

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-04-07

Artículos

Calidad del agua superficial en la cuenca del río Atoyac, Guerrero, México

Surface water quality in the Atoyac River basin, Guerrero, Mexico

Esther Madrid¹, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8672-898X>

Ma. Laura Sampedro², ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7966-8190>

Ma. del Carmen Maganda³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8479-1556>

Ana Laura Juárez⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1020-7198>

Maximino Reyes⁵, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0954-3434>

Justiniano González⁶, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3881-4881>

¹Centro de Ciencias de Desarrollo Regional de la Universidad Autónoma de Guerrero, CCDR-UAGRO, Acapulco, Guerrero, México, esthermorales@uagro.mx

²Centro de Ciencias de Desarrollo Regional de la Universidad Autónoma de Guerrero, CCDR-UAGRO, Acapulco, Guerrero, México, 05156@uagro.mx

³Instituto de Ecología, INECOL A. C., Xalapa, Veracruz, México, carmen.maganda@inecol.mx

⁴Centro de Ciencias de Desarrollo Regional de la Universidad Autónoma de Guerrero, CCDR-UAGRO, Acapulco, Guerrero, México, 05197@uagro.mx

⁵Centro de Ciencias de Desarrollo Regional de la Universidad Autónoma de Guerrero, CCDR-UAGRO, Acapulco, Guerrero, México, 11471@uagro.mx

⁶Centro de Ciencias de Desarrollo Regional de la Universidad Autónoma de Guerrero, CCDR-UAGRO, Acapulco, Guerrero, México, 11565@uagro.mx

Autora para correspondencia: Ma. Laura Sampedro, 05156@uagro.mx

Resumen

La cuenca del río Atoyac atraviesa los municipios de Atoyac de Álvarez y Benito Juárez en el estado de Guerrero, México. Desde el año 2000 existen evidencias de que sus aguas están contaminadas en las zonas más pobladas. Este trabajo tuvo por objetivo investigar la calidad del agua superficial en la zona alta, media y baja de la cuenca del río Atoyac en Guerrero. La metodología incluyó nueve sitios de muestreo, para analizar 11 parámetros fisicoquímicos y ocho metales pesados, en seis momentos diferentes, que abarcaron épocas de lluvia y estiaje. Los datos obtenidos se compararon con los criterios ecológicos de la calidad del agua y con los indicadores del semáforo de la calidad del agua. Para conocer las diferencias en la calidad del agua en las tres zonas de la cuenca, se realizó un análisis estadístico cuantitativo con diseño cuasi experimental, transversal y comparativo sobre la DBO₅. Los resultados respecto a DBO₅

y a los compuestos nitrogenados (N-NH_3 , N-NO_2^- y N-NO_3^-) demuestran que el agua del río Atoyac, Guerrero, en la cuenca alta, media y baja no se considera apta como fuente de abastecimiento de agua potable, riego agrícola o protección de la vida acuática. Además, que la cuenca baja del río Atoyac, Guerrero, se encuentra contaminada por la presencia de Cd y Hg, lo cual puede constituir un problema para la salud pública debido a las características tóxicas de los metales pesados.

Palabras clave: contaminación de los ríos, metales pesados en el agua, parámetros fisicoquímicos del agua, calidad de ríos en estiaje y lluvias, normatividad de calidad del agua, México.

Abstract

The Atoyac River basin crosses the municipalities of Atoyac de Alvarez and Benito Juárez in the State of Guerrero, Mexico. Since 2000, there is evidence that its waters are polluted in the most populated areas. The objective of this work was to investigate surface water quality in the upper, middle and lower zones of the Atoyac River basin in Guerrero. The methodology included nine sampling sites to analyze 11 physicochemical parameters and eight heavy metals, at six different times during the rainy and dry seasons. The data obtained were compared with the ecological criteria for water quality and the water quality traffic light indicators. To determine the differences in water quality in the three zones of the basin, a quantitative statistical analysis was carried out with a quasi-experimental, cross-sectional and comparative design on BOD_5 . The results for BOD_5 and nitrogen compounds (N-NH_3^- , N-NO_2^- and N-NO_3^-) show that the water of the Atoyac River, Guerrero, in the upper, middle

and lower basin is not considered suitable as a source of drinking water supply, agricultural irrigation and protection of aquatic life. In addition, the lower basin of the Atoyac River, Guerrero, is contaminated by the presence of Cd and Hg, which can constitute a problem for public health, due to the toxic characteristics of heavy metals.

Keywords: River pollution, heavy metals in water, physicochemical parameters of water, river quality in low water and rainfall, water quality regulations in Mexico.

Recibido: 26/01/2024

Aceptado: 19/06/2024

Publicado *ahead of print*: 19/07/2024

Versión final: 01/07/2025

Introducción

El agua es un recurso vital para el desarrollo de la vida en la Tierra, por lo que muchas personas, con la finalidad de cubrir sus necesidades han establecido sus viviendas cerca de fuentes de agua, como ríos, lagos, lagunas, etcétera, lo cual ha representado una de las fuentes de afectación a la calidad del agua (WWAP, 2018). El deterioro de la calidad del agua ocurre por procesos tanto naturales como antrópicos, y genera como consecuencia que el agua contaminada no pueda utilizarse para consumo humano, para usos domésticos y recreativos, para la industria o la agricultura, por lo que reduce de forma efectiva la cantidad de agua disponible en una determinada zona (ONU, 2016; Conagua, 2017). El

agua contaminada puede contener niveles altos de materia orgánica, nutrientes, drenajes salinos, patógenos y contaminantes emergentes, entre otros. Las causas principales son los vertidos de desechos industriales, aguas municipales residuales sin tratamiento, desechos sólidos a los cuerpos de agua, deforestación, uso del suelo y agroquímicos (FAO, 2019; Evans *et al.*, 2019; FAO, 2021). La gravedad de la contaminación del agua es un común denominador en el mundo que va en aumento y afecta directamente no solo la salud de los ecosistemas sino también la de las personas, su economía, seguridad e inocuidad alimentaria (Semarnat, 2018; Conagua, 2018; ONU, 2018; FAO, 2021). Por lo tanto, conocer la calidad del agua de las distintas fuentes de agua es fundamental para que todos los sectores involucrados realicen acciones para mitigar su contaminación y para definir el uso que ha de tener.

La calidad del agua se determina mediante métodos que incluyen factores físicos, químicos y biológicos, y su comparación con directrices o normas y estándares de calidad (Peters, Campoy-Favela, & Flessa, 2010). De esta forma se puede identificar si el agua es apta para los requerimientos de calidad asociados con un uso determinado y, en su caso, los eventuales procesos de depuración requeridos para la remoción de elementos indeseables o riesgosos (DOF, 1989). Los parámetros principales de la calidad del agua reflejan la función física, química y biológica del medio ambiente con el que tiene interacción el agua. Lo anterior permite reconocer la condición natural o sin influencia de la actividad humana, indicios o aportaciones importantes de descargas de aguas residuales municipales y no municipales, así como áreas con deforestación severa (ONU, 2016; Conagua, 2017).

Instancias de gobierno y académicas, como la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en su proyecto Pro-Regiones; la Comisión Nacional de Derechos Humanos (CNDH), y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) han presentado reportes sobre la calidad del agua del río Atoyac, en el estado de Guerrero. Los reportes indican que el agua superficial del río Atoyac está severamente impactada por la contaminación proveniente de diferentes fuentes. Los informes destacan que, en las localidades más pobladas, como El Paraíso y Atoyac, el agua no debería usarse para actividades recreativas, pecuarias, riego agrícola o vida acuática, respectivamente (IMTA, 2018; Jiménez, Méndez, Alvarado, & Rivera, 2000; Fierro & Alcántara, 2008; Fernández & Fierro, 2014). Asimismo, en 2019, la Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua (Renameca), en su reporte de la calidad del agua de los años 2012-2019, dio a conocer que existía contaminación solo en la zona baja en el punto de agua dulce, correspondiente al puente de San Jerónimo, en Benito Juárez (Semarnat & Conagua, 2019). Aunado a lo anterior, la Comisión Nacional de los Derechos Humanos (CNDH) (CNDH, 2019) emitió la recomendación 056/2019 hacia los municipios de Atoyac de Álvarez y Benito Juárez, del estado de Guerrero, sobre el caso de las violaciones a los derechos humanos a un medio ambiente sano y al saneamiento de agua por la contaminación del río. Los análisis de la calidad del agua del río Atoyac más recientes de la Renameca y el IMTA han sido hechos solo en la zona baja de la cuenca, sin contemplar que el estudio de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en el año 2000, en su diagnóstico ambiental de la cuenca del río Atoyac, ha demostrado la necesidad de llevarlos a cabo en las zonas media y alta.

Ante estos acontecimientos, en el año 2020, en una decisión conjunta con autoridades locales de los municipios de Atoyac de Álvarez y Benito Juárez, organizaciones civiles, como Salvemos el Río Atoyac, Guerrero es Primero y el Centro de Ciencias de Desarrollo Regional de la Universidad Autónoma de Guerrero, promovieron acciones coparticipativas en beneficio de la salud del río y de las poblaciones aledañas a sus riberas (Madrid, 2022). Una de estas acciones fue realizar la investigación que sirve de base al presente artículo, con el objetivo de conocer la calidad del agua superficial de la cuenca del río Atoyac, Guerrero, en nueve sitios de la cuenca, en la zona alta, media y baja, a través de parámetros fisicoquímicos, y metales pesados. Las preguntas que guiaron esta investigación fueron: ¿cuáles son los parámetros fisicoquímicos y el contenido de metales críticos pesados en cada zona de la cuenca?, ¿cuál podría ser la causa de diferencias o similitudes en la calidad del agua de las distintas zonas de la cuenca? y, por ende, ¿cuál es la aptitud del agua del río y qué parámetros afectan sus usos para beneficio de las sociedades ribereñas de las diferentes zonas de la cuenca? Se hicieron estudios comparativos acordes con la metodología que se describe a continuación.

Área de estudio

El estudio se realizó en la cuenca del río Atoyac —que atraviesa los municipios de Atoyac de Álvarez y Benito Juárez, y está dividido en Atoyac 1 y Atoyac 2— perteneciente a la Región Hidrológica RH 19 Costa Grande, Guerrero, México. El río Atoyac nace a una elevación aproximada de 2 800 metros sobre el nivel medio del mar (msnm), en el límite norte del

municipio de Atoyac de Álvarez, y a lo largo de su recorrido de 74.13 kilómetros mantiene una dirección predominante al sur, que desemboca en el océano Pacífico (DOF, 2017) (Figura 1).

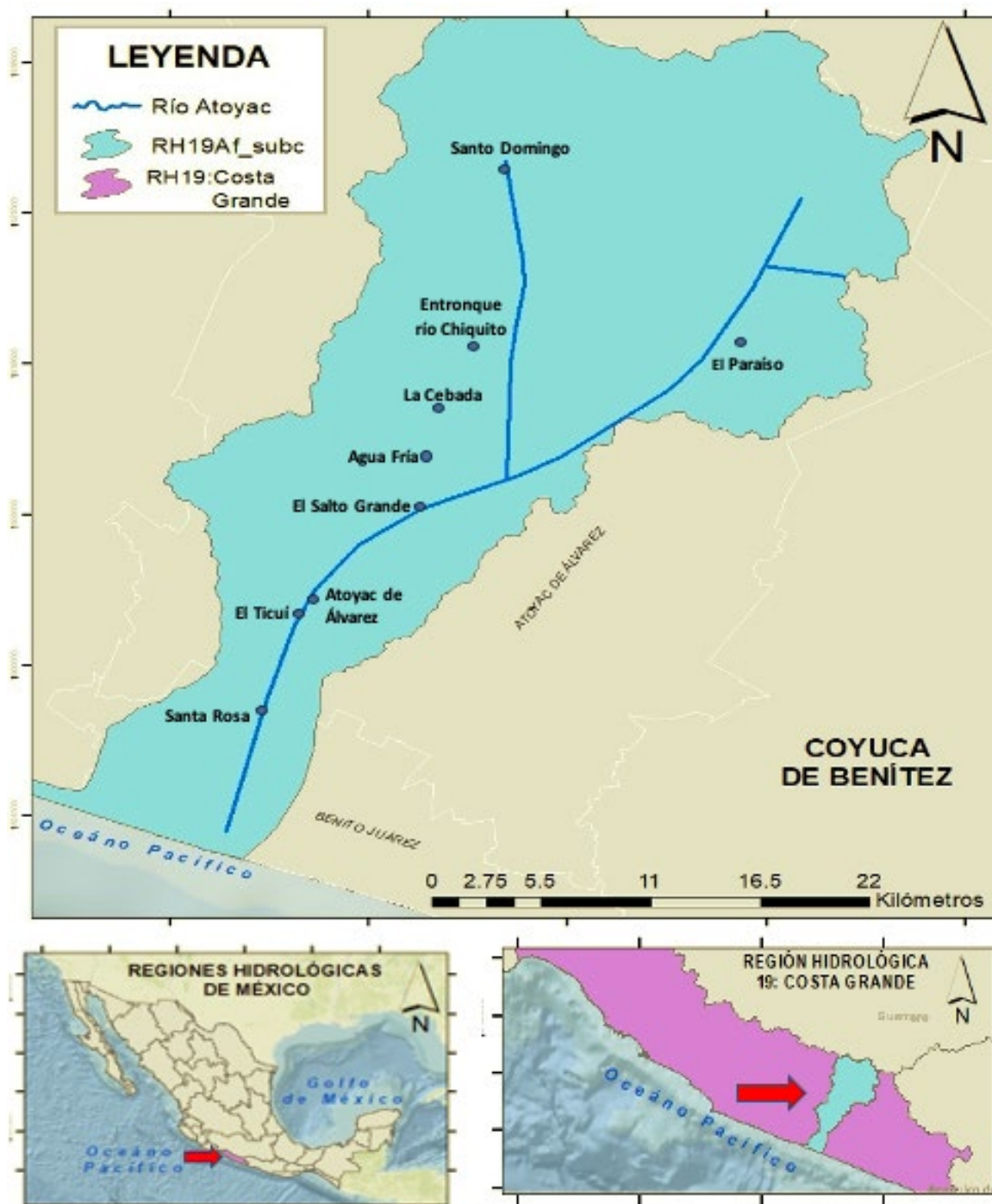


Figura 1. Mapa de localidades de muestreo para análisis fisicoquímico y metales pesados en la cuenca del río Atoyac, Guerrero, utilizando datos del INEGI (2010).

