

Calidad del agua e integridad biótica en manantiales de la subcuenca Río Copalita, Oaxaca

Water quality and biotic integrity in springs of the Copalita River sub-basin, Oaxaca

Adriana Araceli García-Ortiz¹, Salvador Lozano-Trejo^{2*}, Ricardo Miguel Pérez-Munguía³, Idolina Molina-León³, Ernesto Castañeda-Hidalgo² y Gustavo Omar Díaz-Zorrilla²

Recibido: 15 de mayo de 2023.

Aceptado: 10 de enero de 2024.

Publicado: agosto de 2024.

RESUMEN

Antecedentes: los manantiales son una buena opción como suministro de agua, ante esto, su explotación lleva a una disminución de las aguas subterráneas, afectando la cantidad y calidad del recurso. **Objetivo:** evaluar la calidad del agua de manantiales y determinar el índice de integridad biótica asociado a macroinvertebrados acuáticos, para evaluar el grado de conservación de los manantiales. **Método:** se evaluaron ocho manantiales en épocas de estiaje (mayo) y post lluvias (diciembre) a partir de un muestreo selectivo. De acuerdo a diversas Normas Mexicanas se determinaron algunos parámetros físico-químicos y bacteriológicos; simultáneamente se realizó la colecta de macroinvertebrados acuáticos. Posterior a esto, se determinó el índice de calidad del agua mediante tres métodos. Se realizaron análisis de correspondencia sin tendencia y, por último, se determinó el índice de integridad biótica asociado a macroinvertebrados acuáticos (IIBAMA). **Resultados:** los valores de los parámetros físico-químicos y bacteriológicos analizados indican contaminación mostrando valores más altos en la época de post lluvias. De acuerdo al IIBAMA, siete de ocho sitios (87.5 %) se valoran como impactados, al clasificarse en las categorías de “pobre y regular”, sólo el sitio Arroyo Guajolote está en la categoría de bueno (12.5 %). **Conclusiones:** Los manantiales de estudio se encuentran en cierta medida impactados debido a actividades antropogénicas relacionadas con el abastecimiento de agua para la población y actividades recreativas, esto compromete el buen funcionamiento del ecosistema y por consecuencia la calidad de los servicios ecosistémicos brindados.

Palabras clave: contaminación, deterioro, ICA, IIBAMA, macroinvertebrados acuáticos.

ABSTRAC

Background: springs are a good option for water supply, but their exploitation leads to a decrease in groundwater, affecting the quantity and quality of the resource. **Aim:** to evaluate the quality of spring water and determine the index of biotic integrity associated with aquatic macroinvertebrates to determine the degree of conservation of the springs. **Methods:** eight springs were evaluated during low water (May) and post rainfall (December) periods based on selective sampling. In accordance with various Mexican Standards, some physicochemical and bacteriological parameters were determined; simultaneously, aquatic macroinvertebrates were collected. Subsequently, the water quality index was determined using three methods. Correspondence analyses were performed without trend and finally, the index of biotic integrity associated with aquatic macroinvertebrates (IIBAMA) was determined. **Results:** the values of the physical-chemical and bacteriological parameters analyzed indicate contamination, showing higher values in the post-rainy season. According to IIBAMA, seven of eight sites (87.5 %) are rated as impacted, being classified in the “poor and fair” categories; only the Arroyo Guajolote site is in the “good” category (12.5 %). **Conclusions:** the springs studied are impacted due to anthropogenic activities related to water supply for the population and recreational activities, this compromises the proper functioning of the ecosystem and consequently the quality of ecosystem services provided.

Key words: aquatic macroinvertebrates, degradation, IIBAMA, pollution, WQI.

¹ Estudiante del Programa de Maestría en Ciencias en Productividad en Agroecosistemas, Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, Tecnológico Nacional de México. Ex Hacienda de Nazareno, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, 71230. México.

² Profesor investigador del Programa de Maestría en Ciencias en Productividad en Agroecosistemas, Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, Tecnológico Nacional de México. Ex Hacienda de Nazareno, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, 71230. México.

³ Profesor investigador de la Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Av. Francisco J. Múgica s/n, Ciudad Universitaria, Col. Felicitas del Río, Morelia, Michoacán, 58030. México.

*Corresponding author:

Salvador Lozano-Trejo: e-mail: salvador.lt@voaxaca.tecnm.mx

To quote as:

García-Ortiz, A. A., S. Lozano-Trejo, R. M. Pérez-Munguía, I. Molina-León, E. Castañeda-Hidalgo & G. O. Díaz-Zorrilla. 2024. Calidad del agua e integridad biótica en manantiales de la Subcuenca Río Copalita, Oaxaca. *Hidrobiológica* 34 (1): 81-93.

DOI:10.24275/SPMC1325

INTRODUCCIÓN

El recurso agua es indispensable para el desarrollo de la vida de organismos. El ser humano depende de la disponibilidad de agua tanto para consumo doméstico como para la realización de actividades agrícolas e industriales. De acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2014) con el paso del tiempo y ante el aumento de la población humana la demanda por el agua se ha incrementado, aunado a esto, la contaminación del recurso que afecta su calidad puede acrecentar la escasez. Las comunidades rurales han optado por aprovechar los manantiales ubicados en sus territorios para cubrir la demanda del agua, por tal motivo es importante que se conserven sus atributos de buena calidad para evitar problemas de salud en la población; ante esto, el agua que se destina para uso y consumo humano debe cumplir con los parámetros que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 (DOF, 2022; Espinosa-García, 2014). Mientras que, para los usos recreativo, agrícola, pecuario, acuicultura y la protección de la vida acuática se emplea la Ley Federal de Derechos, disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes (CONAGUA, 2023). La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2018) y Rodrigo-Herrera *et al.* (2018) mencionan que las cualidades físicas, químicas y biológicas (bacteriológicas) son las que determinan la calidad del agua al compararlas con normas oficiales o estándares de calidad. Estas características determinan la aceptabilidad del recurso para determinado uso (Camacho-Ballesteros *et al.*, 2020). Si bien, los análisis físico-químicos y bacteriológicos del agua son importantes para determinar la calidad, existe otro tipo de monitoreo de la calidad del agua y del ecosistema, los cuales se basan en el uso de bioindicadores, es decir, organismos vivos que son sensibles a los cambios en su hábitat acuático, lo que puede indicar alteración en el medio (García *et al.*, 2017). Los organismos bioindicadores útiles, deben presentar ciertas características, por ejemplo, deben ser fáciles de identificar, así como de muestrear y cuantificar, de distribución amplia, abundantes, con ecología y ciclo biológico bien estudiados (Viteri-Garcés *et al.*, 2017). Un grupo de bioindicadores que están siendo utilizados con mayor frecuencia para estudios de esta naturaleza son los macroinvertebrados acuáticos, los cuales registran una longitud superior a los 0.5 mm de largo y se pueden observar a simple vista, el método de evaluación basado en ellos es simple, rápido y altamente confiable (Osejos-Merino *et al.*, 2020). A este grupo pertenecen los filos Arthropoda, Mollusca, Annelida, Nematoda y Platyhelminthes (Granados-Martínez & Batista, 2017). Algunas de las características por las cuales se han elegido a los macroinvertebrados como los bioindicadores más utilizados, es por su amplia distribución y gran diversidad de respuestas a los gradientes ambientales; la mayoría son sedentarios y otros tienen gran reacción de huida (deriva), algunos tienen ciclos de vida largo, su taxonomía a nivel familia es bien conocida y el muestreo es sencillo y barato (Prat *et al.*, 2009; Tenjo-Morales & Cárdenas-Castro, 2015). La calidad de los ecosistemas acuáticos, se ve reflejada en la composición de las comunidades de macroinvertebrados, por lo que estos organismos son utilizados como una parte integral para el monitoreo de la calidad del agua (Roldán-Pérez, 2016). La cuenca del Río Copalita y Otros además de suministrar agua a las comunidades asentadas dentro de ella, es la principal proveedora de agua del complejo turístico Bahías de Huatulco (SEMARNAT *et al.*, 2009); ante esto, estudios realizados por la fundación World Wildlife Fund (WWF, 2008) revelan que en la zona existe una dinámica hídrica deteriorada,

así como pérdida de biodiversidad. Debido a esto los estudios de análisis de calidad del agua en los ríos tributarios de la subcuenca del Río Copalita se realizan de manera continua. Los monitoreos relacionados a calidad del agua se deben basar en calidad física, química y biológica del medio (Pérez-Munguía *et al.*, 2009), ya que estos elementos se entrelazan y cualquier cambio impacta en el ecosistema. La degradación ambiental tiene efectos negativos principalmente en los seres vivos que habitan en la zona, por tal motivo los índices de integridad biótica ayudan a conocer el grado de intervención humana en los ecosistemas. El objetivo de la presente investigación fue evaluar la calidad del agua de manantiales, así como la integridad biótica de macroinvertebrados acuáticos, para determinar el nivel de conservación de los manantiales de la subcuenca Río Copalita.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del área de estudio. Los manantiales seleccionados para la investigación se ubican en la microcuenca San Cristóbal la cual ocupa 336 km² de superficie de la subcuenca; y la microcuenca La Venta con 265 km² de territorio (Figura 1), las cuales se anidan en la subcuenca Río Copalita (RH21Ba) y que a su vez forma parte de la cuenca Río Copalita y Otros (RH21B), perteneciente a la Región Hidrográfica 21 denominada Costa de Oaxaca (Puerto Ángel) (INEGI-SIATL, 2021).

