



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

Facultad de Biología



PROGRAMA INSTITUCIONAL DE MAESTRÍA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

Evaluación de la calidad ambiental en sitios prioritarios para la conservación de la fauna íctica en el centro de México

Tesis que presenta:

Biol. Mirian Adilene Chávez Campos

Como requisito para obtener el grado de

Maestra en Ciencias Biológicas

Director de tesis: **Dr. Omar Domínguez Domínguez**

Co-Directora de tesis: **Dra. Arely Ramírez García**

Morelia, Michoacán, febrero de 2026

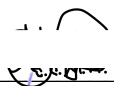


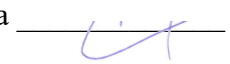
Declaración de originalidad

El presente documento es producto del trabajo original de investigación de Biol. Mirian Adilene Chávez Campos, estudiante del Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas y respetando siempre los más altos estándares éticos solicitados por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Todos los datos de la investigación reportada en el presente documento de tesis (excepto los indicados explícitamente en el texto) fueron obtenidos por Biol. Mirian Adilene Chávez Campos durante el periodo que fue estudiante de la Maestría en Ciencias Biológicas, bajo la Dirección del Dr. Omar Domínguez Domínguez y la Co-Dirección de la Dra. Arely Ramírez García.

Morelia, Mich., a 19 de febrero de 2026

Biol. Biol. Mirian Adilene Chávez Campos firma 

Dr. Omar Domínguez Domínguez firma 

Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas, UMSNH

Dedicatoria

Con profundo agradecimiento dedico este trabajo a mi madre, Juana Campos, por su apoyo constante e incondicional a lo largo de mi vida. Extiendo también esta dedicatoria a mi padre, mis hermanos, mis sobrinos y a mi pareja, quienes con su cariño y respaldo han sido pilares fundamentales en este camino.



“La igualdad no significa que todos seamos idénticos, sino que todos tengamos las mismas oportunidades.” – Paulo Freire, 1970.

Agradecimientos

- Al Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas de la Facultad de Biología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por brindarme el espacio académico para realizar este trabajo.
- A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo otorgado a través de la beca de maestría.
- Al Chester Zoo de Inglaterra, por su respaldo económico para llevar a cabo la investigación.
- A mi asesor, el Dr. Omar Domínguez, por su guía, enseñanza y las oportunidades que me ha brindado durante este camino, siempre tendré en cuenta todos sus consejos y recomendaciones, muchas gracias por las vivencias durante este proceso.
- A mi co-asesora, la Dra. Arely, por sus valiosos consejos y por ser también una amiga a quien quiero y respeto mucho; gracias por ser una inspiración y sobre todo muchas gracias por la buena disposición y esa ayuda que siempre me brindaste, además, gracias por permitirme ser parte de la vida de la Dra. Kir, quien con su alegría nos acompañó en los viajes de campo.
- Al Dr. Rodolfo Pérez, por sus consejos y acompañamiento como miembro de mi comité, siempre recordaré las vivencias de la salida de Durango.
- Al Dr. Salinas, por su apoyo y acompañamiento en este trabajo, además, por siempre darme buenos consejos para mejorar en mi desempeño académico y personal.
- Al Dr. Topiltzin, por sus enseñanzas y consejos, así como por la oportunidad de realizar una estancia de investigación en Cuernavaca, experiencia que me enriqueció profundamente, gracias por todo el apoyo otorgado.
- A Michael (Miguelito), amigo y jefe, gracias por la confianza y las enseñanzas, por creer en mi trabajo y por darme la oportunidad de representar a mi país en Europa, tengo muy gratos recuerdos.
- Al Dr. Ricardo Pérez, por transmitirme sus conocimientos sobre macroinvertebrados y ecosistemas acuáticos, fundamentales para mi trabajo, por la paciencia y disponibilidad que siempre tuvo conmigo.
- Al Dr. Lyons, por su apoyo en el análisis de resultados y por todo lo que me ha enseñado, sobre la importancia de los peces en los ecosistemas acuáticos.

- Al Dr. David, por la oportunidad de aprender más sobre parásitos de peces y que no todos son malos, además de las vivencias personales en las salidas de campo.

- A la Dra. Gabriela Beltrán, por su confianza para participar en el proyecto de Balsas y realizar colectas en la tierra que me vio crecer.

- A la Dra. Ivette, por su enseñanza y apoyo en el trabajo de calidad del agua, gracias por la disponibilidad y orientación que fue de mucha ayuda.

- Al Dr. Apolinar, de Ingeniería Química, por permitirme asistir como oyente a sus clases y aprender más sobre la química del agua, además de haber conocido a una gran amiga en ese espacio.

- Gracias especiales a mis queridas amigas Candy y Jimena, pilares de este trabajo y hermanas de vida, por su compañía y apoyo constante, todas las vivencias de este proceso las llevo siempre en el corazón, gracias por ser tan grandiosas personas tan humanas y empáticas, las quiero mucho.

- Gracias a Cedric y Dereck además de su ayuda incondicional en el trabajo de campo, siempre recibí enseñanzas de ustedes, gracias por el acompañamiento.

- A mis compañeros de laboratorio Aide, Diana, Malu, por su ayuda incondicional en los muestreos de campo.

- A l@s estudiantes de servicio social, Julisa, Talmai, Fer, Julia... por su apoyo en la limpieza de macroinvertebrados, y al colega Beto, por su ayuda en la identificación.

- A mi amiga Montse, en Teuchitlán, por su apoyo incondicional y su deliciosa comida, muchas gracias.

- A mi amiga Pita, por su apoyo durante mi estancia de investigación y por recibirme en su casa con tanto cariño, eres una gran mujer Pita.

- A la asociación civil guardianes del río Teuchitlán, por siempre recibarnos con los brazos abiertos.

- Gracias a los encargados de los sitios de muestreo por su disponibilidad para dejarnos muestrear.

- Un agradecimiento muy especial a mi madre, Juana Campos, por su amor y apoyo incondicional, eres mi ejemplo a seguir, la mujer más valiente que conozco.

- A mi familia, por estar siempre conmigo, apoyarme y consentirme incluso a la distancia, los quiero mucho.

- A mi pareja, Alexander, por su compañía, consejos y apoyo en los momentos difíciles, por cuidar de nuestros gatos y preocuparse siempre por mí, por siempre acompañarme en cada paso que doy, no pude haber elegido una mejor persona para compartir mi vida, te amo.

- A mis gatitos, Lissy y Darcy, por su compañía y cariño durante la escritura de este trabajo.

- Y finalmente, a mí misma, por no rendirme y creer que este sueño era posible.

Contenido

Introducción.....	1
Justificación	3
Hipótesis:.....	5
Objetivos.....	6
Objetivo general:.....	6
Objetivos particulares:	6
Materiales y métodos:.....	7
Sitios de muestreo	7
Trabajo de campo.....	11
Identificación de amenazas directas en cada sitio	12
Valoración de la Calidad Ambiental Visual (VCAV)	12
Variables fisicoquímicas del agua	13
Colecta de macroinvertebrados:	14
Colecta de peces:.....	14
Análisis de datos:	15
Nivel de amenaza en cada sitio	15
VCAV en ríos y arroyos	16
VCAV en manantiales y presas	16
Índice de Calidad de Agua	16
Índice de Integridad Biótica Basado en las Comunidades de	17
Macroinvertebrados Acuáticos (IIBAMA)	17
Índice de integridad biótica (IBI)	18
ANOVA.....	20
Índice compuesto para la categorización de sitios de conservación y restauración, basado en las especies de peces presentes.....	20
Análisis de Correspondencia Múltiple (MCA)	22
Resultados.....	24
Sitio Zacapu	24
Sitio La Mintzita	28
Sitio Rancho el Molino	31

Sitio La Luz	33
Sitio Opopéo	35
Sitio Tocombo	37
Sitio Teuchitlán	40
Sitio San Sebastián.....	45
Sitio Palo Verde	47
Sitio Potrero grande	49
ANOVA	51
Índice compuesto para la priorización de sitios de conservación y restauración, basado en las especies de peces presentes.	51
Análisis de correspondencia múltiple (MCA)	52
Recomendaciones de conservación y restauración en cada uno de los sitios	54
Discusión	62
Amenazas a los ecosistemas acuáticos, presión humana y modificación de hábitats ribereños.....	62
Contaminación del agua.....	64
Especies exóticas y parasitismo en ecosistemas dulceacuícolas	65
Posibilidades de conservación y restauración de sitios dulceacuícolas en el centro de México	65
Conclusiones.....	68
Recomendaciones	69
Literatura citada:.....	70
Anexos	76

Índice de tablas

Tabla 1.- Sitios de muestreo	7
Tabla 2.- Subdivisión de los sitios de muestreo	11
Tabla 3.- Variables de respuesta al ambientes y división de categorías	17
Tabla 4.- Categorías y su interpretación de acuerdo a los resultados del IBI.....	19
Tabla 5.- Cálculo de proporciones:.....	21

Tabla 6.- Significancia de las categorías de prioridad de conservación de acuerdo a las especies de peces	22
Tabla 7.- Riqueza de especies de peces en cada sitio, de donde SD=sin datos.	24
Tabla 10.- Índice compuesto para la priorización de sitios de conservación, basado en las especies de peces presentes	51
Tabla 11.- Recomendaciones de actividades de conservación y restauración de acuerdo a las problemáticas ambientales de cada sitio.....	54

Índice de Figuras

Figura. 1.- Localización de los diez sitios de muestreo en cuerpos de agua del centro de México..	11
Figura 2.- Puntos de muestreo en el sitio Zacapu.....	25
Figura 3.- <i>H. turneri</i> en el manantial La Angostura	26
Figura 4.- <i>C. humboldtianum</i> del lago de Zacapu	27
Figura 5.- Puntos de muestreo en el sitio La Mintzita.....	29
Figura 6.- <i>A. diazi</i> en el sitio Rancho el Molino.....	32
Figura 7.- <i>S. multipunctata</i> en el manantial La Luz	34
Figura 8.- Sitio Opopéo en el municipio de Salvador Escalante, Michoacán.	36
Figura 9.- <i>I. whitei</i> en el manantial de Tocumbo.	39
Figura 10.- Resultados de los diferentes índices para los sitios de Michoacán.	40
Figura 11.- Puntos de muestreo en el sitio Teuchitlán.....	41
Figura 12.- Punto la compuerta en el sitio Teuchitlán.....	43
Figura 13.- <i>A.splendens</i> en el punto del manantial en Teuchitlán.	45
Figura 14.- Sitio San Sebastián	46
Figura 15.- <i>A. maculata</i> en el sitio Palo Verde	48
Figura 16.- Arroyo Potrero Grande en Jalisco.....	50
Figura 17.- Resultados anuales de los diferentes índices aplicados de los sitios de Jalisco....	50
Figura 18.- Resultados del análisis de correspondencia múltiple (MCA).	53
Figura 19.- Dendrograma de similitud entre sitios evaluados.	53

RESUMEN

En el centro de México, los ecosistemas dulceacuícolas enfrentan un proceso acelerado de degradación asociado a múltiples presiones antrópicas, particularmente a la descarga de contaminantes que comprometen la calidad del agua, la integridad del hábitat, la dinámica poblacional y persistencia a largo plazo de las comunidades ícticas, afectando especialmente a las especies endémicas con distribución restringida. Como respuesta a este escenario, se implementó el “Plan G”, una estrategia integral orientada a la conservación de los peces de la subfamilia Goodeinae. A partir de la presencia de especies claves de Goodeinos, se delimitaron 20 sitios prioritarios para su protección y manejo. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la calidad ambiental en diez de estos sistemas prioritarios. En el estado de Michoacán se incluyeron: Zacapu (manantial, lago y río), La Mintzita (manantial y arroyo), Rancho el molino (manantial), La Luz (manantial y presa), Opopéo (manantial) y Tocumbo (manantial y arroyo). En Jalisco se seleccionaron: Teuchitlán (río y manantial), San Sebastián (manantial), Palo Verde (presa) y Potrero Grande (arroyo). Se realizó un muestreo durante la temporada de lluvias (2024) y la temporada de secas (2025). Se colectaron muestras de agua, peces y macroinvertebrados, y las amenazas fueron registradas mediante observación directa en cada sitio. Además, se calculó el índice de la Valoración de la Calidad Ambiental Visual (VCAV). Para los datos fisicoquímicos del agua se aplicó el Índice de Calidad del Agua (ICA), mientras que para los datos biológicos (peces y macroinvertebrados acuáticos) se emplearon dos índices: el Índice de Integridad Biótica basado en Peces (IBI) y el Índice de Integridad Biótica basado en Macroinvertebrados Acuáticos (IIBAMA). De los diez sitios muestreados uno se encontró totalmente seco (Potrero Grande) por lo que se muestran resultados para nueve sitios. Los resultados revelan que las principales amenazas en los diez sitios evaluados incluyen la urbanización, las actividades recreativas, la presencia de especies exóticas y las alteraciones en la calidad y disponibilidad del agua, asociadas tanto a la contaminación como a la extracción hídrica. De acuerdo con la VCAV, los ríos y arroyos presentan una condición pobre, mientras que los manantiales y presas se clasifican en condición marginal o subóptima. El ICA indicó una calidad del agua aceptable en seis sitios (Zacapu, La Mintzita, Rancho El Molino, La Luz, Opopéo y Tocumbo), baja contaminación en dos sitios (San Sebastián y Teuchitlán) y calidad deficiente en un sitio (Palo Verde). En cuanto al IBI, la integridad biótica fue buena en tres sitios (Zacapu, Rancho el Molino y La Luz), regular en cinco (La Mintzita, Tocumbo, San Sebastián,

Teuchitlán y Palo Verde) y mala en uno (Opopéo). Por su parte, el IIBAMA clasificó todos los sitios dentro de la categoría de integridad pobre o regular. Aunque la calidad del agua resulta aceptable en la mayoría de los sitios, los indicadores biológicos evidencian un deterioro de las comunidades acuáticas. En consecuencia, se recomienda diseñar estrategias de conservación específicas para cada sitio, orientadas a mitigar sus amenazas particulares y priorizar la protección de las especies nativas.

Palabras clave: Plan G, Integridad biótica, Especies nativas, Degradación, Conservación.

ABSTRACT

In central Mexico, freshwater ecosystems are undergoing an accelerated process of degradation associated with multiple anthropogenic pressures, particularly the discharge of pollutants that compromise water quality, habitat integrity, population dynamics, and the long-term persistence of fish communities. These impacts disproportionately affect endemic species with restricted distributions. In response to this scenario, “Plan G” was implemented as a comprehensive conservation strategy focused on fish species of the family Goodeidae. Based on the presence of key goodeine species, 20 priority sites were identified for protection and management. Within this framework, the objective of the present study was to evaluate the environmental quality of ten of these priority freshwater systems. In the state of Michoacán, the selected sites were: Zacapu (spring, lake, and river), La Mintzita (spring and stream), Rancho El Molino (spring), La Luz (spring and reservoir), Opopéo (spring), and Tocumbo (spring and stream). In Jalisco, the selected sites were: Teuchitlán (river and spring), San Sebastián (spring), Palo Verde (reservoir), and Potrero Grande (stream). Sampling was conducted during the rainy season (2024) and the dry season (2025). Water, fish, and macroinvertebrate samples were collected, and threats were recorded through direct field observation at each site. In addition, the Visual Environmental Quality Assessment Index (VCAV) was calculated. For physicochemical water data, the Water Quality Index (ICA) was applied, while two biological indices were used for fish and aquatic macroinvertebrates: the Fish-based Index of Biotic Integrity (IBI) and the Aquatic Macroinvertebrate-based Index of Biotic Integrity (IIBAMA). The results indicate that the main threats across the ten evaluated sites include urbanization, recreational activities, the presence of exotic species, and alterations in water quality and availability associated with both pollution and water extraction. According to the VCAV, rivers and streams exhibited poor environmental conditions, whereas springs and reservoirs were classified as marginal or suboptimal. The ICA indicated acceptable water quality at six sites (Zacapu, La Mintzita, Rancho El Molino, La Luz, Opopéo, and Tocumbo), low contamination at two sites (San Sebastián and Teuchitlán), and poor water quality at one site (Palo Verde). Regarding the IBI, biotic integrity was rated as good at three sites (Zacapu, Rancho El Molino, and La Luz), fair at five sites (La Mintzita, Tocumbo, San Sebastián, Teuchitlán, and Palo Verde), and poor at one site (Opopéo). The IIBAMA classified all sites within the poor or fair integrity categories. Although physicochemical water quality was acceptable at most sites, biological indicators

revealed deterioration in the structure and composition of aquatic communities. Consequently, site-specific conservation strategies are recommended, aimed at mitigating local threats and prioritizing the protection of native species.

Keywords: Plan G, Biotic integrity, Native species, Degradation, Conservation.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas acuáticos enfrentan un momento crítico debido a la intensa degradación ambiental, la cual es impulsada por factores humanos como la urbanización y la contaminación industrial y agrícola (Best, 2018). En la zona central de México, estos impactos son especialmente severos (Domínguez-Domínguez et al., 2008; Lyons et al., 2019), y los cuerpos de agua sufren pérdida de hábitat, contaminación y eutrofización. Estas condiciones deterioran significativamente la calidad del agua, un problema reconocido a nivel mundial (Abbasi y Abbasi, 2012). Además, la extracción excesiva de aguas superficiales y subterráneas ha provocado una disminución constante del caudal (SEMARNAT, 2019). Evaluar la calidad del hábitat es esencial para mantener la integridad ecológica de los ecosistemas acuáticos, y este proceso debe combinarse con el muestreo biológico, ya que la alteración del hábitat es un factor crítico de estrés para estos sistemas (Barbour et al., 1999).

El estudio de la calidad ambiental en cuerpos de agua requiere un enfoque sistemático y un lenguaje común para describir y analizar los diversos factores que afectan estos ecosistemas. Para abordar esta necesidad, desde hace varios años se ha intentado clasificar las amenazas más comunes en diferentes cuerpos de agua. Salafsky et al. (2024) proponen una clasificación unificada de amenazas y acciones de conservación, esencial para identificar y abordar los problemas ambientales de manera eficiente. Por otro lado, para la evaluación de la calidad ambiental en cuerpos de agua dulce, en 2023 se adaptó el protocolo estadounidense (EPA) para ríos y arroyos en México, con el objetivo de evaluar el estado ambiental de estos cuerpos de agua. Este método incluye la evaluación de condiciones ribereñas, sustratos disponibles y el estado de conservación de los caudales, proporcionando una perspectiva clara de la calidad ambiental visual de un cuerpo de agua (Pérez-Munguía, 2023).

La vegetación y la diversidad de sustratos en los cuerpos de agua ofrecen hábitats para diferentes grupos, como los macroinvertebrados acuáticos. Por lo que el uso de índices bióticos, como el monitoreo de macroinvertebrados acuáticos, ha demostrado ser eficaz para medir el nivel de perturbación en cuerpos de agua dulce (Daly et al., 2018). Estas métricas son especialmente útiles en áreas perturbadas, ofreciendo una alternativa rápida, confiable y de bajo costo (Roldán-Pérez, 2016). En combinación con este tipo de análisis, en México también se ha implementado el uso de índices de calidad del agua, que miden la contaminación a través de diferentes variables

físicas, químicas y biológicas (SEMARNAT, 2007; Valdés-Basto, 2011). Este índice se basa principalmente en parámetros fisicoquímicos como el pH, DQO, nitratos, fósforo total, SDT y turbidez; dentro de los parámetros biológicos se incluyen las coliformes totales y fecales (Valdés-Basto, 2011). En los cuerpos de agua dulce de México, el ICA puede verse influenciado por diversos factores de carácter puntual o transitorio (Martínez-Paz, 2023), tales como descargas de aguas residuales, y vertidos de origen industrial o agropecuario. Estos aportes no solo deterioran la calidad físico-química del agua, sino que también generan efectos directos sobre la ictiofauna, comprometiendo su salud, estructura poblacional y viabilidad ecológica.

La implementación de un Índice de Integridad Biótica (IBI) basado en la comunidad de peces en México ha sido fundamental para evaluar la salud de los ecosistemas acuáticos, debido a que las actividades humanas, como la introducción de especies exóticas, afectan de manera significativa a las comunidades de peces. Las especies exóticas, debido a su mayor tolerancia a la degradación ambiental, desplazan a las especies nativas, impactando negativamente la biodiversidad acuática (Paller et al., 2016). En 1995 desarrollaron un IBI específico para ríos y arroyos del centro-oeste de México, adaptando un índice creado originalmente para ríos estadounidenses. Este índice considera diferentes métricas, incluyendo la presencia de especies nativas, exóticas y parásitos (Lyons et al., 1995). Posteriormente, en 2003, Medina-Nava adaptó el IBI para la cuenca Lerma-Chapala, introduciendo métricas específicas para sistemas lénticos y lóticos, y años después Ramírez-Herrejón et al. (2012) validó el uso del IBI en la subcuenca del río Angulo, demostrando una fuerte relación entre la calidad ambiental y los resultados del IBI en sistemas lénticos. Estos trabajos concluyen que los sitios con mejor calidad ambiental presentaban una mejor integridad biótica en los peces de acuerdo con el IBI, por lo tanto, este índice se ha consolidado como una herramienta esencial para evaluar la calidad ambiental de los ecosistemas acuáticos basándose en la salud de las comunidades de peces, con lo cual se pueden priorizar necesidades de protección y restauración.

En los cuerpos de agua dulce de México se estima que existen unas 520 especies de peces, de las cuales 163 son endémicas del país. La subfamilia Goodeinae, endémica de esta región, incluye aproximadamente 40 especies vivíparas, algunas de las cuales están declaradas extintas en la naturaleza y la mayoría se encuentran en alguna categoría de riesgo (SEMARNAT, 2010; Lyons et al., 2020). Para asegurar su supervivencia a largo plazo, es esencial proponer

alternativas de conservación de su hábitat de manera urgente. Muchas de las poblaciones viables de goodeinos que aún existen se encuentran en manantiales o lagos, lo que resalta la importancia de desarrollar estrategias de conservación específicas para estos cuerpos de agua (Lyons et al., 2019).

Con el propósito de establecer acciones de conservación para las especies de peces nativos y endémicos de México, en 2023 se presentó un plan dirigido a la protección de los goodeinos. Este plan, sustentado en la distribución, endemidad y estatus de conservación de los peces de la subfamilia Goodeinae, identificó 20 sitios prioritarios en el centro del país, los cuales concentran gran parte de su riqueza (Bamford et al., 2023). No obstante, la información disponible sobre la calidad ambiental de estos sitios y su viabilidad para la conservación, restauración y protección sigue siendo limitada. En consecuencia, resulta indispensable una evaluación profunda, por lo que en este trabajo se realizó una descripción detallada del estado de conservación de diez de los 20 sitios propuestos en el Plan G desde una perspectiva integral, que permita dimensionar sus posibilidades reales de conservación y manejo. Para ello, se aplicaron múltiples índices ecológicos y ambientales, como el ICA, el IIBAMA, el IBI y el VCAV, que, en conjunto, permiten evaluar distintos aspectos de la calidad ambiental, los cuales son complementarios: calidad físico-química del agua, integridad biótica, composición de macroinvertebrados y presión antrópica. Esta combinación de metodologías tiene como objetivo proporcionar una comprensión completa y sólida del estado actual de cada sitio, facilitando la toma de decisiones en materia de conservación.

Justificación

En el centro de México, donde vive el 70% de la población humana del país, sólo se dispone del 20% del agua superficial (Domínguez-Domínguez et al., 2008; Sotelo-Núñez, 2023). Esta situación ha llevado a un deterioro de los recursos hídricos por la contaminación y la destrucción del hábitat. Aunque los ecosistemas acuáticos pueden recuperarse de cambios moderados, superar ciertos límites dificulta que el ecosistema afectado vuelva a su estado natural y estable. El resultado de estos disturbios es una reducción significativa de la biodiversidad acuática (Best, 2018).

De las aproximadamente 100 especies de peces que habitan el centro de México, el 70% son endémicas y la subfamilia Goodeinae destaca como una de las más emblemáticas de la región.

Sin embargo, la mayoría de sus 40 especies están categorizadas como en peligro crítico (CR) o en peligro (EN), y algunas ya están extintas de acuerdo con la UICN (Lyons et al., 2019). La naturaleza microendémica de muchas de sus especies las hace aún más vulnerables a la extinción, y sus estrategias reproductivas y adaptaciones únicas las distinguen desde una perspectiva evolutiva (De la Vega-Salazar, 2006; Ramírez-Herrejón et al., 2012).

En la zona central de México se han identificado diez sitios prioritarios para la conservación debido a la presencia de especies de goodeinos en peligro de extinción y considerando su endemismo (Bamford et al., 2023). Sin embargo, hay una carencia significativa de información acerca de la situación del hábitat y el nivel de degradación de los sitios donde habitan, así como de sus posibilidades de conservación, restauración o preservación. La problemática ambiental en los cuerpos de agua de esta región es compleja y heterogénea: las amenazas varían entre sitios y dependen de múltiples factores físicos, biológicos y humanos (Domínguez-Domínguez et al., 2008; Lyons et al., 2019). Por ello, se requiere una evaluación integral que considere no solo la biodiversidad presente, sino también la calidad ambiental y la presión antrópica.

La implementación de un protocolo estándar, como el propuesto por Salafsky et al. (2024), establece una base esencial para desarrollar un lenguaje común aplicable a la conservación de la biodiversidad. Una clasificación unificada de amenazas y acciones de conservación es crucial para identificar y abordar de manera eficiente los problemas ambientales. Además, la aplicación de diversos índices ecológicos y ambientales como el ICA, IIBAMA, IBI y VCAV permite caracterizar de forma complementaria el estado de los ecosistemas dulceacuícolas. Con ello, se busca contribuir a los esfuerzos de mejora y conservación de los sistemas de agua dulce y sus recursos ictiofaunísticos en la zona central de México, proporcionando una base sólida para futuras medidas de restauración, conservación y protección.

HIPÓTESIS

La calidad ambiental de los sistemas dulceacuícolas del centro de México determina la integridad ecológica de sus comunidades acuáticas; por ello, los sitios con mejores condiciones fisicoquímicas, mayor integridad biótica y menor nivel de amenaza presentarán mayor riqueza de macroinvertebrados intolerantes, mayor diversidad de peces nativos y mayor presencia de especies de peces endémicas sensibles, particularmente de la subfamilia Goodeinae.

OBJETIVOS

Objetivo general:

Evaluar integralmente la calidad ambiental de diez sitios dulceacuícolas del centro de México mediante la aplicación de índices ambientales cuantitativos y cualitativos, así como la implementación de un protocolo estandarizado para la identificación, categorización y jerarquización de amenazas, con el fin de generar un diagnóstico comparativo robusto que sustente estrategias de manejo y conservación.

Objetivos particulares:

- » Evaluar la riqueza de especies ícticas en diez cuerpos dulceacuícolas en el centro de México.
- » Evaluar la calidad del agua en diez cuerpos de agua del centro de México mediante el Índice de Calidad del Agua (ICA) y determinar la integridad biótica considerando las comunidades de peces y macroinvertebrados acuáticos.
- » Comparar la calidad ambiental entre los diez cuerpos dulceacuícolas en el centro de México.
- » Analizar si la calidad ambiental influye en la riqueza de especies nativas de peces.
- » Realizar recomendaciones de conservación y restauración de acuerdo con los requerimientos de cada sitio de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios de muestreo

De los 20 sitios prioritarios propuestos en el Plan G (Bamford et al., 2023), se tomaron diez sitios (Tabla 1, Fig. 1), abarcando un lago, diferentes ríos, manantiales y presas, y procurando incluir la mayor diversidad de especies nativas de peces catalogadas en peligro de extinción.

Tabla 1.- Sitios de muestreo, de donde: EW; Extinta en estado silvestre, CR; En Peligro Crítico, EN; En Peligro, VU; Vulnerable, LC; Preocupación menor, DD; Datos Insuficientes, NE; No Evaluada.

