



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), marzo-abril 2026,
Volumen 10, Número 2.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i2

IDENTIFICACIÓN DE CONTAMINANTES EN LA CUENCA DE LOS RÍOS ATOYAC–SALADO, OAXACA

**IDENTIFICATION OF PHYSICOCHEMICAL AND
MICROBIOLOGICAL CONTAMINANTS IN THE ATOYAC-
SALADO BASIN, OAXACA**

Hannia Rojas Santaella

Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca-Facultad de Ciencias Químicas

Karen Patricia Legorreta Guardado²

Conservación, Vida y Agua. A.C

Erik Martínez Torres

Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca-Facultad de Ciencias Químicas

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i2.23343

Identificación de contaminantes en la cuenca de los ríos Atoyac–Salado, Oaxaca

Hannia Rojas Santaella¹hanniarojassantaella@gmail.com<https://orcid.org/0009-0000-9248-1486>Universidad Autónoma Benito Juárez de
Oaxaca-Facultad de Ciencias Químicas
México**Karen Patricia Legorreta Guardado**gestrategicokova@gmail.com<https://orcid.org/0009-0001-0092-6116>Conservación, Vida y Agua. A.C
México**Erik Martínez Torres**emartinez.fcq@uabjo.mx<https://orcid.org/0009-0008-8220-4029>Universidad Autónoma Benito Juárez de
Oaxaca-Facultad de Ciencias Químicas
México

RESUMEN

La calidad del agua en ríos urbanos representa un desafío ambiental creciente debido al incremento de las descargas municipales y al crecimiento poblacional en zonas metropolitanas. El objetivo de este estudio fue evaluar la presencia y concentración de contaminantes fisicoquímicos, microbiológicos y metales pesados en seis puntos estratégicos de la cuenca Atoyac–Salado, en el estado de Oaxaca, México, con el fin de determinar su nivel de contaminación en relación con la normativa ambiental vigente. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con diseño descriptivo-comparativo y muestreo dirigido en tramos del río influenciados por descargas urbanas. Se analizaron parámetros fisicoquímicos (DQO, SST, nitrógeno total, fósforo total y pH), metales pesados (As, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb y Zn) y el indicador microbiológico *Escherichia coli*, siguiendo métodos estandarizados del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Los resultados evidenciaron concentraciones elevadas de sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno y nitrógeno total, superando los límites establecidos por la normativa mexicana en varios puntos de muestreo. Asimismo, se detectó presencia extrema de *E. coli* en todos los sitios analizados. El análisis espacial mostró un incremento progresivo de la contaminación aguas abajo, asociado al crecimiento urbano y a las descargas municipales en la zona metropolitana de Oaxaca.

Palabras clave: calidad del agua; contaminación fluvial; DQO; *Escherichia coli*; cuenca Atoyac–Salado.

¹ Autor principal.

Correspondencia: hanniarojassantaella@gmail.com

Identification of Physicochemical and Microbiological Contaminants in the Atoyac-Salado Basin, Oaxaca

ABSTRACT

Water quality in urban rivers represents an increasing environmental challenge due to municipal wastewater discharges and rapid population growth in metropolitan areas. The objective of this study was to evaluate the presence and concentration of physicochemical, microbiological, and heavy metal contaminants at six strategic sampling points within the Atoyac–Salado basin in Oaxaca, Mexico, in order to determine the level of water pollution in relation to current environmental regulations. The research followed a quantitative approach with a descriptive-comparative design and targeted sampling in river sections influenced by urban discharges. Physicochemical parameters (chemical oxygen demand, total suspended solids, total nitrogen, total phosphorus, and pH), heavy metals (As, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, and Zn), and the microbiological indicator *Escherichia coli* were analyzed using standardized procedures from the *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Results revealed elevated concentrations of total suspended solids, chemical oxygen demand, and total nitrogen, exceeding Mexican regulatory limits at several sampling sites. Additionally, extremely high levels of *E. coli* were detected at all sampling locations. Spatial analysis indicated a progressive increase in contamination downstream, associated with urban expansion and municipal wastewater discharges within the metropolitan area of Oaxaca.

Keywords: water quality; river pollution; chemical oxygen demand; *Escherichia coli*; Atoyac–Salado basin.