Metodología. Existen factores que influyen en las características físico-químicas y bacteriológicas de los cuerpos de agua, por ejemplo, vegetación, pendiente, clima, suelo; por tal motivo se debe elegir un espacio idóneo para realizar la toma de muestras (De la Lanza-Espino, 2014). Se eligieron espacios de aproximadamente 10 cm de profundidad, libres de vegetación y de sedimentos, evitando que el material para la toma de muestras entre en contacto con el sedimento del fondo.

Selección y muestreo de manantiales. Los manantiales seleccionados fueron ocho, cuatro de tipo helocreno (La Ciénega, Cieneguilla, Llano Grande y La Nevería) y cuatro reocreno (Arroyo Guajolote, Las Golondrinas, Arroyo Gretado y Santo Domingo). El tipo de muestreo fue selectivo, y los manantiales se eligieron de acuerdo al criterio del grado de conservación del ecosistema en el que se sitúan, tomando en cuenta manantiales que no tienen estructuras de captación en su origen. El estudio se llevó a cabo en los meses de mayo y diciembre de 2022, en época de estiaje y post lluvias respectivamente.

Caracterización del entorno. De acuerdo con la clasificación de Steiman (Barquín-Ortiz, 2007) se determinó el tipo de manantial (limnocreno, reocreno, helocreno) y se realizó una descripción de su entorno mediante una ficha descriptiva para inventario de manantiales, anotando coordenadas del sitio, nombre del paraje, localidad, municipio y microcuenca a la que pertenece, ecosistema léntico o lótico, tipo de vegetación, impactos, amenazas o presiones sobre el manantial, por último, el uso que la comunidad le da al agua.

Las muestras de agua se tomaron cerca del nacimiento del manantial, y en cada uno se determinó:

Parámetros físicos. *In situ* la temperatura del ambiente, así como del agua mediante un termómetro de mercurio y de acuerdo a la NMX-AA-007-SCFI-2013 (DOF, 2014). Para medir pH, conductividad eléctrica y salinidad se utilizó el conductímetro Instruments Hanna® previamente calibrado, de acuerdo a la NMX-AA-093-SCFI-2018 (DOF, 2018).

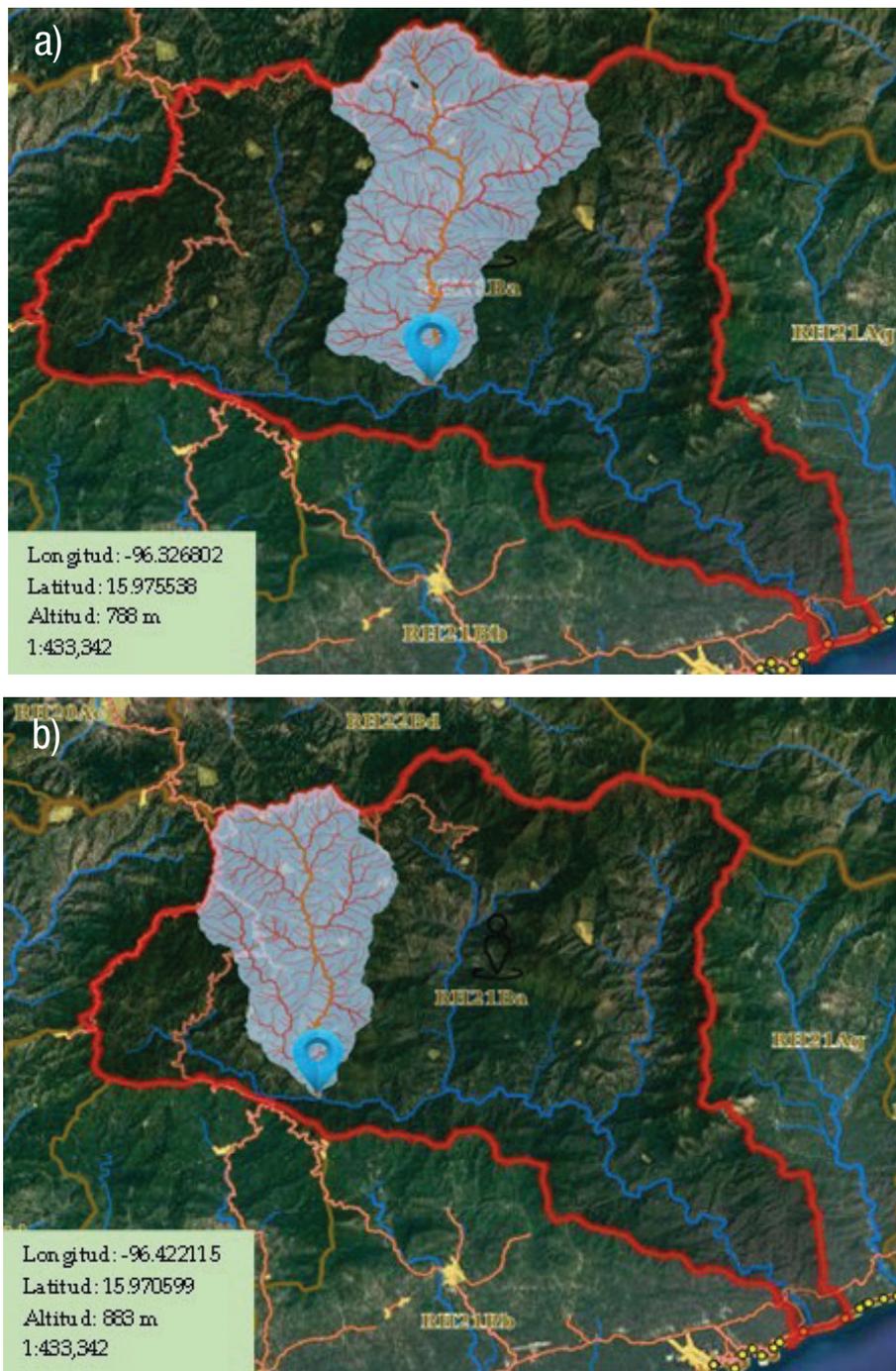


Figura 1. a) Ubicación de la microcuenca San Cristóbal. b) Ubicación de la microcuenca La Venta.

Parámetros químicos. Para determinar el oxígeno disuelto en agua, se tomó una muestra en un frasco Winkler. Simultáneamente se recolectó agua en garrafas de tres litros para determinar sulfatos (SO_4^{2-}) acorde a la NMX-AA-074-SCFI-2014 (DOF, 2014), nitritos (NO_2^-) siguiendo la NMX-AA-154-SCFI-2011 (DOF, 2011), nitratos (NO_3^-) de acuerdo a la NMX-AA-079-SCFI-2001 (DOF, 2001), dureza de calcio y dureza de

magnesio siguiendo la NMX-AA-073-SCFI-2001 (DOF, 2001), dureza total acorde a la NMX-AA-072-SCFI-2001 (DOF, 2001), nitrógeno amoniacal de acuerdo con Solórzano (1969) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) acorde a la NMX-AA-028-SCFI-2001 (DOF, 2001).

Parámetros bacteriológicos. Se tomaron muestras en bolsas de polietileno Whirl-Pak® para la posterior determinación de coliformes tota-

les y fecales, de acuerdo con la NMX-AA-042-SCFI-2015 (DOF, 2015), y de bacterias mesófilas totales acorde a la NOM-092-SSA1-1994 (DOF, 1995).

Las muestras para determinar los parámetros químicos y biológicos se transportaron en hieleras para conservar una temperatura menor de 4 °C; el análisis se realizó en el Laboratorio de Aguas, Alimentos y Lácteos de Oaxaca (Laaactolab) S.A. de C.V. ubicado en la Ciudad de Oaxaca de Juárez.

Parámetros biológicos. La colecta de macroinvertebrados acuáticos se realizó siguiendo la metodología propuesta por Álvarez-Arango (2005), con el uso de una red tipo D-net y abarcando todos los hábitats posibles, para lo cual se removieron piedras, hojarascas, troncos, sedimento, etc., con la finalidad de colectar la mayor cantidad de macroinvertebrados. Las muestras colectadas se colocaron en bolsas herméticas de plástico con alcohol etílico al 70 % y se etiquetaron con el nombre del sitio y la fecha de colecta. En el laboratorio de posgrado del Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (ITVO), con el uso del estereoscopio se separaron los individuos y se preservaron en frascos de plástico con alcohol, anotando los mismos datos que contiene la bolsa; posteriormente se realizó la identificación taxonómica a nivel familia de acuerdo a las claves de Merrit *et al.* (2008), y de catálogos ilustrados de Oscoz-Escudero (2009), Gutiérrez-Fonseca *et al.* (2016), Pérez *et al.* (2016) y, Andino-Guarderas *et al.* (2017). Piñón-Flores *et al.* (2014) sostienen que el uso de taxones superiores es más práctico para este tipo de estudios.