Sitio	Descripción	Especies de peces presentes históricamente
Zacapu	El Lago de Zacapu se localiza dentro de la subcuenca del río Angulo, tributario de la Cuenca Lerma-Chapala en el municipio de Zacapu, Michoacán, México.	Familia Goodeidae: <i>Allotoca zacapuensis</i> (CR, endémica), <i>Allophorus robustus</i> (VU, nativa), <i>Goodea atripinnis</i> (LC, nativa), <i>Skiffia lermae</i> (EN, nativa), <i>Xenotoca variata</i> (LC, nativa), <i>Zoogoneticus quitzeoensis</i> (EN, nativa) y <i>Hubbsina turneri</i> (CR, endémica); Cyprinidae: <i>Notropis grandis</i> (EN, endemica), <i>Algansea tincella</i> (LC, nativa), <i>Cyprinus carpio</i> (exótica), <i>Ctenopharingodon idella</i> (exótica); Poeciliidae: <i>Poeciliopsis infans</i> (LC, nativa); Atherinopsidae: <i>Chirostoma humboldtianum</i> (VU, nativa) (Ramírez-García et al., 2022)
La Mintzita	La Mintzita se localiza al suroeste de la ciudad de Morelia, Michoacán, forma parte de la subcuenca del Lago de Cuitzeo, tributario de la Cuenca Lerma-Chapala en el Estado de Michoacán, México.	Familia Catostomidae: <i>Moxostoma austrinum</i> (DD, nativa); Cichlidae: <i>Oreochromis niloticus</i> (exótica); Cyprinidae: <i>Cyprinus carpio</i> (exótica), <i>Notropis calientis</i> (CR, nativa), <i>Yuriria alta</i> (EN, nativa), <i>Algansea tincella</i> (LC, nativa); Poeciliidae: <i>Poecilia reticulata</i> (LC, exótica), <i>Poeciliopsis infans</i> (LC, nativa), <i>Xiphophorus hellerii</i> (exótica), <i>Pseudoxiphophorus bimaculatus</i> (exótica);

		Goodeidae: <i>Allophorus robustus</i> (VU, nativa), <i>Allotoca dugesii</i> (EN, nativa), <i>Goodea atripinnis</i> (LC, nativa), <i>Hubbsina turneri</i> (CR, nativa), <i>Neotoca bilineata</i> (EN, nativa), <i>Skiffia lermæ</i> (EN, nativa), <i>Xenotoca variata</i> (LC, nativa), <i>Zoogoneticus quitzeoensis</i> (EN, nativa) (CPUM)
Rancho el molino	Ubicado en el municipio de Tzintzuntzan, Michoacán, perteneciente a la cuenca del Lago de Pátzcuaro.	Familia Goodeidae: <i>Skiffia lermæ</i> (EN, nativa), <i>Allotoca diazi</i> (CR, endémica), <i>Allotoca dugesii</i> (CR, endémica) <i>Goodea atripinnis</i> (LC, nativa), <i>Allophorus robustus</i> (VU, nativa); Cyprinidae: <i>Algansea lacustris</i> (CR, endémica); Atherinopsidae: <i>Chirostoma patzcuaro</i> (CR, endémica); Poeciliidae: <i>Poeciliopsis infans</i> (exótica) (CPUM)
La luz	Ubicado en el municipio de Jacona de Plancarte, Michoacán. Perteneciente a la subcuenca del río Duero.	Familia Catostomidae: <i>Moxostoma austrinum</i> (DD, nativa); Godeidae: <i>Chapalichthys encaustus</i> (VU, nativa), <i>Allophorus robustus</i> (VU, nativa), <i>Goodea atripinnis</i> (LC, nativa), <i>Zoogoneticus purhepechus</i> (VU, nativa), <i>Skiffia multipunctata</i> (EN, nativa); Poeciliidae: <i>Poecilia mexicana</i> (exótica), <i>Poeciliopsis infans</i> (LC, nativa), <i>Xiphophorus hellerii</i> (exótica) (CPUM)
Teuchitlán	El río Teuchitlán nace en los manantiales dentro del balneario “El Rincón” ubicado en el municipio de Teuchitlán, Jalisco, este río	Familia Goodeidae: <i>Ameca splendens</i> (CR, nativa), <i>Goodea atripinnis</i> (LC, nativa), <i>Zoogoneticus purhepechus</i> (VU, nativa), <i>Zoogoneticus tequila</i> (EN, endémica), <i>Skiffia francesae</i> (EW, nativa), <i>Xenotoca melanosoma</i>

	pertenece a la Cuenca del río Ameca.	(EN, nativa); Familia Cichlidae: <i>Oreochromis niloticus</i> (exótica), <i>Oreochromis aureus</i> (exótica); Familia Poeciliidae: <i>Poecilia sphenops</i> (exótica), <i>Poeciliopsis infans</i> (LC, nativa), <i>Pseudoxiphophorus bimaculatus</i> (exótica), <i>Xiphophorus hellerii</i> (exótica), <i>Xiphophorus maculatus</i> (exótica), <i>Poecilia reticulata</i> (exótica); Familia Ictaluridae: <i>Ictalurus dugesii</i> (nativa); Familia Leuciscidae: <i>Algansea amecae</i> (EN, nativo), <i>Notropis amecae</i> (EW), nativa), Yuriria amatlana (EN, nativa); Familia Cyprinidae: <i>Cyprinus carpio</i> (exótica) (CPUM)
San Sebastián	Ubicado cerca del municipio de Etzatlán, Jalisco, en el extremo este de la Hacienda San Sebastián. Es un manantial que se encuentra dentro de la cuenca del Río Ameca.	Familia Catostomidae: <i>Moxostoma austrinum</i> (DD, nativa); Cichlidae: <i>Oreochromis aureus</i> (exótica), <i>Oreochromis mossambicus</i> (exótica); Cyprinidae: <i>Algansea amecae</i> (EN, endémica); Goodeidae: <i>Allotoca maculata</i> (CR, endémica), <i>Goodea atripinnis</i> (LC, nativa), <i>Xenotoca doadrioi</i> (CR, endémica), <i>Xenotoca melanosoma</i> (EN, nativa); Poeciliidae: <i>Poeciliopsis infans</i> (LC, nativa), <i>Xiphophorus maculatus</i> (exótica), <i>Pseudoxiphophorus bimaculatus</i> (exótica) (CPUM)
Opopéo	Pequeño lago que se encuentra en la subcuenca del lago de Zirahuén, en la parte	Familia Atherinopsidae: <i>Chirostoma estor</i> (EN, nativa); Centrarchidae: <i>Micropterus salmoides</i> (exótica); Cichlidae: <i>Oreochromis mossambicus</i> (exótica); Goodeidae:

	alta de la comunidad de Opopeo, Michoacán.	<i>Allophorus robustus</i> (VU, nativa), <i>Allotoca dugesii</i> (EN, nativa), <i>Allotoca meeki</i> (CR, endémica), <i>Skiffia lermæ</i> (EN, nativa), <i>Goodea atripinnis</i> (LC, nativa); Poeciliidae <i>Poeciliopsis infans</i> (exótica) (CPUM)
Palo verde	Se encuentra en el municipio de Etzatlán, Jalisco, perteneciente a la cuenca del Ameca.	Familia Cichlidae: <i>Oreochromis aureus</i> (exótica); Goodeidae: <i>Allotoca maculata</i> (CR, endémica), <i>Xenotoca melanosoma</i> (EN, nativa); Poeciliidae: <i>Poeciliopsis infans</i> (LC, nativa) (CPUM)
Potrero grande	Arroyo Potrero Grande es un arroyo afluente del río Ameca, Jalisco, pertenece a la cuenca del Ameca.	Familia Goodeidae: <i>Allotoca goslinei</i> (EW, nativa), <i>Ilyodon furcidens</i> (LC, nativa), <i>Allodocdichthys polylepis</i> (NE, nativa); Catostomidae: <i>Moxostoma austrinum</i> (DD, nativa); Poeciliidae: <i>Xiphophorus hellerii</i> (exótica) (CPUM)
Tocumbo	Pequeño manantial conocido como “Ojo de agua” que se encuentra en el municipio de Tocumbo, Michoacán, pertenece a la Cuenca del Balsas.	Familia Atherinopsidae: <i>Chirostoma melanococcus</i> (CR, nativa); Cyprinidae: <i>Algansea tincella</i> (LC, nativa), <i>Carassius auratus</i> (exótica); Goodeidae: <i>Chapalichthys pardalis</i> (CR, endémica), <i>Goodea atripinnis</i> (LC, nativa), <i>Ilyodon whitei</i> (LC, nativa), <i>Neoophorus regalis</i> (CR, nativa); Poeciliidae: <i>Poecilia reticulata</i> (exótica), <i>Poeciliopsis gracilis</i> (exótica), <i>Poeciliopsis infans</i> (LC, nativa), <i>Xiphophorus hellerii</i> (exótica) (CPUM)

Los diez sitios de muestreo están distribuidos en seis cuencas del Eje Neovolcánico Transversal, ubicadas en los estados de Michoacán y Jalisco (Fig. 1).

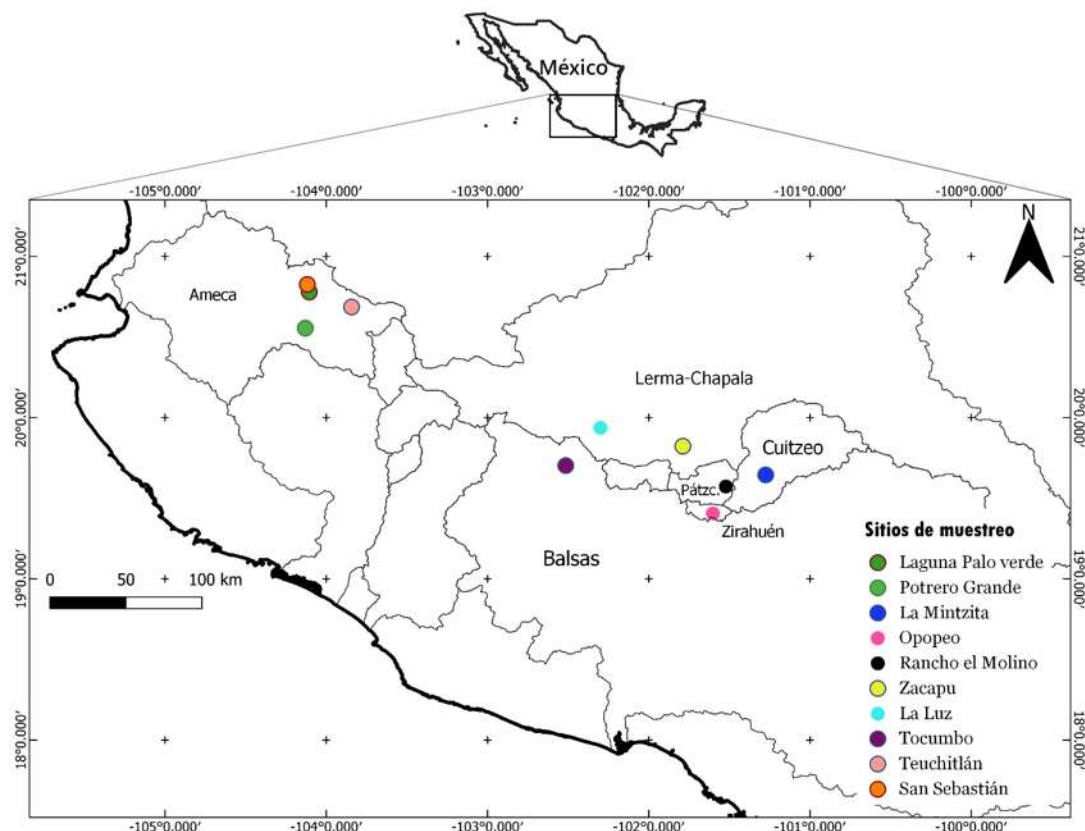


Figura. 1.- Localización de los diez sitios de muestreo en cuerpos de agua del centro de México. Cada color representa un sitio específico, identificado en la leyenda. Los polígonos delimitan las principales regiones hidrológicas en las que se ubican los sitios: Ameca, Lerma-Chapala, Cuitzeo, Pátzcuaro, Zirahuén y Balsas.

Trabajo de campo

Para la recolección de datos biológicos y fisicoquímicos se realizaron dos muestreos: el primero durante la temporada de lluvias, en octubre de 2024, y el segundo durante la temporada seca, en abril y mayo de 2025. Para realizar los muestreos, los sitios se subdividieron en varios puntos de muestreo (Tabla 2).

Tabla 2.- Subdivisión de los sitios de muestreo.

Sitio	Punto de muestreo	Latitud	Longitud
Zacapu	La Angostura	19°49'39"N	101°47'16"W
	Lago	19°49'22"N	101°47'14"W

	Río	19°49'27"N	101°46'38"W
La Mintzita	Arroyo	19°38'53"N	101°16'15"W
	Manantial	19°38'42"N	101°16'28"W
Rancho el molino	Manantial	19°34'23"N	101°31'17"W
La luz	Manantial	19°56'13"N	102°17'58"W
	Presa	19°56'13"N	102°17'54"W
Opopéo	Punto 1	19°24'22"N	101°36'07"W
	Punto 2	19°24'20"N	101°36'04"W
Tocumbo	Manantial	19°42'11"N	102°30'53"W
	Arroyo	19°42'12"N	102°30'51"W
Teuchitlán	Inicio del Río	20°41'17"N	103°50'33"W
	Compuerta	20°40'52"N	103°50'38"W
	Manantial	20°40'37"N	103°50'37"W
San Sebastián	Manantial	20°49'22"N	104°07'10"W
Presa palo verde	Punto 1	20°46'38"N	104°06'11"W
	Punto 2	20°46'38"N	104°06'46"W
Potrero grande	Arroyo	20°28'53"N	103°58'30"W

Identificación de amenazas directas en cada sitio

Para la identificación de las amenazas en los sitios de muestreo se utilizó la clasificación unificada de amenazas (Anexo 1) y acciones de conservación propuestas por Salafsky et al. (2024); se realizó una evaluación detallada de las amenazas presentes en cada sitio de acuerdo con lo observado en los muestreos realizados. La evaluación de amenazas se realizó de manera general a nivel de sitio, ya que las condiciones son similares entre puntos de muestreo.

Valoración de la Calidad Ambiental Visual (VCAV)

La valoración de la calidad ambiental visual se realizó en cada punto de muestreo. En el caso de ríos y arroyos se utilizó la metodología propuesta por Pérez-Munguía (2023), utilizando las

métricas establecidas para Gradiente Bajo (GB) y Ambos Gradientes (AG), teniendo un total de diez variables (Anexo 3).

Para manantiales y presas se realizó una adaptación del protocolo original debido a que presentan características físicas y ecológicas distintas a las de los ríos, por lo tanto, las siguientes variables no se tomaron en cuenta: variabilidad de los estanques, gradiente de sedimentación, status de flujo, sinuosidad del canal, estabilidad de la ribera izquierda y derecha, protección vegetal de la ribera izquierda y derecha y ancho de la zona de vegetación ribereña izquierda y derecha. Las variables que se incorporan son específicas para manantiales y se basan principalmente en las características físicas y ecológicas de los mismos; estas métricas se indican en el Anexo 5.

Para obtener la variable magnitud del manantial se mide la velocidad del flujo de salida, justo en el punto donde desemboca (termina). Se utilizó un estadal para medir la profundidad (cm), un flujómetro para medir la velocidad de flujo de salida (m^3/s), para ello se toma en cuenta el ancho de la zona donde desemboca el manantial, si esta zona mide 1m se debe seccionar por lo menos en 5 partes de 20 cm y se tomó una lectura con el flujómetro en cada una de las secciones teniendo al final cinco lecturas de la velocidad del flujo.

Variables fisicoquímicas del agua

En cada uno de los puntos de muestreo se tomaron tres réplicas de cada variable. Para la toma de variables ambientales se utilizó una sonda multiparamétrica HANNA (H1 9828), para medir pH, sólidos disueltos totales (TDS, mg/L), oxígeno disuelto (O_2 , mg/L) y conductividad eléctrica (mg/L). Los análisis de demanda química de oxígeno DQO (mg/L) se realizaron de acuerdo con el método de digestión Hach de rango bajo (0-150 mg/L). Para este método se tomó una muestra de agua en frascos de plástico de 1 L; posteriormente, con una pipeta volumétrica se agregaron 2 ml de la muestra de agua a cada vial previamente etiquetado con el número de réplica correspondiente. En el laboratorio, los viales se llevaron a digestión durante 120 minutos en un digestor Hach (DRB 200) y, posterior a la digestión, los viales se midieron en un espectrofotómetro Hach (DR 2400) a una longitud de onda de 430 nm. Para medir las variables de alcalinidad (ppm), nitratos (mg/L), nitritos ($\mu\text{g/L}$), fósforo total (mg/L), cloruros (mg/L), dureza total (mg/L), amonio (mg/L) y sulfato (mg/L) (Anexo 6), se midieron utilizando los métodos especificados para el fotómetro de campo HANNA HI83300.

La turbidez (cm) se midió con un disco Secchi. Para los coliformes totales (NMP/100mL) y coliformes fecales (NMP/100mL) se colectaron muestras de agua en bolsas WHIRL-PAK estériles y se mantuvieron entre 4°C y 6°C para su traslado al laboratorio. El procesamiento de muestras se realizó en un tiempo no mayor a 24 horas, esto de acuerdo con el método de número más probable establecido por la norma oficial mexicana NMX-AA-042-SCFI-2015. Para la prueba presuntiva de coliformes, de cada muestra de agua se realizaron tres diluciones a 10 ml, 1 ml y 0.1 ml, que se sembraron en tubos previamente esterilizados con una preparación de medio de cultivo Caldo Lactosado (DB Bixon), los cuales contenían una campana Durham. Los tubos se incubaron a una temperatura de 35°C durante 24 horas. Los tubos que resultaron positivos, presentando turbidez y presencia de gas en la campana Durham, se sembraron en nuevos tubos con campana Durham y medio de cultivo Bilis Verde Brillante al 2% (Difco), a una temperatura de 45°C por 24 horas. Los tubos que resultaron positivos se sembraron en tubos nuevos con medio de cultivo caldo EC (Dibico) que contenían una campana Durham, y se incubaron a 45°C durante 24 horas para la prueba de presencia de *Escherichia coli*. Los tubos resultaron positivos si presentaban gas en la campana Durham, turbidez o cambio de color.

Colecta de macroinvertebrados:

Para la colecta de macroinvertebrados, el primer paso es identificar los diferentes sustratos encontrados en el punto de muestreo, como vegetación enraizada, vegetación flotante, algas, raíces y rocas. Una vez identificados los sustratos, se recolectaron los macroinvertebrados utilizando una red "D" de 30 cm de ancho con una abertura de malla de 0.5 mm, y se realizaron ocho arrastres de 50 cm de largo, procurando cubrir todos los sustratos encontrados, tanto en el centro (si fue posible) como en las orillas. Las muestras se lavaron, se colocaron en bolsas de polietileno, se fijaron con alcohol al 96% y se etiquetaron manteniendo la identidad del sustrato donde fueron colectadas.

En el laboratorio se realizó la separación e identificación hasta el nivel taxonómico de familia utilizando un microscopio estereoscópico y claves taxonómicas (Dobson et al., 2012; Thorp & Rogers, 2016; Damborenea et al., 2020).

Colecta de peces:

Los organismos se colectaron empleando diferentes artes de pesca dependiendo del cuerpo de agua (trampas nasa, chinchorro, electropesca y redes de mano). Se utilizaron cinco trampas tipo

nasas del modelo G-40 con una abertura de 1/8" pulgada durante 30 minutos, distribuidas de manera homogénea en el sitio de colecta y con un cebo de fécula de maíz. Se utilizó un chinchorro de 5 m de ancho, 2.29 m de alto y una abertura de malla de 1.35 mm, y se realizó un lance por sitio con la ayuda de tres personas, donde dos de ellas realizaron el arrastre y una ayudó a cerrar la red al final del arrastre. Para la electropesca, se utilizó un equipo de electropesca con un voltaje inicial de ~250V y un amperaje de 12V durante 30 minutos (el voltaje y amperaje podían cambiar de acuerdo a la conductividad del agua) a lo largo del sitio de muestreo, y con la ayuda de tres personas: una administraba las descargas eléctricas y la otra persona, con una red, atrapaba los peces que quedaban adormecidos en la columna de agua, la tercera persona tenía una cubeta con agua para colocar los peces. Se utilizaron redes de mano con una abertura de malla de 5 mm, el muestreo se realizó por tres personas (tres redes) distribuidas en diferentes puntos del sitio durante 30 minutos. Una vez colectados, los peces se colocaron en cubetas con agua para ser separados por especie, manteniendo la identidad del arte de pesca. Los peces se pesaron por especie y se tomaron datos de presencia de malformaciones corporales o ectoparásitos. Una vez obtenida la información, los peces fueron devueltos vivos al mismo punto donde se colectaron, procurando la menor manipulación posible de los organismos. También se llevó un registro de las especies observadas en el punto de muestreo que no se lograron capturar con los artes de pesca utilizados, esto con la finalidad de tener la mayor información posible.

Análisis de datos:

Nivel de amenaza en cada sitio

De acuerdo con Salafsky et al. (2024), se tomaron en cuenta 11 métricas y a cada una se le dio un valor de cinco puntos, la suma total de puntos es de 55 puntos (Anexo 2), a partir de estos puntos se realizaron cinco categorías.

Nivel de Amenaza:

- » Muy bajo (1-11)
- » Bajo (12-22)
- » Moderado (23-33)

» Alto (34-44)

» Muy Alto (45-55)

VCAV en ríos y arroyos

Cada categoría se evaluó de 0 a 20 puntos, seccionando en 4 categorías (0 a 5, categoría pobre; de 6 a 10, categoría marginal; de 11 a 15, categoría subóptima; de 16 a 20, categoría óptima). En el caso de las variables para la evaluación de la ribera, la puntuación se dividió y se asignó la mitad a cada lado de la ribera (izquierda y derecha), ponderándose de 0 a 10 puntos (Anexo 4).

Para la interpretación de resultados se suman todos los puntos dando como resultado:

» Óptima (200 – 165)

» Subóptima (164 – 143)

» Marginal (142 – 109)

» Pobre (109 – 0)

VCAV en manantiales y presas

La valoración de calidad ambiental es la sumatoria de los puntos que se hayan asignado a cada una de las variables, por lo que esta valoración tiene calificaciones entre cero y 24 puntos (Anexo 5). Para conocer la condición ambiental obtenida de la valoración, las puntuaciones se distribuyen de acuerdo con la siguiente escala:

» Optima $Y > 18$ puntos

» Sub optima $12 < Y \leq 18$ puntos

» Marginal $6 < Y \leq 12$ puntos

» Pobre $Y \leq 6$ puntos

Índice de Calidad de Agua

Se aplicó el Índice de Calidad del Agua (ICA) para cada sitio considerando los 17 parámetros fisicoquímicos obtenidos.

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

De donde:

ICA = índice de calidad del agua

I_i = índice de calidad del parámetro i

W_i = Coeficiente de ponderación del parámetro i

n = número del total de parámetros

Para el coeficiente de ponderación del parámetro i (W_i) (Anexo 7), se tomó en cuenta la ponderación de las variables establecidas por SEMARNAT (2007). Se utilizó el método de ajuste de W_i para las variables nitritos, sulfatos, % de saturación de oxígeno y amonio.

El valor del ICA se midió en una escala de 0 a 100 puntos de acuerdo a los resultados obtenidos:

- » Aguas Excelentes (85<ICA≤100)
- » Aguas Aceptables (70<ICA≤85)
- » Aguas Poco contaminadas (50<ICA≤70)
- » Aguas Contaminadas (30<ICA≤50)
- » Aguas Altamente contaminadas (0<ICA≤30)

Índice de Integridad Biótica Basado en las Comunidades de Macroinvertebrados Acuáticos (IIBAMA)

En cada uno de los sitios se calculó el Índice de Integridad Biótica Basado en las Comunidades de Macroinvertebrados Acuáticos (IIBAMA). Este se calcula tomando en cuenta la riqueza de familias de macroinvertebrados acuáticos (Tabla 3). Este mide las variables de respuesta al ambiente (VRA). El IIBAMA se divide en 4 categorías (1 a 4 puntos) y considera las siguientes variables:

Tabla 3.- Variables de respuesta al ambiente y división de categorías.

Variables (VRA)	Cat 1	Cat 2	Cat 3	Cat 4
Riqueza de taxa (RT)	Y<23	23≤Y<27	27≤Y<30	Y≥30

Número de familias de Ephemeropteros, Plecópteros y Tricópteros (REPT)	Y<9	Y=9	Y=10	Y≥11
El número de taxa de insectos intolerantes (RII)	Y<9	9≤Y<12	12≤Y<14	Y≥14
Número de taxa intolerantes (#TI)	Y<10	10≤Y<12	12≤Y<14	Y≥14
Valor de la tolerancia media (TM)	Y≥5.33	5.13≤Y<5.33	4.65≤Y<5.13	Y<4.65
El número de Taxa fijos (#TF)	Y<9	9≤Y<11	Y=11	Y≥12

El IIBAMA se calcula con la suma de los puntos de las VRA:

$$IIBAMA = \sum VRA$$

De donde VRA= Variables de respuesta al ambiente

El índice se refleja como la sumatoria de todas las variables y se clasifica como:

- » Excelente (IIBAMA ≥ 22)
- » Buena (16 < IIBAMA ≤ 21)
- » Regular (13 < IIBAMA ≤ 16)
- » Pobre (IIBAMA ≤ 13)

Índice de integridad biótica (IBI)

Para el índice de integridad biótica se recopiló la mayor información posible de las comunidades de peces presentes en cada uno de los sitios de estudio, englobando los datos históricos disponibles, como la biomasa de las poblaciones de peces presentes, la talla, la abundancia y la presencia de especies exóticas.

También se realizó una recopilación de todas las métricas utilizadas en la obtención del IBI para peces en el centro de México (Anexo 9) (Mercado-Silva et al., 2018), para posteriormente elegir las métricas a evaluar en cada uno de los sitios, tomando en cuenta la información histórica de cada sitio, así como las posibilidades de obtención de datos en el presente estudio. Estas métricas se eligieron con la ayuda de expertos en la aplicación de IBI's en el centro de México (Ph. D. John Lyons y Dr. Juan Pablo Ramírez Herrejón). Las métricas utilizadas para evaluar los diferentes sitios se presentan en el Anexo 10. El IBI se expresa como la suma de todas las variables y se clasifica en tres categorías (Tabla 4).

Tabla 4.- Categorías y su interpretación de acuerdo a los resultados del IBI.

Categorías del IBI basado en la comunidad de peces propuesto por Lyons et al. (1995)		
Puntuación	Calificación	Atributos de la comunidad de peces
70 - 100	Buena	Comparable a las mejores situaciones con mínima perturbación humana. La riqueza total de especies en la columna de agua está en su nivel máximo esperado para el tamaño del arroyo. La abundancia general de peces es alta, con una gama completa de tallas y edades. Tanto las especies bentónicas como las de la columna de agua son comunes. Hay presencia de especies sensibles, mientras que las especies tolerantes y exóticas no dominan. Los herbívoros y/o carnívoros son comunes. La mayoría de los peces son especies nativas vivíparas. Casi todos los peces están en buenas condiciones físicas.
41 - 69	Regular	La comunidad de peces muestra cierta influencia de la degradación ambiental. La riqueza total de especies y de la columna de agua está por debajo de las expectativas, y las especies bentónicas y sensibles son poco comunes o están ausentes. Las especies tolerantes y exóticas son comunes, y los omnívoros dominan. La mayoría de los peces pueden no ser especies nativas vivíparas.

0 - 40	Pobre	La comunidad de peces está muy modificada por la degradación ambiental. La riqueza total de especies y de la columna de agua es baja. La abundancia general de peces también es baja, y la mayoría de los peces son pequeños. Las especies bentónicas y sensibles suelen estar ausentes. Casi todos los peces son exóticos u omnívoros tolerantes, y la mayoría de los individuos no son especies nativas vivíparas. Es común encontrar peces en malas condiciones físicas.
---------------	-------	---

ANOVA

Se realizó una prueba de Shapiro-Wilk para establecer la normalidad de los datos y un ANOVA de una vía para ver si existía diferencia significativa en la riqueza de especies nativas en función de las variables ambientales evaluadas. Se aplicó una prueba Tukey HSD para ver las diferencias entre grupos. El análisis estadístico se realizó en el software R (versión 4.5.2).