Los sitios y momentos de muestreo se establecieron con el apoyo de actores clave de la cuenca, para lo cual se consideraron criterios de accesibilidad y representatividad en cuanto a la zona de la cuenca, cantidad de población y época del año. La cuenca se dividió en tres zonas y en cada una se ubicaron tres sitios de muestreo en la zona alta: Santo Domingo (SDM), Entronque Río Chiquito (ERCH), El Paraíso (EPR); en la zona media: La Cebada (LCB), Agua Fía (AFR), El Salto Grande (ESGR), y en la zona baja: Atoyac (ATY), El Ticuí (ETC) y Santa Rosa (STR). En total se recolectaron 54 muestras de agua, seis de cada sitio, durante las épocas de lluvia y estiaje, desde mayo de 2021 hasta julio de 2022. Los sitios de muestreo se dividieron en Ruta 1 (R1): SDM, ERCH, LCB, AFR, ESGR, y en Ruta 2 (R2): EPR, ATY, ETC y STR debido a su accesibilidad y ubicación geográfica. En la Tabla 1 se describen las características de los nueve sitios de muestreo de esta investigación.

Tabla 1. Características de los lugares de muestreo en la cuenca del río Atoyac, Guerrero. Elaborada con base en los planes de desarrollo (2021-2024) de los municipios Atoyac de Álvarez y Benito Juárez (H. Ayuntamiento Constitucional de Atoyac de Álvarez, 2021a; H. Ayuntamiento Constitucional de Atoyac de Álvarez 2021b; INEGI, 2013), y en el trabajo de campo del periodo 2020-2022.

Zona	Localidad/uso de suelo y vegetación	Altitud (msnm)	Coordenada UTM (X, Y)	Características
Alta	SDM Pastizal-vegetación secundaria	878	0356546, 1930231	Comunidad cafeticultora y ganadera de 511 habitantes. En la zona de muestreo no se observó contaminación por RSU* significativa. En este tramo el río presentó exposición parcialmente cubierta, y flujos rápidos debido a la inclinación del suelo y rocas presentes
	EPR Selva mediana- agricultura-urbano	882	0370254, 1916997	Comunidad de 3 656 habitantes. La zona de muestreo mostraba alteración de la ribera por la extracción de material pétreo. El tramo de muestreo presentó corrientes moderadas, exposición parcialmente cubierta y rocas grandes
	ERCH Pastizal-bosque mesófilo de montaña	798	0351665, 1919242	Afluente de paso de comunidades altas. En sus costados se observaron zonas con pendientes de siembra y ganado con potenciales escurrimientos al río. Tramo con exposición muy cubierta y corriente baja, con raíces

Zona	Localidad/uso de suelo y vegetación	Altitud (msnmm)	Coordenada UTM (X, Y)	Características
Media	LCB Vegetación secundaria-pastizal	470	0352118, 1916858	Comunidad con 121 habitantes. En el sitio de muestreo se observaron actividades tradicionales de lavado de ropa; patos y cerdos en la ribera y dentro del río; descargas de aguas residuales domiciliarias, así como restos de RSU provenientes de empaques de detergentes, envases de refrescos y bolsas plásticas. Sitio con corriente moderada, exposición parcialmente cubierta, con rocas grandes y medianas
	AFR Agricultura- vegetación secundaria	394	0350674, 1912932	Comunidad con 268 habitantes. Sitio de muestreo cerca de la avenida principal. Se observaron usos recreativos del río; mayor cantidad de rocas grandes; patos y cerdos dentro y fuera del río. Corriente moderada y exposición parcialmente cubierta
	ESGR Vegetación secundaria- agricultura	136	0349049, 1909018	Comunidad turística de 277 habitantes. En sus riberas hay cabañas de descanso, restaurantes y casas provisionales durante la época de estiaje. Presencia frecuente de restos de envases, detergentes, comida y agua jabonosa. Corriente baja tipo canal, exposición abierta, con escasa presencia de algas

Zona	Localidad/uso de suelo y vegetación	Altitud (msnmm)	Coordenada UTM (X, Y)	Características
Baja	ATY Urbano	42	0347105, 1903493	Comunidad de 21 407 habitantes, cabecera municipal. En el sitio de muestreo, además de canes, pollos, cerdos y patos, se concentraba abundante RSU dentro del río y en sus riberas; presencia de rastros y tiraderos clandestinos, y descarga de aguas residuales. Corriente baja tipo canal, exposición abierta, concreto en riberas, escasa presencia de algas
	ETC Urbano-agricultura	35	0347172, 1903502	Localidad de 3 389 habitantes. Cerca del sitio de muestreo era visible la descarga de aguas residuales y presencia de RSU dentro y fuera del río. Lugar de pesca y recreación, con corriente lenta tipo canal, exposición abierta, suelo tipo arenoso y sin rocas
	STR Agricultura-urbano	15	0344411, 1895859	Comunidad con menos de 100 habitantes, muy cercana al paso principal de la carretera federal Acapulco-Zihuatanejo. Se observó erosión en el sitio de muestreo, así como ganado vacuno en sus riberas, bañistas, pescadores, aves, ganado y presencia de RSU. Corriente lenta, moderada vegetación

*Residuo sólido urbano.

En la Tabla 2 se tienen las fechas de muestreo para el análisis fisicoquímico y de metales pesados en los sitios establecidos, así como el comportamiento de temperaturas y precipitación de acuerdo con el

Sistema de Pronósticos en Ríos (SPR) y la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR).

Tabla 2. Épocas de lluvia y estiaje durante los momentos muestreados en la cuenca del río Atoyac, Guerrero. Fuente: SPR y GASIR (2023).

Fecha de muestreo	Ruta	Análisis	Precipitación milímetros	Temperatura ° C		Época
				Máxima	Mínima	
14-05-2021	R1	FQ	3.6	38	17	Lluvia
19-05-2021	R2	FQ	0	36	25	
18-10-2021	R1	FQ	0	37	23.5	Estiaje
20-10-2021	R2	FQ	0	37	21.5	
07-12-2021	R1	FQ y MP	0	37	23.5	Estiaje
09-12-2021	R2		0	36.5	24	
28-02-2022	R1	FQ	0	38	21.5	Estiaje
02-03-2022	R2	FQ	0	37.5	21	
26-05-2022	R1	FQ	0.5	37	22.5	Lluvia
27-05-2022	R2	FQ	9.2	39	22	
05-07-2022	R1	FQ y MP	14.5	33	22	Lluvia
08-07-2022	R2		1.5	38	21.5	

Fisicoquímico (FQ), metales pesados (MP).

Materiales y métodos

Parámetros fisicoquímicos

La toma de muestras se hizo de acuerdo con lo establecido en Norma Oficial Mexicana NMX-AA-O14-1980 para cuerpos receptores, que implica la conservación, almacenaje y análisis correspondientes para aguas naturales (Conagua & Cotemarnat, 2016). Los parámetros fisicoquímicos determinados fueron los siguientes: temperatura en centígrados (T°), potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (SDT), oxígeno disuelto (OD), sulfatos (SO_4^{2-}), nitritos y nitratos (N-NO_2^- , N-NO_3^-), nitrógeno amoniacal (N-NH_3^-), ion amonio (NH_4^+) y demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO_5). Los metales pesados: arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn).

Las determinaciones se llevaron a cabo en el Laboratorio de Análisis Químico Ambiental del Centro de Ciencias de Desarrollo Regional (CCDR), de la Universidad Autónoma de Guerrero (UAGRO), siguiendo las Normas Mexicanas (NMX) establecidas para cada parámetro (Tabla 3).

Tabla 3. Normas Mexicanas empleadas en la determinación de los parámetros de la calidad del agua en el río Atoyac, Guerrero (Conagua-Cotemarnat, 2016).

Parámetro	Norma mexicana
Temperatura	NMX-AA-007-SCFI-2013
pH	NMX-AA-008-SCFI-2016
CE	NMX-AA-093-SCFI-2000
SDT	Método multiparamétrico Hach Sension 156
OD	NMX-AA-012-SCFI-2001
DBO ₅	NMX-AA-028-SCFI-2001
SO ₄ ²⁻	NMX-AA-074-SCFI-2014
N-NO ₂ ⁻	NMX-AA-079-SCFI-2001
N-NO ₃ ⁻	NMX-AA-099-SCFI-2006
N-NH ₃ ⁻	NMX-AA-026-SCFI-2010
As, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, Zn	NMX-AA-051-SCFI-2016

Los metales pesados se determinaron a través de las técnicas de flama y generador de hidruros, como lo establece la norma NMX-AA-051-SCFI-2016 para el análisis y determinación de la aptitud del agua; los resultados de parámetros fisicoquímicos determinados se compararon con los criterios ecológicos de calidad del agua CE-CCA-001/89 (Tabla 4).

Tabla 4. Criterios ecológicos para parámetros fisicoquímicos y metales pesados cuenca del río Atoyac, Guerrero (DOF, 1989; *Conagua & GCA, 2020).

Parámetro (mg/l cuando no se indica otra unidad)	Criterios de Clasificación		
	Abastecimiento de agua potable	Riego Agrícola	Protección de la vida acuática en agua dulce
Temperatura	Condiciones naturales +2.5	NE	Condiciones naturales +1.5
pH	5-9	4.5-9	NE
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	NE	1.00e+6	NE
SDT	500.0	500.0	NE
N- NO_3^-	5	NE	NE
N- NO_2^-	0.05	NE	NE
N- NH_3^-	NE	NE	0.06
SO_4^{2-}	500.0	130.0	0.005
OD	4.0	NE	5.0
DBO_5^*	6	6	6
As	0.5	0.1	0.2
Cd	0.01	0.01	NE
Cu	1.0	0.2	NE
Cr	0.5	1.0	0.01
Hg	0.001	NE	0.00001
Ni	0.01	0.2	NE
Pb	0.05	5.0	NE
Zn	5.0	2.0	NE

NE: no especificado; *semáforo de calidad del agua.

Los resultados obtenidos de DBO_5 se compararon con los criterios establecidos en el semáforo de la calidad del agua, publicado por la Comisión Nacional del Agua (Conagua) y la Gerencia de Calidad del Agua (GCA), en 2020, el cual clasifica la calidad del agua en excelente, buena, aceptable, contaminada y fuertemente contaminada, utilizando colores azul, verde, amarillo, naranja y rojo, respectivamente. La categoría de excelente se otorga si el valor de $\text{DBO}_5 < 3 \text{ mg/l}$; buena, si es $3 < \text{DBO}_5 < 6 \text{ mg/l}$; aceptable, si es $6 < \text{DBO}_5 < 30 \text{ mg/l}$; contaminada, si es $30 < \text{DBO}_5 < 120 \text{ mg/l}$, y fuertemente contaminada si $\text{DBO}_5 > 120 \text{ mg/l}$.

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los datos se utilizaron los resultados de DBO_5 de los nueve sitios de muestreo, en las tres zonas de la cuenca, obtenidos durante las épocas de lluvia y estiaje. Lo anterior porque en todos los sitios de muestreo este parámetro superó el criterio establecido por el semáforo de Conagua, que señala una concentración $< 6 \text{ mg/l}$ para aguas de buena calidad (Conagua & GCA, 2020). Se realizó un diseño cuasi experimental, de temporalidad transversal y alcance comparativo; se utilizó el paquete estadístico Statistical Package for the Social Sciences (SPSS), versión 25, con el cual se obtuvieron las tablas de análisis. Se efectuó la prueba de Shapiro-Wilk, adecuada para muestras pequeñas ($n < 50$), a fin de analizar la prueba de normalidad de los datos. Para realizar la comparación entre los distintos sitios de la cuenca y saber si existe al menos un par de sitios que difieren se utilizó el análisis de varianza unifactorial de Kruskal-Wallis. Para detectar las zonas de la cuenca que

difieren se usó el estadístico U de Mann-Whitney Wilcoxon (Shapiro & Wilk, 1965; Sheskin, 2004; Lorenzo, 2020).