Análisis de las variables. Se determinó el índice de calidad del agua (ICA) siguiendo tres métodos.

De acuerdo a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 1999).

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

Donde: n=18

i=cada uno de los parámetros

I_i=resultado de cada parámetro

W_i=peso/factor de ponderación para cada parámetro

El propuesto por la National Sanitation Foundation (NSF, 2015), el índice se determina mediante una calculadora disponible en la página web de la NSF.

Se calculó el índice estándar WQI (Brown *et al.*, 1970).

$$ICA = \sum_{i=1}^9 (Sub_i * w_i)$$

Donde: w_i=pesos relativos asignados a cada parámetro (Sub), ponderados entre 0 y 1, de tal forma que se cumpla que la sumatoria sea igual a uno.

Sub_i=subíndice del parámetro i.

Se realizaron análisis de correlación entre variables físico-químicas, bacteriológicas, y biológicas mediante Rho (ρ) de Spearman (ρ ≤ 0.05) con el uso del paquete estadístico JMP Pro 14® (SAS Institute,

2008). Con base en los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos se realizaron análisis de correspondencia sin tendencia. Finalmente, se determinó el Índice de Integridad Biótica asociado a Macroinvertebrados Acuáticos (IIBAMA) acorde a lo propuesto por Pérez-Munguía & Pineda-López (2005) para conocer la integridad ecológica de los sitios.

RESULTADOS

Caracterización del entorno. Los manantiales ubicados en los parajes Cieneguilla, La Ciénega, Llano Grande y La Nevería, pertenecientes a la microcuenca del río San Cristóbal son de tipo helocreno. El agua de estos manantiales surge a la superficie de manera difusa formando humedales, por tal motivo es un ecosistema léntico. El manantial ubicado en el paraje Santo Domingo perteneciente a la microcuenca del río San Cristóbal es de tipo reocreno, al igual que los ubicados en los parajes Arroyo Guajolote, Las Golondrinas, Arroyo Gretado pertenecientes en la microcuenca del río La Venta. En este tipo de manantial, el agua subterránea que emerge a la superficie forma un arroyo o río de manera inmediata, se les considera ecosistemas lóticos. La vegetación predominante en los sitios de estudio es de pino y encino (Tabla 1).

La mayoría de los manantiales están destinados al abastecimiento de agua a la población, a excepción de los ubicados en los parajes Arroyo Guajolote, Santo Domingo y La Nevería. Por tal motivo los que abastecen de agua a las comunidades cuentan con sistemas de captación, lo que ha impactado al ecosistema. El manantial del sitio Arroyo Guajolote es utilizado con fines recreativos, esto ha ocasionado acumulación de residuos sólidos en algunas partes de su arroyo; por su parte los que se ubican en los parajes La Nevería y Santo Domingo no están destinados a ningún uso.

Parámetros físicos. El valor de pH del agua de los manantiales fue de 6.0 en los parajes La Ciénega y Cieneguilla; de 7.0 en Llano Grande, Arroyo Guajolote, Las Golondrinas y Arroyo Gretado; por último, los manantiales de Santo Domingo y La Nevería tuvieron un pH de 8.0 (Tabla 2). La mayoría de estos valores se encuentran dentro de los límites permisibles (6.5 a 8.5) de la NOM-127-SSA1-2021 (DOF, 2022). En cuanto a la temperatura promedio del agua y del ambiente, en el mes de mayo fue de 13 y 16 °C respectivamente, mientras que en diciembre fue de 11 y 13 °C. Estos dos parámetros son algunos de los muchos que influyen en la dinámica de la biota acuática, estos parámetros tienen influencia sobre la determinación de otros, por lo tanto, cualquier cambio en estos y otros parámetros físicos afectará al funcionamiento del ecosistema.

Parámetros químicos. Los valores de dureza total disminuyeron en la mayoría de los sitios en la época post lluvias (diciembre), el único sitio que mostró un ligero aumento fue La Ciénega (38 mg l⁻¹). Los NO₃⁻ se mantuvieron casi igual en época de sequía y post lluvias, a excepción del sitio Arroyo Guajolote en el cual este valor se elevó en el mes de diciembre (4.2 mg l⁻¹), los valores de NO₂⁻ aumentaron en la época post lluvias en todos los sitios, mientras que los valores de SO₄⁻² no presentaron ningún cambio, finalmente el NH₃ tuvo un ligero aumento en la época de post lluvias (diciembre), siendo Las Golondrinas el sitio con mayor valor (0.18 mg l⁻¹) (Tabla 2), es importante señalar que ninguno sobrepasó el límite permisible de la NOM-127-SSA1-2021 (DOF, 2022), los cuales para dureza total es de 500.00 mg l⁻¹, para NO₃⁻ es 11.00 mg l⁻¹, NO₂⁻ es 0.90 mg l⁻¹, SO₄⁻² es de 400.00 mg l⁻¹ y para NH₃ es de 0.50 mg l⁻¹.

Tabla 1. Características del entorno de los manantiales de estudio.

Microcuenca	Sitio	Tipo de manantial	Vegetación
San Cristóbal	La Ciénega	Helocreno	Reforestación de pino. Presencia notable de <i>Juncus</i> sp., <i>Scirpus</i> sp., <i>Chenopodium</i> sp., <i>Rumex obtusifolius</i> Linneo., <i>Fraxinus</i> sp., <i>Sporobolus</i> sp., <i>Alnus</i> sp., y pteridofitas.
	Cieneguilla	Helocreno	Bosque de regeneración de pino-encino. Sobresalen ciperáceas, pteridofitas, y gran variedad de gramíneas. Relicto de pino-encino. Cultivos a pequeña escala.
	Llano Grande	Helocreno	Relicto de pino-encino. Presencia de pteridofitas, <i>Juncus</i> sp., <i>Scirpus</i> sp. Cultivo a pequeña escala alrededor.
La Venta	Santo Domingo	Reocreno	Bosque de pino y vegetación de galería. Briofitas en la estructura rocosa y con poca vegetación en el nacimiento. Presencia sobresaliente de <i>Alnus</i> sp., <i>Chiranthodendron pentadactylon</i> Larreat. y pteridofitas.
	La Nevería	Helocreno	Revegetación natural de <i>Pinus rudis</i> Endl. Presencia notable de <i>Juncus</i> sp., <i>Nasturtium officinale</i> W.T. Aiton.
	Arroyo Guajolote	Reocreno	Vegetación de transición encino-pino a selva mediana. Vegetación en el nacimiento. Presencia de pteridofitas, <i>Chiranthodendron pentadactylon</i> Larreat., <i>Salix</i> sp., <i>Quercus</i> sp., <i>Cecropia obtusifolia</i> Bertol., <i>Arbutus</i> sp., <i>Rubus</i> sp., <i>Otatea</i> sp., <i>Cyperus</i> sp.
	Las Golondrinas	Reocreno	Vegetación de encino-pino y de ribera. Presencia de <i>Alnus</i> sp.
	Arroyo Gretado	Reocreno	Vegetación de encino-pino. Sin vegetación en el nacimiento. Presencia de briofitas y pteridofitas.

El promedio del valor de la DBO_5 en época de sequía fue de 56.5 $mg\ l^{-1}$, mientras que para post lluvias fue de 104.5 $mg\ l^{-1}$, en la mayoría de los sitios los valores en esta época fueron más altos a excepción del manantial ubicado en el paraje La Nevería, en el cual el valor disminuyó en comparación con el obtenido en época de sequía (Tabla 2), el hecho que los valores de la DBO_5 sugiere una mayor contaminación en los manantiales.

La Ley Federal de Derechos indica las disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales que determina si los cuerpos de agua son aptos para utilizarse en diversos fines, como son abastecimiento de agua potable, actividades recreativas con contacto primario, riego agrícola, uso pecuario, acuacultura, o protección de la vida acuática. De acuerdo a estos criterios y tomando en cuenta el oxígeno disuelto en agua para la protección de la vida acuática de agua dulce, la mayoría de los sitios cumplen con el parámetro permisible (5.0 $mg\ l^{-1}$) a excepción del manantial ubicado en el paraje La Ciénega, que tuvo un valor de 4.46 $mg\ l^{-1}$, lo cual indicaría que este sitio presenta un cierto grado de contaminación (Tabla 2). Sin embargo, el valor de este parámetro comúnmente es bajo en manantiales tipo helocreno (Picone *et al.*, 2003).