Tasa de permanencia

Se realizó la tasa de permanencia en cada uno de los sitios tomando en cuenta únicamente las especies nativas que históricamente están registradas en los sitios. Este se realizó de la siguiente manera: $TP = \frac{NENA}{NENH}$, de donde TP= tasa de permanencia, NENA= número de especies nativas actuales, NENH= número de especies nativas históricamente registradas.

Índice compuesto para la categorización de sitios de conservación y restauración, basado en las especies de peces presentes

Para categorizar los sitios de muestreo de acuerdo a la importancia de conservación de la ictiofauna presente, se construyó un índice compuesto que se basa en la riqueza de especies y su categoría de riesgo, ponderándolas según su relevancia, y permite categorizar los sitios en niveles de prioridad.

Este índice considera la riqueza de especies, su origen, categoría de riesgo de acuerdo a la IUCN, presencia de especies prioritarias y pérdida de especies nativas y endémicas.

Los pasos fueron:

- Registro del número total de especies presentes en cada sitio.
- Asignación de puntaje de origen a cada especie: Exótica = 0, Nativa = 0.1 y Endémica = 1

- Asignación de puntaje por categoría de riesgo (UICN): Exóticas = 0, DD = 1, LC = 2, VU = 3, EN = 4 y CR = 5
- Identificación de especies prioritarias, definidas como aquellas endémicas en categoría CR o EN.
- El cálculo de proporciones se llevó a cabo como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5.- Cálculo de proporciones.

Proporción de especies nativas	Proporción de especies en categorías de riesgo	Proporción de especies prioritarias	Proporción de especies nativas y endémicas no encontradas respecto al histórico
Suma del puntaje de origen / Número total de especies presentes en el sitio	Suma del puntaje de categoría de riesgo / Suma del puntaje si todas las especies estuvieran en categoría CR	Número de especies prioritarias / Número de especies nativas y endémicas	Número de especies nativas y endémicas no colectadas / Número de especies nativas y endémicas registradas históricamente

Además, en el análisis se realizó la ponderación de las variables que responde a la necesidad de reflejar su importancia relativa en la valoración de los sitios. Se otorgó mayor peso a la presencia de especies prioritarias y a su categoría de riesgo, dado que constituyen el núcleo del valor ecológico y reflejan la vulnerabilidad de las comunidades (Margules y Pressey, 2000; IUCN, 2012). La proporción de especies nativas se consideró con un peso intermedio, pues indica la integridad ecológica del sistema (Lyons et al., 1995), mientras que la pérdida histórica se incluyó como un factor negativo, dado que representa deterioro acumulado y menor resiliencia.

La ponderación quedó de la siguiente manera:

- Especies prioritarias (0.4)
- Categoría de riesgo (0.3)
- Proporción de nativas (0.2)

- Pérdida histórica -(0.1)

Índice compuesto= (Especies prioritarias (0.4)) +(Proporción de especies en categorías de riesgo (0.3)) +(Proporción de especies nativas (0.2)) -(Proporción de especies nativas y endémicas no encontradas respecto al histórico (0.1))

Categorización del nivel de prioridad de conservación.

Los valores obtenidos se clasificaron en tres niveles de prioridad, según los criterios de la Tabla 6.

Tabla 6.- Significancia de las categorías de prioridad de conservación de acuerdo a las especies de peces

Prioridad para conservación	Prioridad para restauración	Rango de valores	Características principales
Poco prioritario	Muy alta	0 – 0.12	- Baja representación de especies nativas - Ausencia de especies prioritarias - Alta pérdida histórica
Moderadamente prioritario	Alta	0.13 – 0.24	- Presencia parcial de especies nativas - La mayoría de especies en categoría LC
Altamente prioritario	Moderada	≥ 0.25	- Alta riqueza de especies nativas - Presencia de especies prioritarias (endémicas EN y CR) - Baja pérdida histórica

Análisis de Correspondencia Múltiple (MCA)

Además, se aplicó un Análisis de Correspondencia Múltiple (MCA) para explorar la relación entre los índices categóricos de calidad ambiental y agrupar los sitios según su calidad

ambiental, representada mediante un dendrograma. El análisis estadístico se realizó en el software R (versión 4.5.2) empleando las librerías FactoMineR y factoextra.

RESULTADOS

Se colectaron 34 especies de peces (Anexo 15 y 16) (Tabla 7), 9 endémicas, 15 nativas y 9 exóticas, pertenecientes a cinco familias: Cyprinidae 6; Goodeidae 19; Atherinopsidae 1; Cichlidae 1 y Poeciliidae 7, y el total de individuos colectados fue de 7,181. De macroinvertebrados acuáticos se colectaron 24 órdenes y 76 familias (Anexo 14). Para los diez sitios muestreados, los resultados se describen individualmente incluyendo: nivel de amenaza que presentan, la valoración de la calidad ambiental visual (VCAV), la calidad del agua (ICA), la riqueza de familias de macroinvertebrados acuáticos, el índice de integridad biótica basado en familias de macroinvertebrados acuáticos (IIBAMA), la riqueza de especies de peces y el índice de integridad biótica basado en peces (IBI). Posteriormente, el índice compuesto para establecer el nivel de prioridad en la conservación de los sitios basado en las especies de peces y el análisis de correspondencia múltiple (MCA).

Tabla 7.- Riqueza de especies de peces en cada sitio, de donde S/D=sin datos.

Sitio	Riqueza total	Nativas	Exóticas
Zacapu	14	11	3
La Mintzita	8	6	2
Rancho el molino	5	5	0
Presa la luz	8	6	1
Opopéo	3	1	2
Tocumbo	7	4	3
Teuchitlán	10	5	5
San Sebastián	6	3	3
Presa palo verde	5	2	3
Potrero grande	S/D	S/D	S/D

Sitio Zacapu

Nivel de amenaza

De acuerdo con la clasificación de amenazas, Zacapu tiene un nivel de amenaza moderado (30 puntos) (Anexo 12). Las amenazas principales son las áreas de vivienda, las vialidades, las actividades recreativas y las modificaciones en las riberas.

Calidad ambiental general del sitio.

De acuerdo con la calidad del agua, Zacapu se clasifica con aguas aceptables. Se colectaron 56 familias de macroinvertebrados acuáticos (Anexo 14); las más abundantes fueron Chironomidae, Hyalellidae y Cyclopidae. De acuerdo con el IIBAMA, se categoriza como bueno. La riqueza de especies de peces fue de 14 (Tabla 7). Se colectaron un total de 800 individuos. Las especies más abundantes fueron *Chirostoma humboldtianum*, *Xenotoca variata* y *Zoogoneticus quitzeoensis*; las menos abundantes fueron *Allotoca zacapuensis* y *Skiffia lermæ*. De acuerdo con el IBI, Zacapu se categoriza como bueno (Fig. 10). Este sitio se divide en tres puntos de muestreo (Fig. 2).

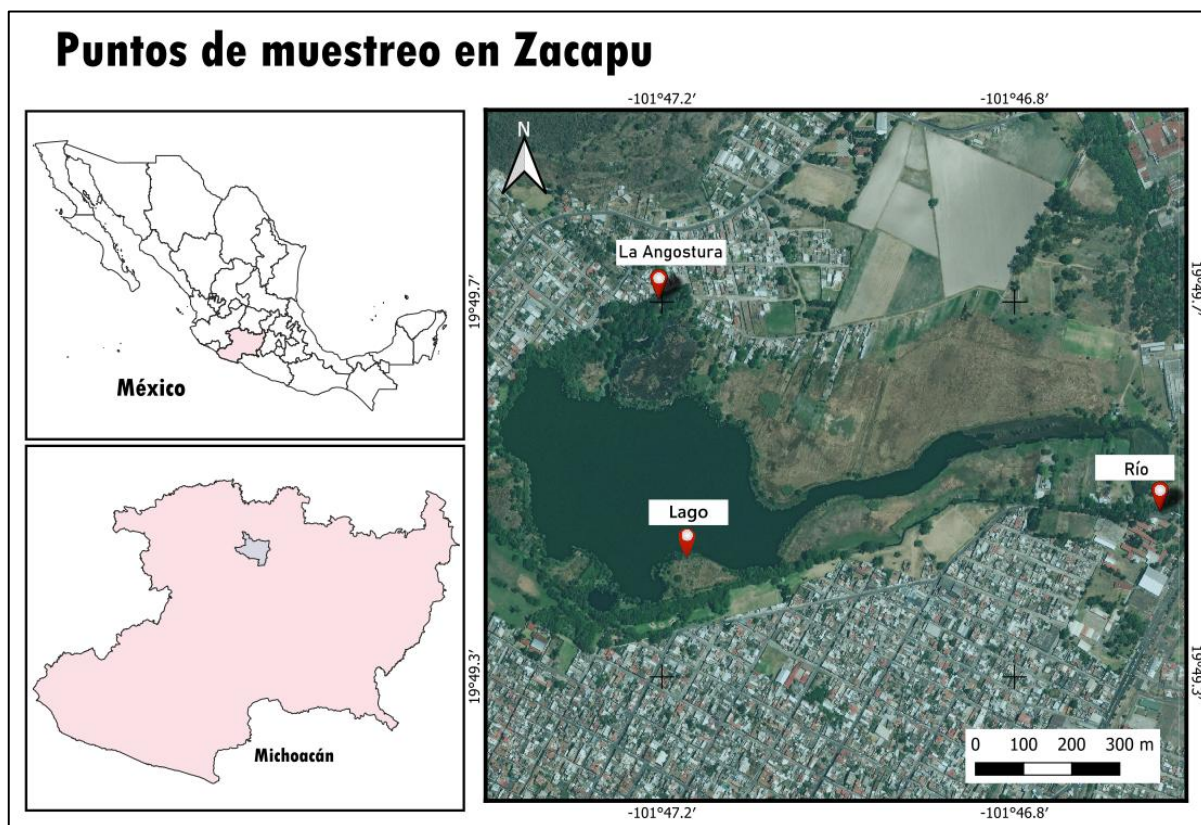


Figura 2.- Puntos de muestreo en el sitio Zacapu.

La Angostura

VCAV

De acuerdo a la clasificación de la condición de emergencia del agua, el manantial La Angostura se considera de múltiples aberturas. Tiene un caudal de $0.04962 \text{ m}^3/\text{s}$, por lo que se clasifica como un manantial de magnitud 3. Este manantial desemboca en el lago de Zacapu y presenta una VCAV marginal (10 puntos) (Anexo 13).

ICA

Durante la temporada de lluvias, los coliformes fecales y totales fueron de 3 NMP, la DQO de 102 mg/L, los nitritos 464 µg/L y la saturación de oxígeno de 74.8%, y el ICA se categorizó como aguas poco contaminadas (Anexo 17). En la temporada de secas la saturación de oxígeno fue de 54%, el fosfato 0.98 mg/L, y los coliformes fecales y totales fueron menores a 3 NMP, la DQO de 0 mg/L, los nitritos 115 µg/L y los nitratos de 3 mg/L, el ICA se categorizó como aguas excelentes (Anexo 18). El ICA de forma anual se categorizó como aguas aceptables (Anexo 19).

IIBAMA

En la temporada de lluvias se colectaron 10 familias de macroinvertebrados acuáticos, en secas se colectaron 20 familias. La familia más abundante fue Hyalellidae, seguida de Cyclopidae y Chironomidae (Anexo 14). El IIBAMA clasificó este sitio como Pobre en ambas temporadas (Anexos 17 y 18) y también de forma anual (Anexo 19).

IBI

En el caso de los peces se recolectaron 16 individuos en temporada de lluvias: 14 nativos y dos exóticos. Durante la temporada de secas, se registraron 94 individuos, todas especies nativas del sitio. Las especies más abundantes fueron *Z. quitzeoensis*, *Hubbsina turneri* (Fig. 3) y *X. variata*, la menos abundante fue *A. zacapuensis* (Anexo 15). El IBI se categorizó como bueno en ambas temporadas (Anexos 17 y 18), así como de manera anual (Anexo 19).



Figura 3.- *H. turneri* en el manantial La Angostura.

Lago

VCAV

El lago de Zacapu está alimentado por diversos manantiales del tipo de múltiples aberturas. En conjunto, registra un caudal de aproximadamente 0.7603782 m³/s, lo que lo clasifica como un sistema de magnitud 2. De acuerdo con la VCAV se considera como un sitio con calidad visual óptima (Anexo 13).

ICA

En la temporada de lluvias se encontró una sobresaturación de oxígeno 111%, una DQO de 43.6 mg/L y coliformes fecales y totales entre 7 y 10 NMP. El ICA clasificó las aguas como poco contaminadas (Anexo 17). Durante la temporada de secas, la saturación de oxígeno fue de 78.03%, la DQO se registró en 9.6 mg/L, los coliformes por debajo de 3 NMP y el fosfato fue de 0.98 mg/L. La calidad de agua se clasificó como aguas excelentes (Anexo 18). De manera anual las aguas del lago se clasificaron como aguas aceptables (Anexo 19).

IIBAMA

En la temporada de lluvias se colectaron 31 familias de macroinvertebrados acuáticos. El IIBAMA clasificó el punto de muestreo como pobre (Anexo 17). En la temporada seca se colectaron 30 familias y el IIBAMA se mantuvo pobre (Anexo 18). Las familias más abundantes fueron Hyallellidae, seguidas de Cyclopidae y Baetidae (Anexo 14). De forma anual el IIBAMA se clasificó como pobre.

IBI

Durante la temporada de lluvias se recolectaron 380 individuos, todos pertenecientes a especies de peces nativos del sitio y se categorizó con buena integridad biótica (Anexo 17). En la temporada de secas se obtuvieron 212 individuos nativos, de los cuales un organismo de la especie *C. humboldtianum* presentaba una deformidad en la parte dorsal causada por el parásito *Myxobolus cerebralis*, en esta temporada la integridad biótica se categorizó como buena (Anexo 18). Las especies más abundantes fueron *C. humboldtianum* (Fig. 4), *X. variata* y *Z. quitzeoensis*, la menos abundante fue *S. lermæ* (Anexo 15). El IBI se categorizó como bueno de manera anual (Anexo 19).



Figura 4.- *C. humboldtianum* del lago de Zacapu.

Río

VCAV

El punto del río obtuvo una VCAV de 89 puntos, lo que lo cataloga como un sitio de calidad visual pobre (Anexo 13).

ICA

En la temporada de lluvias, los nitritos fueron de 316 µg/L, los nitratos de 3.13 mg/L, y los fosfatos estuvieron en un rango alto de 20 mg/L, la DQO fue de 65.6 mg/L, la saturación de oxígeno fue de 78.6% y los coliformes fecales y totales en 14 y 15 NMP. El ICA se clasificó como aguas contaminadas (Anexo 17). Durante la temporada de secas, los nitritos fueron de 169 µg/L, los nitratos de 2.7 mg/L, los fosfatos de 2.5 mg/L, con una saturación de oxígeno de 89.6% y los coliformes fecales y totales variaron entre 3 y 14 NMP. La calidad de agua se clasificó como aguas aceptables (Anexo 18). De forma anual el ICA se clasificó como aguas poco contaminadas (Anexo 19).

IIBAMA

En la temporada de lluvias se colectaron 30 familias de macroinvertebrados acuáticos. El IIBAMA se categorizó como pobre (Anexo 17). En la temporada seca se colectaron 36 familias. El IIBAMA se categorizó como pobre (Anexo 18). Las familias más abundantes de macroinvertebrados acuáticos fueron Chironomidae, Hydropsychidae y Asellidae (Anexo 14). De forma anual el IIBAMA categorizó este punto como regular (Anexo 19).

IBI

Se colectaron 22 individuos de peces nativos durante la temporada de lluvias. El IBI se categorizó como bueno (Anexo 17). En la temporada de secas se colectaron 76 individuos, todos nativos. La integridad biótica se categorizó como buena (Anexo 18). Las especies de peces más abundantes fueron *Z. quitzeoensis*, *Poeciliopsis infans* y *X. variata*, las menos abundantes fueron *Allophorus robustus* y *H. turnerii* (Anexo 15). De manera anual el IBI se categorizó como bueno (Anexo 19).

Sitio La Mintzita

Amenazas

En el sitio La Mintzita se identificaron diversas amenazas directas, entre ellas se encuentran el desarrollo residencial y comercial debido a la presencia de viviendas cercanas al área, así como

una fábrica papelera situada a unos pocos metros de la ribera del arroyo. Se identificó la constante extracción de agua y la infestación por Lirio acuático. Este sitio presenta un nivel de amenaza moderado (30 puntos) (Anexo 12).

Calidad ambiental general del sitio.

El ICA clasifica a la Mintzita como un sitio con aguas aceptables. Se colectaron 37 familias de macroinvertebrados acuáticos y el IIBAMA lo clasifica como regular, las familias más abundantes son Chironomidae, Cyclopidae y Baetidae (Anexo 14). La riqueza de especies de peces en este sitio fue de ocho (Tabla 7), se colectaron 1,067 individuos y las especies más abundantes fueron *Pseudoxiphophorus bimaculatus* y *Xiphophorus hellerii*, la menos abundante fue *Goodea atripinnis*. El IBI categorizó a La Mintzita como regular. (Fig. 10). Este sitio se divide en dos puntos de muestreo (Fig. 5).

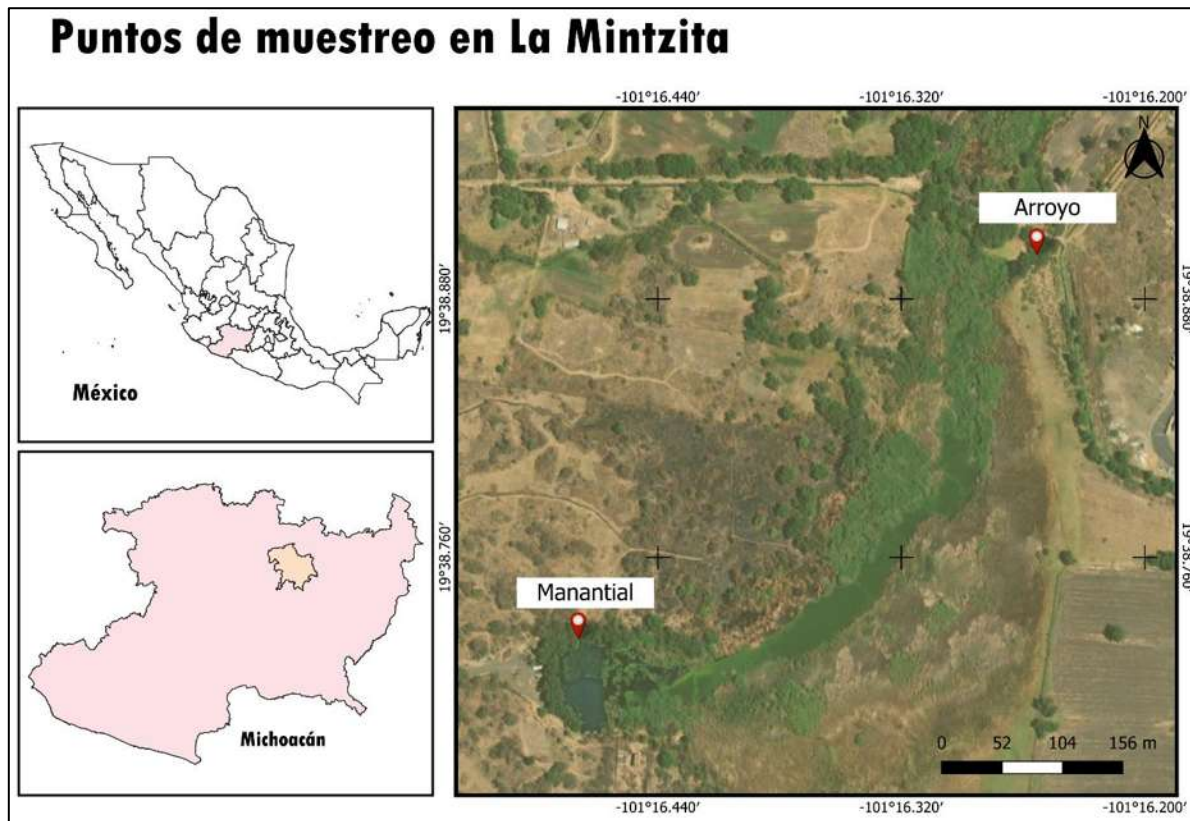


Figura 5.- Puntos de muestreo en el sitio La Mintzita.

Manantial

VCAV

El manantial La Mintzita se clasifica como de múltiples aberturas, con un caudal de 0.4773 m³/s, lo que lo categoriza como un manantial de magnitud 2 de acuerdo con su volumen de descarga. Según la VCAV presenta una calidad subóptima (Anexo 13).

ICA

Durante la temporada de lluvias se registró una saturación de oxígeno de 67.4%, nitratos de 7.4 mg/L, nitritos de 127.3 µg/L, fosfatos de 7.4 mg/L, una demanda química de oxígeno (DQO) de 13.66 mg/L, y coliformes fecales y totales entre 3 y 5 NMP. El ICA se clasifica como aguas aceptables (Anexo 17). En la temporada de secas, la saturación de oxígeno fue de 62.06%, los nitratos de 9.8 mg/L, los nitritos de 2.46 µg/L, los fosfatos fueron de 1.46 mg/L, la DQO fue de 0 mg/L, y los coliformes fecales y totales fueron menores a 3 NMP. Se categorizó como aguas aceptables en esta temporada (Anexo 18). De forma anual las aguas del manantial se catalogaron como aguas aceptables (Anexo 19).

IIBAMA

En la temporada de lluvias se colectaron 24 familias de macroinvertebrados acuáticos. El IIBAMA se categorizó como pobre (Anexo 17). En secas se colectaron 19 familias. El IIBAMA se categorizó como pobre (Anexo 18). Las familias de macroinvertebrados más abundantes en este punto fueron Cyclopidae, Chironomidae y Hyalellidae. De manera anual el IIBAMA categoriza este punto como pobre (Anexo 19).

IBI

En el caso de los peces, se colectaron 588 individuos, de los cuales 87 correspondían a especies nativas y 501 a especies exóticas. De acuerdo con el IBI se categorizó como regular (Anexo 17). En la temporada de secas se colectaron 219 individuos, de los cuales 119 fueron exóticos y 100 nativos. El IBI se mantuvo como regular en esta temporada (Anexo 18). Las especies de peces más abundantes fueron *P. bimaculatus*, *X. hellerii* y *S. lermae*; la menos abundante fue *G. atripinnis*. De forma anual el IBI se categorizó como regular (Anexo 19).

Arroyo

VCAV

De acuerdo con la VCAV, el arroyo presenta una calidad pobre (Anexo 13).

ICA

En la temporada de lluvias, la saturación de oxígeno fue de 55.56%, los nitritos 210 µg/L, los nitratos fueron de 5.3 mg/L, los fosfatos presentaron un rango bajo de 0.33 mg/L, la DQO fue

de 5.6 mg/L, y los coliformes fecales y totales fueron menores a 3 NMP. El ICA se categorizó como aguas excelentes (Anexo 17). En secas, la saturación de oxígeno fue de 37.7%, nitritos 178.6 µg/L, nitratos 2.6 mg/L, fosfatos de 0.83 mg/L, DQO 32 mg/L, y los coliformes fecales y totales fueron de entre 3 y 14 NMP. El ICA se categorizó como aguas aceptables (Anexo 18). De acuerdo con los resultados anuales del ICA, el arroyo presenta aguas aceptables (Anexo 19).

IIBAMA

En la temporada de lluvias se colectaron 20 familias de macroinvertebrados acuáticos. El IIBAMA se categoriza como pobre (Anexo 17). En secas se colectaron 18 familias y se obtuvo un IIBAMA pobre (Anexo 18). Las familias más abundantes en el arroyo fueron Chironomidae, Simuliidae y Baetidae. De forma anual el IIBAMA resultó pobre (Anexo 19).

IBI

Durante la temporada de lluvias se registraron 36 individuos de peces, con una composición de 1 nativo y 35 exóticos. El IBI se categorizó como pobre (Anexo 17). En la temporada de secas se recolectaron 224 individuos, de los cuales 222 pertenecían a especies exóticas y 2 a una especie nativa. El IBI fue pobre (Anexo 18). Las especies más abundantes fueron *X. hellerii* y *P. bimaculatus*; la menos abundante fue *G. atripinnis*. El IBI de manera anual se categorizó como pobre (Anexo 19).

Sitio Rancho el Molino

Amenazas

El manantial Rancho El Molino se localiza en una zona rural que cuenta con viviendas dispersas y vialidades de terracería; entre algunas de las amenazas se incluye que el perímetro del sitio está completamente delimitado por una barda de concreto. Es un área frecuentemente visitada por personas que acuden a nadar, bañarse o lavar automóviles; obtuvo una puntuación de 25 puntos y su nivel de amenaza es moderado (Anexo 12).

VCAV

Este manantial se origina a partir de múltiples aberturas naturales y presenta un caudal de 0.46213 m³/s, lo que permite catalogarlo como un manantial de magnitud 2. Su flujo continúa hacia la formación de un arroyo, en el cual el agua sigue su curso de manera continua. De acuerdo con la VCAV se clasifica como un manantial de calidad subóptima (Anexo 13).

ICA

Durante la temporada de lluvias se registró una saturación de oxígeno del 70%, nitritos de 109 µg/L, nitratos de 4.23 mg/L, fosfatos en un rango bajo (0.6 mg/L), una demanda química de oxígeno (DQO) de 38.3 mg/L y coliformes fecales y totales entre 5 y 14 NMP. El ICA lo clasificó como aguas aceptables (Anexo 17). En la temporada de secas, la saturación de oxígeno fue de 83.96%, nitritos de 206 µg/L, nitratos de 2.4 mg/L, fosfatos de 0.88 mg/L, una DQO de 23.6 mg/L y coliformes fecales y totales en un rango de 5 a 25 NMP. El ICA se categorizó como aguas aceptables (Anexo 18). De forma anual también se clasificó como aguas aceptables (Fig. 10).

IIBAMA

La riqueza de macroinvertebrados acuáticos fue de 30 familias en lluvias y con un IIBAMA pobre (Anexo 17). Se colectaron 23 familias en secas, con un IIBAMA pobre (Anexo 18). En el ciclo anual se colectaron 38 familias; las más abundantes fueron Cyclopidae, Daphniidae y Valvatidae. El IIBAMA clasifica a Rancho el Molino como un sitio regular (Fig. 10).

IBI

La riqueza de especies de peces en Rancho el Molino fue de cinco (Tabla 7). Durante la temporada de lluvias se recolectaron 744 individuos, todos pertenecientes a especies nativas de peces. El IBI lo categorizó como bueno (Anexo 17). En la temporada seca se obtuvieron 84 individuos, igualmente de especies nativas. El IBI se categoriza como bueno (Anexo 18). En un ciclo anual se colectaron 828 individuos, las especies más abundantes fueron *S. lermæ* y *Allotoca diazi* (Fig. 6), la menos abundante fue *G. atripinnis*. El IBI categorizó a este sitio con integridad biótica buena durante todo el año (Fig. 10).



Figura 6.- *Allotoca diazi* en el sitio Rancho el Molino.

Sitio La Luz

Amenazas

Este sitio es un área recreativa que recibe visitantes diariamente; la zona presenta desarrollo residencial con viviendas urbanas y áreas de cultivo, principalmente de bayas, presenta un nivel de amenaza alto con 35 puntos (Anexo 12).

Calidad ambiental general del sitio

En La Luz la calidad del agua se clasifica como aguas aceptables. En este sitio se colectaron 26 familias de macroinvertebrados acuáticos; 16 familias en lluvias y 22 en la temporada de secas, las familias más abundantes fueron Hyalellidae, Chironomidae y Cyclopidae: El IIBAMA en este sitio presenta una integridad pobre en ambas temporadas, así como anualmente. La riqueza de especies de peces en la luz fue de ocho especies (Tabla 7), se colectaron 793 individuos, la especie más abundante fue *Skiffia multipunctata* y la menos abundante fue *P. infans*. El IBI clasificó este sitio con una integridad biótica buena (Fig. 10).