Resultados

Parámetros fisicoquímicos

Los resultados de las determinaciones fisicoquímicas y de metales pesados se promediaron para cada sitio muestreado, y se analizaron de acuerdo con las épocas de lluvia y estiaje. En las figuras 2 a 11 se encuentran los resultados promedio para cada parámetro en los nueve sitios muestreados de la cuenca, correspondientes a las zonas alta, media y baja durante los dos momentos muestreados.

En la Figura 2 se puede observar que las temperaturas (en centígrados) más bajas corresponden a la zona alta de la cuenca y las temperaturas más elevadas a la zona baja, respectivamente.

TEMPERATURA PROMEDIO

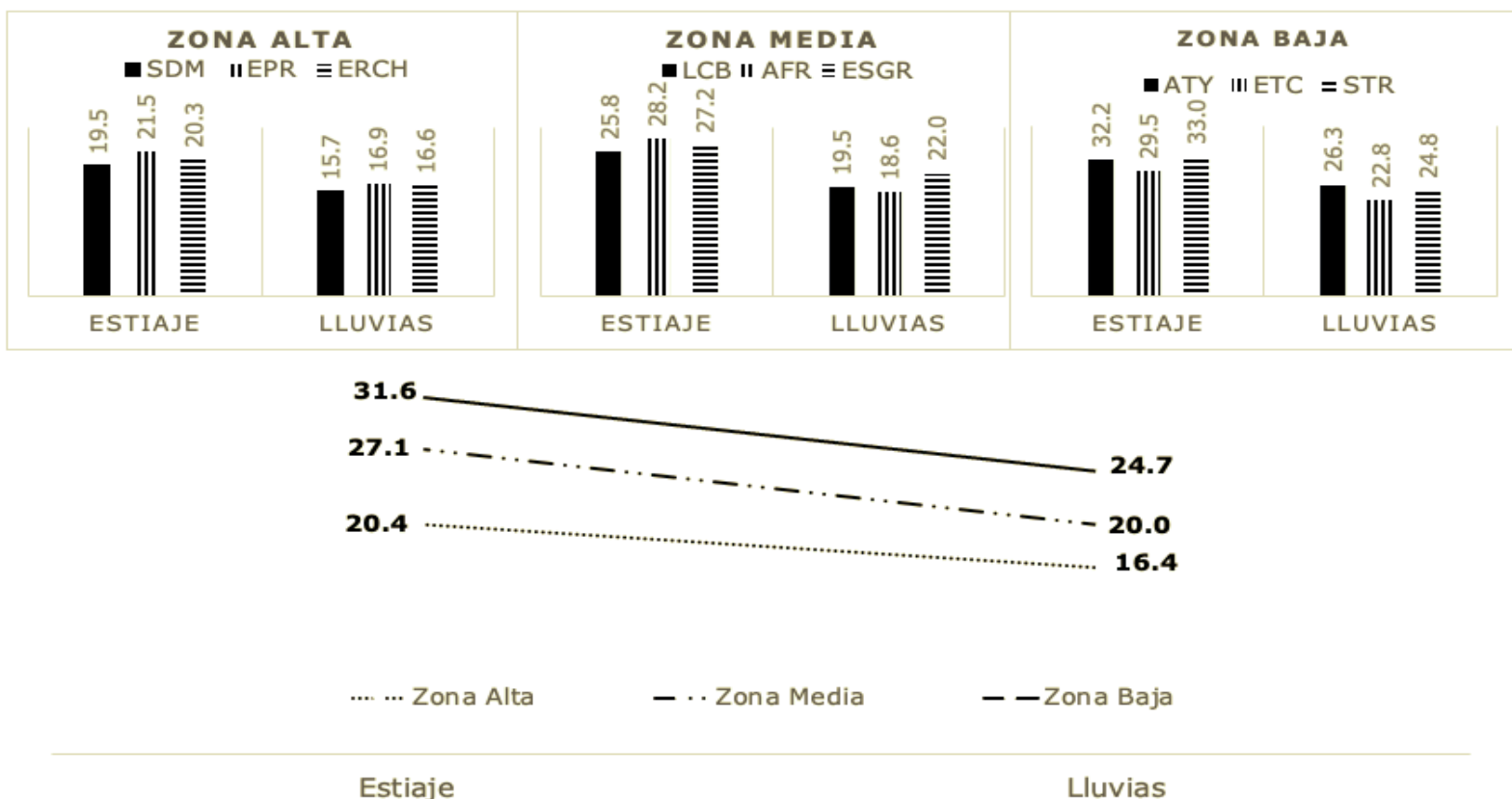


Figura 2. Temperatura promedio en las zonas alta, media y baja del río Atoyac, Guerrero, durante las épocas de estiaje y lluvia.

Los promedios de pH en los nueve sitios muestreados en épocas de lluvia eran ligeramente más bajos que en época de estiaje (Figura 3). ERCH (7.2), LCB (7.6) y ATY (7.6) de las cuencas alta, media y baja, respectivamente, presentaron los valores promedio más bajos en época de lluvias; mientras que SDM (8.2), ESGR (8.6) y ETC (8.3), los valores promedio más altos de pH durante el estiaje.

pH PROMEDIO

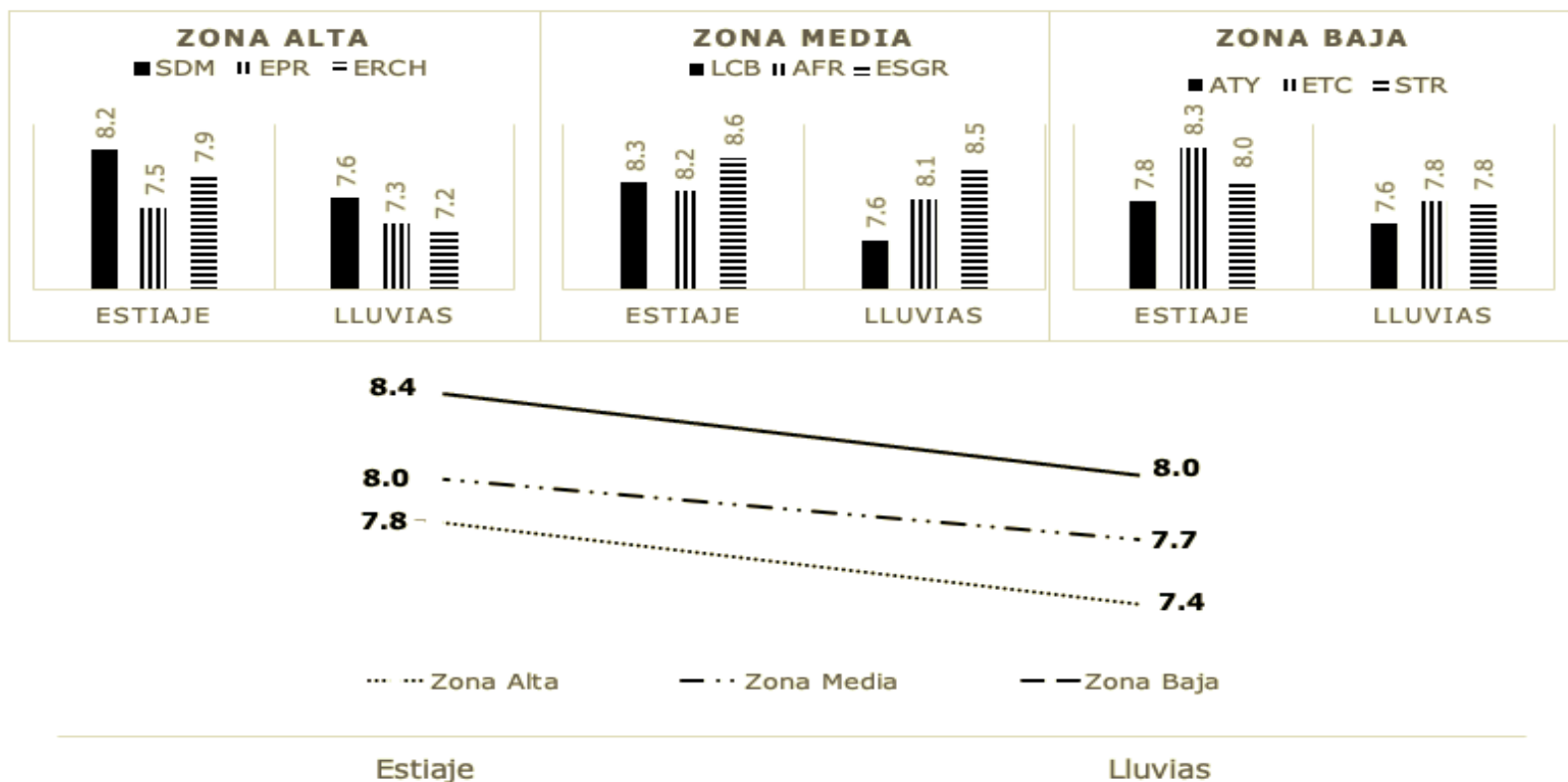


Figura 3. pH promedio en las zonas alta, media y baja del río Atoyac, Guerrero, durante las épocas de estiaje y lluvia.

La CE para las cuencas alta, media y baja mostró una tendencia de aumento hacia la época de lluvia; los valores promedio más altos los presentó la cuenca baja (Figura 4).

CE PROMEDIO

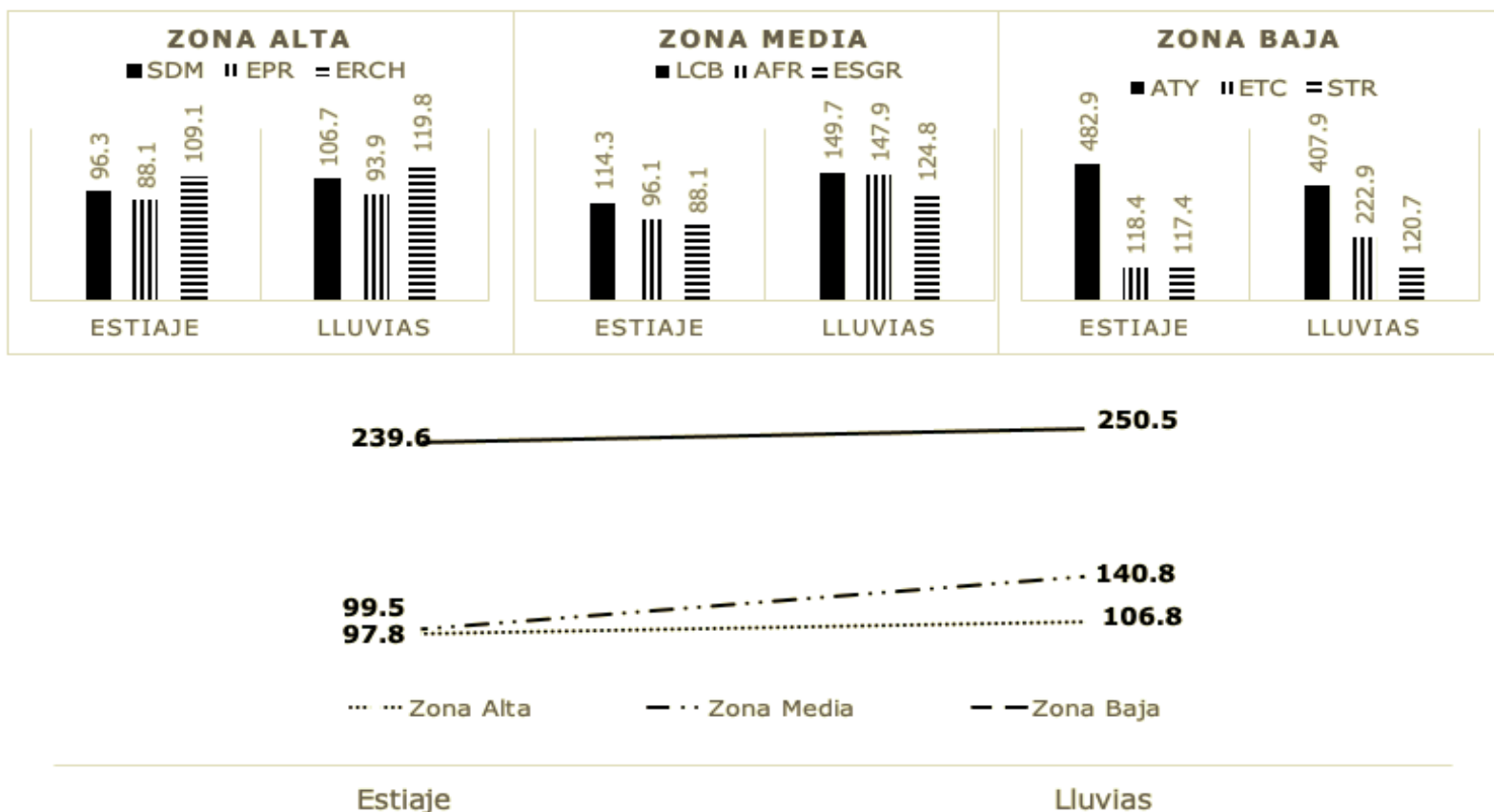


Figura 4. CE promedio en las zonas alta, media y baja del río Atoyac, Guerrero, durante las épocas de estiaje y lluvia.

Por su parte, el parámetro SDT para las cuencas alta, media y baja mostró una tendencia en aumento hacia la época de lluvia; la cuenca baja presentó los valores promedio más elevados. ATY, la localidad de la zona baja, y LCB y ERCH de la zona media y alta, respectivamente, presentaron los valores más altos (Figura 5).