Parámetros bacteriológicos. Los sitios con mayor grado de contaminación fueron Arroyo Guajolote con 64 NMP 100 ml^{-1} de coliformes totales y 179 UFC ml^{-1} de organismos mesófilos totales; el sitio Arroyo Gretado mostró 23 NMP 100 ml^{-1} de coliformes totales y 137 UFC ml^{-1} de organismos mesófilos totales; el sitio Santo Domingo presentó 11 NMP 100 ml^{-1} de coliformes totales y 123 UFC ml^{-1} de mesófilos totales (Tabla 2). Estos tres sitios presentaron los valores más altos en relación a estos dos indicadores, lo que indica contaminación bacteriológica en la época de sequía. Los LMP de coliformes fecales acorde a la NOM-

127-SSA1-2021 (DOF, 2022) son de <1.1 NMP 100 ml^{-1} o No detectables, mientras que para coliformes totales los LMP son de <2 NMP 100 ml^{-1} de acuerdo a la NOM-093-SSA1-1994 (DOF, 1995). Por último, los LMP de bacterias mesófilas de acuerdo a la NOM-093-SSA1-1994 (DOF, 1994) es de 100 UFC ml^{-1} .

Análisis de variables fisicoquímicas y bacteriológicas. Los manantiales no mostraron diferencias estadísticas por tipo de manantial. El análisis de correspondencia sin tendencia, muestra que la variación ambiental entre los sitios, se explica hasta en el 90.4 % con base en las características físico-químicas y bacteriológicas siguientes: en el primer eje, con valor propio de 0.276 eigenvalor, se encuentran las siguientes variables: temperatura del agua, nitrógeno amoniacal (NH_3), sulfatos (SO_4^{2-}), coliformes fecales, coliformes totales y mesófilos totales. En tanto que, en el segundo eje con un valor propio de 0.04 eigenvalor, se encuentran los nitratos (NO_3^-) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5). Los sitios Santo Domingo, Arroyo Gretado y Arroyo Guajolote mostraron mayor contaminación comparado con el resto de los sitios esto en el muestreo del mes de mayo, ya que en diciembre todos los sitios resultaron contaminados por coliformes totales y fecales (Figura 2).

Índice de calidad del agua (ICA). A partir de los parámetros físico-químicos y bacteriológicos se determinó el Índice de Calidad del Agua (ICA) (Tabla 3).

De acuerdo a la clasificación de SEMARNAT (2002) la calidad del recurso en los manantiales de estudio fue poco contaminada y altamente contaminada, mientras que el ICA de la NSF (2015) la calidad va de mala a buena; por último, en la clasificación del índice de calidad

del agua estándar WQI (Brown *et al.*, 1970) la calidad se encuentra en la clasificación de mala a buena. En las categorías propuestas por la CONAGUA, la escala de clasificación variará dependiendo del uso que se le destine al recurso, mientras que el WQI y el propuesto por la NSF no están destinados para usos específicos.

De acuerdo con la SEMARNAT (2014) en México, la CONAGUA considera la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) entre los principales indicadores de calidad del agua, ya que este recurso ha resultado impactado debido a descargas de contaminantes tóxicos que no se consideran en el cálculo del ICA. Los valores de la DBO_5 clasifican a la calidad del agua de los ocho manantiales de estudio en la categoría “contaminada” para época de estiaje; mientras que, en época post lluvias, los sitios Cieneguilla, Llano Grande y Las Golondrinas se encuentran en la categoría “fuertemente contaminada”, los sitios La Ciénega, Arroyo Guajolote, Arroyo Gretado y Santo Domingo se mantuvieron en la categoría “contaminada” (Tabla 3).

Parámetros biológicos. Se colectaron un total de 6,814 organismos “macroinvertebrados acuáticos”, pertenecientes a seis clases taxonómicas, 15 órdenes y 46 familias, siendo la clase Insecta y el orden Diptera los más abundantes. En la Tabla 4 se presentan familias con mayor abundancia, las cuales son intolerantes a los cambios en su hábitat por lo cual son buenos indicadores de integridad biótica.

Para la determinación del Índice de Integridad Biótica Asociado a Macroinvertebrados Acuáticos (IIBAMA), se tomaron en cuenta 43 fami-

lias de las 46 identificadas en los dos muestreos, ya que se conocen valencia de tolerancia, gremio trófico y hábito de vida. De acuerdo con este índice, seis sitios (La Ciénega, Cieneguilla, Las Golondrinas, Santo Domingo Cascada y Arroyo y La Nevería) se encuentran en la categoría de “pobre”, lo que indica que la comunidad de macroinvertebrados acuáticos no es sostenible, ya que el gremio trófico no es el adecuado para el mantenimiento de los flujos energéticos del sistema (Tabla 5).

DISCUSIÓN

Caracterización del entorno. La zona de estudio pertenece a la cuenca del río Copalita, la cual ha estado sometida a una gran presión sobre el agua a consecuencia del cambio en el uso del suelo, debido a sistemas de producción agrícola y pecuaria, así como el aprovechamiento forestal (Sánchez-Bernal *et al.*, 2014; Sandoval-García y Cantú-Silva, 2021) esta cuenca fue impactada por el Huracán Agatha categoría 2 en la escala Saffir-Simpson en mayo de 2022, lo que ocasionó severas afectaciones en los manantiales de estudio con grandes avenidas de agua, caída de árboles, arrastre de sedimentos, modificaciones y ampliación de cauces, entre otras. Los huracanes son perturbaciones naturales capaces de reiniciar el desarrollo del ecosistema e incluso de sanearlo, lamentablemente la deforestación y fragmentación los hacen vulnerables ante los efectos de estos fenómenos naturales (Manson *et al.*, 2009).

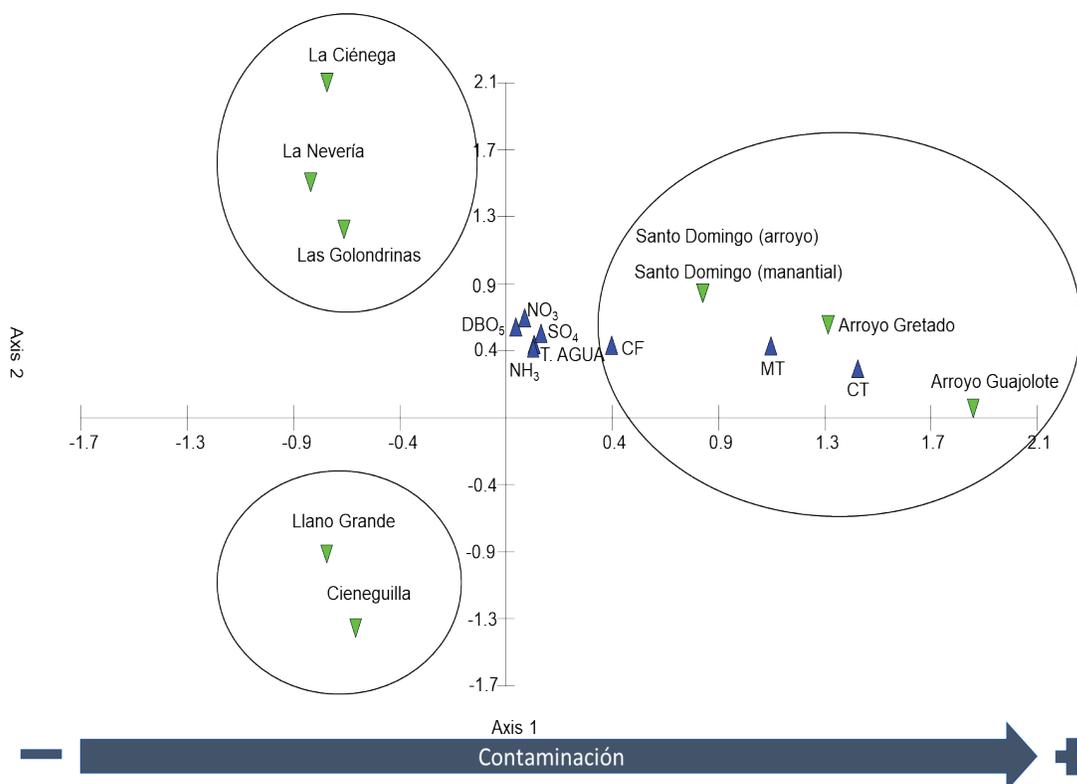


Figura 2. Análisis de correspondencia sin tendencia de acuerdo a los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos de los manantiales de estudio. NO_3^- = nitratos, SO_4^{2-} = sulfatos, DBO_5 = demanda bioquímica de oxígeno, NH_3 = nitrógeno amoniacal, T. agua = temperatura del agua, CF = coliformes fecales, CT = coliformes totales, MT = mesófilos totales.

Tabla 2. Valores de los parámetros físico-químicos y bacteriológicos en los manantiales de estudio durante la época de estiaje (mayo) y post lluvias (diciembre).