Artículo recibido 15 febrero 2026

Aceptado para publicación: 15 marzo 2026



INTRODUCCIÓN

La calidad del agua en ríos urbanos y periurbanos constituye uno de los principales desafíos ambientales en América Latina, debido al crecimiento demográfico acelerado, la expansión industrial y la insuficiente infraestructura de saneamiento (UNESCO, 2023), en México, diversos cuerpos de agua presentan deterioro progresivo asociado a descargas municipales e industriales, situación que compromete la salud pública, los ecosistemas acuáticos y el desarrollo regional (CONAGUA, 2023). En este contexto, la cuenca de los ríos Atoyac–Salado, en el estado de Oaxaca, representa un sistema fluvial de alta relevancia hidrológica y socioeconómica que ha mostrado signos persistentes de degradación ambiental en la última década.

El diagnóstico oficial de calidad del agua señala que distintos puntos del río Atoyac han sido clasificados como “contaminados” y “fuertemente contaminados” en el periodo 2012–2023, registrando concentraciones elevadas de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST) y microorganismos indicadores de contaminación fecal, particularmente *Escherichia coli* (CONAGUA, 2023). Estas condiciones reflejan la influencia de descargas municipales insuficientemente tratadas, aportes industriales y escorrentía urbana, que en conjunto incrementan la carga orgánica, microbiológica y metálica del sistema acuático.

La problemática adquiere mayor complejidad ante la presencia documentada de metales pesados en la cuenca. Investigaciones recientes han reportado concentraciones significativas de manganeso (Mn), hierro (Fe), zinc (Zn), níquel (Ni), cadmio (Cd) y plomo (Pb) en sistemas fluviales asociados al río Atoyac, identificando riesgos ecológicos moderados a altos mediante enfoques probabilísticos y curvas de sensibilidad de especies (Dueñas-Moreno et al., 2024). Asimismo, estudios de monitoreo en tiempo real han evidenciado que episodios de descarga industrial pueden incrementar la concentración de metales traza y generar eventos de toxicidad aguda, afectando organismos acuáticos sensibles (Hernández-Ramírez et al., 2019). La persistencia y potencial bioacumulación de estos elementos incrementan el riesgo sanitario para poblaciones que utilizan el agua para actividades agrícolas o recreativas.

Desde una perspectiva ecológica, el incremento de la DBO y la DQO reduce la disponibilidad de oxígeno disuelto, alterando la estructura y funcionalidad de los ecosistemas acuáticos (Chapman, 1996).



De manera complementaria, la contaminación microbiológica representa un riesgo sanitario significativo, dado que *E. coli* es un indicador reconocido internacionalmente de contaminación fecal reciente (WHO, 2017). La coexistencia de cargas orgánicas elevadas, nutrientes (nitrógeno y fósforo) y metales pesados genera efectos sinérgicos que pueden intensificar el deterioro ambiental y aumentar la toxicidad del agua (Hernández-Ramírez et al., 2019).

En el ámbito metodológico, la evaluación integrada de la calidad del agua mediante el análisis conjunto de parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y metálicos ha demostrado ser eficaz para identificar patrones espaciales de contaminación y priorizar acciones de gestión ambiental (Sener et al., 2017). Sin embargo, en el caso específico de la cuenca Atoyac–Salado, persiste un vacío en la integración analítica comparativa de estos parámetros bajo un enfoque espacial y normativo que permita contrastar los resultados con los límites máximos permisibles establecidos en la legislación ambiental mexicana.

En este marco, el objetivo general de la presente investigación es evaluar la presencia y concentración de contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos en seis puntos estratégicos de la cuenca Atoyac–Salado, Oaxaca, para determinar su nivel de contaminación en relación con la normativa ambiental vigente. De manera específica, el estudio busca: (1) determinar los niveles de DQO, SST, nitrógeno total, fósforo total, pH y metales pesados en los puntos de muestreo seleccionados; (2) identificar la presencia y concentración de *Escherichia coli* como indicador de contaminación microbiológica; (3) comparar los resultados obtenidos con los límites máximos permisibles establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas aplicables; (4) analizar la distribución espacial de los contaminantes mediante herramientas de georreferenciación; y (5) identificar posibles fuentes de contaminación asociadas a descargas municipales en los municipios evaluados.