Manantial

VCAV

Es un manantial delimitado con bardas de cemento y el único sustrato del fondo es arenoso; presenta una valoración pobre (Anexo 13) según la VCAV.

ICA

En la temporada de lluvias se registró una saturación de oxígeno de 72.46%, nitritos de 178.6 µg/L, nitratos de 2.9 mg/L, fosfatos en un rango bajo (1.66 mg/L), una DQO de 4.33 mg/L, y coliformes fecales y totales en un rango de 3 a 14 NMP. De acuerdo con el ICA, el agua es de una calidad aceptable (Anexo 17). En la temporada de secas, la saturación de oxígeno fue de 56.33%, los nitritos de 101.66 µg/L, los nitratos de 2.03 mg/L, fosfatos de 1.44 mg/L, la DQO fue de 0 mg/L, y los coliformes fecales y totales de entre 3 y 28 NMP. La calidad de agua fue excelente (Anexo 18). Anualmente la calidad del agua se clasifica como aguas excelentes (Anexo 19).

IBI

Durante la temporada de lluvias se recolectaron 69 individuos de cinco especies de peces, todas nativas. El IBI se clasificó como bueno (Anexo 17). En la temporada de secas se colectaron 17 individuos, todos nativos, uno de los cuales presentó lesiones cutáneas visibles en diversas partes del cuerpo. El IBI se categorizó como regular en esta temporada (Anexo 18). Las especies más abundantes fueron *S. multipunctata* (Fig. 7) y *G. atripinnis*. De acuerdo con el IBI, este manantial se categorizó con una integridad buena anualmente (Anexo 19).



Figura 7.- *S. multipunctata* en el manantial La Luz.

Presa

VCAV

La Luz está conformada por un sistema que incluye un manantial de múltiples aberturas y una presa. De acuerdo con la medición de su caudal (considerando tanto la presa como el manantial) se registra un flujo de 1.95884 m³/s, lo que permite clasificarlo como un manantial de magnitud 2. Esta presa desemboca en un afluente tipo arroyo. La presa presenta una VCAV subóptima (Anexo 13).

ICA

Durante la temporada de lluvias, la saturación de oxígeno fue de 75.63%, los nitritos de 178.66 µg/L, los nitratos de 1.46 mg/L, fosfatos de 2.5 mg/L, una DQO de 0 mg/L y coliformes fecales y totales entre 5 y 18 NMP, en la temporada de secas, se registró una DQO de 58.41 mg/L, una saturación de oxígeno de 60.2%, nitritos de 87.3 µg/L, nitratos de 2.3 mg/L, fosfatos de 1.25 mg/L, y coliformes fecales y totales en un rango de 3 a 58 NMP. La calidad de agua se mantuvo en la categoría de aguas aceptables en ambas temporadas (Anexos 17 y 18).

IBI

Las especies de peces colectadas pertenecían a especies nativas; se registró la colecta de 539 individuos nativos durante la temporada de lluvias. En la temporada seca se obtuvieron 168 individuos, también nativos del área; en este último grupo, se identificó un ejemplar con deformaciones morfológicas. Las especies más abundantes fueron *S. multipunctata* y *Chapalichthys encaustus*; la menos abundante fue *P. infans*. El IBI se categorizó como bueno en ambas temporadas y de forma anual (Anexos 17 y 18).

Sitio Opopéo

Amenazas

El manantial de Opopéo se encuentra dentro del núcleo urbano del poblado del mismo nombre, lo que lo expone a diversas amenazas directas. Entre estas se encuentran el desarrollo de viviendas y establecimientos comerciales, así como la construcción de múltiples carreteras en sus alrededores. Opopéo presenta un nivel de amenaza moderado con 30 puntos (Anexo 12).

Calidad ambiental general del sitio

El manantial de Opopéo está clasificado como un manantial de múltiples aberturas. Presenta un caudal de 0.0248875 m³/s, lo que lo ubica dentro de la categoría de manantial de magnitud 4. El flujo generado desemboca en un pequeño arroyo que desciende hacia la zona del pueblo, para finalmente desembocar en el Lago de Zirahuén. De acuerdo con la VCAV, el manantial tiene una calidad subóptima (Anexo 13) (Fig. 8).

De acuerdo con el ICA, Opopéo se clasifica como aguas poco contaminadas. Se colectaron 38 familias de macroinvertebrados acuáticos (Anexo 14), en lluvias se colectaron 32 y en secas 26, las familias más abundantes fueron Chironomidae, Daphniidae y Cyclopidae. El IIBAMA categorizó este sitio como pobre en ambas temporadas y también de forma anual. La riqueza de especies de peces en este sitio fue de tres especies (Tabla 7), una nativa y dos exóticas; se colectaron un total de 94 individuos y la especie más abundante fue *G. atripinnis*. El IBI clasificó a este sitio con una integridad biótica pobre (Fig. 10).

Punto 1

ICA

Durante la temporada de lluvias los nitritos fueron de 140.67 $\mu\text{g/L}$, nitratos 4.6 mg/L, los fosfatos 1.6 mg/L, la saturación de oxígeno 77.5%, la DQO de 97.67 mg/L, coliformes totales fueron de 15.77 NMP y coliformes fecales de 3 NMP. El ICA clasificó este punto como aguas poco contaminadas (Anexo 17). En la temporada de seca de registraron nitritos de 78.67 $\mu\text{g/L}$, nitratos de 1.67 mg/L, fosfatos de 5.9 mg/L, saturación de oxígeno de 57.93%, una DQO de 23 mg/L, coliformes totales de 271.24 NMP y coliformes fecales menores a 3 NMP. En esta temporada se clasificó como aguas aceptables (Anexo 18). De forma anual el ICA clasificó este punto como aguas poco contaminadas (Anexo 19).

IBI

En el caso de los peces, en la temporada de lluvias se recolectaron 23 organismos: 22 pertenecientes a una especie nativa y uno a una especie exótica. Se observó que más de la mitad de los individuos presentaban infestación por *Lernea* en las aletas. La especie más abundante fue *G. atripinnis*. Durante la temporada de secas, en este mismo punto se recolectó un único organismo, correspondiente a una especie exótica. El IBI clasificó este punto como pobre en ambas temporadas y anualmente (Anexos 17 y 18).



Figura 8.- Sitio Opopéo en el municipio de Salvador Escalante, Michoacán.

Punto 2

ICA

En lluvias los nitritos fueron de 153.33 $\mu\text{g/L}$, nitratos de 4.0 mg/L, fosfatos de 0.38 mg/L, la saturación de oxígeno fue de 63.6%, la DQO de 1.67 mg/L, coliformes totales de 11.34 NMP y

coliformes fecales de 3 NMP, en secas, los nitritos de 330.33 µg/L, nitratos de 4.2 mg/L, fosfatos de 6.77 mg/L, saturación de oxígeno de 38.77%, DQO de 29.6 mg/L, coliformes totales de 9.50 NMP y coliformes fecales menores a 3 NMP. De acuerdo con el ICA, este punto presentó aguas aceptables en ambas temporadas, así como anualmente (Anexos 17 y 18).

IBI

Durante la temporada de lluvias se registraron 40 individuos de peces, todos pertenecientes a una especie nativa. Más de la mitad de los ejemplares presentaban presencia del parásito *Lernea*, principalmente en las aletas pectorales. En la temporada de secas, se recolectaron 30 individuos: 23 pertenecientes a dos especies exóticas (*Cyprinus carpio* y *Carassius auratus*) y 7 a la especie nativa *G. atripinnis*. El IBI clasificó este sitio como pobre en ambas temporadas (Anexos 17 y 18).

Sitio Tocumbo

Amenazas

El sitio de Tocumbo tiene una zona de manantial estructuralmente modificada que funciona como alberca; el flujo de este manantial desemboca en un pequeño arroyo. La alberca cuenta con piso y bardas de concreto, y conserva únicamente un pozo emergente cubierto por una estructura de concreto; se ubica dentro de una zona recreativa que recibe visitantes de forma cotidiana. Presenta un nivel de amenaza alto con 35 puntos (Anexo 12).

Calidad ambiental general del sitio

La calidad del agua en Tocumbo se clasifica como aguas aceptables según el ICA. En este sitio se colectaron 23 familias de macroinvertebrados acuáticos (Anexo 14), 19 en la temporada de lluvias y 17 en la temporada seca; las familias más abundantes fueron Thiaridae, Hyalellidae y Chironomidae. De acuerdo con el IIBAMA Tocumbo se clasifica como pobre en ambas temporadas, así como anualmente. La riqueza de especies de peces es de siete (Tabla 7), se colectaron 1,927 individuos, las especies más abundantes fueron *Ilyodon withei* y *Poecilia reticulata*, la menos abundante fue *Poeciliopsis gracilis*, el IBI clasifica este sitio con integridad regular (Fig. 10).

Manantial

VCAV

El manantial de Tocumbo presenta un caudal de 0.0320125 m³/s, lo que lo clasifica como un manantial de magnitud 3. Este cuerpo de agua corresponde al tipo tubular, dado que cuenta únicamente con una fuente puntual de emergencia hídrica. El flujo generado por el manantial desemboca en un arroyo, donde el agua continúa su curso. La VCAV clasifica al manantial como pobre (Anexo 13).

ICA

Durante la temporada de lluvias los nitritos fueron de 118.67 µg/L, nitratos 3.3 mg/L, fosfatos 2.38 mg/L, la saturación de oxígeno de 64.63%, la DQO 0 mg/L, coliformes totales de 11.34 NMP y coliformes fecales de 3 NMP. En la temporada de seca, nitritos de 144.33 µg/L, nitratos 5.27 mg/L, fosfatos 0.63 mg/L, saturación de oxígeno 72.6%, una DQO de 0 mg/L, coliformes totales de 3.59 NMP y coliformes fecales menores a 3 NMP. La calidad del agua fue aceptable en ambas temporadas (Anexos 17 y 18).

IBI

En la temporada de lluvias se colectaron 307 peces, de los cuales 31 pertenecían a especies exóticas y 276 a dos especies nativas. En la temporada de secas se recolectaron 865 individuos, de los cuales 604 pertenecían a tres especies nativas, uno de ellos presentaba una malformación corporal causada por el parásito *M. cerebralis* y 261 a dos especies exóticas. Las especies más abundantes fueron *I. whitei* (Fig. 9) y *P. reticulata*; la menos abundante fue *G. atripinnis*. Este punto presenta una integridad regular de acuerdo con el IBI (Anexo 19).



Figura 9.- *I. whitei* en el manantial de Tocumbo.

Arroyo

VCAV

El arroyo está delimitado con cemento en la parte inicial y siguiendo arroyo abajo se va perdiendo el ancho de vegetación ribereña y la sinuosidad del canal; este se encuentra dentro del balneario Ojo de Agua; el arroyo presenta una calidad visual pobre (Anexo 13).

ICA

En lluvias los nitritos fueron de 145.33 $\mu\text{g/L}$, nitratos 7.37 mg/L, fosfatos 6.8 mg/L, saturación de oxígeno de 67.93%, DQO de 5 mg/L, coliformes totales de 18.10 NMP y coliformes fecales de 5.48 NMP, y se categorizó como aguas poco contaminadas (Anexo 17). En secas, nitritos 188 $\mu\text{g/L}$, nitratos 5.23 mg/L, fosfatos 18.83 mg/L, saturación de oxígeno 74.5%, DQO de 0 mg/L, coliformes totales de 45.71 NMP y coliformes fecales menores a 3 NMP, el ICA lo clasifica como aguas aceptables (Anexo 18). De manera anual el ICA clasifica este punto con aguas aceptables (Anexo 19).

IBI

En la temporada de lluvias se colectaron 441 peces, de los cuales 390 pertenecían a especies exóticas y 51 a dos especies nativas. En la temporada de secas se recolectaron 124 individuos, de los cuales 94 pertenecían a tres especies nativas y 30 a dos especies exóticas. Las especies

más abundantes fueron *P. reticulata* e *I. whitei*; la menos abundante fue *P. infans*. Este punto presenta una integridad regular de acuerdo con el IBI (Anexo 19).

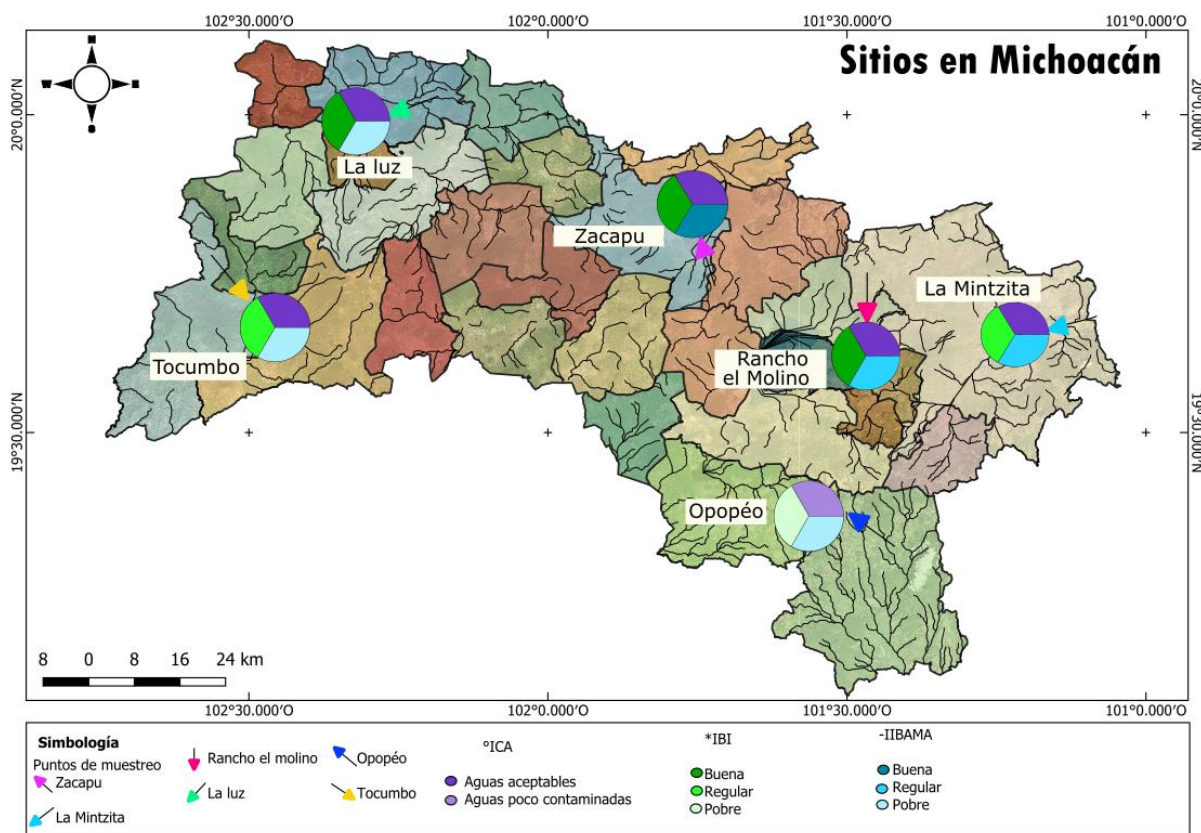


Figura 10.- Resultados de los diferentes índices para los sitios de Michoacán. ICA=Índice de calidad del agua, IIBAMA=Índice de integridad biótica basado en las comunidades de macroinvertebrados acuáticos e IBI=Índice de integridad biótica.

Sitio Teuchitlán

Amenazas

En Teuchitlán, los puntos de muestreo que se incluyen son un manantial y un río que atraviesa longitudinalmente la zona urbana del poblado. A lo largo de este río se ha construido un andador utilizado por personas para realizar ejercicios o pasear con mascotas; esta zona también es altamente concurrida para actividades recreativas y sociales, por lo que presenta contaminación por residuos sólidos debido a un manejo inadecuado de desechos; adicionalmente, se presenta invasión por lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) y lechuguilla (*Pistia stratiotes*). Teuchitlán presenta un nivel de amenaza alto con 40 puntos (Anexo 12).

Calidad ambiental general en el sitio

De acuerdo con el ICA, las aguas de Teuchitlán se clasifican como poco contaminadas. Se colectaron 38 familias de macroinvertebrados acuáticos; las familias más abundantes fueron Thiaridae, Isotomidae y Chironomidae. De acuerdo con el IIBAMA Teuchitlán se categoriza como regular. La riqueza de especies de peces fue de 10 especies (Tabla 7), se colectaron 1,155 individuos y las especies más abundantes fueron *P. bimaculatus* y *X. hellerii*, la menos abundante fue *Ameca splendens* (Fig. 13). Teuchitlán presenta una integridad biótica regular de acuerdo con el IBI. (Fig. 17). Este sitio se dividió en tres puntos de muestreo (Fig. 11).

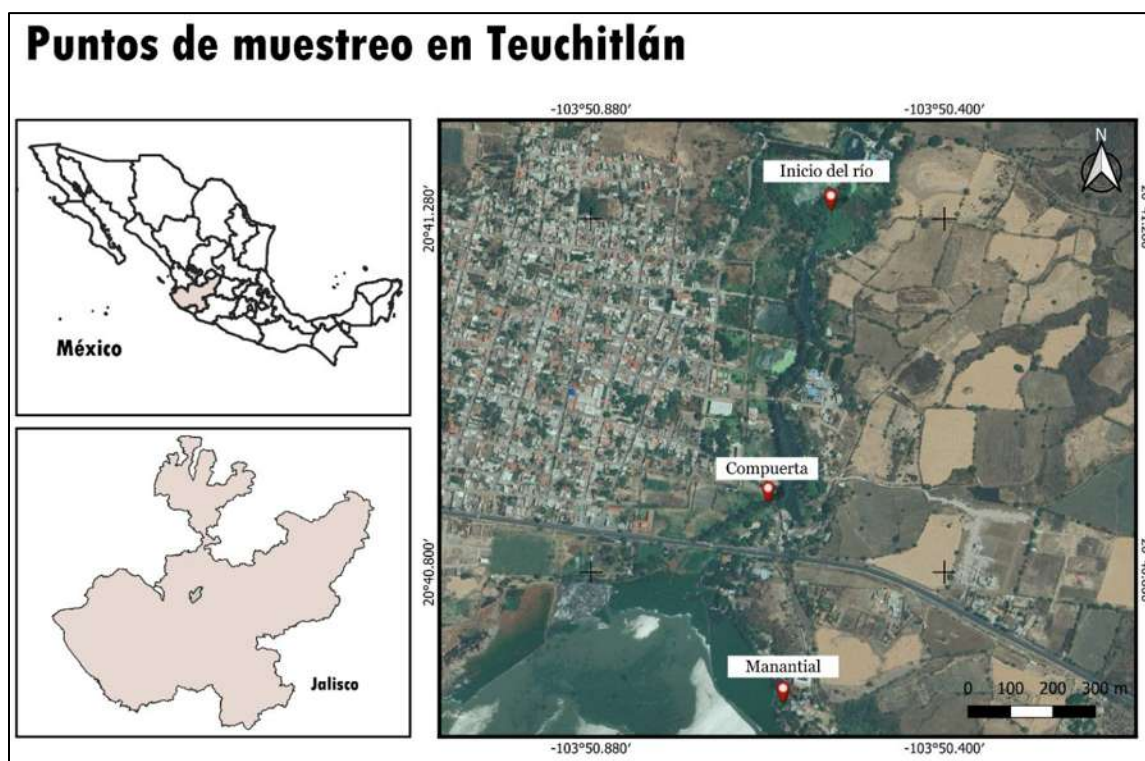


Figura 11.- Puntos de muestreo en el sitio Teuchitlán.

Inicio del río

VCAV

En esta zona del río la vegetación ribereña es escasa y se comienza a canalizar el río, perdiendo sus características de sinuosidad. Se catalogó con un VCAV pobre (Anexo 13).

ICA

En la temporada de lluvias los nitritos fueron de 306.33 µg/L, nitratos de 2.03 mg/L, fosfatos de 1.03 mg/L, saturación de oxígeno de 68.47%, DQO de 11.67 mg/L, coliformes totales de 11.34 NMP y fecales de 10.45 NMP. En secas los nitritos fueron de 143.67 µg/L, nitratos de 8 mg/L, fosfatos de 0.90 mg/L, una saturación de oxígeno de 13%, DQO de 0 mg/L, coliformes totales de 9.50 NMP y coliformes fecales menores a 3 NMP. En ambas temporadas el ICA clasifica el río con aguas poco contaminadas (Anexos 20 y 21).

IIBAMA

En la temporada de lluvias se colectaron 27 familias de macroinvertebrados acuáticos y en secas 17 familias; las familias más abundantes fueron Thiaridae, Cyclopidae e Hydrobiidae. De acuerdo con el IIBAMA se categoriza como pobre en ambas temporadas (Anexos 20 y 21).

IBI

En el caso de los peces, se recolectaron 28 individuos, de los cuales dos pertenecían a una especie nativa y 26 a especies exóticas. En la temporada de secas se recolectaron 317 individuos, de los cuales uno pertenecía a una especie nativa y 316 pertenecían a especies exóticas, en esta temporada también se encontró un individuo con diversas malformaciones en la zona de la cabeza y ojos. La especie más abundante fue *P. bimaculatus* y la menos abundante fue *Zoogoneticus purhepechus*. El IBI categorizó este punto como pobre en ambas temporadas (Anexos 20 y 21).

Compuerta

VCAV

Esta parte del río está totalmente canalizada con bardas de cemento; también se encuentra la compuerta que da inicio a la presa La Vega. Esta parte del río presenta una valoración pobre (Anexo 13).



Figura 12.- Punto la compuerta en el sitio Teuchitlán.

ICA

En la temporada de lluvia los nitritos fueron de 175.5 $\mu\text{g/L}$, nitratos de 3.17 mg/L, fosfatos de 0.37 mg/L, saturación de oxígeno del 71.97%, DQO de 0 mg/L, coliformes totales de 18.43 NMP y fecales de 15.60 NMP. En secas se registraron nitritos de 238.33 $\mu\text{g/L}$, nitratos de 3.8 mg/L, fosfatos de 1.03 mg/L, una saturación de oxígeno de 16.43%, DQO de 0 mg/L, coliformes totales de 28.62 NMP y coliformes fecales menores a 3 NMP. En ambas temporadas el ICA clasifica este punto del río con aguas poco contaminadas (Anexos 20 y 21).

IIBAMA

En la temporada de lluvias se colectaron 22 familias de macroinvertebrados acuáticos, en secas 21 familias. Las familias más abundantes son Isotomidae, Thiaridae y Chironomidae. El IIBAMA clasificó este sitio como pobre en ambas temporadas (Anexos 20 y 21).

IBI

Se colectaron un total de 511 peces. En la temporada de lluvias se colectaron 210 individuos, todos estos pertenecientes a especies exóticas y algunos de estos presentaban hongos cutáneos. En la temporada de secas se colectaron 301 individuos, de los cuales 20 se identificaron como una especie nativa y 281 como especies exóticas; la especie más abundante fue *P. bimaculatus* y la menos abundante fue *Xiphophorus maculatus*. El IBI clasifica este sitio como pobre en ambas temporadas (Anexos 20 y 21).

Manantial

VCAV

El manantial de estudio se localiza dentro del restaurante Cuquita, en el municipio de Teuchitlán. Este cuerpo de agua corresponde a un manantial de múltiples aberturas y posee un caudal de 0.090255 m³/s, lo cual permite clasificarlo como un manantial de magnitud 3. El flujo generado por este manantial se conecta directamente con la presa de La Vega. La VCAV cataloga el manantial con condición pobre (Anexo 13).

ICA

En lluvias se cuantificaron 186.33 µg/L de nitritos, nitratos de 7.47 mg/L, fosfatos de 1.5 mg/L, saturación de oxígeno del 67.43%, DQO de 0 mg/L, coliformes totales y fecales de 3 NMP. En secas los nitritos fueron de 123.67 µg/L, nitratos 9 mg/L, fosfatos de 7.23 mg/L, la saturación de oxígeno fue de 44.83%, DQO de 0 mg/L, coliformes totales de 3.59 NMP y coliformes fecales menores a 3 NMP. En ambas temporadas el ICA clasifica este manantial con aguas aceptables (Anexos 20 y 21).

IIBAMA

Se colectaron 18 familias de macroinvertebrados acuáticos, 13 familias en la temporada de lluvias y nueve en secas; las familias más abundantes fueron Thiaridae, Chironomidae y Pomatiopsidae. El IIBAMA clasifica este sitio con condición pobre en ambas temporadas, así como anualmente (Anexos 20 y 21).

IBI

En la temporada de lluvias se colectaron 149 peces: 75 pertenecientes a dos familias de especies nativas y 74 a especies exóticas. Durante la temporada de secas se colectaron 150 individuos: 77 de peces nativos y 73 de especies exóticas. Las especies más abundantes fueron *P. infans* y *X. hellerii*; la menos abundante fue *Poecilia sphenops*. El IBI categoriza este punto con una integridad regular en ambas temporadas (Anexos 20 y 21).



Figura 13.- *A. splendens* en el punto del manantial en Teuchitlán.

Sitio San Sebastián

Amenazas

El manantial San Sebastián se localiza en la plaza principal de un pequeño poblado y las principales amenazas que presenta son: el desarrollo de viviendas semirrurales y la construcción de vialidades tipo terracería. Se categoriza como un sitio moderadamente amenazado con 30 puntos (Anexo 12).

VCAV

El manantial se encuentra totalmente bardeado y es evidente la pérdida de sustratos dentro y fuera del manantial, presenta azolve y tiene una compuerta que impide el flujo del agua, lo que impidió obtener el dato de la magnitud del manantial. De acuerdo con la VCAV se considera de calidad pobre (Anexo 13) (Fig. 14).



Figura 14.- Sitio San Sebastián.

ICA

En la temporada de lluvias los nitritos fueron de 179.33 $\mu\text{g/L}$, nitratos 3.5 mg/L, los fosfatos en un rango alto 14.57 mg/L, la saturación de oxígeno de 77.33%, la DQO fue de 0 mg/L, los coliformes totales fueron de 7.75 NMP y los fecales de 5.48 NMP. Durante la temporada de secas se registraron nitritos de 39.67 $\mu\text{g/L}$, nitratos de 3.87 mg/L, fosfatos de rango alto de 18.8 mg/L, una saturación de oxígeno de 10.1%, una demanda química de oxígeno (DQO) elevada de 149 mg/L, coliformes totales de 75.99 NMP y coliformes fecales menores a 3 NMP. El ICA cataloga al manantial como aguas poco contaminadas en ambas temporadas, así como anualmente (Fig. 17).

IIBAMA

Se colectaron 17 familias de macroinvertebrados acuáticos (Anexo 14); en lluvias 17 y nueve en secas, las familias más abundantes fueron Caenidae, Diaptomidae y Chironomidae. El IIBAMA clasifica este sitio con condición pobre (Fig. 17).

IBI

La riqueza de especies de peces en este sitio es de seis especies (Tabla 7). En la temporada de lluvias se colectaron 218 individuos, de los cuales 26 pertenecían a especies nativas y 192 a especies exóticas. En la temporada de secas se obtuvo una colecta de 111 individuos: 31 correspondientes a especies nativas y 80 a especies exóticas. Las especies más abundantes fueron *P. bimaculatus* y *Xenotoca melanosoma*; la menos abundante fue *G. atripinnis*. El IBI indica que la integridad en este sitio es regular (Fig. 17).

Sitio Palo Verde

Amenazas

La presa Palo Verde se encuentra adyacente a la carretera federal que conecta Teuchitlán con San Marcos, en el municipio de Etzatlán. En uno de sus márgenes se localizan construcciones rurales, mientras que del lado de la carretera destaca una zona restaurantera que emplea la presa con fines turístico-recreativos; presenta un fuerte problema por invasión de lirio acuático y disminución de volumen en la temporada seca; la presa se cataloga con un nivel de amenaza alto con 40 puntos (Anexo 12).