	La Ciénega		Cieneguilla		Llano Grande		Arroyo Guajolote		Las Golondrinas		Arroyo Gretado		Santo Domingo		La Nevería	
	Mayo	Dic.	Mayo	Dic.	Mayo	Dic.	Mayo	Dic.	Mayo	Dic.	Mayo	Dic.	Mayo	Dic.	Mayo	Dic.
T. ambiente (°C)	19	10	17	12	16	13	19	18	15.5	12	16	13	10	15	16	10
T. agua (°C)	14	12	15	10	14	10	15	13	12	10	13	11	9	10	12	11
pH	6	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	8	7	8	7
Dureza T. (mg l ⁻¹)	33	38	43	34	43	27	58	27	58	46	89	65	299	221	64	57
Dureza Ca (mg l ⁻¹)	6	15	11	13	9	11	6	11	16	19	32	26	31	88	16	22
Dureza Mg (mg l ⁻¹)	27	23	32	21	34	16	52	16	42	27	57	39	268	133	48	35
NH ₃ (mg l ⁻¹)	0.05	0.41	0.04	0.41	0.05	0.35	0.05	0.12	0.02	0.18	0.02	0.18	0.02	0.31	0.02	0.18
NO ₃ ⁻ (mg l ⁻¹)	3.4	3.1	2.2	2.2	2.2	1.3	1.4	4.2	1.2	1.4	2.7	3.2	2.2	2.2	2.5	2
NO ₂ ⁻ (mg l ⁻¹)	0.19	0.46	0.12	0.2	0.13	0.58	0.14	0.63	0.16	0.73	0.19	0.21	0.19	0.47	0.19	0.41
SO ₄ ⁻² (mg l ⁻¹)	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
DBO ₅ (mg l ⁻¹)	67	78	41	126	75	127	50	110	58	176	43	89	49	83	55	47
Oxígeno disuelto (mg l ⁻¹)	4.46		6.21		6.01		7.43		7.57		7.84		8.85		8.04	
CF (NMP 100 ml ⁻¹)	< 1.1	4	< 1.1	3	< 1.1	3	3	3	< 1.1	< 1.1	< 1.1	14	< 1.1	< 1.1	< 1.1	11
CT (NMP 100 ml ⁻¹)	< 1.1	75	< 1.1	21	3	20	64	35	3	75	23	93	11	15	< 1.1	20
MT (UFC ml ⁻¹)	10	162	21	97	16	82	179	120	10	114	137	>300	123	80	6	168

T. ambiente = temperatura del ambiente, T. agua = temperatura del agua, Dureza T. = dureza total, Dureza Ca = dureza de Calcio, Dureza Mg = dureza de Magnesio, NH₃ = nitrógeno amoniacal, NO₃⁻ = nitratos, NO₂⁻ = nitritos, SO₄⁻² = sulfatos, DBO₅ = demanda bioquímica de oxígeno, CF = coliformes fecales, CT = coliformes totales, MT = mesófilos totales.

Parámetros físicos. El valor del pH del agua de los manantiales osciló entre 6.0 a 8.0, lo que los hace aceptables para la protección de la vida acuática, valores fuera de este rango pueden ocasionar limitaciones en los procesos fisiológicos de la biota (Beita-Sandí & Barahona-Palomo, 2011).

La temperatura del agua está relacionada con la temperatura del ambiente (Posada *et al.*, 2013; Prats-Rodríguez *et al.*, 2015), al ser este uno de los parámetros principales para el buen funcionamiento del ecosistema acuático, se puede decir que estos manantiales aún brindan las condiciones básicas para el establecimiento de biota acuática (Jyväsjärvi *et al.*, 2015), ya que los valores de la temperatura del agua de los manantiales no varían mucho en comparación con la de su ambiente.

Parámetros químicos. De acuerdo a la dureza total, nitratos, sulfatos, nitrógeno amoniacal, en la época de estiaje (mayo), así como en la época post lluvias (diciembre) se mantuvieron dentro de los límites permisibles de la NOM-127-SSA1-2021 (DOF, 2022), aunque para diciembre los valores fueron más altos, esto puede deberse a que en la temporada de estiaje las condiciones del medio son más estables (Barbour *et al.*, 1999); además de considerar el paso del huracán, lo que ocasionó arrastre de materiales pétreos, flora y sedimentos, y pudo provocar contaminación (Pacheco-Ávila *et al.*, 2004). En cuanto a la DBO₅ todos los sitios estuvieron dentro de los límites máximos

permisibles de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF, 2022), a excepción del sitio Las Golondrinas en la temporada post lluvias (diciembre).

Parámetros bacteriológicos. La mayoría de los sitios no cumplieron con los límites permisibles de bacterias coliformes fecales y coliformes totales de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2021 (DOF, 2022) y a la NOM-093-SSA1-1994 (DOF, 1995), en cuanto a las bacterias mesófilas sólo los sitios Cieneguilla, Llano Grande cumplieron con los límites máximos permisibles en ambas épocas, esto de acuerdo a la NOM-093-SSA1-1994 (DOF, 1994). De acuerdo con Hernández-Vásquez (2014), los cambios ocasionados en el suelo, por ejemplo, cultivos, pastoreo, actividades recreativas alteran la calidad del agua al existir modificaciones en el aporte del líquido y de sedimentos dentro de la cuenca y por ende de los ecosistemas, la calidad también se ve afectada por las regulaciones del caudal a través de la construcción de presas. Además de arrastre de residuos que también puede elevar la concentración de este parámetro (Mancilla-Villa *et al.*, 2022).

Índice de calidad del agua (ICA). Los tres métodos utilizados para la determinación del ICA varían en el valor de los parámetros, así como en la forma en que se calcula la calidad del agua. Por tal motivo, en México es más común que sólo se tomen en cuenta ciertos parámetros como la DBO₅ para determinar la calidad del agua.

Tabla 3. Índices de Calidad de Agua (ICA) calculados para los manantiales de estudio en época de estiaje (mayo) y post lluvias (diciembre).

Sitio		ICA (CONAGUA/SEMARNAT)	ICA (NSF)	ICA (estandar/Brown)	ICA (DBO ₅)
La Ciénega	May.	17.7 AC	56 Me	49.3 Ma	67 C
	Dic.	41.2 C	49.3 Ma	65 R	78 C
Cieneguilla	May.	14.6 AC	64 Me	62.6 R	41 C
	Dic.	44.9 C	57.3 Me	74 B	126 FC
Llano Grande	May.	22.4 AC	69 Me	67.2 R	75 C
	Dic.	46.7 C	57.3 Me	74 B	127 FC
Arroyo Guajolote	May.	24.7 AC	71 B	66.9 R	64 C
	Dic.	43.9 C	56.3 Me	69 R	110 C
Las Golondrinas	May.	17.8 AC	74 B	71.3 B	58 C
	Dic.	69.7 PC	60.1 Me	78 B	176 FC
Arroyo Gretado	May.	18.7 AC	76 B	71.6 B	43 C
	Dic.	51.7 PC	47.7 Ma	67 R	89 C
Santo Domingo	May.	27.4 AC	79 B	78.4 B	49 C
	Dic.	41.9 C	58.3 Me	77 B	83 C
La Nevería	May.	17.4 AC	76 B	70.2 R	55 C
	Dic.	25 AC	49.6 Ma	69 R	47 C

PC = poco contaminada, AC = altamente contaminada, FC = fuertemente contaminada, C = contaminada, Me = calidad media, Ma = calidad mala, R = calidad regular, B = calidad buena.

Escala de clasificación de calidad del agua. SEMARNAT (2002), AC) altamente contaminada 0-20. C) contaminada 21-40. PC) poco contaminada 41-60. A) aceptable 61-75. NC) no contaminada 75-100. NSF (2015), Mm) muy mala 0-24, M) mala 25-49, Me) media 50-69, B) buena 70-89, E) excelente 90-100. Brown *et al.* (1970), P) pésima 0-25, Ma) mala 26-50, Re) regular 51-70, B) buena 71-90, E) excelente 91-100. DBO₅ (SEMARNAT, 2014), FC) fuertemente contaminada DBO₅ > 120, C) contaminada 30 < DBO₅ ≤ 120, A) aceptable 6 < DBO₅ ≤ 30, BC) buena calidad 3 < DBO₅ ≤ 6, E) excelente DBO₅ ≤ 3

Ahsan *et al.* (2021) mencionan que las características físico-químicas y bacteriológicas del agua de manantial es determinada en mayor medida por descargas naturales y por características minerales del área, estas propiedades pueden alterarse debido a actividades antropogénicas y a factores climáticos como tormentas, lo cual influye en la calidad del agua. Esto conlleva a cambios en el caudal y en el ancho de la corriente del agua, lo que influye en la disolución de material contaminante (Morell-Bayard *et al.*, 2015).

Parámetros biológicos. Los macroinvertebrados acuáticos colectados en el mes de mayo fueron 6,232 mientras que para diciembre fueron solo 582 ejemplares, esto puede deberse al fenómeno de deriva, que

es un movimiento río abajo bastante común en este tipo de organismos, este fenómeno puede ocurrir por dispersión, comportamiento o a consecuencia de disturbios, como la crecida del río o mala calidad del agua (Hanson *et al.*, 2010); en el caso del presente estudio el motivo por el cual el número de ejemplares disminuyó notablemente pudo deberse al impacto que tuvo el huracán en los manantiales, aumentando las descargas de agua y la velocidad de la corriente.