Dado el carácter cuantitativo, descriptivo-comparativo del estudio, se plantea como hipótesis general que los niveles de contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos en la cuenca Atoyac–Salado exceden los límites establecidos por la normativa ambiental mexicana debido a la influencia de descargas municipales. De manera complementaria, se formulan las siguientes hipótesis específicas: (a) las concentraciones de DQO y SST superan los límites máximos permisibles en al menos uno de los puntos evaluados; (b) se detecta presencia significativa de *Escherichia coli* en los 6 puntos ubicados aguas abajo



de descargas urbanas; y (c) los niveles de metales pesados presentan variabilidad espacial asociada a zonas con mayor actividad antropogénica.

Al integrar el análisis de materia orgánica, nutrientes, contaminación microbiológica y metales pesados bajo un enfoque espacial y comparativo normativo, esta investigación contribuye a fortalecer la evidencia científica disponible sobre la cuenca Atoyac–Salado. Asimismo, aporta información técnica relevante para la toma de decisiones orientadas a la restauración ecológica y a la gestión sostenible del recurso hídrico en Oaxaca, en concordancia con los principios de gestión integrada del agua promovidos a nivel internacional (UNESCO, 2023)

METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con alcance descriptivo-comparativo y diseño observacional de corte transversal. Este diseño es ampliamente utilizado en estudios de calidad del agua para evaluar el estado ambiental de sistemas fluviales en un momento determinado y contrastarlo con estándares normativos (Sener et al., 2017). El propósito fue evaluar la presencia, concentración y distribución espacial de contaminantes fisicoquímicos, microbiológicos y metales pesados en los seis puntos estratégicos de la cuenca Atoyac–Salado, considerando la influencia de descargas municipales y urbanas.

El enfoque descriptivo-comparativo permitió contrastar los valores obtenidos con los límites máximos permisibles establecidos en la normativa ambiental mexicana, siguiendo metodologías aplicadas en estudios de evaluación de riesgo ecológico y calidad hídrica (Dueñas-Moreno et al., 2024).

El área de estudio comprendió seis puntos de muestreo ubicados en la cuenca de los ríos Atoyac y Salado, en el Valle Central de Oaxaca. Cinco puntos se localizaron desde la zona colindante con el Instituto Tecnológico de Oaxaca hasta la descarga de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del municipio de La Raya, mientras que un punto adicional se ubicó en el municipio de Santa Lucía del Camino.

La selección de sitios se realizó mediante un muestreo dirigido, priorizando tramos con influencia potencial de descargas municipales. Este criterio es consistente con metodologías empleadas en estudios de evaluación de contaminación en ríos urbanos donde se busca capturar gradientes de impacto

antropogénico (Hernández-Ramírez et al., 2019). En cada punto se registraron coordenadas geográficas mediante receptor GPS, con el fin de permitir análisis espacial posterior y reproducibilidad del estudio. Las muestras de agua residual fueron recolectadas siguiendo protocolos estandarizados para monitoreo ambiental (APHA, 2017). Se realizaron muestreos instantáneos, evitando zonas de remanso o acumulación de sedimentos, con profundidad aproximada de 20–30 cm bajo la superficie para garantizar representatividad. Las muestras destinadas al análisis de metales pesados fueron recolectadas en frascos de polietileno previamente acidificados con HNO₃ hasta pH < 2, conforme a lineamientos internacionales para evitar precipitación o adsorción en paredes del recipiente (Li et al., 2019). Las muestras microbiológicas fueron almacenadas en frascos estériles y transportadas a 4 °C para su análisis dentro de las 24 horas posteriores a la recolección.

Parámetros analizados

Se evaluaron los siguientes indicadores fisicoquímicos:

Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendedos Totales (SST), Nitrógeno Total (NT), Fósforo, Total (PT), pH y Metales pesados (As, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, Zn)

La selección de estos parámetros responde a su reconocimiento internacional como indicadores de carga orgánica, eutrofización y toxicidad metálica en sistemas fluviales urbanos (Sener et al., 2017; Dueñas-Moreno et al., 2024).

La inclusión de metales pesados se fundamenta en su persistencia, potencial bioacumulativo y capacidad de generar riesgo ecológico incluso a bajas concentraciones (Hernández-Ramírez et al., 2019).

Parámetro microbiológico

Escherichia coli como indicador de contaminación fecal reciente, conforme a criterios establecidos por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2017).

Técnicas analíticas

Las determinaciones fisicoquímicas se realizaron conforme a métodos estandarizados del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017).