SDT PROMEDIO

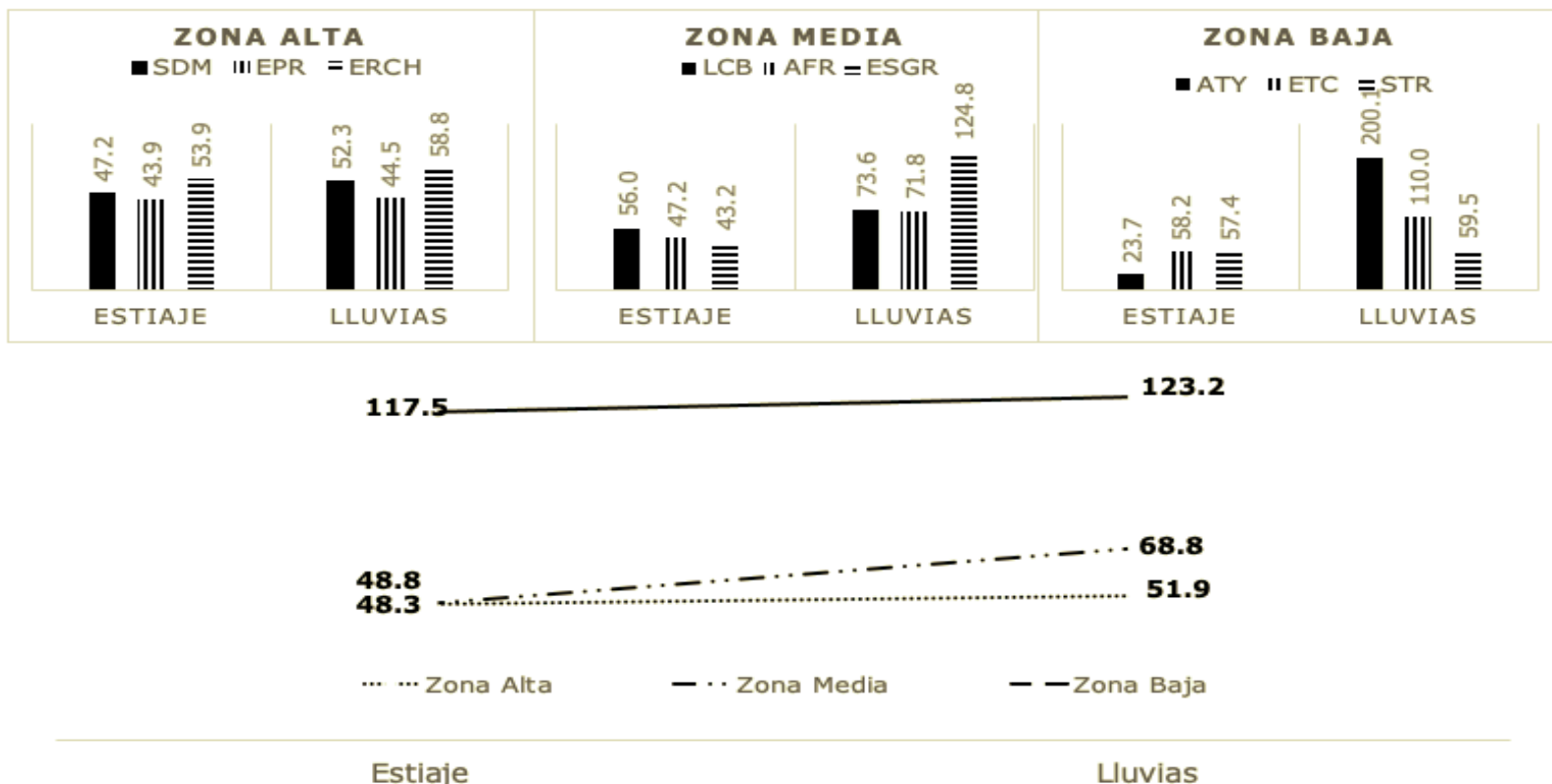


Figura 5. SDT promedio en las zonas alta, media y baja del río Atoyac, Guerrero, durante las épocas de estiaje y lluvia.

En este estudio, los valores promedio de N-NH_3^- y NH_4^+ fueron más altos en la cuenca baja ATY (2.8 mg/l de N-NH_3 y 3.9 mg/l NH_4^+), respectivamente, con una tendencia de aumento hacia la época de lluvia en las tres zonas de la cuenca (Figura 6 y Figura 7). El N-NO_2^- se presentó solo en la cuenca baja y mostró mayor presencia en época de lluvia; por ejemplo, ETC presentó 0.6 mg/l de N-NO_2^- (Figura 8). Por el contrario, el valor promedio de N-NO_3^- fue más elevado en la época de estiaje para las tres zonas de la cuenca, con una tendencia de disminución hacia la época

de lluvia; ERCH (7.3 mg NO_3^-/L N-NO_3^-) fue el de mayor concentración. En la cuenca media y baja fueron LCB (4.4 mg/l) y ATY (4.4 mg $\text{N-NO}_3^-/\text{l}$), respectivamente (Figura 9).

N-NH₃⁻ PROMEDIO

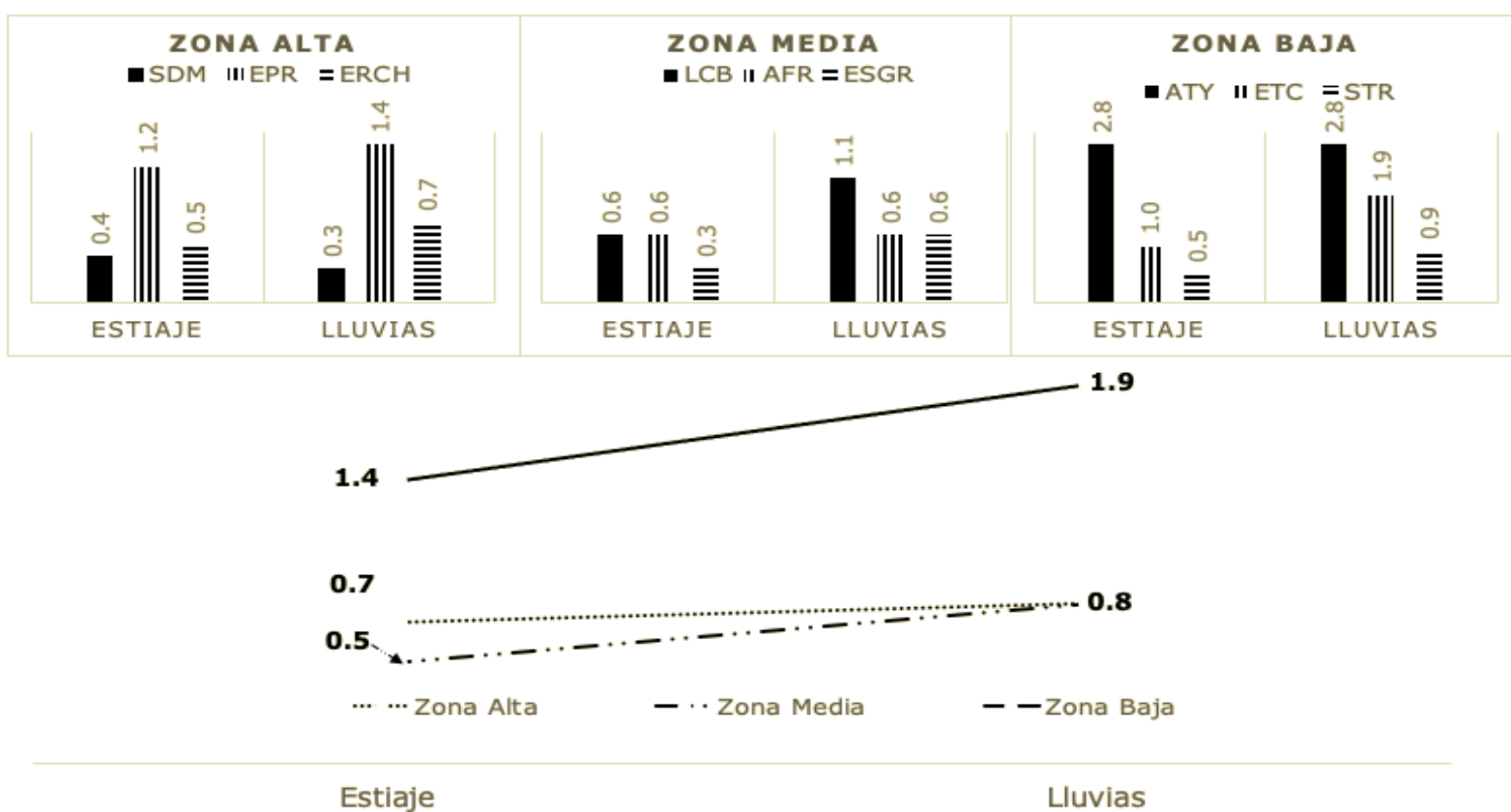


Figura 6. N-NH_3^- promedio en las zonas alta, media y baja del río Atoyac, Guerrero, durante las épocas de estiaje y lluvia.

NH₄⁺ PROMEDIO

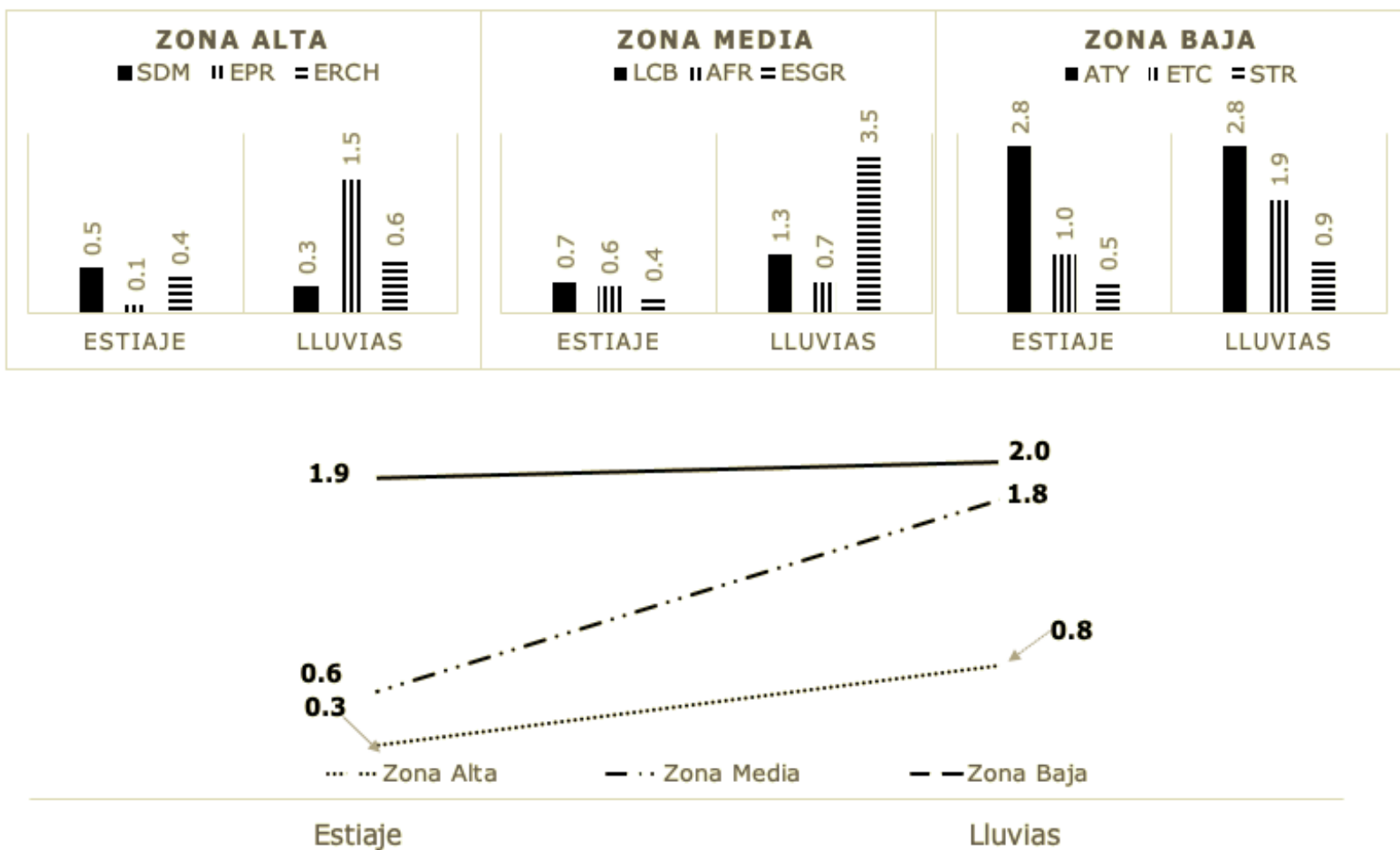


Figura 7. NH₄⁺ promedio en las zonas alta, media y baja del río Atoyac, Guerrero, durante las épocas de estiaje y lluvia.