Los manantiales, así como los ríos, brindan hábitats que son controlados por diversos procesos físicos, como por ejemplo el flujo y calidad del agua, y el transporte de sedimentos, por tal motivo, un mal manejo del caudal puede provocar cambios significativos en la estructura de su biodiversidad (O'Keeffe & Le Quesne, 2010).

Tabla 4. Familias taxonómicas de macroinvertebrados acuáticos con mayor abundancia, como resultado de ambos muestreos (sequía y post lluvias).

	La Ciénega	Cieneguilla	Llano Grande	Arroyo Guajolote	Las Golondrinas	Arroyo Gretado	Santo Domingo (cascada)	Santo Domingo (arroyo)	La Nevería
Leptophlebiidae	0	0	2	48	102	14	152	32	105
Polycentropodidae	4	18	92	2	8	11	9	19	7
Lepidostomatidae	0	0	0	0	0	144	11	5	0
Elmidae	0	0	0	12	14	12	41	27	1
Culicidae	250	0	1	0	0	0	0	0	0
Simuliidae	0	0	2	55	1	9	93	798	10
Chironomidae	118	18	42	11	11	8	5	66	38
Tanytarsini	335	174	1004	142	100	274	54	50	195
Tanypodini	370	168	407	83	38	23	5	91	132

En ambientes que conservan buenas condiciones ecológicas es común encontrar gran abundancia y diversidad de macroinvertebrados pertenecientes a los órdenes taxonómicos Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera (EPT), estos grupos indican buena calidad de agua y de hábitat (Murillo-Montoya *et al.*, 2018), en el presente estudio estos grupos fueron escasos. El orden más abundante fue Diptera, estos organismos al ser tolerantes a los cambios en su hábitat indican contaminación orgánica en los sitios de estudio, así como ambientes degradados (Tampo *et al.*, 2020). La familia más representativa fue Chironomidae, estos organismos son tolerantes a condiciones muy bajas de oxígeno, colonizan hábitats donde existe materia orgánica en descomposición e indican cambios en la calidad del agua (Pérez *et al.*, 2016; Roldán-Pérez, 1996). De acuerdo con Rizky-Junita *et al.* (2018) la presencia de comunidades de macroinvertebrados acuáticos es influenciada por las condiciones de la vegetación riparia, lo que explicaría el alto número de ejemplares colectados en el mes de mayo y la disminución de los mismos en el mes de diciembre, ya que las condiciones de la vegetación de ribera cambiaron drásticamente entre estas dos épocas.

En relación con el índice de integridad biótica asociado a macroinvertebrados acuáticos (IIBAMA), cuatro sitios (La Ciénega, Cieneguilla,

Las Golondrinas y Santo Domingo cascada y arroyo) se encuentran en la categoría “pobre”, dos (Llano Grande y Arroyo Gretado) en la categoría “regular”, donde la comunidad de macroinvertebrados acuáticos se considera impactada; la mayoría de los taxa más sensibles (intolerantes) a los cambios se ha perdido. La cadena trófica también se encuentra afectada, ya que los taxa de hábitos fijos han disminuido (36 familias), por ejemplo, Aeshnidae, Glossosomatidae, Hydropsychidae, Lepidostomatidae, entre otros. El manantial del paraje Llano Grande, se encuentra canalizado para su aprovechamiento, y en el caso del sitio Arroyo Gretado es un manantial de reciente aprovechamiento para uso humano; a pesar de esto, el sitio ha sido usado con fines recreativos, por tal motivo se encuentra moderadamente alterado. y solo un sitio (Arroyo Guajolote) en la categoría “bueno”, si bien la comunidad de macroinvertebrados acuáticos ha sido afectada, ya que se han perdido los taxa más intolerantes (15 familias) y los de hábitos fijos, aún la comunidad es sostenible; ya que se mantienen los taxa que llevan a cabo los mecanismos de flujo energético, como Leptophlebiidae, Baetidae, Polycentropodidae, Beraeidae, Hydropsychidae, Lepidostomatidae, Elmidae, Simuliidae, Chironomidae y Tipulidae. Este sitio se caracteriza por la conservación de la vegetación en su ribera, por tal motivo se considera que es un lugar que conserva su integridad ecológica.

Tabla 5. Variables e índice de integridad biótica asociado a macroinvertebrados acuáticos (IIBAMA).

Sitio	S	REPT	RII	RTI	TM	TF	IIBAMA	CAT IIBAMA
La Ciénega	12	12	4	5	6.58	3	9	Pobre
Cieneguilla	9	1	3	3	5.89	2	6	Pobre
Llano Grande	25	5	14	14	5.28	7	15	Regular
Arroyo Guajolote	22	6	15	15	4.41	11	17	Bueno
Las Golondrinas	16	4	8	8	5.5	5	6	Pobre
Arroyo Gretado	22	6	15	15	4.36	9	16	Regular
Santo Domingo (cascada)	21	5	12	13	4.43	10	14	Pobre
Santo Domingo (arroyo)	17	7	11	12	4.24	8	13	Pobre
La Nevería	18	5	11	12	4.5	8	13	Pobre

S = riqueza de familias, REPT = riqueza de familias de Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera, RII = riqueza de familias de insectos intolerantes, RTI = riqueza de taxa intolerantes, TM = tolerancia media, TF = total de taxa fijos, IIBAMA = valor de índice de integridad biótica, CAT IIBAMA = categoría de la integridad biótica.

Tomando en cuenta que los macroinvertebrados acuáticos son un grupo de gran importancia en los ecosistemas acuáticos para la transferencia de energía en los diferentes niveles, el hecho que su comunidad se encuentre impactada compromete el buen funcionamiento del ecosistema.

Los manantiales de este estudio se encuentran en cierta medida impactados debido a actividades antropogénicas relacionadas con el abastecimiento de agua para la población, estos cambios en el entorno afectan a la biodiversidad que habita en el lugar lo que modifica la estructura y el funcionamiento del ecosistema.

Es importante continuar con estudios de este tipo para conocer el estado actual de los ecosistemas, así como llevar a cabo un buen manejo de estos e implementar acciones para su conservación asegurando una buena calidad en los servicios ecosistémicos brindados.

El problema de la contaminación del agua es muy preocupante, ya que si bien sirve de abastecimiento para la población también cumple una función ecológica en el ecosistema. Comúnmente el agua de manantial está relacionada a una buena calidad, esto debido a que el agua que emerge en forma de manantial es agua subterránea, sería lógico pensar que no ha tenido contacto con la superficie, pero el agua se encuentra en continua circulación y tal vez se desconoce el recorrido que ha realizado, es decir las condiciones en las que se encontraba el medio por donde circuló, si bien el agua realiza un mecanismo de depuración natural también puede contaminarse en el proceso, e inclusive el agua subterránea puede resultar contaminada (Rodríguez-García *et al.*, 2003; Wong-Arguelles *et al.*, 2021). En el caso del presente estudio y basándose en la DBO₅, que en México es uno de los parámetros más utilizados para evaluar la calidad del agua, en el muestreo de mayo todos los sitios se encuentran en la categoría “Contaminada” mientras que en diciembre los sitios Cieneguilla, Llano Grande y Las Golondrinas estuvieron en la categoría “Fuertemente contaminada”, lo que indica que las aguas de los manantiales de estudio reciben descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal. De acuerdo al IIBAMA casi todos los sitios se encuentran en la categoría “Pobre”, a excepción del sitio Arroyo Guajolote en la categoría “Bueno”. La primera categoría mencionada se caracteriza por ser sitios con cauces invadidos o modificados, son manantiales canalizados y con actividades de extracción, por tal motivo están sometidos a una fuerte presión. Mientras que Arroyo Guajolote presenta una estructura natural ya que conserva su integridad ecológica. El utilizar parámetros físico-químicos y bacteriológicos a la par del uso de bioindicadores ayuda a tener una visión más amplia de la situación en la que se encuentra el ecosistema y de esta manera poder implementar medidas de restauración para asegurar una buena calidad de los servicios ecosistémicos brindados.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT). Al World Wildlife Fund (Fondo Mundial para la Naturaleza-WWF México). A la Red Nacional para el Monitoreo de Reservas de Agua en México (REDMORA). A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). Al Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (ITVO). A las comunidades de San José Cieneguilla, Santo Domingo Ozolotepec y San Miguel Suchixtepec por el apoyo y las facilidades brindadas para la realización del estudio.

