios en el río Amanalco o los modelos de fitorremediación con *Salvinia mínima* y *Salix babylonica* demuestran que es posible integrar el conocimiento científico con acciones de manejo sostenible y participación comunitaria.

No obstante, persisten desafíos importantes. La pérdida continua de hábitats, la fragmentación de poblaciones acuáticas, la falta de financiamiento para el monitoreo continuo y la escasa articulación entre instituciones limitan la eficacia de las estrategias de conservación. Por ello, es indispensable consolidar una política pública sustentada en evidencia científica, que incorpore los bioindicadores dentro de los programas estatales y nacionales de gestión del agua, restauración de ecosistemas y educación ambiental.

En suma, los resultados de este trabajo confirman que la evaluación biológica de los sistemas acuáticos mexiquenses es clave para comprender y revertir los procesos de degradación ambiental. Los bioindicadores no solo permiten medir la calidad del agua, sino también reconocer la resiliencia y la fragilidad de los organismos que la habitan. La conservación de los sistemas acuáticos y de su biota no debe entenderse únicamente como una tarea técnica, sino como un compromiso ético y social con el territorio y con las generaciones futuras. Garantizar cuerpos de agua sanos significa asegurar el equilibrio ecológico, la diversidad biológica y la continuidad de la vida misma en el Estado de México.

Referencias

- Aguilar-Miguel X., Legorreta-B G., Casas-Andreu G., (2009). Reproducción ex. Situ en *Ambystoma Granulosum* y *Ambystoma Lermaense* (Amphibia: Ambystomatidae). Rev. Acta Zoológica Mexicana. Vol. 25 (3) pp. 443-454.
- Alcántara V., A. E., Tejocote P., M., Balderas H., P., 2024. Eficiencia de los bioindicadores de toxicidad sobre contaminantes de aguas residuales industriales. Revista Ciencia y Mar. Vol. 28. Núm 83, pp: 3-8. DOI: 10.59673/cym.v28i83.1
- Ávila Akerberg, V., González Martínez V., González Hernández T., Vázquez Trejo M., 2020. El género *Ambystoma* en México ¿Qué son los ajolotes?. Revista CIENCIA Ergo-Sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva, vol. 28, núm. 2, 1, 2021. Universidad Autónoma del Estado de México, México
- Caballero-Pérez, J., Espinal-Centeno, A., Falcon, F., García-Ortega, L., Curiel-Quesada, E., Cruz-Hernández, A. 2018. Transcriptional landscapes of Axolotl (*Ambystoma mexicanum*). Dev. Biol., 433(2). Pp. 227-239.
- Camacho, Z. A. V., Smith, G. R., Ayala, R. M., Lemos-Espinal, J. A. (2020). Distribution and population structure of *Ambystoma altamirani* from the Llano de Lobos, State of Mexico, Mexico. Western North American Naturalist, 80 (2). pp. 228–235.
- Casas-Andreu, G., Cruz-Aviña, R., Aguilar-Miguel, X. (2004). Un regalo poco conocido de México al mundo: el ajolote o axolotl (*Ambystoma*: Caudata: Amphibia) con algunas notas sobre la crítica situación de sus poblaciones. Ciencia ergo sum, 10 (3), pp. 304–308.
- Castán-Aquino Y., Arias-Balderas S., Rojo-Salinas E., Cervantes-Rangel E., Ramos-Trujillo I., Solís-Castro O., (2020). El desarrollo temprano y sobrevivencia del ajolote mexicano (*Ambystoma mexicanum*) son afectados por los pesticidas organofosforados malatión y diclorvos de grado comercial. Rev. Int. Contam. Ambie. 36 (4), pp. 967-975.