Calidad ambiental general del sitio

De acuerdo con la VCAV, la presa presenta una calidad pobre (Anexo 13). El ICA lo clasifica como aguas altamente contaminadas. Se colectaron 36 familias de macroinvertebrados acuáticos, las familias más abundantes fueron Cyclopidae, Diaptomidae y Chironomidae. El IIBAMA clasifica este sitio con condición pobre. La riqueza de especies de peces fue de cinco (Tabla 7). Se colectaron 188 individuos; las especies más abundantes fueron *P. infans* y *P. bimaculatus*; la menos abundante fue *Allotoca maculata* (Fig. 15). El IBI clasifica este sitio con una integridad biótica regular (Fig. 17).



Figura 15.- *A. maculata* en el sitio Palo Verde.

Punto 1

ICA

En la temporada de lluvias los nitritos fueron de 44 $\mu\text{g/L}$, los nitratos de 2.97 mg/L, fosfatos de 2.13 mg/L, la saturación de oxígeno de 30.67%, la DQO de 7 mg/L, coliformes totales de 15.54 NMP y coliformes fecales de 17.33 NMP. De acuerdo con el ICA se clasifica con aguas aceptables en esta temporada (Anexo 20). En la temporada seca, los nitritos fueron de 301.33 $\mu\text{g/L}$, nitratos 4.93 mg/L, fosfatos 18.1 mg/L, una saturación de oxígeno de 18.17%, una DQO de 134.5 mg/L, coliformes totales de 19.85 NMP y coliformes fecales menores a 3 NMP. El ICA clasifica esta temporada como aguas contaminadas (Anexo 21). De forma anual en este punto la calidad de agua se categorizó como aguas altamente contaminadas (Anexo 22).

IIBAMA

En la temporada de lluvias se colectaron 21 familias de macroinvertebrados acuáticos y en la temporada seca 18 familias; las más abundantes fueron Cyclopidae, Diaptomidae y Daphniidae. El IIBAMA se categorizó como pobre en ambas temporadas (Anexo 22).

IBI

En la temporada de lluvias se recolectaron 35 peces: 32 pertenecientes a una especie de pecílido nativo y tres a una especie exótica. En la temporada seca se recolectaron 25 individuos: uno perteneciente a una especie endémica y 24 correspondientes a dos especies exóticas. Las especies más abundantes fueron *P. infans* y *P. bimaculatus*; la menos abundante fue *A. maculata*. El IBI clasifica a este punto con una integridad regular en ambas temporadas (Anexo 22).

Punto 2

ICA

En lluvias los nitritos fueron de 443.5 µg/L, nitratos 0.2 mg/L, fosfatos 10.47 mg/L, la saturación de oxígeno 55.8%, DQO de 7 mg/L, coliformes totales de 18.10 NMP y coliformes fecales de 3 NMP. El ICA lo categorizó como aguas poco contaminadas (Anexo 20). En secas los nitritos fueron de 346.33 µg/L, nitratos de 3.5 mg/L, fosfatos de 27.07 mg/L, saturación de oxígeno de 13.47%, DQO de 108 mg/L, coliformes totales de 18.86 NMP y coliformes fecales también menores a 3 NMP. De acuerdo con el ICA, la calidad del agua se clasificó como aguas contaminadas (Anexo 21). Anualmente la calidad del agua en este punto se categorizó como aguas contaminadas (Anexo 22).

IIBAMA

En la temporada de lluvias se colectaron 19 familias de macroinvertebrados acuáticos y en secas 19 familias; las más abundantes fueron Cyclopidae, Chironomidae y Daphniidae. El IIBAMA clasifica este punto como pobre en ambas temporadas (Anexo 22).

IBI

En la temporada de lluvias se recolectaron 63 peces, de los cuales 61 fueron identificados como pertenecientes a especies nativas y dos a una especie exótica. En la temporada seca se registró la colecta de 65 individuos: tres pertenecientes a una especie endémica y 62 a tres especies exóticas. Las especies más abundantes fueron *P. infans* y *P. bimaculatus*; la especie menos abundante fue *A. maculata*. El IBI categoriza este sitio como regular en ambas temporadas y anualmente (Anexo 22).

Sitio Potrero grande

Amenazas

El sitio Potrero Grande es un pequeño arroyo que cruza una carretera federal, lo que lo expone a diversas amenazas antrópicas. El sitio estaba totalmente seco, por lo tanto, no se encontró agua, macroinvertebrados acuáticos o peces. Debido a esto, no se realizaron los muestreos biológicos ni de calidad de agua y solo se realizó la descripción de amenazas del sitio. Las principales amenazas, además de la sequía, fueron la agricultura y los afluentes industriales (Fig.

16), ya que usan el arroyo como vertedero de aguas residuales industriales; este sitio presenta un nivel de amenaza alto con 35 puntos (Anexo 12).



Figura 16.- Arroyo Potrero Grande en Jalisco.

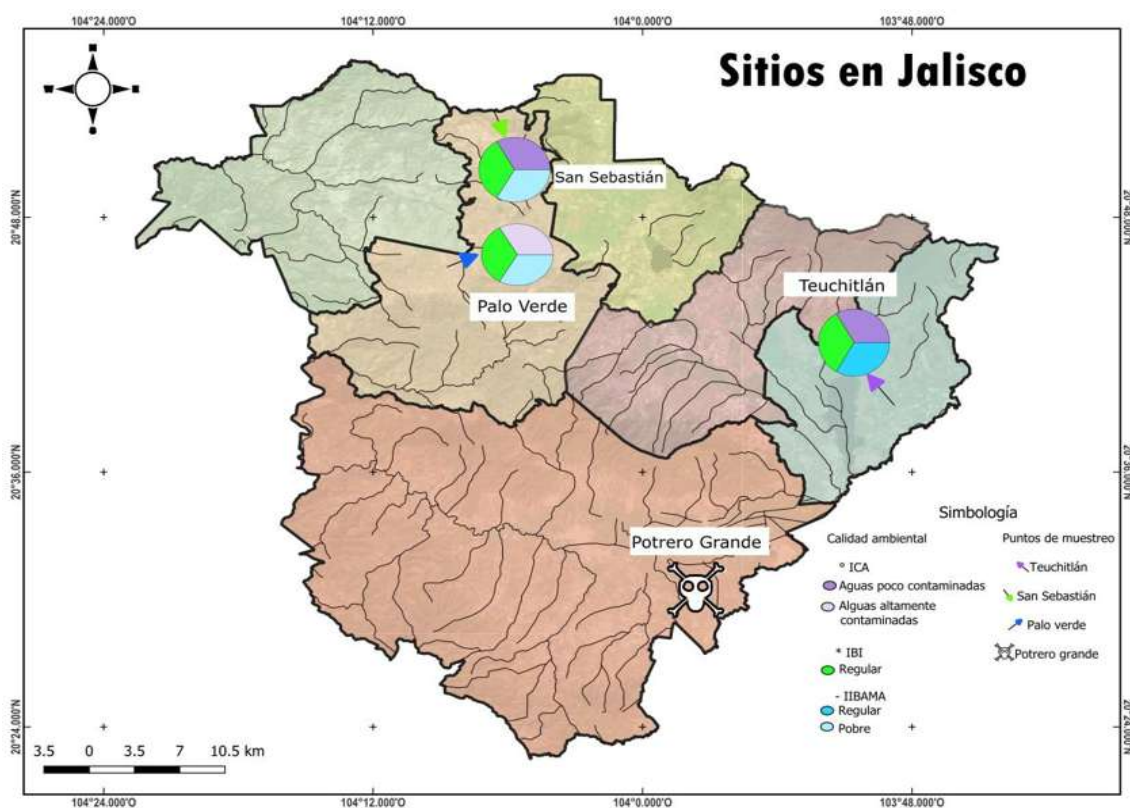


Figura 17.- Resultados anuales de los diferentes índices aplicados de los sitios de Jalisco. ICA=Índice de calidad del agua, IIBAMA=Índice de integridad biótica basado en las

comunidades de macroinvertebrados acuáticos e IBI=Índice de integridad biótica, (El sitio Potrero Grande se encontraba seco por lo que no hay resultados de los índices).

ANOVA

El análisis mostró diferencias significativas en la riqueza de peces según la calidad ambiental visual ($F=13.78$, $p=0.009$); los sitios clasificados como óptimos presentaron mayor número de especies nativas en comparación con los sitios pobres ($p=0.009$). El índice de calidad del agua (ICA) ($F=4.03$, $p=0.091$) y el nivel de amenaza ($F=0.20$, $p=0.823$) no mostraron diferencias significativas. De acuerdo con estos resultados, solo la calidad ambiental visual influye en la riqueza de especies nativas de los sitios.

Índice compuesto para la priorización de sitios de conservación y restauración, basado en las especies de peces presentes.

La mayoría de los sitios evaluados se ubica en las categorías alta y moderadamente prioritarias (Tabla 10), lo que significa que concentran especies endémicas y/o en riesgo, además de mantener cierta representación de especies nativas, aunque con distintos niveles de pérdida histórica. En particular, los valores más altos (Zacapu: 0.36; Rancho el Molino: 0.38; Teuchitlán: 0.28; y Palo Verde: 0.31) destacan como sitios con fuerte presencia de especies prioritarias, lo que los convierte en focos clave para la conservación. Los valores intermedios (La Mintzita: 0.15; La Luz: 0.22; San Sebastián: 0.24; y Tocumbo: 0.22) reflejan sitios moderadamente prioritarios, con cierta vulnerabilidad y menor representación de especies en peligro crítico, pero aún relevantes para mantener la integridad ecológica. Finalmente, el valor de Opopéo (0) indica un sitio de menor prioridad, con ausencia de especies prioritarias y alta pérdida histórica, lo que reduce su valor de conservación.

Tabla 8.- Índice compuesto para la priorización de sitios de conservación, basado en las especies de peces presentes.

Sitio	Índice compuesto para conservación	Nivel de prioridad para conservación
Zacapu	0.36	Altamente prioritario
La Mintzita	0.15	Moderadamente prioritario
Rancho el molino	0.38	Altamente prioritario
La luz	0.22	Moderadamente prioritario
Opopéo	0	Poco prioritario

Tocumbo	0.22	Moderadamente prioritario
Teuchitlán	0.28	Altamente prioritario
San Sebastián	0.24	Moderadamente prioritario
Palo verde	0.31	Altamente prioritario
Potrero Grande	Sin datos	-

Análisis de correspondencia múltiple (MCA)

El análisis de correspondencia múltiple (MCA) permitió visualizar la distribución de los sitios evaluados según sus atributos categóricos de calidad ambiental (Fig. 18). Los ejes 1 y 2 reflejaron un gradiente desde condiciones óptimas (VCAV óptima, IBI buena e IIBAMA bueno) hasta condiciones deterioradas (VCAV pobre, aguas altamente contaminadas, IIBAMA pobre). Complementariamente, el dendrograma jerárquico (Fig. 19), reveló cuatro agrupamientos. Se diferencia Zacapu de los demás sitios, ya que cumple con las características de tener buena integridad biótica tanto en peces como en macroinvertebrados acuáticos, buena calidad del agua, una calidad ambiental visual de regular a óptima y ser un sitio prioritario para la conservación de especies nativas. Posteriormente, se agrupan los sitios La Luz, Tocumbo, Rancho El Molino, La Mintzita y San Sebastián. Estos se caracterizan por presentar una integridad biótica regular, tanto en invertebrados acuáticos como en peces, con calidad de agua que va de poco contaminada a excelente. Sin embargo, son sitios con un nivel de amenaza mayor y una calidad ambiental visual pobre o subóptima. Después, se encuentran los sitios de Teuchitlán y Palo Verde, que presentan aguas poco contaminadas y contaminadas. Su índice biótico en peces es regular, mientras que en Palo Verde el de macroinvertebrados es pobre. Estos sitios están altamente amenazados y, a su vez, son prioritarios para la conservación debido a las especies que se encuentran en ellos, como *Zoogoneticus tequila*, *A. splendens* y *A. maculata*. Finalmente, el sitio Opopeo presenta una integridad biótica pobre, tanto en peces como en macroinvertebrados, calidad de agua poco contaminada y se considera poco prioritario para la conservación de especies, debido a la gran pérdida histórica de especies nativas.

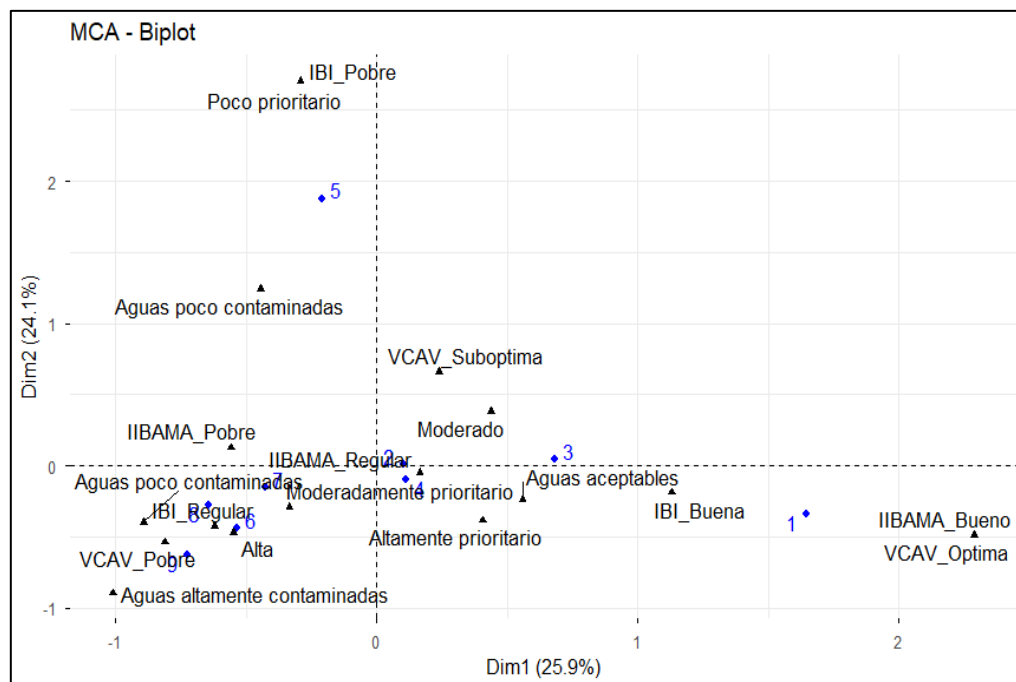


Figura 18.- Resultados del análisis de correspondencia múltiple (MCA). 1: Zacapu, 2: Mintzita, 3: Rancho el M., 4: La Luz, 5: Opopéo, 6: Tocumbo, 7: Teuchitlán, 8: San Sebas. y 9: Palo Verde. (VCAV) Valoración de la calidad ambiental visual, (IIBAMA) Índice de integridad biótica basado en las comunidades de macroinvertebrados acuáticos e (IBI) Índice de integridad biótica.

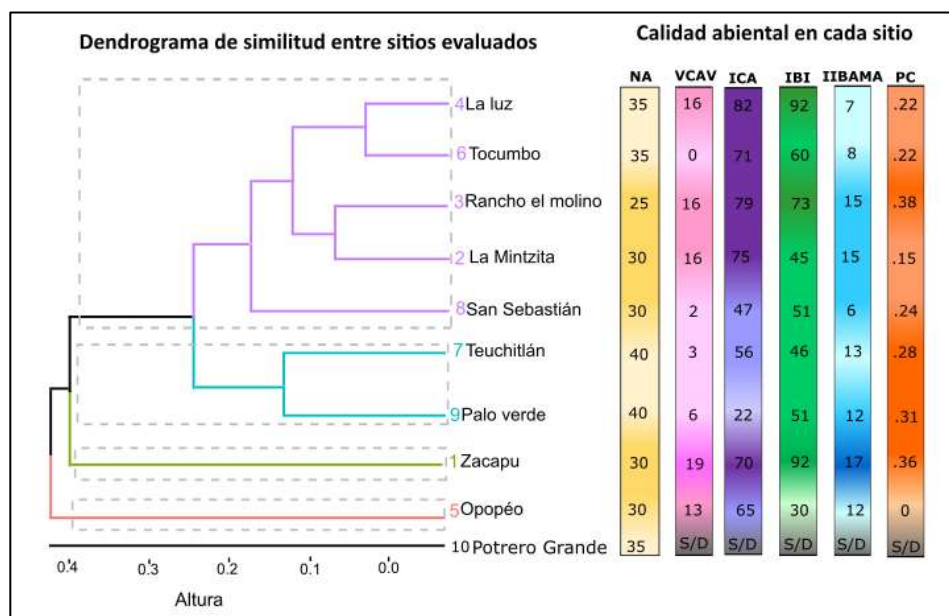


Figura 19.- Dendrograma de similitud entre sitios evaluados. NA= Nivel de Amenaza (0-45 puntos); VCAV= Valoración de la calidad ambiental visual (0-20 puntos); ICA=Índice de calidad del agua (0-100 puntos); IIBAMA=Índice de integridad biótica basado en las comunidades de macroinvertebrados acuáticos (0-23 puntos); IBI=Índice de integridad biótica (0-100), PC= Prioridad de conservación del sitio (0-0.38 puntos) y S/D = Sin datos.

Recomendaciones de conservación y restauración en cada uno de los sitios

Se elaboró una serie de recomendaciones de conservación y restauración específicas para cada sitio (Tabla 11), considerando las propuestas de actividades de conservación planteadas por Salafsky et al. (2024) y Langhammer et al. (2024) a nivel global, aplicables a problemáticas similares a las identificadas en este trabajo. Además, en la tabla 11 se indica si los sitios cuentan con algún tipo de protección ambiental gubernamental, la calidad ambiental general obtenida en este estudio, resultado de la suma de todos los índices y evaluaciones realizadas, y la tasa de permanencia de las especies nativas registradas históricamente en cada sitio.

Tabla 9.- Recomendaciones de actividades de conservación y restauración de acuerdo a las problemáticas ambientales de cada sitio.

Sitio	Tipo de protección	Calidad ambiental general	Tasa de permanencia de especies nativas	Prioridad de conservación de especies de peces	Tipo de intervención	Acciones de conservación
Zacapu	Sitio RAMSAR y ANP "LAGUNA DE ZACAPU Y SU RIBERA"	Buena	1	Altamente prioritario	Manejo precautorio	Se requiere actualización del plan de manejo propuesto en 2005: Protección y manejo de la cuenca hidrográfica, restauración de hábitats ribereños, manejo sostenible de ecosistemas, mitigación de impactos de infraestructura, regulación de actividades recreativas, regulación y monitoreo de la pesca, erradicación y control de especies invasoras, regulación de efluentes industriales, gestión integral de residuos sólidos y monitoreo de la calidad del agua.
La Mintzita	Sitio RAMSAR y ANP (Zona sujeta a	Regular	0.5	Moderadamente prioritario	Restauración	Se requiere actualización del plan de manejo propuesto en 2010: Protección y manejo de la cuenca hidrográfica, restauración de

	preservación ecológica)					hábitats ribereños, manejo sostenible de ecosistemas, regulación de actividades recreativas, educación ambiental, gestión de caudales y presas, regulación de la extracción de agua, erradicación y control de especies invasoras (plantas y peces), restauración de comunidades nativas, monitoreo de impactos ecológicos, regulación de efluentes industriales, gestión integral de residuos sólidos y monitoreo de la calidad del agua.
Rancho el molino	Sin protección	Regular	0.6	Altamente prioritario	Restauración	Establecimiento y manejo de áreas protegidas, manejo de la cuenca hidrográfica, regulación del crecimiento urbano, restauración de hábitats ribereños, planificación territorial participativa, mitigación de impactos de infraestructura, regulación de actividades recreativas, educación ambiental comunitaria, planificación de uso recreativo compatible con la conservación, monitoreo de impactos en la fauna acuática, gestión de caudales y presas, y monitoreo de la calidad del agua.
Presa la luz	Sin protección	Regular	1	Moderadamente prioritario	Manejo precautorio	Establecimiento y manejo de áreas protegidas, manejo de la cuenca hidrográfica, regulación de

						actividades recreativas, educación ambiental comunitaria, planificación de uso recreativo compatible con la conservación, monitoreo de impactos en la fauna acuática, restauración de hábitats ribereños, planificación territorial participativa, mitigación de impactos de infraestructura, manejo sostenible de prácticas agrícolas y acuícolas, reducción de agroquímicos, gestión de caudales y presas, erradicación y control de especies invasoras, restauración de comunidades nativas, gestión integral de residuos sólidos, campañas comunitarias de limpieza y monitoreo de la calidad del agua.
Opopéo	Sin protección	Mala	0.2	Poco prioritario	Restauración urgente	Establecimiento y manejo de áreas protegidas, manejo de la cuenca hidrográfica, regulación del crecimiento urbano, restauración de hábitats ribereños, planificación territorial participativa, mitigación de impactos de infraestructura, regulación de actividades recreativas, educación ambiental, gestión de caudales y presas, restauración de ecosistemas acuáticos, recuperación de la conectividad hidrológica, control y manejo de especies invasoras

						(<i>Cyprinus carpio</i> y <i>Carassius auratus</i>), monitoreo y tratamiento de parasitosis en peces, programas de repoblación con especies locales, gestión integral de residuos sólidos, campañas comunitarias de limpieza y monitoreo de la calidad del agua.
Tocumbo	Sin protección	Mala	0.6	Moderadamente prioritario	Restauración	Establecimiento y manejo de áreas protegidas, manejo de la cuenca hidrográfica, regulación del crecimiento urbano y turístico, restauración de hábitats ribereños, planificación territorial participativa, mitigación de impactos de infraestructura, manejo sostenible de prácticas agrícolas, regulación de actividades recreativas, educación ambiental comunitaria, planificación de uso recreativo compatible con la conservación, monitoreo de impactos en la fauna acuática, gestión de caudales y presas, erradicación y control de especies invasoras de peces, campañas comunitarias de limpieza y monitoreo de la calidad del agua.
Teuchitlán	Sin protección	Mala	0.5	Altamente prioritario	Restauración	Implementar un esquema de protección legal; manejo de la cuenca hidrográfica, regulación del crecimiento urbano y turístico; restauración de hábitats ribereños;

						planificación territorial participativa; mitigación de impactos de infraestructura; manejo sostenible de prácticas agrícolas y ganaderas; reducción de agroquímicos; control de escurrimientos contaminantes; regulación y monitoreo de la pesca; promoción del uso sostenible de especies; regulación de actividades recreativas; educación ambiental comunitaria; monitoreo de impactos en la fauna acuática; gestión de caudales y presas; recuperación de la conectividad hidrológica; erradicación y control de peces invasores; manejo de plagas vegetales acuáticas (lirio y lechuguilla); restauración de comunidades nativas; monitoreo de impactos ecológicos; programas de repoblación con especies locales; control y tratamiento de aguas residuales; regulación de escurrimientos agrícolas; gestión integral de residuos sólidos; campañas comunitarias de limpieza; y monitoreo de la calidad del agua.
San Sebastián	Sin protección	Mala	0.4	Moderadamente prioritario	Restauración	Establecimiento y manejo de áreas protegidas; manejo de la cuenca hidrográfica, regulación del crecimiento urbano y turístico;

						restauración de hábitats ribereños; planificación territorial participativa; mitigación de impactos de infraestructura; manejo sostenible de prácticas agrícolas; regulación de actividades recreativas; educación ambiental comunitaria; planificación de uso recreativo compatible; monitoreo de impactos en la fauna acuática; gestión de caudales y presas; recuperación de la conectividad hidrológica; erradicación y control de especies invasoras de peces; restauración de comunidades nativas; programas de repoblación con especies locales; control y tratamiento de aguas residuales; gestión integral de residuos sólidos; campañas comunitarias de limpieza; y monitoreo de la calidad del agua.
Presa palo verde	Área estatal de protección hidrológica	Mala	0.7	Altamente prioritario	Restauración	Establecer un plan de manejo: protección y manejo de la cuenca hidrográfica, regulación del crecimiento urbano y turístico; restauración de hábitats ribereños; planificación territorial participativa; mitigación de impactos de infraestructura; manejo sostenible de prácticas agrícolas y ganaderas; reducción de agroquímicos; control de

						escurrimientos contaminantes; regulación y monitoreo de la pesca; promoción del uso sostenible de especies; fortalecimiento de poblaciones nativas; regulación de actividades recreativas; educación ambiental comunitaria; gestión de caudales y presas; recuperación de la conectividad hidrológica; erradicación y control de peces invasores; manejo de plagas vegetales acuáticas (lirio); gestión integral de residuos sólidos; campañas comunitarias de limpieza; monitoreo constante de la calidad del agua; e implementación de tecnologías de saneamiento.
Potrero grande	Sin protección	Sin datos	0	Sin datos	Restauración urgente	Establecimiento y manejo de áreas protegidas; regulación del crecimiento urbano; restauración de hábitats ribereños; planificación territorial participativa; mitigación de impactos de infraestructura; manejo sostenible de prácticas agrícolas; reducción de agroquímicos; control de escurrimientos contaminantes; restauración de zonas afectadas por infraestructura; control de escurrimientos contaminantes asociados a carreteras; recuperación de caudales mediante restauración

					hidrológica; reforestación de zonas de recarga; prevención de la introducción de especies invasoras; programas de repoblación con especies nativas una vez restaurado el caudal; regulación de efluentes industriales y agrícolas; gestión integral de residuos sólidos; campañas comunitarias de limpieza; monitoreo constante de la calidad del agua; gestión de riesgos hidrológicos; y fortalecimiento de prácticas sostenibles locales.
--	--	--	--	--	---

DISCUSIÓN

La evaluación de la calidad ambiental de los sistemas acuáticos en Michoacán y Jalisco permitió describir el estado de conservación de dichos ecosistemas. Los sitios con mejor calidad ambiental y menor nivel de amenaza, como Zacapu y Rancho El Molino, mostraron una mayor riqueza de especies nativas y buena integridad biótica de acuerdo con el IBI y el IIBAMA, mientras que aquellos con mayores presiones antrópicas, como Palo Verde, Teuchitlán y Opopeo, evidencian condiciones degradadas, dominancia de especies exóticas y pérdida histórica de fauna íctica.

Amenazas a los ecosistemas acuáticos, presión humana y modificación de hábitats ribereños

A nivel nacional, la SEMARNAT (2018) y la CONABIO (2016) han señalado que la contaminación por aguas residuales sin tratamiento, el uso de agroquímicos y la introducción de especies exóticas de peces representan las principales amenazas para los ecosistemas acuáticos en México. Los resultados de este estudio confirman dichas presiones en los sitios evaluados, donde la urbanización, las especies exóticas, la extracción de agua y las actividades recreativas han generado niveles moderados de amenaza (30 puntos) y, en casos críticos, como Tocombo, Teuchitlán y Palo Verde, alcanzaron niveles altos (35–40 puntos). Tickner et al. (2020) advierten que los cuerpos de agua dulce desaparecen tres veces más rápido que los bosques, y que las poblaciones de vertebrados acuáticos han disminuido más del doble que las terrestres, lo que refleja una crisis de conservación acuática a escala global. El caso de Potrero Grande ejemplifica esta problemática: el sitio se encontró totalmente seco, además, el arroyo se usa como vertedero de aguas residuales industriales. Este deterioro contrasta con la descripción histórica del hábitat de la especie *Allotoca goslinei* realizada por Smith y Miller (1987), quienes mencionan que era la especie dominante (75% de abundancia proporcional) en el territorio donde se distribuía. Sin embargo, muestreos posteriores (Helmus et al., 2009) confirmaron su desaparición y la IUCN en 2019 la evaluó como extinta en estado silvestre. Este caso evidencia cómo la pérdida de hábitat y la presión antrópica pueden llevar al declive de la biodiversidad de un sitio.