N-NO₂⁻ PROMEDIO

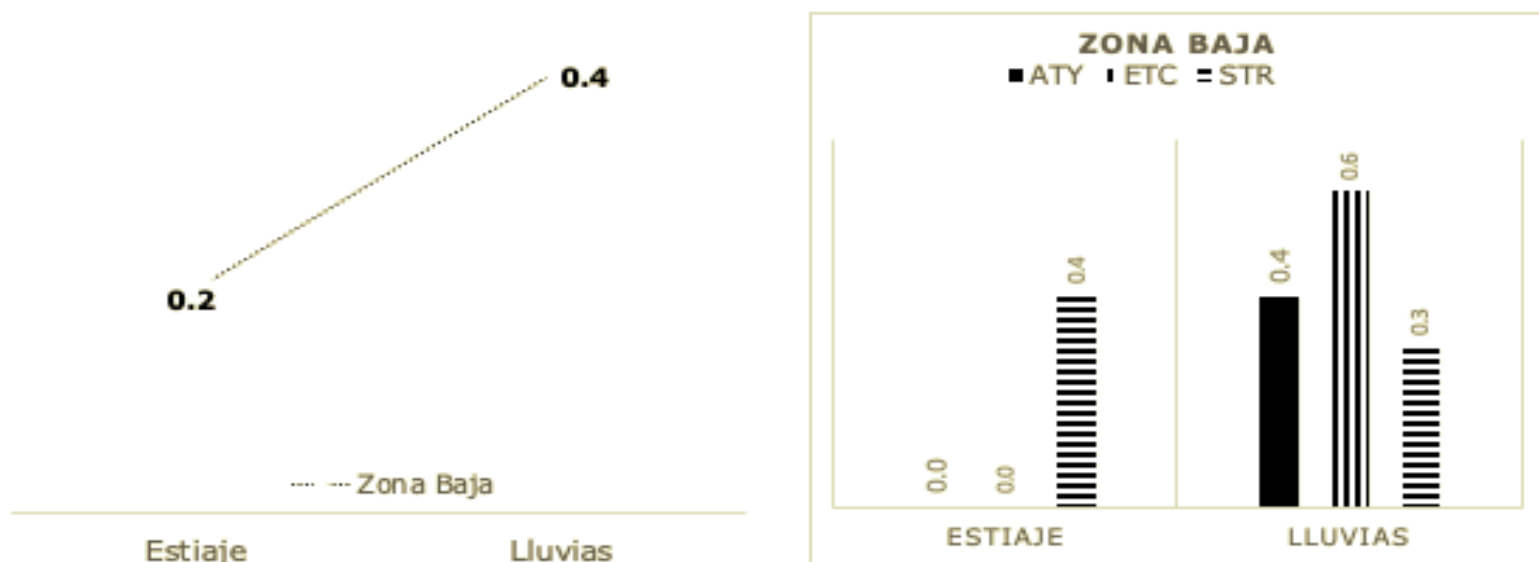


Figura 8. N-NO₂⁻ promedio en la zona baja del río Atoyac, Guerrero, durante las épocas de estiaje y lluvia.

N-NO₃⁻ PROMEDIO

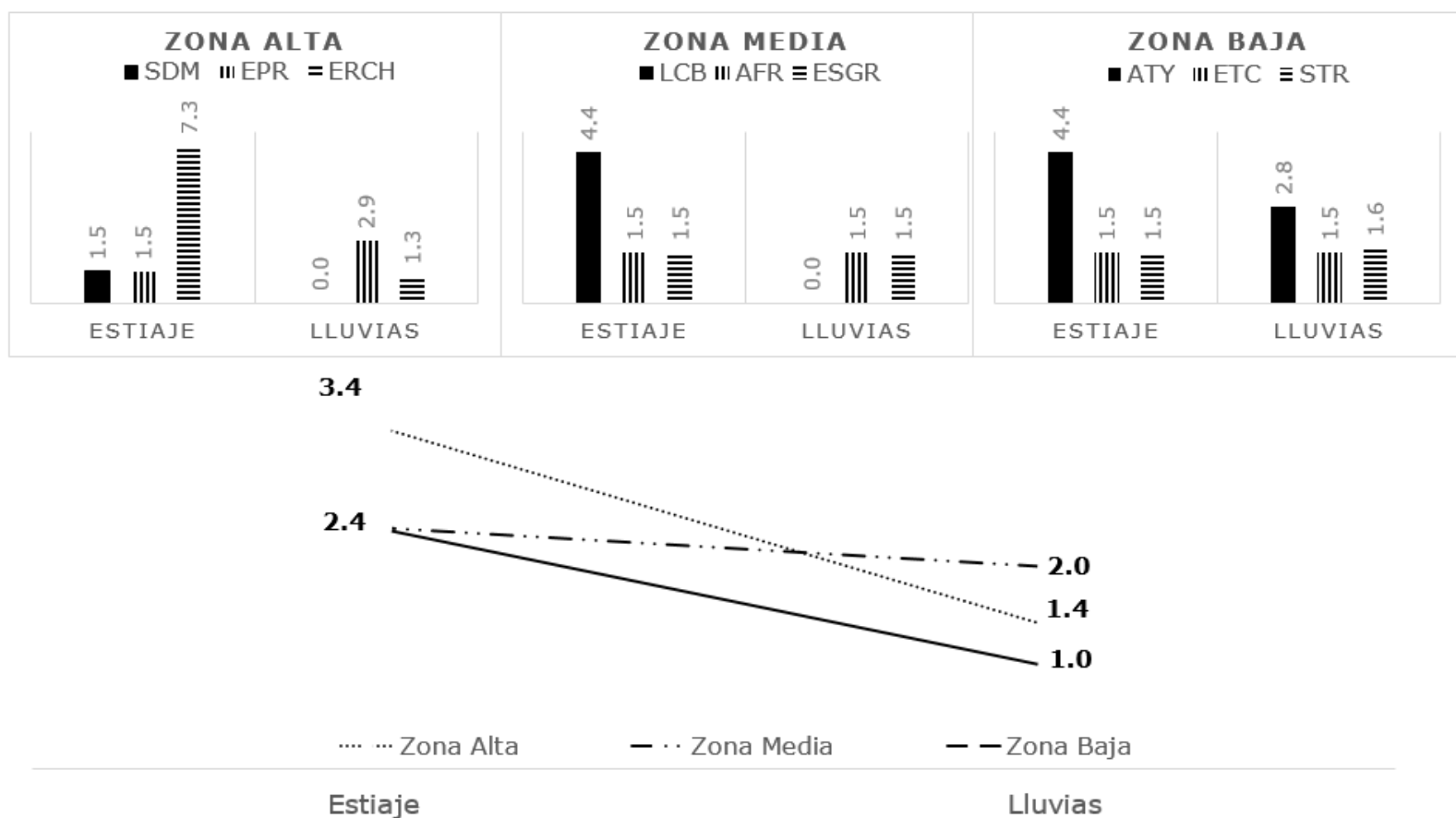


Figura 9. N-NO₃⁻ promedio en las zonas alta, media y baja del río Atoyac, Guerrero, durante las épocas de estiaje y lluvia.

Los SO₄²⁻ en la zona alta durante la época de lluvia estuvieron presentes solo en EPR (65 mg/l), mientras que en la zona baja en ATY (107.5 mg/l) y ETC (60 mg/l). Sin embargo, durante la época de estiaje, solo se presentaron en ATY (60 mg/l).

Los valores promedio de OD presentaron tendencia de disminución hacia la época de lluvia para la cuenca media y baja, sin embargo, el

fenómeno fue contrario para la cuenca alta (Figura 10). Al analizar los valores de manera independiente para cada zona de la cuenca se aprecian comportamientos diferentes. El valor promedio más bajo para la cuenca alta fue en época de lluvia para EPR (6.9 mg/l), sin embargo, para las cuencas media y baja fue para LCB (5.8 mg/l) y ATY (3.9 mg/l) durante la época de estiaje. Los valores promedio más altos fueron en épocas de lluvia para SDM (8.0 mg/l), ESGR (9.4 mg/l) y ETC (7.6 mg/l) de las cuencas alta, media y baja, respectivamente.

OD PROMEDIO

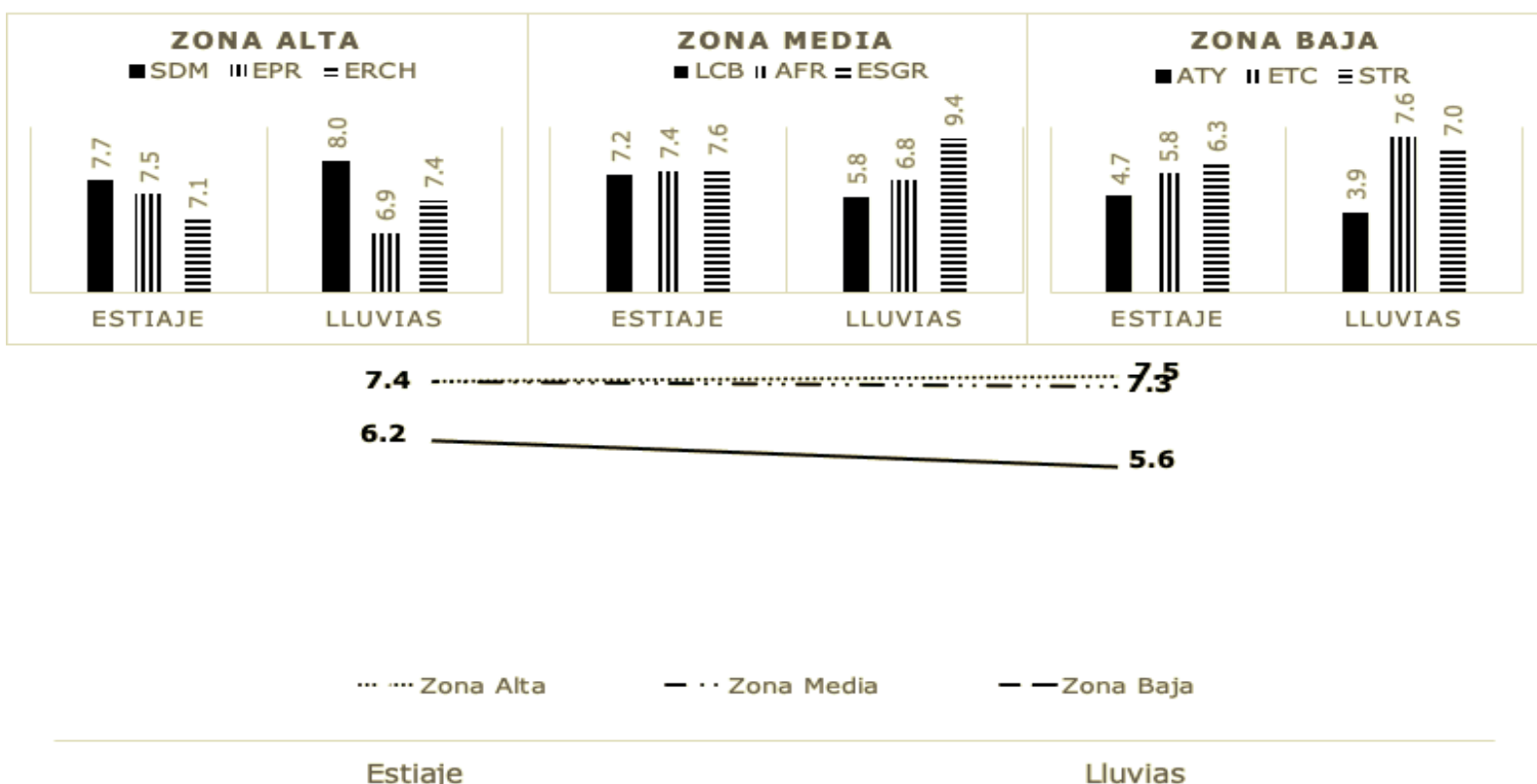


Figura 10. OD promedio en las zonas alta, media y baja del río Atoyac, Guerrero, durante las épocas de estiaje y lluvia.

La DBO₅ tanto para la cuenca media y baja presentó tendencia de aumento hacia la época de lluvia; la cuenca baja presentó los valores más elevados (Figura 11). Las concentraciones mayores fueron para ATY (155.1 mg/l) y ESGR (57 mg/l), ambas en época de lluvia, mientras ERCH (22.3 mg/l) presentó sus concentraciones mayores en la época de estiaje.