- CITES, 2022. Lista roja de las especies prioritarias: México. The red list. USA. Tomo 2. www.cites.org.mexico.priorityspecies.
- Collins, S. (2014). Foto 26129556, (c) Steve Collins, todos los derechos reservados · iNaturalist Mexico. <https://mexico.inaturalist.org/photos/26129556>
- CONABIO, 2022. Listado taxonómico de especies prioritarias para México. CONABIO. www.conabio.gob.mx. México.
- CONABIO. (2025). Charal de Santiago (Chirostoma riojai). <https://enciclovida.mx/especies/30855>
- CONAGUA. (2024). Indicadores de Calidad del Agua | Comisión Nacional del Agua | Gobierno | gob.mx. <https://www.gob.mx/conagua/articulos/indicadores-de-calidad-del-agua>
- CONAGUA. (2025). Indicadores de Calidad del Agua | Comisión Nacional del Agua | Gobierno | gob.mx. <https://www.gob.mx/conagua/articulos/indicadores-de-calidad-del-agua>
- De la Lanza Espino, G., Hernández Pulido, S., & Carvajal Pérez, J. L. (2011). Organismos indicadores de la calidad del agua y de la contaminación (bioindicadores). UNAM / Plaza y Valdés. https://books.google.com.mx/books?id=DfXiBOYXb98C&pg=PA7&hl=es&source=gsb_to_c_r&cad=2#v=onepage&q&f=false
- Diario Oficial de la Federación, 2017. Plan Nacional de Desarrollo 2012-2018. México. pp. 20-150.en ambientes con bajo oxígeno. Hidrobiológica, 27(1), 55–67.
- Everson, M. K., Graya, N. L., Jones, G. A., Lawrence, M. L., Foley E. M., Sovacool, L. K., Kratovil, D. J., Hotaling, S., Hime, M. P., Storfer, A., Olea, P. G., Daniel, P. R., Aguilar-Miguel H., O'Neill, M. E., Zambrano, L., Shaffer, B. H., Weisrock, W. D., (2021). Geography is more important than life history in the recent diversification of the tiger

salamander complex. Rev. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Vol. 118 No. 17 (pp. 1-10).

- FAO. (2022). FAO's Global Information System on Water and Agriculture. <https://www.fao.org/home/search/es?q=agua+en+mexico>
- Ferreira, V., Bini, L. M., González Sagrario, M. de los Á., Kovalenko, K. E., Naselli-Flores, L., Padial, A. A., & Padišák, J. (2023). Aquatic ecosystem services: an overview of the Special Issue. *Hydrobiologia*, 850(12–13), 2473–2483. <https://doi.org/10.1007/S10750-023-05235-1/TABLES/2>
- García-Galano, T., & Chávez-Sánchez, C. (2018). Respuestas fisiológicas y moleculares de peces nativos mexicanos ante el estrés ambiental. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 89(3), 780–792. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2018.3>.
- Godínez-Domínguez, E., & González-Sansón. (2017). EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN ECOLÓGICA DEL RÍO ZAHUAPAN [Artículo]. Redalyc. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.01.01>
- Gómez-Hernández, E., Hoffman, T., Kutter, C., Uh-Ramos, D., Leal, D., Estrella-Gómez, N., Trejo, K., Fuentes, I., Carrillo-Niquete, G., Fuentes-Ortiz, G., & Santamaría, J. M. (2023, diciembre 7). *Salvinia minima* Baker: un helecho acuático con capacidad para fitorremediar cuerpos de agua contaminados por metales. Desde el Herbario, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. http://www.cicy.mx/sitios/desde_herbario/
- Heredia-Bobadilla R., Sunny A., (2021)., Análisis de la categoría de riesgo de los ajolotes de arroyos de alta montaña (Caudata: Ambystoma). *Acta Zoología Mexicana*, Vol 37, pp. 1-19.
- Hernández-Quiroz M., Hernández Soto J., Rojo-Callejas F., Robles-Mendoza C., Vanegas-Pérez C., Ponce de León-Hill C., (2013). Extracción asistida por microondas y limpieza en fase sólida como método de análisis para la determinación de plaguicidas organofosforados en *Ambystoma mexicanum*. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 29 (2). pp. 189-200.