DQO: Método colorimétrico de digestión cerrada.

SST: Filtración y secado a 103–105 °C.

NT y PT: Digestión ácida seguida de análisis espectrofotométrico.



Metales pesados: Espectrofotometría UV-Vis (CN,Cu,Cr,Zn) y Colorimetría (As,Hg,Ni,Pb).

El análisis microbiológico de *E. coli* se realizó por la técnica de filtración en membrana, asegurando control de calidad interno con blancos.

Los resultados fueron comparados con los límites máximos permisibles establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas aplicables en materia de descargas y calidad del agua (NOM-001-SEMARNAT). Esta comparación permitió determinar el grado de incumplimiento normativo y clasificar el nivel de contaminación en cada punto, siguiendo enfoques comparativos utilizados en estudios de evaluación de calidad hídrica (Sener et al., 2017).

Para evaluar patrones espaciales se empleó el software QGIS, generando mapas temáticos de distribución de contaminantes. Asimismo, se exploraron asociaciones entre concentración de contaminantes y proximidad a descargas municipales mediante análisis espacial exploratorio, metodología aplicada en estudios recientes de evaluación de riesgo ecológico en sistemas fluviales contaminados (Dueñas-Moreno et al., 2024).

RESULTADOS Y ANALISIS

El análisis de los parámetros físicoquímicos y microbiológicos obtenidos en los seis puntos de muestreo (M1–M6) permitió identificar variaciones espaciales en la calidad del agua de la cuenca Atoyac–Salado, asociadas principalmente a la influencia de asentamientos urbanos y descargas municipales. Los resultados se compararon con los límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT para descargas en aguas nacionales.(Tabla 1)

La temperatura del agua presentó valores entre 19.41 °C y 29.05 °C, todos dentro del límite máximo permisible de 35 °C. Los valores más bajos se registraron en M1 (Instituto Tecnológico de Oaxaca) y M3 (Santa Lucía del Camino) con 19.41 °C, mientras que el valor más alto se observó en M5 (Río Salado) con 29.05 °C. Estas variaciones pueden estar relacionadas con diferencias en cobertura vegetal, profundidad del cauce y grado de exposición solar en cada tramo del río.

En cuanto a los Sólidos Suspendidos Totales (SST), todos los puntos de muestreo superaron el límite permisible de 84 mg/L, con valores que oscilaron entre 200 mg/L y 400 mg/L. Las concentraciones más altas se registraron en M2 (zona correspondiente a la central de abastos) y M3 (Municipio de Santa Lucía), lo cual sugiere una elevada carga de sedimentos y materia orgánica asociada a escorrentía



urbana, descargas domésticas y arrastre de residuos sólidos.

El Nitrógeno Total presentó valores relativamente bajos en los puntos iniciales del muestreo (15 mg/L en M1 y 13 mg/L en M2), pero incrementos significativos en los puntos ubicados aguas abajo. El valor máximo se registró en M4 (150 mg/L), seguido de M6 (93 mg/L), superando el límite establecido de 35 mg/L. Este patrón sugiere una acumulación progresiva de nutrientes provenientes de descargas domésticas y actividades urbanas.

En relación con el Fósforo Total, los valores oscilaron entre 2.2 mg/L y 14.6 mg/L, permaneciendo por debajo del límite permisible de 21 mg/L. Sin embargo, las concentraciones más altas se registraron nuevamente en M4 y M6, lo cual refleja el aporte de nutrientes derivados de aguas residuales municipales.

Tabla 1.- Comparativa de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos por punto de muestreo

Parámetro	Límite						
	NOM-001 (V.I)	M1 ITO	M2 Central	M3 Santa Lucia	M4 Puente Tequio	M5 Salado	Río M6 Salida PTAR
Temperatura (°C)	35	19.41	20.41	19.41	26.32	29.05	24.64
SST (mg/L)	84	200	400	400	340	200	300
DQO (mg/L)	210	140	80	510	610	270	590
Nitrógeno Total (mg/L)	35	15	13	68	150	64	93
Fósforo Total (mg/L)	21	2.2	3.4	9.4	14.6	8.8	13.4
E. coli (NMP/100 ml)	600	Incontables UFC	Incontables UFC	Incontables UFC	Incontables UFC	Incontables UFC	Incontables UFC
pH	6-9	7.82	7.86	7.82	7.62	7.55	7.27

Fuente: Elaboración propia con los datos obtenidos de los sitios de muestro, en la tabla se describen los sitios de muestreo en orden de aparición (M1-M6), el valor de referencia se tomo de la columna referente a cuerpos receptores (ríos y arroyos) como valor instantáneo. En negritas se resaltan los valores que se encuentran fuera de la Norma Oficial Mexicana.