DBO₅ PROMEDIO

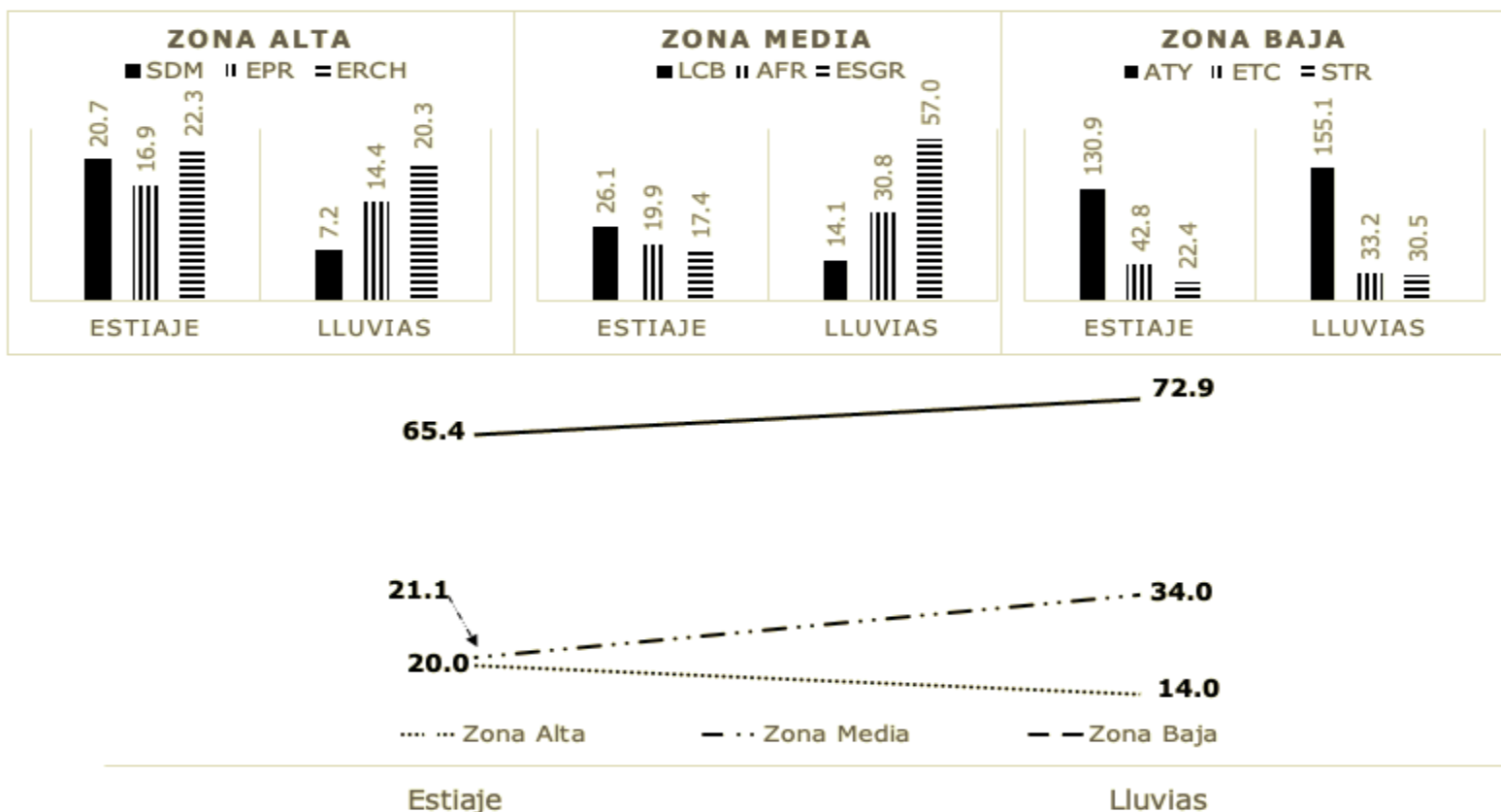


Figura 11. DBO₅ promedio en las zonas alta, media y baja del río Atoyac, Guerrero, durante las épocas de estiaje y lluvia.

Presencia de metales pesados

En la Tabla 5 se observan los resultados de las concentraciones de As, Cu, Cr, Ni, Pb, Zn durante las épocas de lluvia y estiaje en las distintas zonas de la cuenca del río Atoyac, Guerrero. Dichas concentraciones están por debajo del límite de detección del equipo, por lo que no representan un peligro en el río Atoyac, Guerrero, de acuerdo con los límites establecidos (Tabla 4). Las concentraciones de Cd en ATY, ETC y STR, (cuenca baja) durante las épocas de lluvia y estiaje oscilaron entre 0.02 y 0.05 mg/l; la ATY presentó la mayor concentración durante lluvia. El Hg en la cuenca baja en la época de estiaje presentó una concentración de 0.001 mg/l para las tres localidades, pero durante la época de lluvia sus valores oscilaron entre 0.002 y 0.003 mg/l.

Tabla 5. Concentración de metales pesados en la cuenca baja del río Atoyac, Guerrero.

Metal mg/l	Lluvia			Estiaje			Límite de cuantificación del equipo*
	ATY	ETC	STR	ATY	ETC	STR	
As	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	0.002
Cd	0.05	0.04	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02
Cu	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.05
Cr	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.05
Hg	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
Ni	< 0.06	< 0.06	< 0.06	< 0.06	< 0.06	< 0.06	0.06
Pb	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.10
Zn	0.01	0.08	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02

*Espectrofotómetro de absorción atómica Thermo Scientific, modelo iCE 3000 series, con generador de hidruros modelo VP100.

Aptitud del agua

Para determinar la aptitud del agua superficial del río Atoyac se analizaron los valores promedio de las determinaciones fisicoquímicas y de metales pesados resultantes en cada zona con respecto de los límites establecidos por los CE-CCA-001/89 (Tabla 4). El análisis determinó que los parámetros N-NH_3^- , N-NO_2^- , OD, Cd y Hg analizados fueron rebasados como se indica a continuación.

Los promedios de las concentraciones de N-NH_3^- en todos los sitios muestreados de las zonas alta, media y baja indican que el agua no es apta para la protección de la vida acuática. Asimismo, los promedios de las concentraciones de N-NO_2^- , en ATY, ETC y STR de la zona baja indican que el agua del río Atoyac en esos sitios no es apta como fuente de abastecimiento de agua potable.

Las concentraciones promedio de SO_4^{2-} en EPR (65 mg/l), ATY (107.5 mg/l) y ETC (60 mg/l) durante la época de lluvia, y (ATY 60 mg/l) durante estiaje indican que el agua del río Atoyac en esos tres sitios de la zona baja no es apta para la protección de la vida acuática.

Las concentraciones de Cd que resultaron entre 0.02 y 0.05 mg/l en todas las localidades muestreadas de la zona baja durante las épocas de lluvia y estiaje demuestran que el agua del río Atoyac no es apta para el abastecimiento de agua potable (0.01 mg/l) ni riego agrícola (0.01 mg/l). De igual manera, las concentraciones de Hg que oscilaron entre 0.001 y 0.003 mg/l determinadas para la misma zona demuestran que sus aguas no son aptas como fuente de abastecimiento de agua potable (0.001 mg/l) ni para la protección de la vida acuática (0.00001 mg/l).

Las concentraciones promedio de OD en ATY (3.9 mg/l) en la zona baja durante la época de estiaje demuestran que el agua del río Atoyac en ese sitio no puede usarse para abastecimiento de agua potable (4.0 mg/l) ni protección de la vida acuática (5.0 mg/l).

Calidad del agua

La calidad del agua del río Atoyac, Guerrero, para las cuencas alta, media y baja no resultó ser de buena o excelente calidad; esto, al comparar el promedio de las concentraciones de DBO₅, en todos los sitios analizados durante las épocas de lluvia y estiaje, con los criterios establecidos por el semáforo Conagua y GCA (2020).

En la zona alta, el promedio de las concentraciones de DBO₅, que osciló entre 7.2 y 22.3 mg/l, clasifica el agua en aceptable. En la zona media, los resultados promedio de DBO₅, solo en época de lluvia (de 14.1 a 57 mg/l), la clasifican como contaminada, mientras que en estiaje es aceptable, con concentraciones entre 17.4 y 26.1 mg/l. Mientras tanto, en la zona baja, en estiaje y lluvia, el promedio de las concentraciones, entre 22.4 y 155.1 mg/l, clasifica al agua del río Atoyac como contaminada.

La clasificación de la calidad del agua del río Atoyac, Guerrero, en todas las localidades y momentos muestreados, empleando como referentes al semáforo Conagua, se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Clasificación de la calidad del agua en las localidades de las zonas alta, media y baja del río Atoyac, Guerrero, durante las épocas de estiaje y lluvia (Conagua & GCA, 2020; DOF, 1989).

Zona	Localidad	Semáforo Conagua		Semáforo Conagua Promedios	
		Estiaje	Lluvia	Estiaje	Lluvia
Alta	SDM	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable
	EPR	Aceptable	Aceptable		
	ERCH	Aceptable	Aceptable		
Media	LCB	Aceptable	Aceptable	Contaminada	Aceptable
	AFR	Contaminada	Aceptable		
	ESGR	Contaminada	Aceptable		
Baja	ATY	Fuertemente contaminada	Fuertemente contaminada	Contaminada	Contaminada
	ETC	Contaminada	Contaminada		
	STR	Contaminada	Aceptable		

En la Tabla 6 se detalla la calidad del agua para cada sitio muestreado en las tres zonas de la cuenca del río Atoyac. Destaca que en las épocas de estiaje y lluvia la zona alta se mantuvo como aceptable. En la zona media se observaron más sitios contaminados en estiaje que en lluvia, mientras que en la zona baja predominaron los sitios contaminados y fuertemente contaminados durante estiaje.

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los datos se utilizaron los resultados de las concentraciones de DBO_5 debido a que fue el único parámetro que rebasó los criterios del semáforo Conagua para todos los sitios muestreados de las cuencas alta, media y baja.

El análisis estadístico fue comparativo y se utilizaron las medias y medianas de DBO_5 de los seis momentos de muestreo, que abarcan las épocas de lluvia y estiaje. En la Tabla 7 se presentan los resultados de la mediana del DBO_5 , donde se muestra que el agua del río Atoyac, Guerrero, en las cuencas alta y media es aceptable, mientras que en la cuenca baja está contaminada (Conagua & GCA, 2020). Al realizar la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para DBO_5 (variable dependiente), se observó que estos no siguen una distribución normal, es por esto que para realizar la comparación de los datos en este análisis se utilizaron estadísticos no paramétricos (Tabla 8).

Tabla 7. Media y mediana anual de DBO_5 .

Cuenca	Parámetro	Media	Mediana
Alta	DBO_5	15.78	14.60
Media	DBO_5	26.15	13.36
Baja	DBO_5	64.19	45.69

Tabla 8. Prueba de normalidad Shapiro-Wilk para DBO₅

Pruebas de normalidad			
	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	Gl	Sig.
DBO ₅	0.702	54	0.000

La prueba de análisis de varianza unifactorial de Kruskal-Wallis demuestra con un nivel de significancia de 0.05 que existen diferencias del rango promedio de DBO₅ entre las cuencas alta y baja, así como entre las cuencas media y baja (Tabla 9).

Tabla 9. Rangos obtenidos de la prueba Kruskal-Wallis.

Zona	N	Rango promedio
Alta	18	20.75
Media	18	22.72
Baja	18	39.03
Total	54	

Los resultados de la prueba U de Mann-Whitney Wilcoxon para DBO₅, con un nivel de significancia de 0.05 y un *p*-valor de 0.862, indicaron que los rangos fueron casi similares en las zonas alta-media (Tabla 10) y diferentes en las zonas baja-alta y media-baja (Tabla 11 y Tabla 12). Lo anterior significa que las medianas de las concentraciones de DBO₅ fueron estadísticamente igual para las zonas alta-media y diferentes en las zonas baja-alta y media-baja, respectivamente.

Tabla 10. Prueba de rangos y estadísticos de prueba U de Mann-Whitney-Wilcoxon para la zona media-alta del río Atoyac, Guerrero.

Rangos				Estadísticos de prueba ^a	
Zona	N	Rango promedio	Suma de rangos		DBO ₅
Alta	18	18.19	327.50	U de Mann-Whitney	156.500
Media	18	18.81	338.50	W de Wilcoxon	327.500
Total	36			Z	-0.174
				Sig. asintótica(bilateral)	0.862
				Significación exacta (2*(sig. unilateral))	0.864 ^b

^aVariable de agrupación: zona.

^bNo corregido para empates.

Tabla 11. Rangos promedios y estadísticos de prueba U de Mann-Whitney-Wilcoxon para la zona alta-baja del río Atoyac, Guerrero.

Rangos				Estadísticos de prueba ^a	
Cuenca	N	Rango promedio	Suma de rangos		DBO ₅
Alta	18	12.06	217.00	U de Mann-Whitney	46.000
Baja	18	24.94	449.00	W de Wilcoxon	217.000
Total	36			Z	-3.671
				Sig. asintótica(bilateral)	0.000
				Significación exacta (2*(sig. unilateral))	0.000 ^b

^aVariable de agrupación: zona.

^bNo corregido para empates.

Tabla 12. Rangos promedios y estadísticos de prueba U de Mann-Whitney-Wilcoxon para la zona media-baja del río Atoyac, Guerrero.

Rangos				Estadísticos de prueba ^a	
Cuenca	N	Rango promedio	Suma de rangos		DBO ₅
Media	18	13.42	241.50	U de Mann-Whitney	70.500
Baja	18	23.58	424.50	W de Wilcoxon	241.500
Total	36			Z	-2.896
				Sig. asintótica(bilateral)	0.004
				Significación exacta (2*(sig. unilateral))	0.003 ^b

^aVariable de agrupación: Zona.

^bNo corregido para empates.