Además, en sitios donde aún se encuentran especies en peligro crítico de extinción, la presión humana ha modificado o eliminado las funciones ecológicas de los hábitats ribereños mediante procesos de fragmentación, contaminación, urbanización y modificación de las riberas en los ecosistemas dulceacuícolas, lo que incrementa el riesgo de catástrofes naturales en escenarios de cambio climático (Curtean-Bănăduc et al., 2014). Históricamente, las riberas han sido canalizadas, rectificadas y ocupadas para fines agrícolas, industriales y urbanos, mientras que la vegetación de las riberas ha sido percibida como una plaga o un obstáculo a eliminar; esto ha generado impactos negativos sobre la estabilidad de las orillas (Cianfaglione, 2021). La aplicación de la Valoración de la Calidad Ambiental Visual (VCAV) permitió visualizar que la degradación ambiental afecta la integridad de los cuerpos de agua dulce evaluados, ya que sitios como el lago de Zacapu mostraron una VCAV óptima, y un IBI e IIBAMA bueno, otros sitios como La Mintzita presentaron condiciones subóptimas, un IBI e IIBAMA regular y, en los casos críticos que han perdido su estructura natural, como Tocombo y Teuchitlán, se clasificaron con calidad pobre en VCAV, tuvieron también una integridad biótica pobre según el IIBAMA y regular según el IBI. Estos resultados reflejan cómo las modificaciones a los ecosistemas acuáticos afectan a la diversidad de especies que se encuentran en el mismo, ya que las riberas funcionan como microhábitats, refugio para la fauna acuática y filtros contra contaminantes, además, la modificación de los cuerpos de agua influye en otros factores ambientales como variaciones en salinidad, temperatura, deposición/erosión y concentración de nutrientes (Curtean-Bănăduc et al., 2014).

En general, la baja diversidad de macroinvertebrados acuáticos registrada en manantiales se relaciona con impactos directos en sus nacimientos, como la canalización o delimitación por estructuras de contención (Stevens et al., 2018). Por el contrario, sitios con mayor heterogeneidad y vegetación ribereña conservada presentan mayor diversidad de especies, ya que esto favorece la riqueza y resiliencia de las comunidades (Vinson y Hawkins, 1998; Meza et al., 2012; Bravo-Chaves y Restrepo-Franco, 2021). El análisis de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos mediante el IIBAMA evidenció un gradiente claro de integridad biótica entre los sitios evaluados, en sitios con mejor integridad se registraron diversas familias con altas abundancias, mientras que en sitios degradados predominó la presencia de grupos tolerantes como Chironomidae, acompañados de taxa oportunistas como Cyclopidae y

Daphniidae, lo que coincide con lo reportado en ambientes agrícolas y urbanos (Farfán-Beltrán et al., 2019; Pulgarín-Ríos et al., 2022).

Adicionalmente, en los sitios evaluados, se identificó la invasión de lechuguilla de agua (*P. stratiotes*) y lirio acuático (*E. crassipes*) en La Mintzita, Teuchitlán y Palo Verde. Se ha registrado la dispersión de especies invasoras de plantas acuáticas, como el caso de *P. stratiotes*, donde la supervivencia y adaptación de estas especies son muy exitosas, además, forman densas coberturas superficiales que reducen la penetración de la luz, disminuyen el intercambio de oxígeno con la atmósfera y alteran los ciclos de nutrientes, favoreciendo así procesos de eutrofización. Su proliferación provoca la pérdida de hábitat para peces y macroinvertebrados, además de elevar los costos de su manejo y control (Šajna et al., 2007). Por lo que, en los sitios donde se encuentran, se sugiere actuar con rapidez en el control y erradicación de estas especies invasoras que causan graves problemas en el ecosistema, y evitar que los daños lleguen a ser irreversibles.

Contaminación del agua

En un estudio realizado por Villa-Villaseñor et al. (2022) se registró que las altas concentraciones de nitrato ($\text{NO}_3\text{-N}$) en cuerpos de agua dulce generan múltiples efectos adversos en los goodeinos. A nivel fisiológico, el nitrato se absorbe principalmente por las branquias, donde puede provocar fusión lamelar, hiperplasia y edema, reduciendo la capacidad de intercambio gaseoso y ocasionando anoxia. En la sangre, el nitrato favorece la formación de metahemoglobina, una forma incapaz de transportar oxígeno, lo que deriva en hipoxia sistémica. Estos cambios se reflejan en alteraciones conductuales como pérdida de equilibrio, letargo y permanencia en la superficie o el fondo de la columna de agua, respuestas compensatorias ante la deficiencia de oxígeno. La calidad del agua debe considerarse en la conservación de peces, por lo que la situación de Palo Verde es crítica, ya que el sitio fue clasificado como altamente contaminado y apenas mantiene dos especies nativas, entre ellas la especie de goodeino *A. maculata*, endémica y en peligro crítico de extinción (IUCN-18/02/2026). La exposición continua a aguas con alta carga de nitratos y otros contaminantes industriales incrementa el riesgo de desaparición local de esta especie, ya que la combinación de estrés fisiológico, baja resiliencia poblacional y pérdida de hábitat limita sus posibilidades de supervivencia.

Especies exóticas y parasitismo en ecosistemas dulceacuícolas

La introducción de especies exóticas depredadoras y omnívoras representa una de las principales amenazas para los ecosistemas dulceacuícolas, ya que alteran los ciclos de nutrientes y desplazan a las especies nativas (Schindler et al., 2001; Eby et al., 2006). Un ejemplo de este impacto se observa con la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), donde su excreción de nutrientes incrementa la disponibilidad de nitrógeno y fósforo, favoreciendo procesos de eutrofización y proliferación de algas (Figueredo y Giani, 2005; Starling et al., 2002). En los sitios evaluados, este patrón se refleja en los resultados del Índice de Integridad Biótica (IBI), que fue regular o pobre en lugares como Teuchitlán, San Sebastián y Palo Verde. En estos sitios se registró la presencia de especies exóticas del género *Oreochromis* sp., el guatopote manchado (*P. bimaculatus*) y el pez cola de espada (*X. hellerii*), cuya coexistencia con especies nativas podría estar afectando negativamente la estructura de las comunidades ícticas.

En el sitio de Opopeo se registró el caso más crítico de parasitismo, donde el Índice de Integridad Biótica (IBI) fue clasificado como pobre. La mayoría de los peces muestreados presentaban infestación por el parásito *Lernaea* (gusano ancla). Este parásito, considerado exótico en México, fue introducido junto con las carpas (*C. carpio* y *C. auratus*) y es común en ambientes donde estas especies están presentes. Las infestaciones por *Lernaea* son particularmente dañinas ya que causan lesiones focales en los tejidos, aumentando la susceptibilidad a infecciones bacterianas y fúngicas, además de pueden provocar mortalidad masiva en peces en estado silvestre y de cultivo (Goodwin et al., 1999). La combinación de especies exóticas y parásitos representa un doble factor de presión que compromete la supervivencia de las especies nativas, reduce la resiliencia de las comunidades y acelera la pérdida de integridad biótica.

Posibilidades de conservación y restauración de sitios dulceacuícolas en el centro de México

Los cuerpos de agua de la Mesa Central mexicana representan puntos calientes de biodiversidad con altos niveles de endemismo, por lo que la degradación de sus hábitats tiene consecuencias ecológicas potencialmente graves; Bamford et al., 2023, identificaron sitios prioritarios para la conservación de peces nativos, sin embargo, esta prioridad se definió principalmente por la presencia de especies endémicas en riesgo y no por la calidad ambiental actual de los sitios. En este trabajo se incorpora la evaluación de la calidad ambiental, lo que permite reconocer que

algunos lugares, como Teuchitlán y Palo Verde, aunque presentan condiciones ambientales de mala calidad, siguen siendo prioritarios debido a las especies ícticas que albergan. En estos casos, la conservación efectiva requiere acciones previas de restauración que mejoren la calidad ambiental y aseguren la persistencia de las especies, en concordancia con lo señalado por Gann et al. (2019) sobre la necesidad de diferenciar conservación y restauración como enfoques complementarios.

En este sentido, la LGEEPA (1988, reformada en 2026) y la Ley de Aguas Nacionales (1992, reformada en 2025) ofrecen el marco legal para establecer figuras de protección como sitios Ramsar, áreas voluntarias para la conservación o áreas naturales protegidas estatales y federales. De acuerdo con Figueroa y Sánchez-Cordero (2011), mantener un área protegida implica acciones de conservación activas, aunque en sitios como Zacapu y La Mintzita los planes de manejo son antiguos (propuestos en 2005 y 2010), se recomienda realizar una actualización, para asegurar la conservación de estos sitios. En contraste tenemos sitios que a pesar de tener una protección gubernamental no se cuenta con un plan de manejo, como es el caso de la Presa Palo Verde, donde es necesario implementar un plan de manejo de manera urgente por la gravedad de la calidad de agua que presenta y el problema de infestación de lirio acuático, tal como recomiendan Salafsky et al. (2024) sobre la importancia de planes adaptativos para una conservación efectiva.

La protección de las riberas es igualmente crítica para la conservación de los ecosistemas acuáticos ya que estas zonas funcionan como barreras naturales, en este sentido, la Ley de Aguas Nacionales establece una franja de 10 metros en cuerpos de agua amplios y 5 metros en cauces pequeños, con el fin de preservar la integridad de las riberas, lo que coincide con las recomendaciones de Langhammer et al. (2024) sobre la protección a las riberas para evitar la fragmentación y asegurar los procesos hidrológicos de infiltración, recarga y transporte de nutrientes. Además, la NOM-001-SEMARNAT-2021 regula las descargas industriales, lo que resulta especialmente relevante en sitios como Potrero Grande, Zacapu y La Mintzita, cercanos a fábricas que podrían verter efluentes contaminantes. Aunque ninguno de los diez sitios evaluados en este estudio se encuentra en la lista de alta prioridad de la NMX-AA-159-SCFI-2012 sobre caudal ecológico, cumple con criterios como la presencia de especies nativas listadas

en la NOM-059-SEMARNAT-2010 y la IUCN, por lo que podrían incluirse en los planes de conservación de caudales a nivel nacional.

Finalmente, la extracción y control de especies exóticas de peces en sitios como Teuchitlán, La Mintzita, Tocumbo, Opopéo y Presa Palo Verde es esencial para reducir la presión sobre las especies nativas, tal como lo documentan Contreras-MacBeath et al. (2014) y Espinosa-Pérez (2014). Ambos autores coinciden en que la presencia de cíclidos y pecílidos no nativos ha generado impactos severos en los ecosistemas acuáticos y que la extracción de estas especies exóticas constituye una acción prioritaria para recuperar la biodiversidad y asegurar la persistencia de las comunidades ícticas nativas. Sin embargo, estas acciones técnicas deben complementarse con programas de educación ambiental comunitaria, que permitan sensibilizar a la población sobre los efectos de las especies invasoras y fomentar su participación en actividades de control y monitoreo. De acuerdo con propuestas recientes como las de Martínez-Muñoz et al. (2024), la educación ambiental es indispensable para que las comunidades comprendan los impactos de las especies exóticas y se involucren activamente en la conservación de los cuerpos de agua dulce.

CONCLUSIONES

La evaluación de la calidad ambiental en diez sitios del centro de México permitió identificar un gradiente claro de condiciones, que va desde ambientes con buena integridad ecológica y presencia de especies nativas prioritarias, hasta sitios con fuerte presión antrópica y pérdida total de la ictiofauna. El sitio con mejor calidad ambiental fue Zacapu, seguido de Rancho El Molino, los cuales se consideran prioritarios para su conservación. Se identificaron sitios con condiciones regulares en cuanto al IBI e IIBAMA, pero sometidos a mayor presión antrópica, como presa La Luz, La Mintzita, Tocumbo y San Sebastián. Asimismo, se encontraron sitios con fuerte presión antrópica pero considerados altamente prioritarios para la conservación, como Teuchitlán y Presa Palo Verde, debido a la presencia de especies endémicas en riesgo crítico. En contraste, Opopéo resultó poco prioritario para la conservación, ya que la pérdida de ictiofauna nativa registrada históricamente es alta, aunque sus condiciones ambientales aún se consideran regulares, por lo que es importante tomar acciones de restauración de manera inmediata. Finalmente, se documentó un sitio totalmente seco: el Arroyo Potrero Grande, lo que refleja la amenaza latente del cambio climático y la sequía extrema en la región, sino también la presión derivada de la extracción y desviación de agua, así como el abatimiento de los mantos acuíferos por riego excesivo. El análisis multivariado y el dendrograma confirmaron la lógica de priorización y la necesidad de estrategias de conservación y restauración adecuadas para cada sitio.

RECOMENDACIONES

Los resultados evidencian la necesidad de implementar estrategias diferenciadas de conservación y restauración, priorizando los sitios con mayor integridad ecológica como Zacapu, Rancho el Molino, La Luz y atendiendo de manera urgente a aquellos con condiciones críticas como Opopeo, Presa Palo Verde, Tocumbo, Teuchitlán, Potrero Grande y San Sebastián. Asimismo, se recomienda fortalecer el monitoreo y la participación comunitaria para garantizar la persistencia de la biodiversidad acuática en el centro de México.

LITERATURA CITADA:

- Abbasi, T., Abbasi, S.A. (2012). Water Quality Indices, Elsevier, pp. 353-356, 10.1016/B978-0-444-54304-2.00016-6
- Bamford, P., Baltzer, M., Contreras-MacBeath, T., Domínguez-Domínguez O., Goodwin, R., Edmondstone, M., Hernández Valencia, F., Köck, M., Patricio, H. y Ramírez-García, A. (2023). Action plan for the Conservation of Mexico's Goodeid Fishes. IUCN SSC Freshwater Conservation Committee and Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo. 58 p.
- Barbour, M. T., Gerritsen J., Zinder B. D. y Stribling J. B. (1999). Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish. Second Edition. EPA 841-B41-99-002. United States Environmental Protection Agency. Office of Water. Washington, D.C.
- Best, J., (2018). Anthropogenic stresses on the world's big rivers. Nat. Geosci. 12 (1), 7–21.
- Bravo-Chaves, J., y Restrepo-Franco, G. (2021). Riparian vegetation structure and seasonality influence functional diversity more than taxonomic diversity of stream fish assemblages in the Colombian Amazon. Aquatic Ecology, 56(1), 153–172.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (1988). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. Diario Oficial de la Federación. Última reforma publicada el 19 de enero de 2026. Consultar en: <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEIPA.pdf>
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (1992). *Ley de Aguas Nacionales*. Diario Oficial de la Federación. Última reforma publicada el 15 de marzo de 2025. Consultar en: <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LAN.pdf>
- Cianfaglione, K. (2021). Plant landscape and models of French Atlantic estuarine systems: Extended summary of the doctoral thesis. Transylvanian Review of Systematical and Ecological Research, 23, 15–36.
- Contreras-MacBeath, T., Gaspar-Dillanes, M. T., Huidobro-Campos, L., y Mejía-Mojica, H. (2014). Peces invasores en el centro de México. En R. Mendoza & P. Koleff (Coords.), *Especies*

acuáticas invasoras en México (pp. 413–424). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

Curtean-Bănăduc, A., Schneider-Binder, E., y Bănăduc, D. (2014). The importance of the riverine ligneous vegetation for the Danube Basin lotic ecosystems. In K. Cianfaglione (Ed.), *L'importanza degli Alberi e del Bosco, Cultura, Scienza e Coscienza del Territorio* (pp. 187–210). Trento, Italia: Temi Edit.

Daly, A.J., Baetens, J.M., y De Baets, B. (2018). Ecological Diversity: Measuring the Unmeasurable. *Mathematics*, 6 p. 28.

Damborenea, C., Rogers, D. C., y Thorp, J. H. (2020). Thorp and Covich's freshwater invertebrates: Vol. V. Keys to Neotropical and Antarctic fauna (4th ed.). Academic Press.

De la Vega-Salazar, M. Y. (2006). Situación de los peces dulceacuícolas en México. *Ciencias*, 72, 20–30. Universidad Nacional Autónoma de México.

Dobson, M., Pawley, S., Fletcher, M., y Powell, A. (2012). Guide to freshwater invertebrates (Scientific Publication No. 68). Freshwater Biological Association.

Domínguez-Domínguez, O., Zambrano, L., Escalera-Vázquez, L. H., Pérez-Rodríguez, R., y Pérez-Ponce de León, G. (2008). Cambio en la distribución de goodeidos (Osteichthyes: Cyprinodontiformes: Goodeidae) en cuencas hidrológicas del centro de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 79(2), 501-512.

Eby, L. A., Roach, W. J., Crowder, L. B., y Stanford, J. A. (2006). Effects of stocking-up freshwater food webs. *Trends in Ecology & Evolution*, 21(10), 576–584.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.06.016>

Espinosa-Pérez, H. (2014). Biodiversidad de peces en México / Biodiversity of fishes in Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(2), 243–251.

Farfán-Beltrán, M. E., Rocha-Ortega, M. y Córdoba-Aguilar, A. (2019). Comunidades de macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores de calidad de agua en ambientes urbanos. En A. Córdoba-Aguilar (Ed.), *Ecología urbana y biodiversidad en México* (pp. 85–104). Instituto de Ecología, UNAM. <https://doi.org/10.22201/ib.9786073020305e.2019.c4>

- Figueredo, C. C., y Giani, A. (2005). Ecological interactions between Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) and the phytoplankton community of the Furnas Reservoir (Brazil). *Freshwater Biology*, 50(8), 1391–1403. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2005.01407.x>
- Figueroa, F., Sánchez-Cordero, V., Illoldi-Rangel, P. y Linaje, M. (2011). Evaluación de la efectividad de las áreas protegidas para contener procesos de cambio en el uso del suelo y la vegetación. ¿Un índice es suficiente? *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82(3), 951–963.
- Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., Hallett, J. G., Eisenberg, C., Guariguata, M. R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., Gonzales, E., Shaw, N., Decleer, K., y Dixon, K. W. (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology*, 27(S1), S1-S46. <https://doi.org/10.1111/rec.13035>
- Goodwin, A. E. (1999). Massive *Lernaea cyprinacea* infestations damaging the gills of channel catfish polycultured with bighead carp. *Journal of Aquatic Animal Health* 11:406–408.
- IUCN. (2012). IUCN Red List Categories and Criteria: Version 3.1 (Second edition). Gland, Switzerland and Cambridge, UK: IUCN. Disponible en: [IUCN Red List](#)
- Langhammer, P. F., Bull, J. W., Bicknell, J. E., Oakley, J. L., Brown, M. H., Bruford, M. W., Butchart, S. H. M., Carr, J. A., Church, D. y Cooney, R. (2024). The positive impact of conservation action. *Science*, 384(6694), 453–458
- Lyons J., Piller K.R., Artigas-Azas J.M., Dominguez-Dominguez O., Gesundheit P., Köck M., Medina-Nava M., Mercado-Silva N., Ramírez-García A. y Findley K.M. (2019). Distribution and current conservation status of the Mexican Goodeidae (Actinopterygii, Cyprinodontiformes). *Zookeys*. 4; 885:115-158.
- Lyons, J., Máiz-Tomé, L., Tognelli, M., Daniels, A., Meredith, C., Bullock, R. and Harrison, I., Contreras-MacBeath, T., Hendrickson, D.A., Arroyave, J., Mercado Silva, N., Köck, M., Domínguez Domínguez, O., Valdés González, A., Espinosa Pérez, H., Gómez Balandra, M.A., Matamoros, W., Schmitter-Soto, J.J., Soto-Galera, E., Rivas González, J.M., Vega-Cendejas, M.E., Ornelas-García, C.P., Norris, S. y Mejía Guerrero, H.O. (2020). The status and distribution

of freshwater fishes in Mexico. Cambridge, UK and Albuquerque, New Mexico, USA: IUCN and ABQ BioPark.

- Lyons, J., Navarro-Pérez, S., Cochran, P. A., Santana, C. E. y Guzmán-Arroyo, M. (1995). Index of Biotic Integrity Based on Fish Assemblages for the Conservation of Streams and Rivers in West-Central Mexico. *Conservation Biology*, Vol. 9, No. 3, pp. 569-584.
- Margules, C. R., y Pressey, R. L. (2000). Systematic conservation planning. *Nature*, 405(6783), 243–253.
- Martínez-Paz, E. (2023). Modelo de evaluación del estado de conservación de ríos vadeables (Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo).
- Martínez-Muñoz, A. L., González-Pérez, B. K., Valdez-Calderón, A. y Gayosso-Morales, M. A. (2024). Lirio acuático en cuerpos de agua: una revisión científica y tecnológica. En el Congreso Panamericano de Especies Acuáticas Invasoras y No-Nativas.
- Medina-Nava M. (2003). Utilización del Índice de Integridad Biótica (IIB) para determinar áreas de conservación de peces en la Cuenca Lerma-Chapala en Michoacán. (Tesis de Maestría, Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo).
- Mercado-Silva, N., Lyons, J. y Contreras-Balderas, S. (2018). Índices Biológicos de Integridad en Peces Mexicanos, su Uso en la Conservación de Recursos Dulceacuícolas. *Estudios sobre los peces del desierto norteamericano*, Facultad de Ciencias Biológicas UANL. Pag. 138-150.
- Meza, A.M., Rubio, J., Gomes, L. y Walteros, J.M. (2012). Calidad de agua y composición de macroinvertebrados acuáticos en la subcuenca alta del Río Chinchiná. *Caldasia*, 34(2): 443-456.
- Paller, M. H., Wike, L. D. y Jernigan, T. (2016). Biological invasions: Displacement of native species by exotics. En *Impact of Biological Invasions on Ecosystem Services* (pp. 157–175). Springer, Cham.
- Pérez-Munguía, R. M. (2023). Guía para Valorar la Calidad Ambiental Visual. Proyecto Nacional de Investigación e Incidencia de Ecohidrología para la sustentabilidad y gobernanza del agua y cuencas para el bien común (PRONAI). Versión revisada.

- Pulgarín-Ríos, A. (2022). Diversidad de macroinvertebrados acuáticos y calidad del agua de tres zonas agrícolas en la cuenca alta del río San Pedro-Mezquital, México. *Intropica*, 18(1), 24–36. <https://doi.org/10.21676/23897864.4469>
- Ramírez-García, A., Domínguez-Domínguez, O., López-López, E., Moncayo-Estrada, R., y Cruz-Agüero, J. (2022). Temporal changes in the fish community structure of a small subtropical spring lake: Decadal and seasonal analysis. *Ecology of Freshwater Fish*, 32 (1), e12669. <https://doi.org/10.1111/eff.12669>
- Ramírez-Herrejón, J. P., Mercado-Silva, N., Medina-Nava, M. y Domínguez-Domínguez, O. (2012). Validación de dos índices biológicos de integridad (IBI) en la subcuenca del río Angulo en el centro de México. *Revista de Biología Tropical*, 60(4), 1669-1685.
- Roldán-Pérez, G. (2016). Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(155), 220–237
- Šajna, N., Haler, M., Škornik, M., y Kaligarič, M. (2007). Survival and expansion of *Pistia stratiotes* L. in a thermal stream in Slovenia. *Aquatic Botany*, 87(1), 75–79.
- Salafsky, N., Böhm, M., He, K. K., Relton, C., Young, B. E., Chénier, M., Cochrane, E., Hilton-Taylor, C., Lamarre, P., Dionne, M., Latrémouille, C., Morrison, J., Raymond, C. V., Seddon, M., y Suresh, V. (2024). Classification of direct threats to the conservation of ecosystems and species 4.0. *Conservation Biology*. <https://doi.org/10.1111/cobi.14434>
- Schindler, D. E., Knapp, R. A., y Leavitt, P. R. (2001). Alteration of nutrient cycles and algal production resulting from fish introductions into mountain lakes. *Ecosystems*, 4(4), 308–318. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0013-4>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2018). Informe de la situación del medio ambiente en México. México: SEMARNAT. Encontrado en: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/index.html>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2000). *Ley General de Vida Silvestre*. Diario Oficial de la Federación. Última reforma publicada el 10 de junio de 2025. Encontrado en: <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGVS.pdf>

- SEMARNAT. (2007). Dirección General de Estadística e Información Ambiental.
- SEMARNAT. 2019. Informe de la situación del medio ambiente en México edición 2019.
- Smith, M. L., y Miller, R. R. (1987). *Allotoca goslinei*, a new goodeid fish from the Río Ameca drainage, Jalisco, México. *Copeia*, 1987(2), 391–396. <https://doi.org/10.2307/1445665>
- Sotelo-Núñez, E. I. (2023). Agua, desigualdad y medio ambiente en México: reflexiones desde la UAM Xochimilco sobre un problema creciente. *Revista Ciencia*, 75(2), 1618-1629.
- Starling, F. L. R. M., Lazzaro, X., Cavalcanti, C., y Moreira, R. (2002). Contribution of omnivorous tilapia to eutrophication of a shallow tropical reservoir: Evidence from a fish kill. *Freshwater Biology*, 47(12), 2443–2452. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00993.x>
- Stevens, L. E., Springer, A. E., y Ledbetter, J. D. (2018). Springs ecosystem inventory protocols (B. Murrieta, Trad.). Springs Stewardship Institute. Flagstaff, Arizona. 60 pp.
- Thorp, J. H., y Rogers, D. C. (2016). Thorp and Covich's freshwater invertebrates: Vol. II. Keys to Nearctic fauna (4th ed.). Academic Press.
- Tickner, D., Opperman, J. J., Abell, R., Acreman, M., Arthington, A. H., Bunn, S. E., Cooke, S. J., Dalton, J., Darwall, W., Edwards, G., Harrison, I., Hughes, K., Jones, T., Leclère, D., Lynch, A. J., Leonard, P., McClain, M. E., Muruven, D., Olden, J. D. y Young, L. (2020). Bending the curve of global freshwater biodiversity loss: An emergency recovery plan. *BioScience*, 70(4), 330–342. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa002>
- Valdés-Basto, J., Samboni-Ruíz, N. E., y Carvajal-Escobar, Y. (2011). Desarrollo de un Indicador de la Calidad del Agua usando estadística aplicada, Caso de estudio: Subcuenca Zajón Oscuro. *Rev. Tecno Lógicas*. 26: 165-180.
- Villa-Villaseñor, I. M., Yáñez-Rivera, B., Rueda-Jasso, R. A., Herrera-Vargas, M. A., Hernández-Morales, R., Meléndez-Herrera, E. y Domínguez-Domínguez, O. (2022). Differential sensitivity of offspring from four species of goodeine freshwater fish to acute exposure to nitrates. *Frontiers in Ecology and Evolution*. DOI: [10.3389/fevo.2022.1014814](https://doi.org/10.3389/fevo.2022.1014814)
- Vinson, M. R., y Hawkins, C. P. (1998). Biodiversity of stream insects: Variation at local, basin, and regional scales. *Annual Review of Entomology*, 43(1), 271–293.

ANEXOS

Anexo 1

Clasificación de amenazas para cuerpos de agua dulce propuestas por Salafsky et al. (2024)

Categoría	Subcategoría	Ejemplos
1. Desarrollo residencial y comercial	1.1 Áreas de vivienda y urbanas	Ciudades, suburbios, pueblos
	1.2 Áreas comerciales e industriales	Fábricas, centros comerciales, bases militares
	1.3 Áreas de turismo y recreación	Campos de golf, parques acuáticos
2. Agricultura y acuicultura	2.1 Cultivos anuales y perennes	Plantaciones de alimentos, fibras
	2.2 Plantaciones de madera y pulpa	Teca, eucalipto
	2.3 Ganadería	Granjas de vacas, ranchos
	2.4 Acuicultura marina y de agua dulce	Piscicultura, camas de moluscos
3. Producción de energía y minería	3.1 Perforación de petróleo y gas	Pozos de petróleo
	3.2 Minería y canteras	Minas de carbón, extracción de oro
	3.3 Energía renovable	Energía geotérmica, parques solares, eólicos
4. Corredores de transporte y servicios	4.1 Carreteras y ferrocarriles	Autopistas, caminos secundarios
	4.2 Líneas de servicios públicos	Cables eléctricos, tuberías de gas
	4.3 Rutas de navegación	Canales, rutas de barcos
	4.4 Rutas aéreas	Transporte aéreo y espacial
5. Uso consumible de recursos biológicos	5.1 Caza y recolección de animales terrestres	Caza con fines diversos, mortalidad accidental
	5.2 Recolección de plantas terrestres	Cosecha no maderable con fines múltiples
	5.3 Tala y cosecha de madera	Madera, fibra, combustible
	5.4 Pesca y recolección acuática	Peces, plantas acuáticas, mortalidad accidental
6. Intrusiones y disturbios humanos	6.1 Actividades recreativas	Uso no consumible que perturba el hábitat
	6.2 Guerra y ejercicios militares	Perturbación por fuerzas armadas
	6.3 Trabajo y otras actividades	Presencia humana no recreativa ni militar
7. Modificaciones del sistema natural	7.1 Fuego y supresión de incendios	Alteración del régimen natural del fuego

	7.2 Presas y gestión de agua	Cambios en flujo hídrico
	7.3 Otras modificaciones del ecosistema	Conversión del hábitat por “gestión”
8. Especies y genes problemáticos	8.1 Especies invasoras no nativas	Plantas, animales o microbios exóticos
	8.2 Especies nativas problemáticas	Especies locales desbalanceadas
	8.3 Material genético introducido	Genes/organismos modificados por humanos
9. Contaminación	9.1 Aguas residuales domésticas/urbanas	Escorrentía con nutrientes, tóxicos, sedimentos
	9.2 Efluentes industriales y militares	Minería, energía y extracción
	9.3 Efluentes agrícolas y forestales	Agroquímicos, sedimentos
	9.4 Basura y desechos sólidos	Enredo de fauna silvestre
	9.5 Contaminantes atmosféricos	Emisiones puntuales y difusas
10. Eventos geológicos	10.1 Volcanes	Erupciones, gases volcánicos
	10.2 Terremotos/tsunamis	Movimiento sísmico, marejadas
	10.3 Avalanchas/deslizamientos	Deslizamientos de tierra, lodo
11. Cambio climático y clima severo		Cambios a largo plazo, eventos extremos

Anexo 2

Puntuación de las amenazas utilizadas para clasificar los sitios de muestreo evaluados en este estudio.