Uno de los hallazgos más relevantes corresponde a la contaminación microbiológica, ya que en todos los puntos de muestreo se registró presencia extrema de *Escherichia coli*, y por la técnica utilizada no se puede comparar, sin embargo por la alta concentración este resultado evidencia una contaminación fecal generalizada en la cuenca analizada.

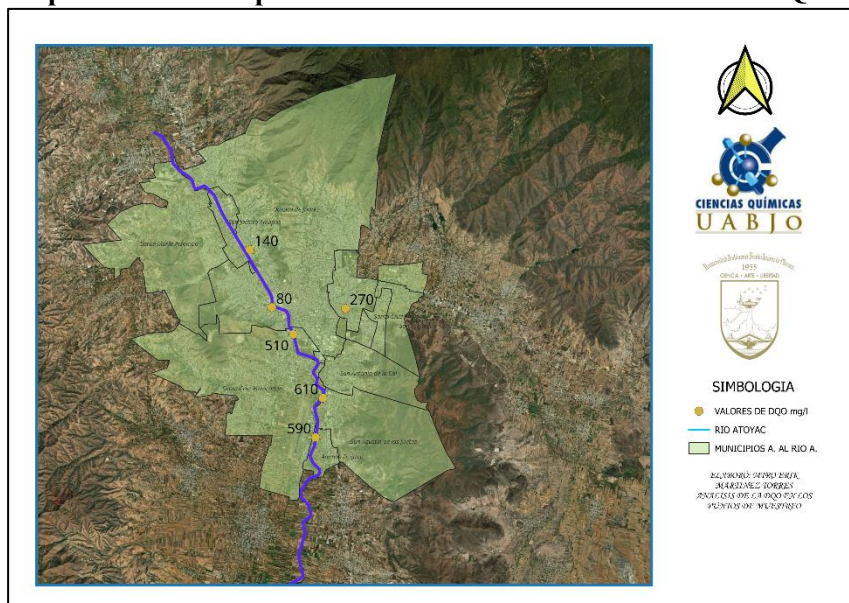
El pH se mantuvo dentro del rango permisible de 6–9, con valores entre 7.27 y 7.86, lo que indica condiciones cercanas a la neutralidad en el sistema acuático.

El análisis espacial de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en los puntos de muestreo ubicados a lo largo del río Atoyac muestra un incremento progresivo de las concentraciones conforme el cauce atraviesa la zona metropolitana de Oaxaca. La distribución espacial representada en el mapa evidencia un patrón asociado a la presión antropogénica derivada del crecimiento urbano y las descargas de aguas residuales municipales. (Mapa 1)

En el punto de muestreo ubicado en la zona norte del área de estudio, cercano al municipio de San Jacinto Amilpas, se registró una concentración aproximada de 140 mg/L de DQO, valor que refleja una carga orgánica moderada en comparación con los puntos localizados aguas abajo. Este comportamiento inicial puede estar relacionado con aportes difusos provenientes de asentamientos urbanos periféricos y escorrentía superficial, los cuales introducen materia orgánica y compuestos oxidables al sistema fluvial. Posteriormente, en el punto localizado aguas abajo dentro del municipio de Oaxaca de Juárez, se registró una concentración cercana a 80 mg/L, lo que sugiere una ligera disminución temporal en la carga orgánica. Este fenómeno puede explicarse por procesos de dilución hidráulica, sedimentación de sólidos y autodepuración natural del río, mecanismos ampliamente documentados en sistemas fluviales urbanos (Shrestha & Kazama, 2007).



Mapa 1.- Analisis espacial de la concentración de la Demanda Química de Oxígeno.



Fuente: M en C Erik Martínez Torres, QGIS, en el mapa se observa las variaciones de la concentración de la DQO en función de la densidad poblacional.