REFERENCIAS

- AHSAN, W. A., H. R. AHMAD, Z. U. R. FAROOQI, M. SABIR, M. A. AYUB, M. RIZWAN & P. ILIC. 2021. Surface water quality assessment of Skardu springs using Water Quality Index. *Environmental Science and Pollution Research* 28: 20537-20548. DOI: 10.1007/s11356-020-11818-5
- ÁLVAREZ-ARANGO, L. F. 2005. *Metodología para la utilización de los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C. 263 p.
- ANDINO-GUARDERAS, P., E. A. GUEVARA, R. E. ESPINOSA & T. SANTANDER-G. 2017. *Cartilla de identificación de macroinvertebrados acuáticos. Guía para el monitoreo participativo*. Ministerio del Ambiente. Aves y Conservación. Quito, Ecuador. 43 p.
- BARBOUR, M. T., J. GERRITSEN, B. D. SNYDER & J. B. STRIBLING. 1999. *Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish*. Environmental Protection Agency. Washington, D.C. 337 p.
- BARQUÍN-ORTIZ, J. 2007. Patrones de biodiversidad en manantiales: implicaciones para la gestión de las aguas subterráneas. *Locustella: Anuario de la Naturaleza de Cantabria* 4: 37-49.
- BEITA-SANDÍ, W. & M. BARAHONA-PALOMO. 2011. Físico-química de las aguas superficiales de la Cuenca del río Rincón, Península de Osa, Costa Rica. *UNED Research Journal* 2 (2): 157-179.
- BROWN, R. M., N. I. McCLELLAND, R. A. DEININGER & R. G. TOZER. 1970. A water quality index-Do we dare? *Water Sewage Works* 117 (10): 339-343
- CAMACHO-BALLESTEROS, A., H. M. ORTEGA-ESCOBAR, E. I. SÁNCHEZ-BERNAL & Á. CAN-CHULIM. 2020. Indicadores de calidad físico-química de las aguas residuales del estado de Oaxaca, México. *Terra Latinoamericana* 38 (2): 361-375. DOI: 10.28940/terra.v38i2.610
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA). 1999. *Índice de calidad del agua*. Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua. México. 1 p.
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA). 2018. *Estadísticas del agua en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México. 303 p.
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA). 2023. *Ley Federal de Derechos. Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes para el ejercicio fiscal 2023*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México. 283 p.
- DE LA LANZA-ESPINO, G. 2014. *Protocolo para el muestreo de calidad del agua en ríos endorréicos y exorréicos, y en humedales para la aplicación de la Norma de Caudal Ecológico (NMX-AA-159-SCFI-2012)*. Programa Nacional de Reservas de Agua. México. 33 p.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN (DOF). 1994. *Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-093-SSA1-1994 Bienes y servicios. Preparación de alimentos que se ofrecen en establecimientos fijos*. Secretaría de Salud. México. 14 p.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN (DOF). 1995. *Norma Oficial Mexicana NOM-092-SSA1-1994 Bienes y servicios. Método para la cuenta de bacterias aerobias en placa*. Secretaría de Salud. México. 6 p.

- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN (DOF). 1995. *Norma Oficial Mexicana NOM-093-SSA1-1994 Bienes y servicios. Prácticas de higiene y sanidad en la preparación de alimentos que se ofrecen en establecimientos fijos*. Secretaría de Salud. México. 16 p.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN (DOF). 2001. *Norma Mexicana NMX-AA-072-SCFI-2001 Análisis de agua-determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas*. Secretaría de Economía. México. 19 p.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN (DOF). 2001. *Norma Mexicana NMX-AA-073-SCFI-2001 Análisis de agua-determinación de cloruros en aguas naturales, residuales y residuales tratadas*. Secretaría de Economía. México. 18 p.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN (DOF). 2001. *Norma Mexicana NMX-AA-079-SCFI-2001 Análisis de agua-determinación de nitratos en aguas naturales, residuales y residuales tratadas*. Secretaría de Economía. México. 27 p.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN (DOF). 2001. *Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001 Análisis de agua-determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas*. Secretaría de Economía. México. 24 p.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN (DOF). 2011. *Norma Mexicana NMX-AA-154-SCFI-2011 Análisis de agua-determinación de nitrógeno de nitritos en aguas naturales, residuales y residuales tratadas*. Secretaría de Economía. México. 14 p.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN (DOF). 2014. *Norma Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2013 Análisis de agua-medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas*. Secretaría de Economía. México. 23 p.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN (DOF). 2014. *Norma Mexicana NMX-AA-074-SCFI-2014 Análisis de agua-medición del ion sulfato en aguas naturales, residuales y residuales tratadas*. Secretaría de Economía. México. 13 p.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN (DOF). 2015. *Norma Mexicana NMX-AA-042-SCFI-2015 Análisis de agua-enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y Escherichia coli*. Secretaría de Economía. México. 29 p.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN (DOF). 2018. *Norma Mexicana NMX-AA-093-SCFI-2018. Análisis de agua-medición de la conductividad eléctrica en aguas naturales, residuales y residuales tratadas*. Secretaría de Economía. México. 21 p.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN (DOF). 2022. *Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*. Secretaría de Salud. México. 124 p.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN (DOF). 2022. *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021. Límites permisibles de contaminantes en las descargas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 17 p.
- ESPINOSA-GARCÍA, A. C. 2014. Calidad del agua. *Impluvium* 3: 1-37.
- GARCÍA, J. M., L. F. SARMIENTO, M. S. RODRÍGUEZ & L. S. PORRAS. 2017. Uso de bioindicadores para la evaluación de la calidad del agua en ríos: aplicación en ríos tropicales de alta montaña. Revisión corta. *UG-Ciencia* 23: 47-62. DOI: 10.18634/ugcj.23.v.01.659
- GRANADOS-MARTÍNEZ, C. & A. BATISTA. 2017. Macroinvertebrados acuáticos. En: Lasso, C. A. & M. A. Morales-Betancourt (Eds.), *III. Fauna de Caño Cristales, sierra de La Macarena, Meta, Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C., Colombia, pp. 46-65.
- GUTIÉRREZ-FONSECA, P. E., A. M. ALONSO-RODRÍGUEZ & A. RAMÍREZ. 2016. *Macroinvertebrados acuáticos de Puerto Rico como bioindicadores de calidad ambiental*. Puerto Rico. 6 p.
- Hanson, P., M. Springer & A. Ramírez. 2010. Introducción a los grupos de macroinvertebrados acuáticos. *Revista de biología tropical* 58 (4): 3-37.
- HERNÁNDEZ-VÁZQUEZ, I. 2014. La calidad del agua en los ríos de México. *Impluvium* 3: 7-13.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA (INEGI-SIATL). 2021. Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas. Disponible en línea en: https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/ (consultado el 20 octubre 2022).
- JYVÄSJÄRVI, J., H. MARTTILA, P. M. ROSSI, P. ALA-AHO, B. OLOFSSON, J. NISELL, B. BACKMAN, J. ILMONEN, R. VIRTANEN, L. PAASIVIRTA, R. BRITSCHGI, B. KLOVE & T. MUOTKA. 2015. Climate-induced warming imposes a threat to north European spring ecosystems. *Global change biology* 21: 4561-4569. DOI: 10.1111/gcb.13067
- MANCILLA-VILLA, O. R., L. GÓMEZ-VILLASEÑOR, J. L. OLGUÍN-LÓPEZ, R. D. GUEVARA-GUTIÉRREZ, O. HERNÁNDEZ-VARGAS, H. M. ORTEGA-ESCOBAR, H. FLORES-MAGDALENO, A. CÁN-CHULIM, E. I. SÁNCHEZ-BERNAL, E. CRUZ-CRESPO & C. PALOMERA-GARCÍA. 2022. Contaminación orgánica por coliformes, Nitrógeno y Fósforo en los ecosistemas acuáticos de la cuenca Ayuquila-Armería, Jalisco, México. *Revista de ciencias biológicas y de la salud* 24 (1): 5-14. DOI: 10.18633/biotecnia.v24i1.1283
- MANSON, R. H., E. J. JARDEL-PELÁEZ, M. JIMÉNEZ-ESPINOSA & C. A. ESCALANTE-SANDOVAL. 2009. Perturbaciones y desastres naturales: impactos sobre las ecorregiones, la biodiversidad y el bienestar socioeconómico. En: Sarukhán, J. (Coord. Gral.). *Capital Natural de México. Volumen II: estado de conservación y tendencias de cambio*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México. pp. 131-184.
- MERRIT, R. W., K. W. CUMMINS & M. B. BERG (Eds.). 2008. *An introduction to the aquatic insects of North America*. 4th ed. Kendall/Hunt Publishing Company. United States of America. 1158 p.
- MORELL-BAYARD, A. DE LA C., P. S. BERGUES-GARRIDO & E. R. PORTUONDO-FERRER. 2015. Valoración de los parámetros físico-químicos de las aguas del río San Juan en los períodos húmedo y seco de 2014. *Ciencia en su PC* 1: 1-12.
- MURILLO-MONTOYA, S. A., A. MENDOZA-MORA, E. S. RESTREPO-BASTIDAS & M. A. RODRÍGUEZ. 2018. Utilización de macroinvertebrados acuáticos como herramienta para determinar la calidad del agua en la quebrada Santo Tomás, municipio de Pensilvania, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 42 (164): 212-220. DOI: 10.18257/raccefyn.655