- Hincapié, M., Carbonell-Medina, B., Arenas-Gómez C., Delgado, JP. (2021)., *Ambystoma mexicanum*, un organismo modelo en biología del desarrollo y regeneración: experiencia colombiana. *Revistas UNAL. Acta Biológica Colombiana*, 27(1). pp. 113-126. IUCN. (2020). *Ambystoma maculatum*: IUCN SSC Amphibian Specialist Group. IUCN Red List of Threatened Species. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2022-1.RLTS.T59064A193224401.EN>
- IUCN. (2019, October 23). *Ambystoma granulosum*: IUCN SSC Amphibian Specialist Group. IUCN Red List of Threatened Species. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2020-2.RLTS.T59058A539739111.EN>
- Jüttner I., Carter C., Cox E.J., Ector L., Jones V., Kelly M.G., Kennedy B., Mann D.G., Turner J. A., Van de Vijver B., Wetzel C.E., Williams D.M. (2025) . *Freshwater Diatom Flora of Britain and Ireland*. *Amgueddfa Cymru - National Museum Wales*. Available online at <https://naturalhistory.museumwales.ac.uk/diatoms/browsespecies.php?-recid=2435>
- Krebs C. J. (2001). *Ecología: Estudio de la distribución y la abundancia*. 2da. Edición, Ed. Harla. México, pp. 15-50.
- Kumar, S., & Singh, R. (2020). Antioxidant defense mechanisms in microalgae under environmental stress. *Aquatic Botany*, 163, 103208. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2020.103208>
- Lamothe, A. R. 2001. *Guía Taxonómica de nemátodos y helmintos de importancia médica*. CECSA. México. pp. 20-60.
- López López, E. (2025). *La evaluación de la salud de los ecosistemas acuáticos mediante el uso de biomonitorio con macroinvertebrados acuáticos*. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. <https://scme.mx/la-evaluacion-de-la-salud-de-los-ecosistemas-acuaticos-mediante-el-uso-de-biomonitorio-con-macroinvertebrados-acuaticos/>

- 11
 • López-López, E., Heck, V., Sedeño-Díaz, J. E., Gröger, M., & Rodríguez-Romero, A. J. (2023). A comparing vision of the lakes of the basin of Mexico: from the first physicochemical evaluation of Alexander von Humboldt to the current condition. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1217343.
- 15
 • Marchenko, A. M., & Kuzovkina, Y. A. (2023). The Ovule Number Variation Provides New Insights into Taxa Delimitation in Willows (*Salix* subgen. *Salix*; Salicaceae). *Plants*, 12(3), 497. <https://doi.org/10.3390/PLANTS12030497>
- Martínez, M., & Ramírez, P. (2017). Estrategias adaptativas de macroinvertebrados acuáticos
- 6
 • Martínez-Silva, P. (2015). Variación espacio-temporal de microalgas acuáticas del embalse de Betania – Huila y su relación con la calidad del agua. *Intrópica*, 10(1), 11–19.
- Matt, W., & Whiles, M. (2010). *Freshwater Ecology* (2nd ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-01718-8>
- Méndez, F., Helios, A., De La Vega Pérez, D., Hugo, V., & Arcos, J. (2009). Diversidad biológica e inventarios Herpetofauna. 243–260.
- Miller, R. R., Minckley, W. L., & Norris, S. M. (2009). *Peces dulceacuícolas de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- 12
 • Montes de Oca-Jimenez R., Pérez-Rodríguez J. E., Rodríguez- Domínguez M. C.(2022). Niveles de plomo en suelo, pasto y agua en localidades cercanas al río Lerma, del Estado de México, dedicada a la ganadería. *Terra Latinoamericana*, 40.
- Montes de Oca-Jiménez, R., Pérez-Rodríguez, J. E., & Rodríguez-Domínguez, M. C.
- Montoya G. M.F., Alcántara V. A. E., Tejocote P. M., 2023. La influencia de las interacciones biológicas con la contaminación de los sistemas acuáticos. *Diotima, Revista Científica de Estudios Transdisciplinaria* ISSN: 2448-549. Vol. 8. Núm. 23 pp: 1-16.