Discusión

En este estudio se observó que los promedios de las temperaturas fueron más bajas en la época de lluvias que en estiaje, mientras que resultaron más bajas en la zona alta que en la zona baja. Lo anterior puede estar relacionado con las características locales de cada zona de la cuenca, como la contaminación de los cuerpos de agua y la sobreexplotación de los recursos hídricos (UN & WMO, 2023). Por ejemplo, en la zona alta existen localidades con menor cantidad de población, menor perturbación de las áreas naturales y mayor cantidad de recubrimiento vegetal. Por otro lado, en las zonas bajas se encuentran concentradas la mayor cantidad de población y el uso del suelo es urbano (Tabla 1). El estudio

publicado por el IMTA (2018) evidencia que, de agosto de 2018 a julio de 2022, la diferencia de temperatura para ATY en la zona baja de la cuenca es $+5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, y en Benito Juárez de $+3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este incremento de temperatura podría estar relacionado con una menor disponibilidad de agua, menor precipitación y, por ende, con el cambio climático (Martínez & Patiño, 2012; Montes, Navarro, Domínguez, & Jiménez, 2013). Por otro lado, AFR ($28.2\text{ }^{\circ}\text{C}$) y EPR ($21.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) de la zona media y alta de la cuenca presentaron temperaturas muy similares a las presentadas en la zona baja de la cuenca en 2018. Es decir, las zonas media y alta están teniendo temperaturas similares a las zonas bajas, donde el uso del suelo, la cantidad de población y las características de cobertura vegetal son muy diferentes.

El pH bajo está influenciado por diversas actividades humanas relacionadas con la disposición de desechos de agricultura, escurrimientos y lavados asociados con el sistema fluvial, drenajes ácidos y emisiones de combustibles fósiles, entre otros factores relacionados con el sistema carbonato-bicarbonato. El pH bajo depende de los procesos que ocurren en los cuerpos de agua, asociados con la descomposición de materia orgánica proveniente de aguas domiciliarias o aguas negras (Martínez *et al.*, 2013; García, Arguello, Parra, & Pincay, 2019; Raffo & Ruiz, 2014). Considerando lo anterior, el valor promedio de pH en ERCH (7.2) más bajo de la zona alta tiene un probable origen en las zonas de siembra y pastoreo de ganado realizadas en pendientes que llegaban al afluente muestreado en ese punto. En ESGR, lugar de la cuenca media, el valor más elevado de pH promedio (8.6) tiene un origen probable en todas las formas de contaminación de materia orgánica provenientes del uso del río en esa zona (recreación, cabañas, comercialización de comida) (Tabla 1).

El contenido de materia orgánica, al ser oxidada por el oxígeno disuelto, genera cambios en la calidad del agua, y desaparición de peces y plantas. En 2000 y 2018 se reportaron valores mínimos de pH en ATY de 8.0 y 7.19, respectivamente, durante la época de lluvia, mientras que en este estudio fue de 7.6 (Jiménez *et al.*, 2000; IMTA, 2018).

En este estudio, ATY de la zona baja presentó el valor más alto de CE, con 482.9 y 407.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en estiaje en lluvias, respectivamente, mientras que Jiménez *et al.* (2000) reportaron 134.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$, para la misma zona en la misma época del año. EPR de la zona alta (93.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y STR de la zona baja (120.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$) tuvieron concentraciones menores que las reportadas por Jiménez *et al.* (2000), quienes reportaron 96.2 y 236 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para las mismas zonas. Por otro lado, ATY fue la localidad de la zona baja que presentó 200.1 mg SDT/l, que rebasa los valores reportados por el IMTA (2018) y Jiménez *et al.* (2000), que reportaron para la misma los valores máximos de 72 y 73 mg/l, respectivamente. Las características de la zona baja: tener mayor cantidad de habitantes, evidentes descargas de aguas residuales, presencia de residuos sólidos urbanos (RSU) dentro y en las márgenes del río, así como el criadero y matanza clandestinos de animales, sin duda se vieron reflejadas en los resultados. En la época de lluvia aumentan los arrastres de SDT, provenientes de la escorrentía urbana y de la inadecuada disposición de RSU, lo que resulta en valores elevados de CE (Vitousek *et al.*, 1997; Carpenter *et al.*, 1998; Hansen & Ruiz, 2021).

Para los compuestos nitrogenados N-NH_3^- , N-NO_3^- , N-NO_2^- , además de los valores de referencia de CE-CCA-001/89 existen otros criterios de calidad del agua empleados para proteger especies de animales acuáticos (WHO, 1996; EPA, 1999; EEA, 2000; Environment & Health, 2001;

Alonso, 2005; Camargo, Alonso, & Salamanca, 2005; EEA, 2005; EPA, 2006). Al comparar estos parámetros (Tabla 4, 0.35 y 0.02 mg N-NH₃⁻/l, 0.009 y 0.35 mg N-NO₂⁻/l y 2 mg N-NO₃⁻/l y, además, un valor de referencia para N-NH₄⁺) con los resultados promedio de este estudio, se observó lo siguiente para cada parámetro: las concentraciones promedio de N-NH₃⁻, que oscilaron entre 0.3 y 2.8 mg/l, rebasan en todos los momentos y sitios muestreados de la cuenca del río Atoyac, Guerrero, lo establecido en los CE-CCA/89 para la protección de la vida acuáticos. Por su parte, los valores promedio de N-NO₂⁻ rebasan al parámetro establecido (0.05 mg/l), lo que indica que el agua no es apta para abastecimiento del agua potable en todos los sitios de la cuenca baja durante lluvias, mientras que estiaje solo en STR. Los valores promedio de N-NO₃⁻ en SDM (7.3 mg/l) en estiaje rebasan lo establecido por CE-CCA/89, lo cual clasifica el agua de ese sitio como no apta como abastecimiento de agua potable. Por otro lado, al comparar los resultados de esta investigación con los estudios de Jiménez *et al.*, (2000) realizados en la misma zona, se observó que la concentración de N-NH₄⁺ presentó un aumento. La presencia de compuestos nitrogenados puede deberse a vertidos y residuos de rastros, así como a los procesos de escorrentía e infiltración (Vitousek *et al.*, 1997; Carpenter *et al.*, 1998). En este estudio se observó que en los sitios ETC y ATY había vertidos y residuos de rastros clandestinos, y que existía la probabilidad de procesos de escorrentía e infiltración de basureros. Por su parte, en ERCH, LCB y EPR, la presencia de estos compuestos pudo deberse a la escorrentía e infiltración proveniente del uso de fertilizantes en campos de cultivos de café, mango y coco (Tabla 1). Los compuestos nitrogenados están asociados con la acidificación de ríos y lagos, con baja o reducida alcalinidad, con efectos

perjudiciales sobre la salud humana y de animales acuáticos, por eso su importancia en la determinación (Camargo & Alonso, 2007).

La presencia de SO_4^{2-} está relacionada con la disminución del pH de las aguas, y puede ser causada por gases como el ácido sulfúrico ($\text{H}_2\text{SO}_4^{2-}$), proveniente del uso de combustibles fósiles y fertilizantes, que precipitan en la época de lluvia; esto podría traer consecuencias en el ecosistema acuático (Camargo & Alonso 2007). El SO_4^{2-} , al ser muy soluble en agua, puede ser reducido a sulfito y volatilizado a la atmósfera como H_2S , que posteriormente precipita como sales insolubles o se incorpora a organismos vivos (APHA, AWWA, & WPCF, 1992). En este caso, se observa la presencia en EPR (65 mg/l), ATY (107.5 mg/l) en lluvias y ETC (60 mg/l en secas y lluvias) con la causa probable del mayor número de habitantes y los usos de suelo urbano, lo que podría significar en la mayor cantidad de emisiones de $\text{H}_2\text{SO}_4^{2-}$. Por lo anterior, el agua del río Atoyac en los tres sitios (EPR, ETC y ATY) no se considera apta para la protección de la vida acuática, según los CE-CCA/89.

Las concentraciones de Cd en ATY, ETC y STR de la zona baja de la cuenca del río Atoyac oscilaron entre 0.02 y 0.05 mg/l; mostraron un aumento respecto al estudio del IMTA (2018), que reportó valores entre < 0.01 y < 0.3 mg/l. Por su parte, Hg para la misma zona tuvo concentraciones que oscilaron entre 0.001 y 0.003 mg/l, que a su vez fueron mayores a los reportados en el estudio del IMTA (2018), cuyos valores oscilaron de 0.0005 a 0.0006 mg/l. Lo anterior pudo deberse a que el estudio del IMTA señala que los muestreos se realizaron después de lluvias, por lo que los contaminantes pudieron ser transportados por escorrentía y/o diluidos. Por su parte, Renameca, en su reporte del periodo 2012-2019, señala que no existía presencia de Hg y Cd en el agua

del río Atoyac. Cabe mencionar que el muestreo solo se realizó en el sitio ubicado en el municipio de Benito Juárez, sin analizar sitios de ATY o ETC, todos pertenecientes a la misma zona baja (DOF, 1989; IMTA, 2018; Semarnat & Conagua, 2019). En general, la presencia de Cd y Hg en el agua pudo deberse a los lixiviados de desechos electrónicos y vertimiento de aguas residuales de la zona, que además es la más poblada de la cuenca del río Atoyac, Guerrero. Los desechos domésticos y agrícolas observados en los sitios de muestreo; incineración de desechos municipales, médicos y peligrosos; vertederos de basura, y erosión de riberas pueden estar incidiendo en la presencia de estos metales en el agua del río (Tabla 1) (PNUMA, 2002; Pirrone *et al.*, 2010; Castro & Valdés, 2012; UNEP, 2013). Por otra parte, la concentración de Cd puede estar asociada en trazas con la presencia de Zn (esfalerita) (Talavera *et al.*, 2005; Romero, Armenta, & González, 2007), metal que estuvo presente en las determinaciones de este estudio con valores oscilantes entre 0.01 y 0.08 mg/l. La concentración de Cd Y Hg puede constituir un problema para la salud pública debido a su bioacumulación y toxicidad, por lo que es de suma importancia realizar acciones que ayuden a mitigar su aparición (Hong *et al.*, 2020; Ankit *et al.*, 2021).

Al comparar las concentraciones de OD, se observó una disminución de 2.1 unidades, en comparación con los resultados emitidos por el IMTA (2018). Respecto a DBO₅, los resultados para ATY (155.1 mg DBO₅/l) en la zona baja en este estudio resultan mayores que los reportados en otros estudios, los cuales reportaron un valor máximo de 2 y 30.8 mg/l durante la época de lluvia en los años 2018 y 2000, respectivamente (Jiménez *et al.*, 2000; IMTA, 2018). Por su parte, el reporte de Renameca del periodo

2012-2019 indicó un valor promedio de 2 mg/l en su sitio ubicado en el municipio de Benito Juárez (Semarnat & Conagua, 2019).

El análisis de las concentraciones de DBO₅ reflejan la necesidad de una especificación adecuada de la normatividad en cuanto a los límites permisibles y su clasificación, pues el semáforo de Conagua indica valores de referencia que podrían generar ambigüedad al ser comparados con CE-CCA-001/89 (Conagua & GCA, 2020; DOF, 1989).

El análisis estadístico para la zona refiere que la calidad del agua en los sitios ETC-STR-ATY de la zona baja difiere de los seis sitios restantes ubicados en las zonas media y alta. Un factor determinante para esta diferencia es, sin duda, la cantidad de población que existe en la zona baja, así como el uso del agua y los aspectos fisiográficos de la misma, como la menor cantidad de rocas y disminución en los flujos del agua con exposición directa al sol y mayor presencia de impactos hacia el río (Tabla 1). Lo anterior se traduce en mayor cantidad de materia orgánica, aumento de la temperatura en el agua de río, menor capacidad de dilución de contaminantes y más contaminación.

Conclusiones

Los hallazgos de esta investigación sobre la aptitud, calidad y parámetros fisicoquímicos que afectan al agua del río Atoyac en Guerrero para beneficio de las comunidades ribereñas son los siguientes:

- El agua en las cuencas alta, media y baja no se considera apta como fuente de abastecimiento de agua potable, riego agrícola y

protección de la vida acuática debido a las concentraciones de los compuestos nitrogenados (N-NH_3^- , N-NO_2^- y N-NO_3^-).

- La cuenca baja del río Atoyac, Guerrero, está contaminada por la presencia de Cd y Hg, lo cual puede constituir un problema para la salud pública debido a su toxicidad, por lo que es de suma importancia llevar a cabo acciones que ayuden a mitigar su presencia.
- El agua del río Atoyac en las zonas alta, media y baja no es de buena calidad ni en lluvias ni en estiaje, esto respecto al semáforo Conagua con base en el parámetro DBO_5 .
- Al comparar estadísticamente la calidad del agua de las tres zonas de la cuenca respecto a las medianas del parámetro de DBO_5 , la calidad del agua en las zonas baja-media y baja-alta resultan ser diferentes, mientras que la comparación de las zonas media-alta refleja similitudes.

Estos resultados sugieren la necesidad de mejorar el manejo de residuos sólidos urbanos, cuidado y conservación de riberas, mejor control de descargas municipales y de rastros clandestinos en ETC y ATY, así como el establecimiento de regulaciones sanitarias en los lugares destinados a la recreación como ESGR y STR, y en el uso y la disposición final adecuados de los fertilizantes y envases vacíos utilizados para los diferentes cultivos producidos en toda la región.

Los resultados han sido compartidos a través de talleres participativos con las personas que han mostrado interés en el proyecto, de tal manera que en algunas localidades han generado medidas de mitigación preventivas y correctivas; concientización a otros sectores

poblacionales a través de pláticas y colocación de carteles, limpieza de los cauces y riberas de los ríos, al igual que generación de espacios para compostas escolares. Estas medidas coadyuvan a la protección del río y de los habitantes vecinos a sus riberas, y podrán ser compartidos en otra publicación.