- NATIONAL SANITATION FOUNDATION (NSF). 2015. Water quality index calculator for surface water. Disponible en línea en: <https://www.knowyourh2o.com/outdoor-3/water-quality-index-calculator-for-surface-water> (consultado el 11 enero 2023).
- O'KEEFFE, J. & T. LE-QUESNE. 2010. *Cómo conservar los ríos vivos. Guía sobre los caudales ecológicos*. Serie Seguridad Hídrica de WWF-2. WWF- World Wide Fund. Gland, Suiza. 47 p.
- OSCOZ-ESCUADERO, J. 2009. *Guía de campo. Macroinvertebrados de la Cuenca del Ebro*. Confederación Hidrográfica del Ebro. España. 129 p.
- OSEJOS-MERINO, M. A., M. C. MERINO-CONFORME, M. V. MERINO-CONFORME & J. L. SOLÍS-BARZOLA. 2020. Macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua de la parte céntrica del río Jipijapa-Ecuador. *Revista científica Mundo de la investigación y el conocimiento* 4 (4): 454-467. DOI: 10.26820/recimundo/4.(4).octubre.2020.454-467
- PACHECO-ÁVILA, J., A. CABRERA-SANSORES & R. PÉREZ-CEBALLOS. 2004. Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los sistemas municipales de abastecimiento en el Estado de Yucatán, México. *Ingeniería* 8 (2): 165-179.
- PÉREZ, A., N. SALAZAR, F. AGUIRRE, M. FONT, E. ZAMORA, A. CORDOVA & K. ACOSTA. 2016. *Guía de macroinvertebrados bentónicos de la provincia de Orellana*. Orellana, Ecuador. 116 p.
- PÉREZ-MUNGUÍA, R. M. & R. PINEDA-LÓPEZ. 2005. Diseño de un índice de integridad biótica para ríos y arroyos del Centro de México, usando las asociaciones de Macroinvertebrados. *Entomología mexicana* 4: 241-245.
- PÉREZ-MUNGUÍA, R. M., V. M. RAMÍREZ-MELCHOR & M. A. PIÑÓN-FLORES. 2009. Análisis comparativo de las asociaciones de Ephemeroptera, en sitios con distinto grado de conservación en el río Chiquito, Morelia, Michoacán. *Entomología Mexicana* 8: 326-331.
- PICONE, L. I., Y. E. ANDREOLI, J. L. COSTA, V. APARICIO, L. CRESPO, J. NANNINI & W. TAMBASCIO. 2003. Evaluación de nitratos y bacterias coliformes en pozos de la Cuenca Alta del Arroyo Pantanoso (BS. AS.). *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 32(1): 99-110.
- PIÑÓN-FLORES, M. A., R. M. PÉREZ-MUNGUÍA, U. TORRES-GARCÍA & R. PINEDA-LÓPEZ. 2014. Integridad biótica de la microcuenca del Río Chiquito, Morelia, Michoacán, México, basada en la comunidad de macroinvertebrados acuáticos. *Revista de Biología Tropical* 62 (2): 221-231.
- POSADA, E., D. MOJICA, N. PINO, C. BUSTAMANTE & A. MONZÓN-PINEDA. 2013. Establecimiento de índices de calidad ambiental de ríos con bases en el comportamiento del oxígeno disuelto y de la temperatura, aplicación al caso del río Medellín, en el Valle de Aburrá en Colombia. *Dyna* 80 (181): 192-200.
- PRAT, N., B. RÍOS, R. ACOSTA & M. RIERADEVALL. 2009. Los macroinvertebrados como indicadores de calidad de las aguas. En: Domínguez, E. & H. R. Fernández (Eds.). *Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos*. Fundación Miguel Lillo. Tucumá, Argentina, pp.631-654.
- PRATS-RODRÍGUEZ, J., R. VAL-SEGURA, M. ARBAT-BOFILL, M. CARDONA-MARTÍ, D. NINYEROLA-CHIFONI, J. ARMENGOL-BACHERO & J. DOLZ-RIPOLLÉS. 21-24 de julio de 2015. *Trabajos de seguimiento de la temperatura del agua en el curso inferior del río Ebro (España)*. 1er. Congreso Iberoamericano sobre sedimentos y ecología Querétaro, Querétaro, México.
- RIZKY-JUNITA, N., D. SUTJININGSIH & E. ANGGRAHENI. 2018. *The influence of riparian characteristics on the diversity and abundance of macroinvertebrates at cascade-pond system universitas Indonesia Depok*. The 2nd. International Conference on Eco Engineering Development. Gothenburg, Sweden. 14 p. DOI: 10.1088/1755-1315/195/1/012005
- RODRIGO-HERRERA, C., P. PACHECO-MOLLINADO, M. E. ORIHUELA, M. L. PIÑEROS & E. COBO. 2018. *Guía de monitoreo participativo de la calidad de agua*. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). Quito, Ecuador. 68 p.
- RODRÍGUEZ-GARCÍA, R., C. MARTÍNEZ-MUÑOZ, D. HERNÁNDEZ-VIZCAINO, J. DE L. VEGUILLAS & MA. L. ACEVEDO DE PEDRO. 2003. Calidad del agua de fuentes de manantial en la zona básica de salud de Sigüenza. *Revista Española de Salud Pública* 77 (3): 423-432.
- ROLDÁN-PÉREZ, G. 1996. *Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia*. Fondo para la Protección del Medio Ambiente. Bogotá, Colombia. 217 p.
- 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): 254-274. DOI: dx.doi.org/10.18257/raccefyn.335
- SÁNCHEZ-BERNAL, E. I., G. SANDOVAL-OROZCO, M. A. CAMACHO-ESCOBAR, F. VALDEZ-MARTÍNEZ, A. RODRÍGUEZ-LEÓN & H. M. ORTEGA-ESCOBAR. 2014. Calidad hidrogeoquímica de las aguas del río Copalita, Oaxaca, México. *Revista Internacional de Ciencia y Sociedad* 1 (2): 27-41.
- SANDOVAL-GARCÍA, C. & I. CANTÚ-SILVA. 2021. Análisis geomático del cambio de uso del suelo en la subcuenca río Copalita, Oaxaca. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 11: 1-12. DOI: 10.19136/era.a8n11.2915
- SAS INSTITUTE. 2008. *JMP v. 8. Statistical*. Discovery from SAS.
- SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT), COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA), PROCURADURÍA FEDERAL DE PROTECCIÓN AL AMBIENTE (PROFEPA) & COMISIÓN ESTATAL DEL AGUA (CEA). 2009. Plan de Manejo Integral de la Cuenca Hidrológica del Río Copalita, Oaxaca. Oaxaca, México. 313 p.
- SECRETARÍA DEL MEDIO Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT). 2002. *Escala de clasificación de la calidad del agua para usos específicos, según su Índice de Calidad del Agua (ICA)*. Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). México. 1 p.
- SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT). 2014. Calidad del agua. Disponible en: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/06_agua/6_2_1.html (consultado el 05 abril 2023).
- SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT). 2009. *Indicadores de calidad del agua*. Gerencia de calidad del agua. Disponible en: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_AGUA05_01%26IBIC_user=dgeia_mce%26IBIC_pass=dgeia_mce (consultado el 05 abril 2023).
- SOLÓRZANO, L. 1969. Determination of ammonia in natural waters by the phenolphthorite method. *Limnology and Oceanography* 14 (5): 799-801. DOI: 10.4319/lo.1969.14.5.0799

- TAMPO, L., I. M. LAZAR, I. KABORÉ, A. OUEDA, K. V. AKPATAKU, G. DJANEYE-BOUNDJOU, L. M. BAWA, G. LAZAR & W. GUENDA. 2020. A multimetric index for assessment of aquatic ecosystem health based on macroinvertebrates for the Zio River basin in Togo. *Limnologica* 83 (11): 1-11. DOI: 10.1016/j.limno.2020.125783
- TENJO-MORALES, A. I. & E. CÁRDENAS-CASTRO. 2015. Importancia y utilidad de los bioindicadores acuáticos. *Biodiversidad Colombia* 1 (5): 39-48.
- VITERI-GARCÉS, M. I., J. A. CHALEN-MEDINA & Z. L. CEVALLOS-REVELO. 2017. Determinación de bioindicadores y protocolos de la calidad de agua en el embalse de la Central Hidroeléctrica Baba. *Dominio de las ciencias* 3 (3): 628-646. DOI: 10.23857/dom.cien.pocaip.2017.3.3.jun.628-646
- WONG-ARGUELLES, C., A. J. & C. CARRANZA-ÁLVAREZ. 2021. Calidad del agua de los manantiales del humedal natural "Ciénega de Tamasopo" en San Luis Potosí, México. *Tecnología y ciencias del agua* 16(6): 1-35. DOI: 10.24850/j-tyca-2021-06-01
- WWF (WORLD WILDLIFE FUND INC). 2008. *Manejo Integrado de las Cuencas Copalita-Zimatán-Huatulco*. Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P. México. 2 p.