Sin embargo, a medida que el río atraviesa zonas con mayor densidad poblacional y actividad urbana, particularmente en las inmediaciones de Santa Cruz Xoxocotlán y San Antonio de la Cal, se observa un incremento significativo de la DQO. En estos puntos se registraron valores de 510 mg/L, 610 mg/L y 590 mg/L, los cuales indican una elevada carga de materia orgánica y compuestos químicos oxidables en el agua.

Este incremento aguas abajo sugiere una fuerte influencia de descargas municipales, escurrimientos urbanos y aportes de aguas residuales domésticas, particularmente en zonas donde el sistema de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales es insuficiente o presenta deficiencias operativas. Diversos estudios han documentado que en ríos urbanos de países en desarrollo, la descarga directa de aguas residuales domésticas constituye una de las principales fuentes de incremento en los niveles de DQO y otros indicadores de contaminación orgánica (Kannel et al., 2007).

La concentración máxima registrada en el punto cercano a San Antonio de la Cal (610 mg/L) representa el valor más alto dentro del gradiente espacial analizado. Este resultado puede relacionarse con la acumulación progresiva de contaminantes a lo largo del cauce, así como con el aporte continuo de descargas municipales provenientes de los municipios que conforman la zona metropolitana de Oaxaca,

entre ellos Oaxaca de Juárez, Santa Cruz Xoxocotlán y San Antonio de la Cal, cuya población conjunta supera varios cientos de miles de habitantes. En sistemas fluviales urbanos, el incremento de la población y la expansión de la mancha urbana se asocian directamente con mayores cargas de contaminantes orgánicos en cuerpos de agua superficiales (Varol, 2020).

El patrón espacial observado en el mapa permite identificar un gradiente de contaminación creciente aguas abajo, fenómeno común en ríos que atraviesan zonas urbanizadas. Este comportamiento refleja la acumulación de materia orgánica, compuestos químicos oxidables y residuos provenientes de actividades domésticas, comerciales e industriales.

Asimismo, los valores registrados superan ampliamente los niveles típicamente asociados a cuerpos de agua con buena calidad ambiental, lo que sugiere condiciones de contaminación orgánica significativa y una posible disminución del oxígeno disuelto en el agua, situación que puede afectar la integridad ecológica del ecosistema acuático y limitar los usos potenciales del recurso hídrico (Chapman, 1996).

Desde una perspectiva espacial, la cartografía generada mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite visualizar la relación entre la calidad del agua y la distribución territorial de las actividades humanas, constituyéndose en una herramienta fundamental para la gestión ambiental de cuencas hidrográficas. Este tipo de análisis facilita la identificación de zonas críticas de contaminación y contribuye a orientar estrategias de monitoreo, control de descargas y planificación ambiental en áreas urbanas (Kannel et al., 2007).

En conjunto, los resultados evidencian que la contaminación orgánica del río Atoyac en el tramo analizado está fuertemente influenciada por factores antropogénicos asociados al crecimiento urbano y las descargas municipales, lo que resalta la necesidad de fortalecer los sistemas de tratamiento de aguas residuales y las políticas de gestión integral del recurso hídrico en la región.

Metales pesados

Los resultados del análisis de metales pesados muestran concentraciones relativamente bajas en todos los puntos de muestreo. El arsénico se detectó únicamente en M3 y M4 con 0.05 mg/L, valores inferiores al límite de 0.4 mg/L.(Tabla 2)

El cobre presentó concentraciones de 1 mg/L en M3 y 2 mg/L en M4 y M5, mientras que el cromo alcanzó su mayor concentración en M4 (0.439 mg/L). Aunque estos valores se encuentran por debajo



de los límites permisibles, su presencia sugiere aportes asociados a actividades urbanas y transporte de contaminantes por escorrentía.

Por otra parte, cianuro, mercurio, níquel, plomo y zinc no fueron detectados en las muestras analizadas.

Tabla 2.- Comparativa de concentración de metales pesados

Metal	Límite (mg/L)	NOM M1 ITO	M2 Central	M3 Lucia	Santa M4 Tequio	Puente M5 Salado	Río M6 PTAR	Salida
Arsénico	0.4	0	0	0.05	0.05	0	0	
Cianuro	3	0	0	0	0	0	0	
Cobre	6	0	0	1	2	2	0.2	
Cromo	1.5	0.029	0.018	0.075	0.439	0.017	0.029	
Mercurio	0.02	0	0	0	0	0	0	
Níquel	4	0	0	0	0	0	0	
Plomo	0.4	0	0	0	0	0	0	
Zinc	20	0	0	0	0	0	0	

Fuente: Elaboración propia con los datos obtenidos de los sitios de muestro, en la tabla se describen los sitios de muestreo en orden de aparición (M1-M6), el valor de referencia se tomo de la columna referente a cuerpos recertores (ríos y arroyos) como valor instantaneo.