- Newton, A., Mistri, M., Pérez-Ruzafa, A., & Reizopoulou, S. (2023). Editorial: Ecosystem services, biodiversity, and water quality in transitional ecosystems. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11, 1136750. <https://doi.org/10.3389/FEVO.2023.1136750/BIBTEX>
- Ramírez-Macal, D.A., Conzuelo-Sierra, M.R., Salazar-de Santiago, A., Chávez-Ríos, A., De Velasco-Reyes, I., Díaz, J.M., 2022. Descripción Morfométrica de la Anatomía Externa e Interna del *Ambystoma mexicanum*. *Int. Jour. Morphol.* 40(2). pp. 401-406.
- Robles-Mendoza, C., C. E. García-Basilio and R. L. Vanegas-Pérez. (2009). Maintenance media for the axolotl *Ambystoma mexicanum* juveniles (Amphibia: Caudata). *Hidrobiológica* 19 (3). pp. 205-210.
- Rodiles-Hernández, R., Hendrickson, D. A., Lundberg, J. G., & Humphries, J. M. (2005). *Lacantunia enigmatica* (Teleostei: Siluriformes), a new phylogenetically puzzling freshwater fish from Mesoamerica. *Zootaxa*, 1000, 1–24.
- Rodríguez Guerrero, A. D., & Blasquez Martínez, L. I. (2024). Análisis socioespacial de las Ciénegas del Lerma: caracterización para el diseño de políticas públicas ambientales. *Revista cartográfica*, (109), 99-119.
- Rueda, A. R. (2022). Introducción a la seguridad hídrica. En Instituto Mexicano de Tecnología del Agua eBooks.
- Ruiz-Toro J., Vélez- Macias F., Caicedo-Quintero O, Aguirre-Ramírez N., (2016). Modelación espacial de la calidad del agua en el río Tapartó, municipio de Andes, Antioquia, Colombia. *MUTIS Journal of the Faculty of Sciences and Engineering*. Vol. 6 (1), pp. 16-27.
- Saez, L., Garcia, S., Fàbregas, E., Riera, M., & Molino, S. (2025). *Salvinia minima* (Salviniaceae) a new non-native species for the Iberian Peninsula. *Acta Botanica Malacitana*, 50, 21160. <https://doi.org/10.24310/abm.50.2025.21160>

- Salgado-Maldonado, G., & Pineda-López, R. F. (2003). The Asian fish tapeworm *Bothriocephalus acheilognathi*: A potential threat to native freshwater fish species in Mexico. *Biological Invasions*, 5, 261–268.
- Sánchez, J. A., Álvarez, T., Pacheco, J. G., Carrillo, L., González, R. A. (2016). Calidad del agua subterránea: acuífero sur de Quintana Roo, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 4(7). pp.75-96.
- Sánchez-Sánchez, A., Tejocote-Pérez, M., Fuentes-Rivas, R.M., Linares-Hernández, I., Martínez-Miranda, V., Fonseca-Montes de Oca, R.M.G. 2018. Treatment of a Textile Effluent by Electrochemical Oxidation and Coupled System Electrooxidation–Salix babylonica. *International Journal of Photoenergy*. 2018 (1). pp. 12-25.
- Santos-Barrera, G., & Flores-Villela, O. (2011). Anfibios de México: diversidad, biología y conservación. UNAM.
- SEMARNAT. (2015). Atlas Digital Geográfico. https://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/agua.html?utm_source=chatgpt.com
- Silis-Cano, J.A., Tejocote-Pérez, M., Alcántara-Valladolid, A.E., Barrera-Díaz, C.E. 2020. Desalination and Water Treatment Runoff water treatment with high organic matter load through a scalable prototype electrocoagulation system with a rotary axis design. *Des. And Water Treat.* 195(1):148-153.
- Sosa Rodríguez, F. S., Chaparro-Herrera, D. J., Vazquez-Arenas, J., Arias, A. N., & Alva-Martínez, A. F. (2024). Construction of wetlands in La Piedad Lagoon: a strategy to mitigate climate change in Mexico. *Blue-Green Systems*, 6(1), 54-69.
- Tabernero, N. R., Chocobar Ponce, S., Prado, C., & Rosa, M. (2024). Fitorremediación con *Salvinia mínima* (Salviniaceae): Identificación de biomarcadores temporales durante la