Amenaza	Puntuaje
1. Desarrollo residencial y comercial	5
2. Agricultura y acuicultura	5
3. Producción de energía y minería:	5
4. Corredores de transporte y servicios	5
5. Amenazas al uso de recursos biológicos por el uso consumible de recursos "salvajes"	5
6. Intrusiones y disturbios humanos	5
7. Modificaciones del sistema natural	5
8. Especies y genes invasores y otros problemáticos	5
9. Contaminación	5
10. Eventos geológicos	5

Anexo 3

Descripción de las variables para evaluar el VCAV en ríos y arroyos (Pérez-Munguía, 2023)

Variable	Interpretación
Sustrato Disponible para la Macrofauna (AG)	Se refiere a la cantidad y variabilidad de sustratos disponibles para el asentamiento de macroinvertebrados, es importante que se considere que los sustratos deben ser los esperados para el sitio, en la cabecera se trata de roca madre, rocas grandes y pequeñas, guijarros grandes, medianos y pequeños, gravas y arenas.
Caracterización del sustrato de los estanques (GB)	Se refiere a la variedad de sustratos que conforman el fondo de los estanques. Califica la heterogeneidad del fondo de los estanques.
Variabilidad de los estanques (GB)	Considera la variabilidad en el tamaño y profundidad de los estanques. Con cuatro tipos: estanques pequeños y someros, estanques pequeños y profundos, estanques grandes y someros y estanques grandes y profundos. Se consideran estanques grandes aquellos que cualquiera de las secciones (largo, ancho u oblicua), sea mayor que la sección transversal y es profundo si la profundidad promedio es mayor a un metro.
Gradiente de sedimentación (AG)	Califica la acumulación anómala de sedimentos en forma de “islas”. En corrientes de gradiente alto, la sedimentación ocurre principalmente en las orillas y en los de gradiente bajo, no se deben formar “islas”. Esta variable es un indicador de los mecanismos de transporte del cauce,
Status del flujo (AG)	Considera la forma como la corriente toca las riberas. Califica el hecho de que el agua esté en contacto con ambas riberas.
Alteraciones del canal (AG)	Se consideran aquellas evidencias de modificaciones y/o alteraciones en el canal, como resultado de obras construidas por el hombre.
Sinuosidad del canal (GB)	Califica la relación entre la longitud del cauce (LC) y la longitud del valle (LV). LC se considera la longitud del Thalweg o bien de la línea de máxima profundidad, en tanto

	que LV es la longitud del cauce en línea recta.
Estabilidad de la ribera izquierda y derecha (AG)	Se refiere a la proporción que ocupan en el tramo las evidencias de erosión y/o fallas de las riberas.
Protección vegetal de la ribera izquierda y derecha (AG)	Estima la proporción de las riberas del cauce que se encuentran protegidas por vegetación ribereña nativa. En gradiente alto, esta vegetación se compone de elementos herbáceos, arbustivos y arbóreos, pero siempre asociados a rocas grandes; en este caso, la protección de las riberas está dada por la estructura rocosa de las mismas. En gradiente bajo, esta vegetación está fundamentalmente compuesta por herbáceas, de manera que la presencia de árboles y arbustos no es una condición deseada y generalmente son el resultado de intervención humana.
Ancho de la zona de vegetación ribereña izquierda y derecha (AG)	Estima el ancho de la zona de amortiguamiento proporcionado por la vegetación nativa de la zona ribereña. Se debe considerar que hay formas de vegetación que ocupan áreas de máxima ribera o de planicie de inundación, por ejemplo, la vegetación de Páramo puede ser tocada por el agua del cauce, en estos casos y si la vegetación del lugar está bien conservada, se considera una condición óptima. La vegetación propia de cultivos no es una condición deseable.

Anexo 4

Descripción para la asignación de puntos para cada variable.

Sustrato disponible para la Macrofauna (AG):			
Optima	Subóptima	Marginal	Pobre
Más del 70% del tramo (en el gradiente hacia abajo) contiene una combinación de sustratos estable (rocas, vegetación acuática, raíces),	Entre el 40-70% del tramo (de gradiente bajo), contiene la combinación de sustratos estables en el sitio, son susceptibles de ser colonizados o para	Entre el 20-40% de tramo (de gradiente bajo), contiene la combinación de sustratos estables, son susceptibles de ser colonizados o para el	Menos que 20% (de gradiente bajo), contiene la combinación de sustratos estables, son susceptibles de ser colonizados o para el

que son susceptibles a ser colonizados por macrofauna.	el establecimiento de la macrofauna.	establecimiento de la macrofauna. Con frecuencia los sustratos han sido removidos por actividad antrópica.	establecimiento de la macrofauna. La ausencia de sustratos es obvia por actividad antrópica. Existen sustratos inestables o recientemente removidos.
Asignación de puntos de las categorías de la variable			
20 19 18 17 16	15 14 13 12 11	10 9 8 7 6	5 4 3 2 1 0
Caracterización del sustrato de los estanques (GB):			
Óptima	Subóptima	Marginal	Pobre
El fondo está formado por una mezcla de sustratos dominantes y estables, principalmente grava y arena. Es frecuente la vegetación sumergida y enraizada.	El fondo es una mezcla de arena fina, limo y arcilla. Suele predominar el fango. Hay plantas sumergidas y enraizadas.	Todo el fondo está formado por lodo, limo o arena, con poca o ninguna vegetación sumergida y enraizada	El fondo está constituido por lodo o cieno endurecido, o en casos extremos por piedras, sin vegetación sumergida ni enraizada
Asignación de puntos de las categorías de la variable			
20 19 18 17 16	15 14 13 12 11	10 9 8 7 6	5 4 3 2 1 0
Variabilidad de los estanques (GB):			
Óptima	Subóptima	Marginal	Pobre
El tramo presenta todos los tipos de estanques, Grandes y profundos (>1m), someros y poco profundos (<1m)	La mayoría de los estanques son grandes y profundos (>1m). Hay muy pocos estanques someros (<1m).	Los estanques someros (<1m) son más comunes que los profundos (>1m)	La mayoría de los estanques son pequeños y someros o no hay estanques.
Asignación de puntos de las categorías de la variable			
20 19 18 17 16	15 14 13 12 11	10 9 8 7 6	5 4 3 2 1 0
Gradiente de sedimentación (AG):			
Óptima	Subóptima	Marginal	Pobre
Menos del 20% del tramo en estudio presenta acumulación de sedimentos en las áreas centrales del cauce.	Se observa que la acumulación de sedimentos (gravas, arenas o partículas finas) en el interior del cauce ocupan entre el 20-30%.	Es evidente la acumulación de sedimentos entre el 50-80% de los estanques muestran esta afectación.	La sedimentación de materiales finos, arenas o gravas es intensa, el desarrollo de estas acumulaciones cubre más del 80%,

			lo que hace que casi sean inexistentes los estanques.																	
Asignación de puntos de las categorías de la variable																				
20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Status del flujo (AG):																				
Optima					Subóptima					Marginal					Pobre					
El agua toca la base de ambas riberas y una mínima cantidad de sustratos se encuentra expuesta.					El agua toca más del 75% de la base de las riberas y solo se encuentran los sustratos menos del 25%					El agua toca entre el 25-75% de la base de las riberas y/o la mayor parte de los sustratos de los rabiones se encuentra expuesta.					Hay muy poca agua en el cauce lo que hace que los sustratos de la ribera estén expuestos y el agua únicamente se mantiene en interior de pequeños estanques.					
Asignación de puntos de las categorías de la variable																				
20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Alteraciones del canal (AG):																				
Optima					Subóptima					Marginal					Pobre					
No hay indicios de canalización en el tramo de estudio, tampoco existen vados, puentes o cualquier otra obra antrópica que modifique el cauce.					Hay indicios de canalización, normalmente en zonas adyacentes a puentes. Es posible encontrar pruebas de dragados o canalizaciones que tuvieron lugar hace más de 20 años, pero no hay pruebas de estos impactos recientes.					La canalización es amplia, puede tratarse de obras que alteran la ribera, como carreteras, alcantarillas u otras estructuras, con entre un 40-80% del curso de agua canalizado o afectado					Con cualquiera de las siguientes condiciones: las orillas y el fondo del canal están revestidos con gaviones o cemento. Más del 80% del canal está canalizado o dragado.					
Asignación de puntos de las categorías de la variable																				
20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Sinuosidad del canal (GB):																				
Optima					Subóptima					Marginal					Pobre					
Las curvas del cauce aumentan su longitud de 3 a 4 veces más que la longitud en línea recta.					Las curvas del cauce aumentan su longitud de 2 a 3 veces más que la longitud en línea recta.					Las curvas del cauce aumentan su longitud de 1 a 2 veces más que la longitud en línea recta.					El cauce es recto en el tramo en estudio.					
Asignación de puntos de las categorías de la variable																				
20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0

Estabilidad de las riberas Izquierda y derecha (AG):										
Optima		Subóptima			Marginal			Pobre		
La ribera es estable, no hay evidencia de erosión o de falla de ribera, menos del 5% de la ribera se encuentra afectada.		La ribera es moderadamente estable, la evidencia de erosión o de falla de ribera ocupa entre el 5-30% de la ribera afectada.			La ribera es moderadamente inestable, hay evidencia de erosión o de falla de ribera entre el 30-60% de la ribera afectada.			La ribera es inestable, hay evidencia de erosión o de falla de ribera en más del 60% de la ribera afectada.		
Asignación de puntos de las categorías de la variable										
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Protección vegetal de las riberas izquierda y derecha (AG):										
Optima		Subóptima			Marginal			Pobre		
Más del 90% de la ribera está cubierta de vegetación nativa. La evidencia de pastoreo es mínima o no existe; la mayoría de las plantas tienen un crecimiento natural.		Entre el 70-90% de la ribera está cubierta de vegetación nativa. Algunas clases de plantas no están bien representadas. La evidencia de pastoreo no ha afectado el crecimiento natural de la mayoría de las plantas.			Entre el 50-70% de la ribera conserva vegetación, generalmente se trata de parches de vegetación nativa separados por áreas desnudas.			Menos del 50% de la ribera conserva vegetación ribereña.		
Asignación de puntos de las categorías de la variable										
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Ancho de la zona de vegetación ribereña izquierda y derecha (AG):										
Optima		Subóptima			Marginal			Pobre		
El ancho de la vegetación ribereña es mayor a 18 metros. Las actividades antrópicas no han impactado esta zona.		El ancho de la vegetación ribereña es entre 18-12 metros. Las actividades antrópicas han impactado mínimamente a esta zona.			El ancho de la vegetación ribereña es entre 12 y 6 metros. Las actividades antrópicas han impactado considerablemente a esta zona.			El ancho de la zona de vegetación ribereña es menor a 6 metros y hay poca o no hay vegetación por efecto de actividades antrópicas.		
Asignación de puntos de las categorías de la variable										
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0

Anexo 5

Descripción de las variables para evaluar VCAV en manantiales y presas.

Métricas	Interpretación	Medición
1.- Combinación de sustrato	Se refiere a los diferentes sustratos que podemos encontrar en el cuerpo de agua que sirven de hábitat para macroinvertebrados acuáticos. Un sustrato se define como superficie donde puede vivir un animal o planta. Tales como cieno, arcilla, arena, gravas, guijarros, rocas, vegetación enraizada, vegetación acuática flotante, troncos, ramas. Nota: La conversión del fondo del manantial a pisos construidos por el hombre se califica con cero puntos.	El fondo ha sido transformado en su totalidad ----- 0 puntos Un solo sustrato (ej. cieno o grava) menos de 20% ----- 1 punto Entre dos y cuatro Sustratos diferentes 20% - 40% ----- 2 Puntos Cinco o seis sustratos Diferentes 40% a 70%---- 3 puntos Más de seis sustratos Diferentes más de 70%--- 4 puntos
2.- Presencia de vegetación enraizada	Se refiere a la combinación de plantas enraizadas al fondo del cuerpo de agua, entre las que se encuentran Elodea, Nymphaea, Lwdgia, Hydrocotyle, Typha, Scirpus, Cyperus, Potamogetum.	No hay presencia de vegetación enraizada ----- 0 puntos Existe vegetación flotante pero no vegetación enraizada ----- 1 punto Hay por lo menos dos especies formando los parches de vegetación enraizada en el manantial ----- 2 puntos Hay por lo menos tres o cuatro especies formando los parches de vegetación en el manantial ----- 3 puntos Hay más de cuatro especies formando los parches de vegetación enraizada en el manantial ----- 4 puntos
3.- Condición de la Emergencia	Se refiere a la forma en que emerge el manantial. Nota: En esta métrica no se asigna un valor en	Pueden ser: Múltiples aberturas: múltiples aberturas de donde emerge el agua (ej. La Mintzita)

	porcentaje, solo se debe registrar el tipo de emergencia del manantial.	Tuberales: Una sola abertura circular de donde emerge agua a mucha presión (ej. Tocumbo)
4.- Condición del cuerpo de agua de salida	Se refiere al tipo del cuerpo de agua en el que desemboca el manantial. Nota: En esta métrica no se asigna un valor en porcentaje, solo registra el tipo de cuerpo de agua de salida.	Solo debes registrar si el manantial desemboca en un: 1.- Arroyo 2.- Río 3.- Presa 4.- Laguna
5.- Estabilidad de la ribera	Se refiere a si la orilla presenta erosión en ribera (ej. evidencia de uso doméstico como lavaderos, o si el ganado accede a beber agua en la orilla o la falta total de vegetación). Nota: no confundir esta variable con otro tipo de alteraciones en la ribera como construcciones, estas se califican en la variable de Alteraciones el manantial.	Esta medición se hace solo en las orillas del cuerpo de agua. Más del 95% de la ribera presenta evidencia de erosión ----- 0 puntos Entre el 60% y 95% de las riberas se encuentran erosionadas ----- 1 punto Entre el 30% y 60% de la ribera se encuentra erosionada ---- 2 puntos Entre el 5% y 30% de las riberas tienen evidencia de erosión ----- 3 puntos Menos del 5% o no hay evidencia de erosión en la ribera ----- 4 puntos
6.- Magnitud del manantial	La magnitud de un manantial se refiere a la cantidad de agua que esté descarga o produce de acuerdo con la escala de Meinzer, 1927. Nota: La forma de medir esta variable se explica detalladamente más adelante. Nota: 1 m³ = 1000 litros	Magnitud 1----- > 2.832 m ³ / segundo Magnitud 2 ----- 0.2832 – 2.832 m ³ / seg Magnitud 3 ----- 0.02832 – 0.2832 m ³ / seg Magnitud 4 ----- 0.3785l m ³ /min – 0.02832 m ³ / seg Magnitud 5 ----- 0.03785 m ³ /min – 0.3785l m ³ /min Magnitud 6 ----- 0.003785 m ³ / min – 0.03785 m ³ /min Magnitud 7 ----- 0. 00473 m ³ /min– 0.003785 m ³ /min Magnitud 8 ----- < 0. 00473 m ³ /min

7.- Protección vegetal de la ribera	Se refiere a la presencia de vegetación recubriendo la orilla del cuerpo de agua.	No hay vegetación en la orilla del cuerpo de agua ----- 0 puntos Menos del 50% de toda la orilla está cubierta de vegetación ----- 1 punto Entre el 50% y 70% la orilla está cubierta por vegetación y esta se compone por diferentes especies -----2 puntos Entre el 70% y 90% de la orilla está cubierta por diferentes tipos de vegetación ----- 3 puntos Más del 90% de la orilla se encuentra cubierta de vegetación, además, esta vegetación es nativa ----- 4 puntos
8.- Ancho de la zona buffer	Se refiere a la distancia buffer de las orillas del manantial a usos del suelo antropizados. Nota: las actividades humanas que protegen las riberas se consideran como parte de la zona buffer, tales como la siembra de pastos o de vegetación herbácea sub acuática en las riberas del manantial o bien de elementos pétreos que tengan la finalidad de contener la erosión de las riberas.	No hay franja buffer ----- 0 puntos La franja buffer que rodea la orilla mide menos de seis metros de ancho ----- 1 punto La franja buffer que rodea la orilla mide entre seis y doce metros de ancho ----- 2 puntos La franja buffer que rodea la orilla mide entre 12 y 18 metros de ancho----- 3 puntos La franja buffer que rodea e la orilla mide más de 18 metros de ancho----- 4 puntos
9.- Alteraciones al manantial	Se refiere a los tipos de modificaciones en la ribera y el fondo del manantial.	La totalidad del manantial ha sido modificada para usos humanos ----- 0 puntos En el fondo se han eliminado los sustratos naturales pero

		las riberas conservan elementos naturales como rocas y vegetación ----- 1 punto Los sustratos del fondo son objeto de manejo, pero no se han eliminado y las riberas han sido perturbadas o modificadas ----- 2 puntos Se conservan los elementos naturales del fondo y de las riberas, pero hay evidencia de perturbación ----- 3 puntos La evidencia de modificación en el sustrato y las riberas es mínima (menos del 5% del total del espacio muestra alteraciones) ---- 4 puntos
--	--	---

Anexo 6

Métodos del fotómetro de campo HI 83300 para cada variable

Variable	Método	Longitud de onda
Alcalinidad (ppm)	Método colorimétrico	610 nm
Nitritos (µg/L)	Adaptado de EPA Método Diazotización 354.1	466 nm
Nitratos (mg/L)	Método de Reducción de Cadmio	525 nm
Fosforo total (mg/L)	Adaptado del Método Ácido Ascórbico	610 nm
Cloruros (mg/L)	Adaptado del Método Tiocianato de Mercurio (II)	466 nm
Dureza total (mg/L)	Adaptado de EPA Método recomendado 130.1	466 nm
Amonio (mg/L)	Adaptado de ASTM Manual of Water and Environmental Technology, D1426 Método Nessler.	420 nm
Sulfato (mg/L)	El sulfato se precipita con cristales de cloruro de bario	466 nm

Anexo 7

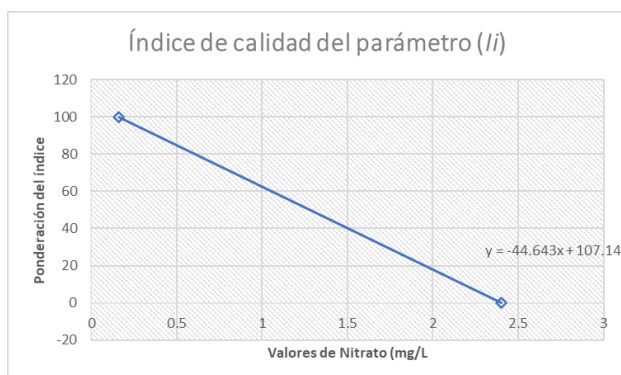
Coeficiente de ponderación del parámetro i (W_i) ajustado para cada parámetro.

No.	Parámetro	Peso (W_i)
1	Nitritos	0.6
2	Nitratos	2.6
3	Fosfatos	2.6
4	%Sat	0.6
5	OD	5
6	Conduc.	2.6
7	Amonio	0.6
8	Alcalinidad	1.6
9	Dureza total	1.6
10	pH	1.6
11	Cloruros	1.1
12	TDS	1.1
13	Sulfatos	0.6
14	DQO	5
15	CT	3.6
16	CF	4.6
17	Turbiedad	1.1
	Suma de W_i	36.5

Para calcular el índice de calidad del parámetro (I_i) se utilizó una gráfica de calibración, donde los valores en X iban del valor más pequeño del parámetro al valor más alto del parámetro, y en Y, de 0 a 100. Para encontrar el (I_i), se utilizó la ecuación de la recta $Y = mx + b$, sustituyendo en X el valor del parámetro.

Ejemplo:

Si quisiéramos saber el valor del índice de calidad del parámetro (I_i) para un valor de 2 mg/L de nitrato y nuestro valor más bajo sea 0.16 mg/L y el valor más alto sea 2.4 mg/L se tendría que realizar un gráfico y obtener la ecuación de la recta



Anexo 8 Gráfica de calibración para calcular el índice de calidad del parámetro (I_i) para nitratos.

Sustituyendo el valor del cual queremos saber el (*Ii*) en X de la ecuación obtenemos el valor del (*Ii*)

$$Y = -44.643X + 107.14$$

$$Y = -44.643(2) + 107.14$$

$$Y = 17.85$$

El índice de calidad del parámetro (*Ii*) para nitrato sería 17.85

Anexo 9

Métricas utilizadas en los cuatro Índices Mexicanos de Integridad Biótica (IBI) basados en peces. (%) Indica el 'porcentaje de individuos colectados'. IBI-1: Lyons et al., 1995; IBI-2: Lyons et al., 2000; IBI-3: Contreras-Balderas et al., 2000; IBI-4: Contreras-Balderas et al., 2005. Contreras-Balderas et al., 2000 definen las "especies intrusas" como aquellas cuya presencia en un sistema ha sido favorecida por modificaciones humanas del hábitat.

Métricas IBI	IBI-1	IBI-2	IBI-3	IBI-4
No. de especies nativas	X	X	X	X
No. de individuos nativos (%)	X	X		
Individuos bentónicos nativos (%)	X			
No. de especies bentónicas (%)	X			
No. de especies bentónicas nativas (%)	X			
No. de especies pelágicas	X			X
No. de especies pelágicas nativas	X			
No. de especies sensibles	X	X	X	
No. de especies sensibles nativas (%)	X			
Individuos de especies tolerantes (%)				X
No. de especies tolerantes nativas (%)				X
No. de especies tolerantes (%)				X
Individuos de especies exóticas (%)			X	X
Individuos omnívoros (%)				X
No. de especies omnívoras (%)				X
No. de especies insectívoras (%)				X
No. de especies herbívoras (%)				X
No. de especies carnívoras (%)		Y		X
No. de especies primarias (%)		X		X
No. de especies microfagas (%)				X
No. de especies secundarias (%)				X
No. de especies neárticas (%)		X		X
No. de especies neotropicales (%)				X
Individuos vivíparos nativos (%)				X
No. de peces por ½ hora de muestreo				X
Individuos enfermos, deformes, tumores (%)				X
No. de especies comunes nativas	X	X	X	
No. de especies de Goodeidae nativas				X

No. de especies de <i>Chirostoma</i> sp.				X
No. de especies sensibles nativas	X	X	X	
Biomasa de especies tolerantes (%)				X
Biomasa de especies exóticas (%)				X
Biomasa de carnívoros nativos (%)				X
Longitud estándar máxima de especies nativas				X
Especies de parásitos exóticos (%)				X
No. de especies exóticas (%)		X		X
No. de especies intrusas (%)				X
No. de individuos exóticos		X		X
No. de especies intrusas por colección (%)				X

Anexo 10

Métricas del IBI utilizadas para este estudio en todos los sitios de muestreo.

No.	Métrica	Valor máximo de puntos en cada métrica
1	Número de especies nativas	12.5 (si se conservan todas las especies)
2	Número de especies sensibles	12.5 (de acuerdo al número más alto históricamente)
3	Porcentaje de individuos de especies tolerantes	12.5 (de acuerdo al más bajo actualmente)
4	Porcentaje de individuos de especies exóticas	12.5 (de acuerdo al más bajo actualmente)
5	Número de peces por 30 minutos de muestreo	12.5 (de acuerdo al número más alto actualmente)
6	Porcentaje de individuos enfermos, deformados, aletas desgastadas, lesiones o tumores	12.5 (de acuerdo al porcentaje más bajo actualmente)
7	Número de especies de goodeidos	12.5 (de acuerdo al más alto históricamente)
8	Número de especies omnívoras	12.5 (de acuerdo al más alto históricamente)
	Total	100

Anexo 11

Clasificación de amenazas en cada uno de los sitios, donde X indica la presencia de la amenaza en el sitio.

Amenazas Directas	División	Op opé o	Rancho el Molino	La Mintz ita	Tocu mbo	La Lu z	Zac apu	Palo Verd e	San Sebasti án	Teuc hitlá n	Pot rer o gra nde
Desarrollo residencial y comercial	Áreas de vivienda y urbanas	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Áreas comerciales e industriales			X							X
	Áreas de turismo y recreación			X	X	X	X	X	X	X	
Agricultura y acuicultura	Cultivos anuales y perennes			X	X	X		X		X	X
	Ganadería							X		X	X
Corredores de transporte y servicios	Carreteras y ferrocarriles	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Líneas de servicios públicos	X	X	X	X		x	X	X	X	X
Intrusiones y disturbios humanos	Actividades recreativas	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Extracción de agua masiva			X	X	X				X	
Modificaciones del sistema natural	Presas gestión/usos del agua	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Otras modificaciones del ecosistema	X	X		X	X	x	X		X	X
Especies y genes invasores y otras problemáticas	Especies invasoras no nativas	X		X	X	X	X	X	X	X	X
	Especies no nativas problemáticas (plaga de Lirio)							X		X	
Contaminación	Aguas residuales domésticas y aguas residuales urbanas	X		X			X		X	X	X
	Basura y desechos sólidos	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Efluentes industriales y militares			X							X

	Efluentes agrícolas y forestales			X	X			X		X	X
--	----------------------------------	--	--	---	---	--	--	---	--	---	---

Anexo 12

Resultados del nivel de amenaza en cada sitio de muestreo.