Distribución espacial de la contaminación

El análisis espacial de los puntos de muestreo evidenció un incremento progresivo de la contaminación aguas abajo, particularmente en los puntos M3, M4 y M6. Este patrón coincide con el trayecto del río a través de zonas densamente urbanizadas del área metropolitana de Oaxaca de Juárez, Santa Cruz Xoxocotlán y San Antonio de la Cal, donde se concentran importantes descargas municipales y escorrentía urbana. (Mapa 2, Tabla 1 y 2)

Mapa 2.- Ubicación espacial de los sitio de muestreo en el rio atoyac y salado



Fuente: M en C Erik Martinez Torres, QGIS, en el mapa se observa los sitio de muestreo, los cuales fueron tomados de norte a sur del efluente de los rios, se logra apreciar un punto fuera del afluente del rio atoyac, el cual cooresponde al rio salado (Municipio de Santa Lucia del Camino Oaxaca).

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian un deterioro significativo en la calidad del agua de la cuenca Atoyac–Salado, caracterizado principalmente por elevadas concentraciones de materia orgánica, sólidos suspendidos y contaminación microbiológica.

El incremento progresivo de contaminantes observado a lo largo del río está fuertemente relacionado con el crecimiento poblacional y la expansión urbana en el área metropolitana de Oaxaca de Juárez, que constituye el principal centro urbano del estado, así como en Santa Cruz Xoxocotlán y San Antonio de la Cal. Estas zonas presentan una alta densidad poblacional y generan grandes volúmenes de aguas residuales domésticas que, en muchos casos, son descargadas de forma directa o con tratamiento insuficiente en el sistema fluvial.

Las altas concentraciones de DQO y SST registradas en los puntos M4 y M6 indican una elevada carga de materia orgánica y sólidos en suspensión, lo que puede reducir el oxígeno disuelto y afectar la biodiversidad acuática. Estudios realizados en ríos urbanos han demostrado que el aumento de estos parámetros está directamente relacionado con descargas municipales y escorrentía urbana (Varol & Şen,

2012).

La presencia incontable de *Escherichia coli* en todos los puntos analizados constituye un indicador claro de contaminación fecal, asociada principalmente a descargas de aguas residuales domésticas. Investigaciones recientes han demostrado que los ríos que atraviesan zonas densamente pobladas presentan concentraciones significativamente mayores de bacterias indicadoras de contaminación fecal (Ahmed et al., 2020; <https>).

Por otro lado, las concentraciones relativamente bajas de metales pesados sugieren que las principales fuentes de contaminación en el área de estudio están más relacionadas con actividades urbanas y domésticas que con procesos industriales intensivos. Este patrón ha sido observado en diversas cuencas urbanas donde la contaminación orgánica domina sobre la contaminación por metales (Li et al., 2019). En conjunto, los resultados indican que el deterioro de la calidad del agua en la cuenca Atoyac–Salado está fuertemente influenciado por el aporte antropogénico derivado del crecimiento urbano, las descargas municipales y la escorrentía superficial, lo que genera una acumulación progresiva de contaminantes a lo largo del cauce del río.

CONCLUSIONES

La evaluación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en la cuenca Atoyac–Salado evidenció un deterioro significativo de la calidad del agua, particularmente en los tramos urbanos del río.

Los resultados muestran que los Sólidos Suspendidos Totales, la Demanda Química de Oxígeno y el Nitrógeno Total superan los límites establecidos por la normativa ambiental en varios puntos de muestreo, destacando M4 (Puente El Tequio) y M6 (salida de la PTAR) como los sitios con mayor nivel de contaminación.

La presencia incontable de *Escherichia coli* en todos los puntos analizados confirma una contaminación fecal generalizada en la cuenca, lo que representa un riesgo potencial para la salud pública y para los ecosistemas acuáticos.