remoción de Cr (VI). Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica, 59(3).

<https://doi.org/10.31055/1851.2372.v59.n3.44742>.

- Tejocote-Pérez, M. 2021. Primer Método microbiológico de aislamiento por microescala. Patente en solicitud. IMPI. MX/2019/001. México.
- Tejocote-Pérez, M., Alcántara-Valladolid, A.E., Barrera-Díaz, C.E., 2021. Recarga natural de camas de água por infiltração assistida com ectomicorrizas em florestas de Nevado de Toluca. Conservação e Meio Ambiente (pp.105-115).
- Tollefson, J. 2019. Humans are driving one million species to extinction. Nature, 569 (7755) pp. 171-180.
- Ulloa, M. 2015. Taxonomía de hongos inferiores, descripción e importancia. FCE. 2a. México. pp. 23-180.
- Vergara-Villadiego, J. C., Leones-Cerpa, J., Ojeda-Delgado, K., Tejada-Tovar, C., & Restrepo Mesa, J. F. (2024). Uso de bioindicadores para determinar la presencia de contaminantes en cuerpos de agua. Ing-NOVA, 3(2), 74-92. https://www.researchgate.net/publication/385873025_Uso_de_bioindicadores_para_determinar_la_presencia_de_contaminantes_en_cuerpos_de_agua.
- Wong-Argüelles, Cynthia, Carranza-Álvarez, Candy, Alonso-Castro, Angel J., & Ilizaliturri-Hernández, César A. (2021). In situ phytoremediation in Mexico: a review. Revista fitotecnia mexicana, 44(2), 133-142. Epub 09 de octubre de 2023. <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.2.133>
- Zambrano, L., Reidl, P.M., McKay, J., Griffiths, R., Shaffer, B., Flores-Villela, O., Parra-Olea, G. & Wake, D. (2010). «Ambystoma mexicanum». Lista Roja de especies amenazadas de la UICN 2015.4 (en inglés). ISSN 2307-8235

Zamudio K. R., Wieczorek A. M., (2007). Fine-scale spatial genetic structure and dispersal among spotted salamander (*Ambystoma maculatum*) breeding populations. *Molecular Ecology*. Vol. 16 (2). pp. 257-274.

Sobre los autores

Coordinadores

Patricia Balderas Hernández

Patricia Balderas Hernández es Doctora en Ciencias (Química Analítica) y la Maestría en Ciencias (Química Analítica) ambas por la Universidad Autónoma Metropolitana y la licenciatura en Química Farmacéutica Bióloga por la Universidad Nacional Autónoma de México. Se ha desempeñado como profesora durante 13 años en la Universidad Metropolitana a partir de 1994, del 2004 al 2006 prestó sus servicios profesionales en la Universidad Iberoamericana y desde el año 2006 es Profesora-Investigadora de la Universidad Autónoma del Estado de México, adscrita al CCIQS. Desde 2006 a la fecha es miembro del SNI Nivel 1 y cuenta con Perfil PRODEP. Sus líneas de investigación que ha desarrollado son: Tratamiento de Aguas Residuales, Electrodo modificado, Métodos de remediación de aguas contaminadas con metales, Producción de Bioetanol. Microescala y Química Verde en Química Analítica. Actualmente es Coordinadora del CCIQS UAEM-UNAM. Publicaciones recientes: Water Treatment by Microbial Fuel Cell (2025) y Waste expanded polystyrene/zinc ferrite nanoparticles films: degradation by visible light photocatalysis and use in composites with rice husk reinforcement (2025).