Sitio	Puntuaje	Nivel de amenaza
Zacapu	30	Moderado
La Mintzita	30	Moderado
Rancho el molino	25	Moderada
Presa la luz	35	Alta
Opopéo	30	Moderado
Tocumbo	35	Alta
Teuchitlán	40	Alta
San Sebastián	30	Moderado
Presa palo verde	40	Alta
Potrero grande	35	Alta

Anexo 13

Valoración de la Calidad Ambiental Visual (VCAV) en cada punto de muestreo

Sitio	Punto de muestreo	VCAV	Categoría
Zacapu	La Angostura	10	Marginal

	Lago	19	Optima
	Río	89	Pobre
La Mintzita	Arroyo	117	Pobre
	Manantial	16	Suboptima
Rancho el molino	Manantial	16	Suboptima
La luz	Manantial	3	Pobre
	Presa	16	Suboptima
Opopéo	Punto 1	13	Suboptima
	Punto 2	13	Suboptima
Tocumbo	Manantial	0	Pobre
	Arroyo	104	Pobre
Teuchitlán	Inicio del Río	53	Pobre
	Compuerta	86	Pobre
	Manantial	3	Pobre
San Sebastián	Manantial	2	Pobre
Presa palo verde	Punto 1	6	Pobre
	Punto 2	6	Pobre
Potrero Grande	Sin datos	-	-

Anexo 14

Familias de macroinvertebrados encontradas

Michoacán								Jalisco		
Orden	Familia	Zacapu	La Mintzita	Rancho el molino	Presa la luz	Opopéo	Tocumbo	Teuchitlán	San Sebastián	Palo verde
Amphipoda	Hyalellidae	*	*	*	*		*	*		
Arhynchobdellida	Erpobdellidae	*		*			*		*	*
Basommatophora	Lymnaeidae	*				*	*			*
	Physidae	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Planorbidae	*	*	*	*	*	*	*		*
	Sphaeriidae	*	*	*	*		*	*	*	*
Coleoptera	Carabidae							*		
	Chrysomelidae									*
	Curculionidae		*			*				*
	Dytiscidae	*		*	*	*		*		
	Elmidae	*								
	Gyrinidae	*								
	Haliplidae	*								
	Hydraenidae							*		
	Hydrophilidae	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Psephenidae	*								
	Scirtidae			*	*			*	*	
	Staphylinidae	*	*	*		*		*		*
Corbiculacea	Cyrenidae	*						*		
Decapoda	Cambaridae	*	*	*	*	*		*	*	*
	Pseudothelphusidae		*							
Diptera	Ceratopogonidae		*		*	*		*	*	*
	Chironomidae	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Culicidae	*	*			*		*		*

	Dixidae			*		*				
	Empididae	*		*		*		*		
	Ephydriidae				*					
	Muscidae					*				
	Psychodidae	*				*		*		
	Sciomyzidae					*				
	Simuliidae	*	*	*				*		
	Stratiomyidae	*	*					*		*
	Tipulidae		*	*	*	*	*	*	*	
Entomobryomorpha	Isotomidae	*	*	*	*	*		*	*	*
	Poduridae	*				*				
	Sminthuridae		*	*		*		*		*
Ephemeroptera	Baetidae	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Caenidae	*	*	*	*				*	
	Leptohyphidae	*	*	*	*	*				
Haplotaenidia	Haplotaenidiidae	*				*				
	Naididae			*	*		*			
Hemiptera	Belostomatidae	*	*	*		*	*			*
	Corixidae	*				*				
	Gerridae	*		*		*				
	Macrovelidae			*			*			
	Mesovelidae					*		*		*
	Naucoridae		*	*						*
	Nepidae		*					*		
	Notonectidae	*				*				
	Veliidae	*		*		*				*
Hydrachnidia	Hydrachnidia	*	*	*	*	*	*	*		*
Hydroida	Hydridae	*								
Isopoda	Asellidae	*	*	*	*	*	*	*		

Lepidoptera	Crambidae Noctuidae	*	*	*				*	*	
Littorinimorpha	Pomatiopsidae	*						*		
Lumbriculida	Lumbriculidae	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Megastropoda	Ampullariidae Valvatidae	*		*				*		
Neotaenioglossa	Hydrobiidae Thiaridae	*				*		*		*
Neuroptera	Sisyridae				*					
Odonata	Aeshnidae		*	*	*	*	*	*		*
	Calopterygidae	*	*							
	Coenagrionidae	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Libellulidae					*		*		*
Rhynchobdellida	Glossiphoniidae	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Piscicolidae									*
Trichoptera	Calamoceratidae	*	*				*			
	Helicopsychidae			*						
	Hydropsychidae	*								
	Hydroptilidae	*	*					*		*
	Lepidostomatidae						*			
	Leptoceridae	*								
Tricladida	DugesIIDae	*	*				*			*
	Planariidae					*				

Anexo 15

Especies de peces colectadas en sitios de Michoacán

Zacapu	Familia	Especie	Origen	La Angostura	Lago	Río
--------	---------	---------	--------	--------------	------	-----

				Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas
	Goodeidae	<i>Goodea atripinnis</i>	N	*	*	*		*	*
		<i>Zoogoneticus quitzeoensis</i>	N	*	*	*	*	*	*
		<i>Xenotoca variata</i>	N	*	*	*	*	*	*
		<i>Allotoca zacapuensis</i>	N	*					
		<i>Hubbsina turnerii</i>	N		*	*	*		*
		<i>Allophorus robustus</i>	N		*	*		*	
		<i>Skiffia lermae</i>	N			*			
	Poeciliidae	<i>Poeciliopsis infans</i>	N			*		*	*
		<i>Pseudoxiphophorus bimaculatus</i>	E	*					
	Cyprinidae	<i>Notropis grandis</i>	N	O	O	O	O		
		<i>Algansea tincella</i>	N			*	*		
		<i>Cyprinus carpio</i>	E			O	O		
		<i>Ctenopharingodon idella</i>	E			O	O		
	Atherinopsidae	<i>Chirostoma humboldtianum</i>	N			*	*		
La Mintzita	Familia	Especie	Origen	Arroyo		Manantial			
				Lluvias	Secas	Lluvias	Secas		
	Goodeidae	<i>Goodea atripinnis</i>	N	*			*		
		<i>Zoogoneticus quitzeoensis</i>	N			*	*		
		<i>Xenotoca variata</i>	N	O	O	*	*		
		<i>Skiffia lermae</i>	N	O	*	*	*		
	Poeciliidae	<i>Poeciliopsis infans</i>	N			O	O		
		<i>Pseudoxiphophorus bimaculatus</i>	E	*	*	*	*		
		<i>Xiphophorus hellerii</i>	E	O	*	*	*		
	Cyprinidae	<i>Notropis calientis</i>	N			O	O		
Rancho el molino	Familia	Especie	Origen	Manantial					
				Lluvias	Secas				
	Goodeidae	<i>Allophorus robustus</i>	N	*	*				
		<i>Allotoca diazi</i>	N	*	*				

		<i>Allotoca dugesii</i>	N	*	*		
		<i>Goodea atripinnis</i>	N	*			
		<i>Skiffia lermæ</i>	N	*	*		
La Luz	Familia	Especie	Origen	Manantial		Presa	
				Lluvias	Secas	Lluvias	Secas
	Goodeidae	<i>Goodea atripinnis</i>	N	*	*	*	*
		<i>Zoogoneticus purhepechus</i>	N	*		*	*
		<i>Chapalichthys encaustus</i>	N	*		*	*
		<i>Allophorus robustus</i>	N		*	*	*
		<i>Skiffia multipunctata</i>	N	*	*	*	*
	Poeciliidae	<i>Poeciliopsis infans</i>	N				*
		<i>Xiphophorus hellerii</i>	E			O	
	Cyprinidae	<i>Cyprinus carpio</i>	E	O	O	O	
	Catostomidae	<i>Moxostoma austrinum</i>	N	O	O	O	O
Opopéo	Familia	Especie	Origen	Punto 1		Punto 2	
				Lluvias	Secas	Lluvias	Secas
	Goodeidae	<i>Goodea atripinnis</i>	N	*		*	*
	Cyprinidae	<i>Carassius auratus</i>	E			O	*
		<i>Cyprinus carpio</i>	E	*	*	O	*
Tocumbo	Familia	Especie	Origen	Manantial		Arroyo	
				Lluvias	Secas	Lluvias	Secas
	Goodeidae	<i>Ilyodon whitei</i>	N	*	*	*	*
		<i>Chapalichthys pardalis</i>	N	*	*	*	*
		<i>Goodea atripinnis</i>	N	O	*	*	*
	Poeciliidae	<i>Poeciliopsis infans</i>	N			*	

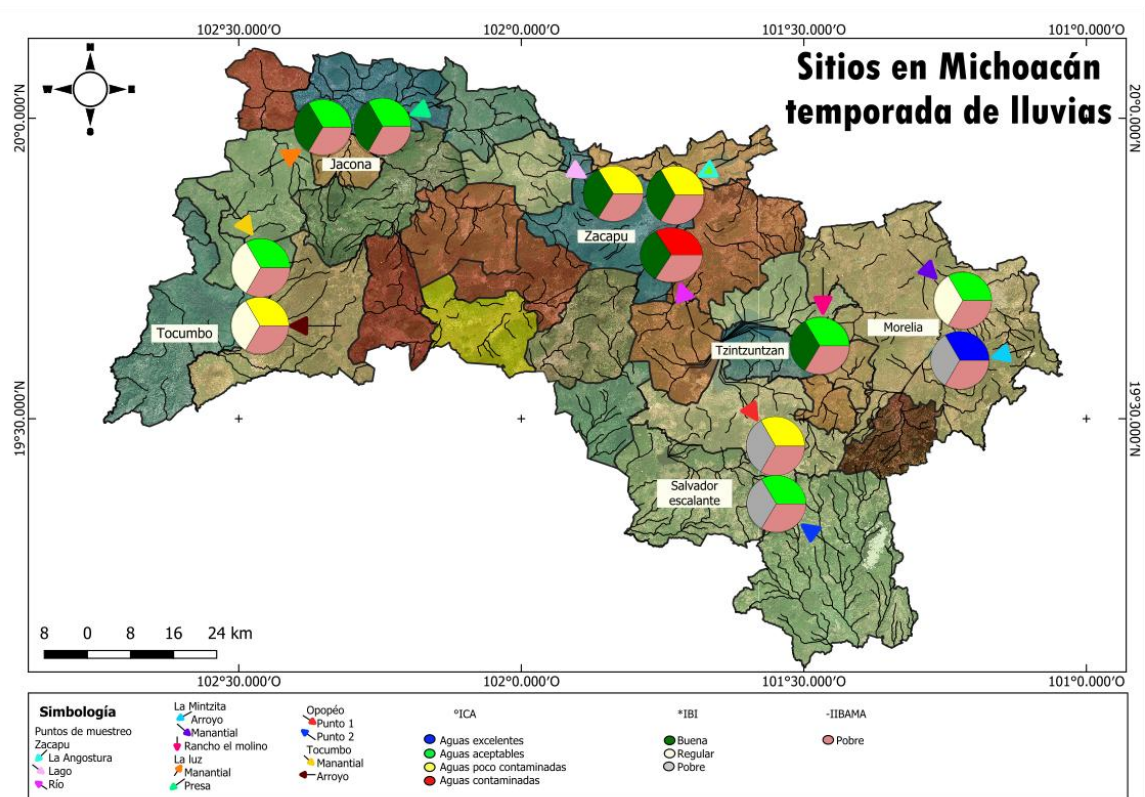
		<i>Poeciliopsis gracilis</i>	E	*		*		
		<i>Poecilia reticulata</i>	E	*	*	*	*	
		<i>Xiphophorus hellerii</i>	E	*	*	*	*	

Anexo 16

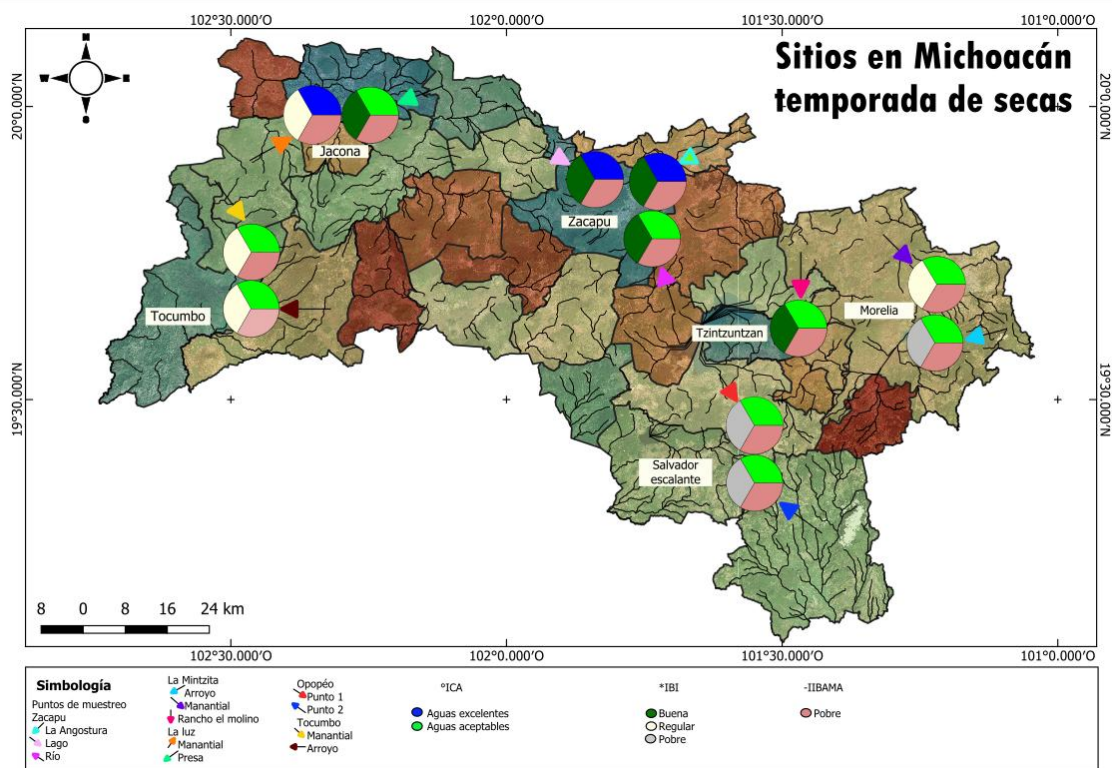
Especies de peces colectadas en sitios de jalisco

	Familia	Especie	Origen	Inicio del río		Compuerta		Manantial	
				Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas
Teuchitlán	Goodeidae	<i>Goodea atripinnis</i>	N	O	O	O	O	*	O
		<i>Zoogoneticus purhepechus</i>	N	*	*			O	O
		<i>Zoogoneticus tequila</i>	N					*	*
		<i>Amea splendens</i>	N	O	O			O	*
	Poeciliidae	<i>Poeciliopsis infans</i>	N			O	*	*	*
		<i>Xiphophorus maculatus</i>	E			*	O	O	O
		<i>Poecilia sphenops</i>	E	O	*	*	*	O	*
		<i>Pseudoxiphophorus bimaculatus</i>	E	*	*	*	*	*	*
		<i>Xiphophorus hellerii</i>	E	*	*		*	*	*
	Cichlidae	<i>Oreochromis sp.</i>	E	*	*	*	O	O	O
San Sebastián	Familia	Especie	Origen	Manantial					
				Lluvias	Secas				
	Goodeidae	<i>Xenotoca doadrioi</i>	N	*	*				
		<i>Xenotoca melanosoma</i>	N	*	*				
		<i>Goodea atripinnis</i>	N		*				
	Poeciliidae	<i>Pseudoxiphophorus bimaculatus</i>	E	*	*				
		<i>Xiphophorus maculatus</i>	E	*	*				
	Cichlidae	<i>Oreochromis sp.</i>	E	*	*				
Palo verde	Familia	Especie	Origen	Punto 1		Punto 2			

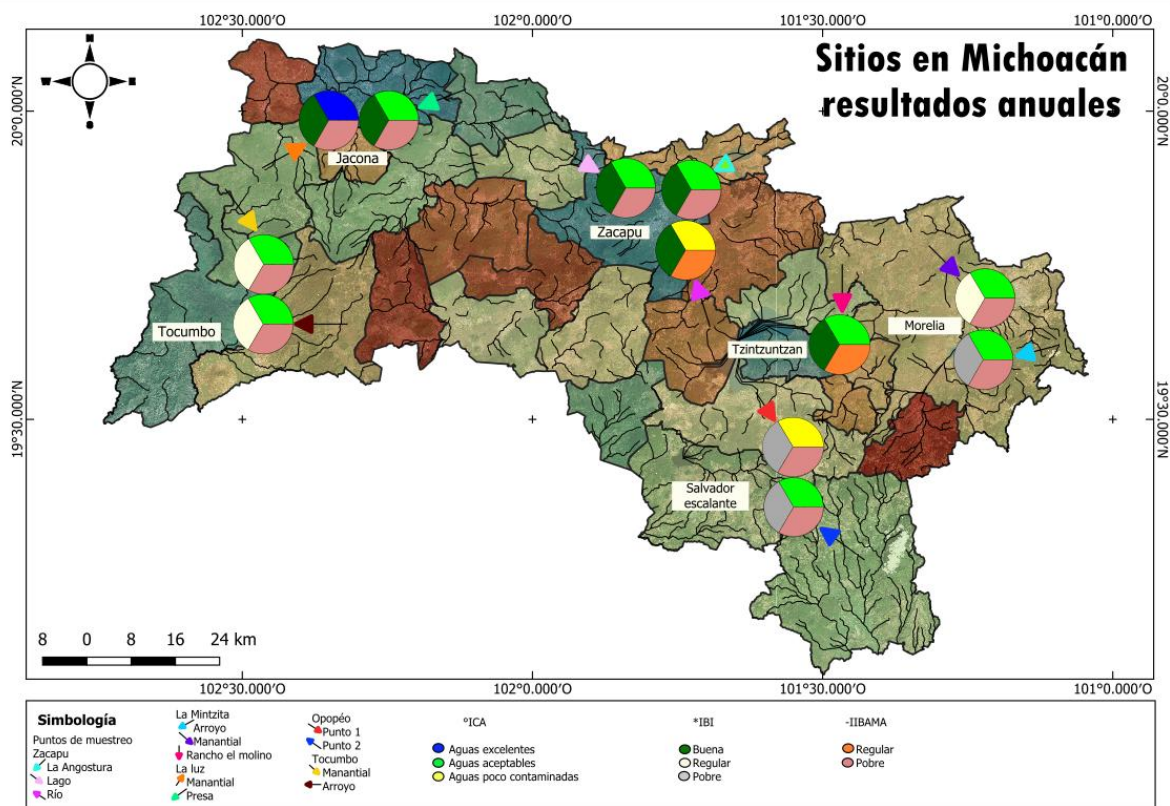
				Lluvias	Secas	Lluvias	Secas
	Goodeidae	<i>Allotoca maculata</i>	N		*		*
	Poeciliidae	<i>Poeciliopsis infans</i>	N	*		*	
		<i>Poecilia sphenops</i>	E				*
		<i>Pseudoxiphophorus bimaculatus</i>	E		*	*	*
	Cichlidae	<i>Oreochromis</i> sp.	E	*	*	*	*



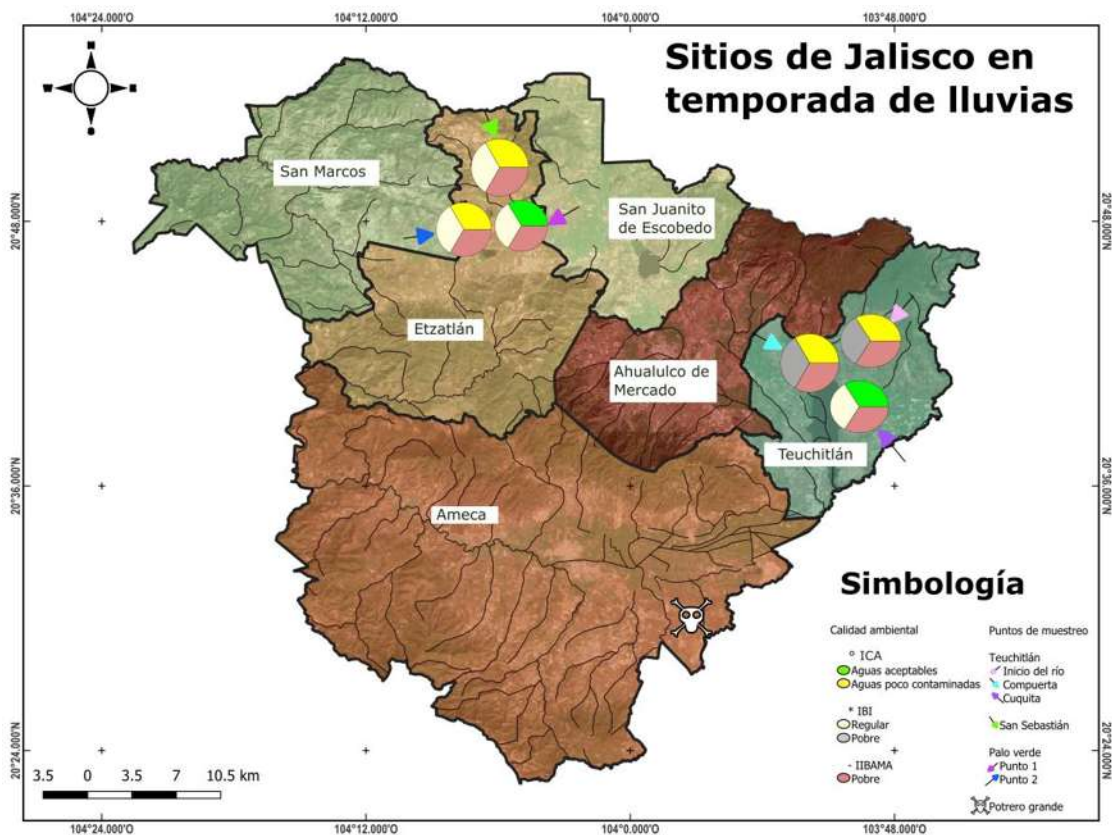
Anexo 17 Resultados de los índices en temporada de lluvias en Michoacán.



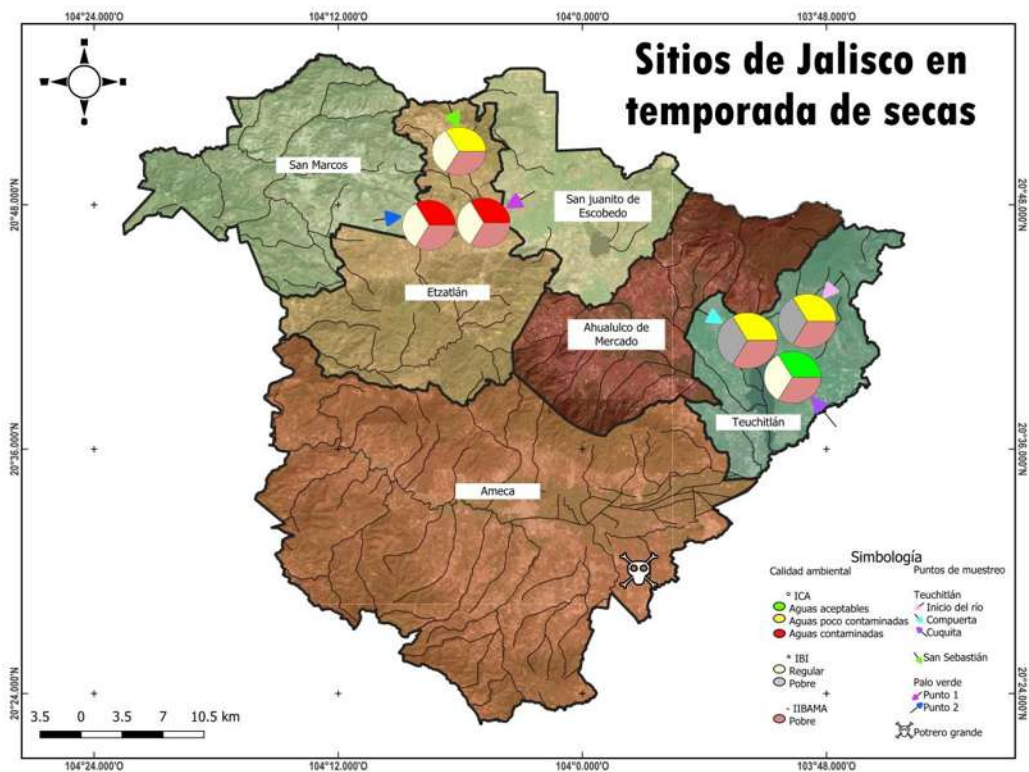
Anexo 18 Resultados de índices en temporada de secas Michoacán.



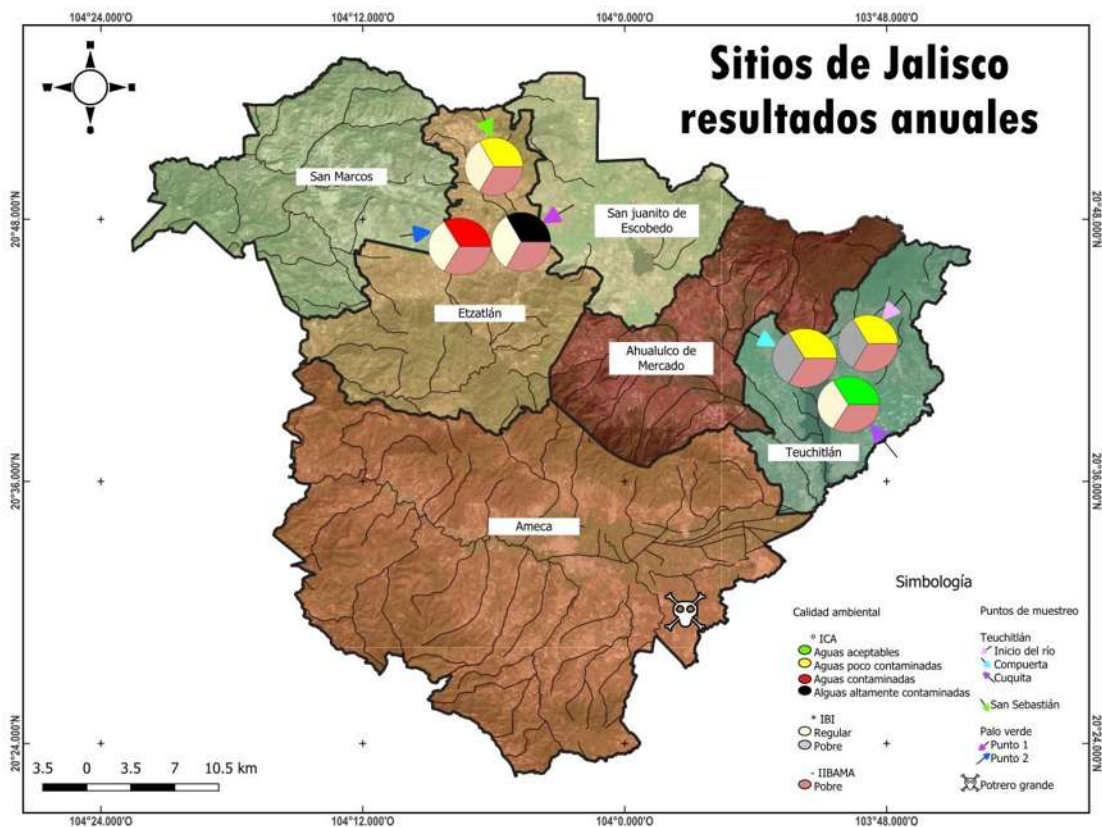
Anexo 19 Resultados anuales en cada punto de muestreo en Michoacán.



Anexo 20 Resultados de los índices en temporada de lluvias en Jalisco.



Anexo 21 Resultados de los índices en temporada de secas en jalisco.



Anexo 22 Resultados anuales en cada punto de muestreo en Jalisco.

Mirian Adilene Chávez Campos

Evaluación de la calidad ambiental en sitios prioritarios para la conservación de la fauna íctica en el centro de México.pdf

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:558640846

Fecha de entrega

19 feb 2026, 12:06 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

19 feb 2026, 12:27 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

Evaluación de la calidad ambiental en sitios prioritarios para la conservación de la fauna íctica e....pdf

Tamaño del archivo

4.3 MB

113 páginas

26.490 palabras

149.083 caracteres

13% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 13%  Fuentes de Internet
- 6%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas	
Título del trabajo	Evaluación de la calidad ambiental en sitios prioritarios para la conservación de la fauna íctica en el centro de México	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Mirian Adilene Chávez Campos	1719777d@umich.mx
Director	Omar Domínguez Domínguez	omar.dominguez@umich.mx
Codirector	Arely Ramírez García	arelyr@umich.mx
Coordinador del programa	Rosa Elvira Núñez Anita	mae.ciencias.biologicas@umich.mx

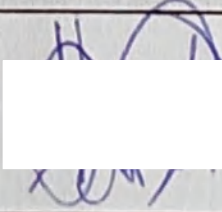
Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	Sí	Uso para corrección de ortografía y gramática

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	Sí	Traducción de artículos científicos
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	Sí	Asistencia en corrección de script para el estadístico R Studio y uso para problemas con la creación de mapas en el software Qgis
Búsqueda y organización de información	Sí	Uso para búsqueda de artículos científicos y creación de tablas comparativas de los mismos artículos para una mejor visualización de la información
Formateo de las referencias bibliográficas	Sí	Ayuda para dar formato a las referencias
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Mirian Adilene Chavez Campos 
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán a 18 de febrero de 2026