Agradecimientos

A la Dirección General de Estudios Tecnológicos Industrial y de Servicios (DGETI) por el apoyo de la beca comisión para la realización de estudios de posgrado. Al Centro de Ciencias de Desarrollo Regional de la Universidad Autónoma de Guerrero por el financiamiento para la realización del proyecto. Al Dr. Diego Guzmán Balderas, por el apoyo con los análisis estadísticos. A las organizaciones civiles Guerrero es Primero y Salvemos el Río Atoyac, y a los H. ayuntamientos de los municipios Benito Juárez y Atoyac de Álvarez, específicamente al Ing. Acacio Castro Serrano, por su acompañamiento durante todos los muestreos.

Referencias

- Alonso, A. (2005). *Valoración de la degradación ambiental y efectos ecotoxicológicos sobre la comunidad de macroinvertebrados bentónicos en la cabecera el río Henares* (tesis doctoral). Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, Madrid, España.
- APHA, AWWA, & WPCF, American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Pollution Control Federation. (1992). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales* (17 ed.). Madrid, España: Editorial Díaz de Santos, S. A.

- Ankit, Saha, L., Kumar, V., Tiwari, J., Sweta, Rawat, S., Singh, J., & Baudh, K. (2021). Electronic waste and their leachates impact on human health and environment: Global ecological threat and management. *Environmental Technology & Innovation*, (24), 2352-1864. DOI: 10.1016/j.eti.2021.102049
- Camargo, J. A., Alonso, A., & Salamanca, A. (2005). Nitrate toxicity to aquatic animals: A review with new data for freshwater invertebrates. *Chemosphere*, (58), 1255-1267. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2004.10.044
- Camargo, J. A., & Alonso, A. (2007). Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. *Ecosistemas*, 16(2), 1-13.
- Carpenter, R. S., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N., & Smith, W. H. (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 8(3), 559-568. DOI: 10.2307/2641247
- Castro, G., & Valdés, J. (2012). Concentración de metales pesados (Cu, Ni, Zn, Cd, Pb) en la biota y sedimentos de una playa artificial, en la bahía San Jorge 23°S, norte de Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 40(2), 267-281. DOI: 10.3856/vol40-issue2-fulltext-3
- CNDH, Comisión Nacional de Derechos Humanos. (2019). *Recomendación No. 56/2019*. Recuperado de <https://www.cndh.org.mx/documento/recomendacion-562019>

- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2017). *Estadísticas de agua en México. Edición 2017*. Recuperado de https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/CONAGUA%202017a.%20Estad%C3%ADsticas%20del%20agua%20M%C3%A9xico_0.pdf
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2018). *Atlas de agua en México. Edición 2018*. Recuperado de <https://agua.org.mx/biblioteca/atlas-de-agua-en-mexico/>
- Conagua & Cotemarnat, Comisión Nacional del Agua & Comité Técnico de Normalización Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2016). *Normas mexicanas vigentes del sector hídrico*. Recuperado de <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/normas-mexicanas-83266>
- Conagua & GCA, Comisión Nacional del Agua & Gerencia de Calidad del Agua. (2020). *Calidad del agua*. Recuperado de http://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2016/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServlet28b9.html
- DOF, Diario Oficial de la Federación. (2017). (04/09/2017). Recuperado de https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5496054&fecha=04/09/2017&print=true
- DOF, Diario Oficial de la Federación (1989). *ACUERDO por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Aguas CE-CCA-001/89. (13/12/1989)*. Recuperado de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989

- Environment & Health. (2001). *Priority substances list assessment report: ammonia in the aquatic environment*. Recuperado de https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/migration/hc-sc/ewh-semt/alt_formats/hecs-sesc/pdf/pubs/contaminants/psl2-lsp2/ammonia/ammonia-eng.pdf
- EEA, European Environment Agency. (2000). *Nutrients in European ecosystems* (Environmental Assessment Report No. 4). Recuperado de <https://www.eea.europa.eu/publications/ENVIASSRP04>
- EEA, European Environment Agency. (2005). *Source apportionment of nitrogen and phosphorus inputs into the aquatic environment* (Environmental Assessment Report No. 7). Recuperado de https://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2005_7

- EPA, Environmental Protection Agency. (1999). *Update of ambient water quality criteria for ammonia*. Recuperado de <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/20003O3L.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1995+Thru+1999&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C95thru99%5CTxt%5C00000015%5C20003O3L.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefaultPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL#>
- EPA, Environmental Protection Agency. (2006). *National recommended water quality criteria*. Recuperado de <https://www.epa.gov/wqc/national-recommended-water-quality-criteria-tables>
- Evans, A. E. V., Mateo, A., Sagasta, J., Qadir, M., Boelee, E., & Ippolito, A. (2019). Agricultural water pollution: Key knowledge gaps and research needs. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 36, 20-27. DOI: 10.1016/j.cosust.2018.10.003

- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos*. Roma, Italia: Food and Agriculture Organization of the United Nations. DOI: 10.4060/CA6030ES
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura – Sistemas al límite. Informe de síntesis 2021*. Roma, Italia: Food and Agriculture Organization of the United Nations. DOI: 10.4060/cb7654es
- Fierro, L. M., & Alcántara, V. N. (2008). Participación ciudadana y desarrollo sustentable en la recuperación de la cuenca del río Atoyac. En: *Antología de Estudios Territoriales. Fomento de los Estudios Territoriales en Iberoamérica, segunda parte. Desarrollo Regional, Urbano y Ambiental*. Recuperado de <https://www.convenciontropico-cuba.com/CIETA/Desarrollo%20Regional%20Urbano%20y%20Ambiental.pdf>
- Fernández, G. R., & Fierro, L. M. (2014). Participación ciudadana y desarrollo sustentable en la recuperación de la cuenca del río Atoyac: proyecto pro-regiones UNAM-UAGro. *Tlamati*, 6(4) 59-62. Recuperado de http://ri.uagro.mx/bitstream/handle/uagro/550/11995_ART2015OK.pdf
- García, S. L., Arguello, A., Parra, R., & Pincay, M. (2019). Factores que influyen en el pH del agua mediante la aplicación de modelos de regresión lineal. *INNOVA Research Journal*, 4(2), 59-71. DOI: 10.33890/innova.v4.n2.2019.909

- H. Ayuntamiento Constitucional de Atoyac de Álvarez. (2021a). *PMD, Plan Municipal de Desarrollo 2021-2024 del H. Ayuntamiento Constitucional de Atoyac de Álvarez*. Recuperado de <https://congreso-gro.gob.mx/63/ayuntamientos/plan-municipal/pmd-atoyac-21-24-ver-11.pdf>
- H. Ayuntamiento Constitucional de Benito Juárez. (2021b). *PMD, Plan Municipal de Desarrollo 2021-2024 del H. Ayuntamiento Constitucional de Benito Juárez*. Recuperado de <https://congreso-gro.gob.mx/63/ayuntamientos/plan-municipal/plan-de-desarrollo-municipal-benito-juarez-2021-2024.pdf>
- Hansen, M. A., & Ruiz, C. A. A. (2021). Presión hídrica en una cuenca del trópico húmedo y propuestas para su mitigación. *Aqua-LAC*, 13(2). Recuperado de <https://aqua-lac.org/index.php/Aqua-LAC/article/view/289>
- Hong, Y., Liao, W., Yan, Z., Vai, Y., Feng, C., Xu, Z., & Xu, D. (2020). Progress in the research of the toxicity effect mechanisms of heavy metals on freshwater organisms and their water quality criteria in China. *Journal of Chemistry*, 2020, 1-12. DOI: 10.1155/2020/9010348
- IMTA, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2018). *Informe: Evaluación de contaminantes en el río Atoyac en el tramo comprendido entre los municipios de Atoyac de Álvarez y Benito Juárez, Guerrero*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2010). *Sistemas de consulta-hidrología: cartas de hidrología en aguas superficiales-Región Hidrológica 19F*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2013). *Conjunto de datos vectoriales del uso de suelo y vegetación. Escala 1:250 000, serie V (conjunto nacional)*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>
- Jiménez, V. A., Méndez, B. A., Alvarado, G. A. V., & Rivera, B. C. (2000). Diagnóstico ambiental de la cuenca del río Atoyac, Guerrero. *Altamirano*, junio-julio (16), 43-62.
- Lorenzo, J. (2020). *Introducción a la estadística no paramétrica para estudiantes de educación*. Recuperado de <http://anse-nuza.ffyh.unc.edu.ar/handle/11086.1/1416>
- Madrid, M. E. (2022). Atoyac de Álvarez, Guerrero: Una mezcla de historia, tradición y deterioro ambiental. *Regions & Cohesion*, 12(1), 102-106. DOI: 10.3167/reco.2022.120106
- Martínez, A. P., & Patiño, G. C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(1), 5-20. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222012000100001&lng=es&tlng=es

- Martínez, G., Fermín, I., Brito, F., Márquez, A., De la Cruz, R., Rodríguez, G., Hernández, D., Parra, E., González, M., & Márquez, A. (2013). Calidad de las aguas del caño Mánamo, delta del río Orinoco, Venezuela. *Boletín del Instituto Oceanográfico de Venezuela*, 52(1), 17-27.
- Montes, R. T., Navarro, I., Domínguez, R., & Jiménez, B. (2013). Modificación de la capacidad de autodepuración del río Magdalena ante el cambio climático. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(5) 71-83.
- ONU, Organización de las Naciones Unidas. (2016). *Decenio internacional para la acción Agua Fuente de Vida - Calidad del agua*. Recuperado de <https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/index.shtml>
- ONU, Organización de las Naciones Unidas. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G.2681-P/Rev.3)*, Santiago. Recuperado de <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/cb30a4de-7d87-4e79-8e7a-ad5279038718/content>
- Peters, E., Campoy-Favela, J., & Flessa, K. (2010). *Ciénega de Santa Clara. Comprehensive Monitoring Program* (publicación especial). México, DF, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.

- Pirrone, N., Cinnirella, S., Feng, X., Finkelman, R. B., Friedli, H. R., Leaner, J., Mason, R., Mukherjee, A. B., Stracher, G. B., Streets, D. G., & Telmer, K. (2010). Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources. *Atmospheric Chemistry and Physics*, (10), 5951-5964. DOI: 10.5194/acp-10-5951-2010
- PNUMA, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2002). *Evaluación mundial sobre el mercurio. Productos químicos - División de Tecnología, Industria y Economía*. Ginebra, Suiza: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Raffo, E., & Ruiz, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Industrial Data*, 1(17), 71-80. DOI: 10.15381/idata.v17i1.12035
- Romero, F. M., Armenta, M. A., & González, H. G. (2007). Solid-phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailings impoundment, Taxco, México. *Applied Geochemistry*, 22, 109-127. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2006.07.017
- Semarnat, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). *Informe de la situación del medio ambiente en México* (18ª ed.). Recuperado de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/index.html>

- Semarnat & Conagua, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales & Comisión Nacional del Agua. (2019). *Nota informativa calidad del agua en el río Atoyac, Guerrero. Resultados de la Red Nacional de Monitoreo de la calidad del agua Renameca 2012-2019*. Recuperado de https://files.conagua.gob.mx/conagua/generico/calidad_del_agua/diagnostico_atoyac_guerrero_2012-2019.pdf
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3-4), 561-611. DOI: 10.1093/biomet/52.3-4.591
- Sheskin, D. J. (2004). *Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures* (3th ed). Boca Ratón, USA: Chapman & Hall/CRC. DOI: 10.1201/9781420036268
- SPR & GASIR, Sistema de Pronósticos en Ríos & Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos. (2023). *Reporte 2021-2022 de la Estación Meteorológica (12161)*. Atoyac de Álvarez, México: Sistema de Pronósticos en Ríos & Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos.
- Talavera, M. O., Yta, M., Moreno, T. R., Dótor, A. A., Flores, M., & Duarte, G. C. (2005). Mineralogy and geochemistry of sulfide-bearing tailings from silver mines in the Taxco, Mexico, area to evaluate their potential environmental impact. *Geofísica Internacional*, 44(1), 49-64. DOI: 10.22201/igeof.00167169p.2005.44.1.552
- UNEP, United Nations Environment Programme. (2013). *Mercury, time to Act. Chemical Branch - Division of Technology, Industry and Economics*. Geneva. Recuperado de <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/27436>

- UN & WMO, United Nations & World Meteorological Organization. (2023). *A multi-organization high-level compilation of the latest weather-, climate- and water-related sciences and services for sustainable development*. Recuperado de <http://library.wmo.int/idurl/4/68235>
- Vitousek, P. M., Aber, C. J., Howarth, R. W., Likens, G. E., Matson, P. A., Schindler, D. W., Shelsinger, W. H., & Tilman, D. (1997). Human alteration of the global nitrogen cycle: causes and consequences. *Issues in Ecology*, 1, 1-16.
- WHO, World Health Organization. (1996). *Guidelines for drinking-water quality: Health criteria and other supporting information* (2nd ed.). Geneva, Switzerland: World Health Organization.
- WWAP, Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos / ONU-Agua. (2018). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua*. París, France: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.