ORCID: 0000-0001-6214-6599

Scopus (si cuenta con él): 6506479802

Academia (si cuenta con él): Haga clic o pulse aquí para escribir texto.

Google Académico (si cuenta con él):

<https://scholar.google.com.mx/citations?user=uCtifokAAAAJ&hl=es>

Research Gate (si cuenta con él): https://www.researchgate.net/profile/Patricia_Balderas-Hernandez

Correo pbalderash@uaemex.mx

Boris Miguel López Rebollar

Boris Miguel López Rebollar es Ingeniero Civil, con maestría y doctorado en Ciencias del Agua, por parte de la UAEMex. Profesor-Investigador en el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) y de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex). Es investigador nacional SNII nivel 1 y con perfil deseable PRODEP. Sus líneas de investigación comprenden la modelación, simulación

numérica, mecánica de fluidos y sistemas energéticos sustentables. Integrante del cuerpo académico de Tecnodesarrollo en Ciencias del Agua desarrollando proyectos asociados con el área de Ingeniería y Tecnología. Es asesor de proyectos académicos de licenciatura y posgrado en el área de simulación de fluidos en sistemas avanzados. Sus últimas publicaciones del 2025 son: Micro-Hydropower Generation Using an Archimedes Screw: Parametric Performance Analysis with CFD y Rainwater treatment by solar galvanic system (Mg/Cu): effect of UV radiation on nitrate/ammonia removal and computational fluid dynamics modelling.

ORCID (si cuenta con él): <https://orcid.org/0000-0002-6914-0787>

Google Académico: <https://scholar.google.com/citations?user=cXSfuuUAAAAJ&hl=en>

Research Gate: <https://www.researchgate.net/profile/Boris-Lopez-Rebollar>

Correo: bmlopezr@uaemex.mx

Autores

Ana Elisa Alcántara Valladolid

Ana Elisa Alcántara Valladolid es candidata a Doctora en Ciencias Ambientales (UAEMéx). Cuenta con una Maestría en Ciencias Ambientales (UAEMéx) y la licenciatura de Ingeniero Químico por el Instituto Tecnológico de Toluca. Desde 2013 a la fecha se desempeña como Jefa del Laboratorio de Calidad del Agua del IITCA y como Profesora-Investigadora en la Universidad Autónoma del Estado de México, adscrita al Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA). Cuenta con Perfil PRODEP. Sus líneas de investigación que ha desarrollado son: Calidad del Agua, Tratamiento de Aguas Residuales. Publicaciones recientes: Carbamazepine degradation via solar Galvano Fenton treatment using Mg/Cu anode/cathode system (2024) y Eficiencia de los bioindicadores de toxicidad sobre contaminantes de aguas residuales industriales (2024).

ORCID: 0000-0002-5677-0739

19

Google Académico:

<https://scholar.google.com.mx/citations?user=bvnrW60AAAAJ&hl=es&authuser=1&oi=ao>

Research Gate: https://www.researchgate.net/profile/Ana-Alcantara-Valladolid?ev=hdr_xprf