El análisis espacial permitió identificar un incremento progresivo de la contaminación aguas abajo, asociado al aporte antropogénico derivado del crecimiento urbano y la densidad poblacional en los municipios de Oaxaca de Juárez, Santa Cruz Xoxocotlán y San Antonio de la Cal.



Finalmente, los resultados resaltan la necesidad de fortalecer las estrategias de tratamiento de aguas residuales, monitoreo ambiental y planificación urbana, con el fin de reducir el impacto de las actividades antropogénicas sobre la calidad del agua en esta importante cuenca hidrológica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, W., Bibby, K., Harwood, V. J., Koopmans, M., Bonilla-Aldana, D. K., & Rodriguez-Morales, A. J. (2020). Global prevalence of microbial contamination in surface waters and implications for water quality monitoring. *Water Research*, 179, 115728. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115728>
- American Public Health Association (APHA). (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.
- Chapman, D. (1996). *Water quality assessments: A guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring* (2nd ed.). E & FN Spon.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2023). *Diagnóstico de calidad del agua del río Atoyac y sus afluentes en el estado de Oaxaca, México (2012–2023)*. Gobierno de México.
- Corcoran, E., Nellesmann, C., Baker, E., Bos, R., Osborn, D., & Savelli, H. (2010). *Sick water? The central role of wastewater management in sustainable development*. United Nations Environment Programme. <https://doi.org/10.1787/9789264083578-en>
- Dodds, W. K., & Smith, V. H. (2016). Nitrogen, phosphorus, and eutrophication in streams. *Ecosphere*, 7(10), e01298. <https://doi.org/10.1002/ecs2.01298>
- Dueñas-Moreno, J., Mora, A., Narváez-Montoya, C., & Mahlkecht, J. (2024). Trace elements and heavy metal(loid)s triggering ecological risks in a heavily polluted river-reservoir system of central Mexico: Probabilistic approaches. *Environmental Research*, 262, 119937. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119937>
- Hernández-Ramírez, A. G., Martínez-Tavera, E., Rodríguez-Espinosa, P. F., Mendoza-Pérez, J. A., Tabla-Hernández, J., Escobedo-Urías, D. C., Jonathan, M. P., & Sujitha, S. B. (2019). Detection, provenance and associated environmental risks of water quality pollutants during anomaly events in River Atoyac, Central Mexico: A real-time monitoring approach. *Science of the Total Environment*, 669, 1019–1032. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.138>



- Kannel, P. R., Lee, S., Lee, Y. S., Kanel, S. R., & Khan, S. P. (2007). Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 132, 93–110. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9505-1>
- Li, P., Wu, J., & Qian, H. (2019). Assessment of groundwater quality and human health risk from nitrate contamination in China. *Science of the Total Environment*, 651, 298–308. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.094>
- Li, S., Gu, S., Tan, X., & Zhang, Q. (2019). Water quality in relation to land use and land cover in the upper Han River Basin, China. *Science of the Total Environment*, 648, 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.148>
- Mancilla-Villa, O. R., et al. (2018). Water quality assessment in urban rivers. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 12345–12358. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1089-8>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (1996). *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales*. Diario Oficial de la Federación.
- Sener, S., Sener, E., & Davraz, A. (2017). Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (Turkey). *Ecological Indicators*, 79, 281–292. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.03.060>
- Shrestha, S., & Kazama, F. (2007). Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji River basin, Japan. *Environmental Modelling & Software*, 22(4), 464–475. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.02.001>
- Smith, V. H., & Schindler, D. W. (2009). Eutrophication science: Where do we go from here? *Trends in Ecology & Evolution*, 24(4), 201–207. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.11.009>
- UNESCO. (2023). *United Nations world water development report 2023: Partnerships and cooperation for water*. UNESCO Publishing.



- Varol, M. (2020). Spatio-temporal changes in surface water quality and sediment contamination of a large river basin: A multivariate statistical approach. *Environmental Pollution*, 263, 114661. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114661>
- Varol, M., & Şen, B. (2012). Assessment of nutrient and heavy metal contamination in surface water and sediments of the Tigris River, Turkey. *Ecological Indicators*, 20, 192–200. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.01.012>
- World Health Organization. (2017). *Guidelines for drinking-water quality*. WHO Press.
- World Health Organization. (2017). Guidelines on sanitation and health. *The Lancet Infectious Diseases*. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(17\)30483-3](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(17)30483-3)