Correo: aealcantarav@uaemex.mx

Moisés Tejocote Pérez

Moisés Tejocote Pérez es Biólogo con Maestría y Doctorado bajo Mención Honorífica en Ciencias Ambientales por la UAEMéx. y Posdoctorado en Ingeniería Ambiental por la UAM Azcapotzalco. SNII nivel 1 y con Perfil PRODEP, es Líder Internacional de Alto Impacto por la Int-GAL. Docente e Investigador adscrito al Centro de Investigación en Ciencias Biológicas Aplicadas de la Universidad Autónoma del Estado de México, autor de 11 artículos JCR, 4 libros especializados, 4 capítulos de libro, 1 patente en explotación y 2 marcas registradas en Biotecnología Ambiental y en Alimentos con enfoque en transferencia de conocimiento a productores y empresas del Estado de México, a través de la innovación y desarrollo de prototipos alimentarios Termodeshidratados en 16 municipios del Estado de México, 5 estados del país, 20 países a nivel internacional, la ONU, la NASA y la Agencia Espacial Mexicana. Sus últimas publicaciones de 2025 son: *Historical Geospatial Analysis of Socio-Environmental Conflicts in the Moor of the Duende Natural Park, Colombia, J. of Hunan University Nat. Sci.* y Elaboración del Sendechjo: bebida mazahua de maíz nativo en San Nicolás Guadalupe, Estado de México, *Estudios Sociales Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1149-0637>

Google Académico: <https://scholar.google.com/citations?user=U1pmtt4AAAAJ&hl=es>

Research Gate: https://www.researchgate.net/profile/Tejocote-Perez-Moises?ev=hdr_xprf

Correo: mtp@uaemex.mx

Tonantzin Díaz Alvarado

Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Cuenta con la maestría en Agroindustria Rural, Desarrollo Territorial y Turismo Agroalimentario y la licenciatura en Ingeniera Agrónoma Industrial de la Universidad Autónoma del Estado de México. Pertenece como miembro de la RedSIAL Americana. Su línea de investigación es bioquímica y biotecnología. Publicaciones recientes: artículo Could Mesquite (*Prosopis juliflora*) Help Control Gastrointestinal Parasites in Horses? (2025) y Use of soybean meal-based moxifloxacin pellets in equine nutrition and health (2025) de los cuales es coautora.

Correo: tona.tda@gmail.com

Research Gate: <https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Tonantzin-Diaz-Alvarado-2184538782>

Bioindicadores de los sistemas acuáticos mexiquenses

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	files.conagua.gob.mx Internet	408 palabras — 3%
2	www.researchgate.net Internet	340 palabras — 2%
3	www.gob.mx Internet	182 palabras — 1%
4	2fwww.redalyc.org Internet	151 palabras — 1%
5	www.scielo.org.mx Internet	82 palabras — 1%
6	revistas.unimagdalena.edu.co Internet	76 palabras — 1%
7	documents.mx Internet	70 palabras — < 1%
8	search.bvsalud.org Internet	70 palabras — < 1%
9	core.ac.uk Internet	67 palabras — < 1%
10	scholarsarchive.byu.edu Internet	47 palabras — < 1%
11	www.physik.uni-siegen.de Internet	40 palabras — < 1%
12	hdl.handle.net Internet	39 palabras — < 1%

13	Internet	39 palabras — < 1%
14	colposdigital.colpos.mx:8080 Internet	35 palabras — < 1%
15	www.mdpi.com Internet	33 palabras — < 1%
16	nanopdf.com Internet	30 palabras — < 1%
17	datospdf.com Internet	22 palabras — < 1%
18	ecosur.repositorioinstitucional.mx Internet	20 palabras — < 1%
19	comunicacion-cientifica.com Internet	19 palabras — < 1%
20	doaj.org Internet	19 palabras — < 1%
21	jonuns.com Internet	17 palabras — < 1%
22	elvalle.com.mx Internet	16 palabras — < 1%
23	es.mongabay.com Internet	16 palabras — < 1%
24	hidrobiologica.izt.uam.mx Internet	16 palabras — < 1%

EXCLUIR CITAS

ACTIVADO

EXCLUIR FUENTES

DESACTIVADO

EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA

ACTIVADO

EXCLUIR COINCIDENCIAS < 16 PALABRAS