

HERRAMIENTAS SIG'S PARA LA EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN EN EL RÍO NEXAPA

SIG'S TOOLS FOR POLLUTION ASSESSMENT IN THE NEXAPA RIVER

Arroyo-Ortega, I.F.¹, García-Zamora, J.L.², Herrera-Cárdenas, J.A.³, Torres, E.⁴

¹SECIHTI. CEIBAAS-Instituto de Ecología A. C., Red de Ecología Funcional. Carretera Antigua a Coatepec, No. 351, El Haya, Xalapa, Veracruz C.P. 91073, México.

²Facultad de Química, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Edificio FCQ 9, Ciudad Universitaria. Col. Jardines de San Manuel, C.P. 72540, Puebla, México.

³Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros, Prolongación 168 Barrio de Santiago Mihuacan C. P. 74420, Izúcar de Matamoros

⁴Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Edificio IC 8, Ciudad Universitaria. Col. Jardines de San Manuel, C.P. 72540, Puebla, México

*Autor de correspondencia: eduardo.torres@correo.buap.mx

Recibido: 05/marzo/2025

Aceptado: 20/junio/2025

RESUMEN

Este estudio evaluó la contaminación del río Nexapa mediante la aplicación de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y mediciones de Demanda Química de Oxígeno (DQO). El objetivo fue cartografiar y analizar la distribución espacial de la contaminación a lo largo del río, para ello se recolectaron muestras de agua en siete sitios. Los resultados indicaron niveles de contaminación de "contaminada" a "fuertemente contaminada" según la clasificación de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RENAMECA). Los valores de DQO variaron significativamente, desde 120 hasta 945 mg O₂/L, indicando una alta carga de materia orgánica. Los sitios ubicados aguas abajo de zonas urbanas y agrícolas mostraron los niveles más elevados de DQO, influenciados por descargas de aguas residuales y actividades agropecuarias. El punto más contaminado presentó un valor promedio de DQO de 773 mg O₂/L y se ubicó cerca de una planta de tratamiento inactiva, sugiriendo vertido directo de aguas residuales. La alta DQO observada señala una grave contaminación orgánica, con potenciales efectos adversos en los ecosistemas acuáticos. El uso de SIG permitió visualizar la distribución espacial de la

contaminación. Es urgente implementar medidas de gestión y tratamiento de aguas residuales para proteger la salud del río Nexapa.

Palabras clave: *Demanda Química de Oxígeno, Río Nexapa, Sistemas de Información Geográfica, calidad del agua.*

ABSTRACT

This study assessed pollution in the Nexapa River by applying Geographic Information System (GIS) tools and Chemical Oxygen Demand (COD) measurements. The objective was to map and analyze the spatial distribution of pollution along the river. Water samples were collected at seven sites, and the results indicated contamination levels ranging from "contaminated" to "heavily contaminated," according to the National Water Quality Monitoring Network (RENAMECA) classification. COD values varied significantly, from 120 to 945 mg O₂/L, indicating a high organic matter load. Sites downstream of urban and agricultural areas showed the highest COD levels, influenced by wastewater discharges and farming activities. The most polluted site had an average COD value of 773 mg O₂/L and was located near an inactive treatment plant, suggesting direct discharge of untreated wastewater. The high COD observed indicates severe organic pollution, potentially adversely affecting aquatic ecosystems. GIS tools enabled the visualization of the spatial distribution of pollution. Urgent management and wastewater treatment measures are needed to protect the health of the Nexapa River.

Keywords: *Chemical Oxygen Demand, Nexapa River, Geographic Information Systems, water quality.*

INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental constituye un desafío significativo tanto para los ecosistemas como para la salud humana (Henshaw et al., 2004). Una amplia gama de contaminantes ingresa y se acumula en los distintos compartimentos ambientales, afectando de manera diversa el agua, el suelo y el aire; exponiendo a la población animal y humana a sus efectos nocivos.

En los cuerpos de agua, los contaminantes más comunes incluyen nitratos y fosfatos, así como metales pesados como hierro, manganeso, aluminio, cobre, zinc, plomo, cadmio, cromo, níquel y mercurio, además del metaloide arsénico (Ahamad et al., 2020). Asimismo, los contaminantes

orgánicos persistentes (COP) representan una preocupación particular debido a su resistencia a la degradación química y biológica. Estos compuestos se distinguen por su alta persistencia, toxicidad y movilidad en el ambiente, además de su capacidad para bioacumularse en los organismos vivos (Vagi et al., 2021). Entre los COP más relevantes se encuentran los bifenilos policlorados (BPC), los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y diversos plaguicidas organoclorados. En contraste, los contaminantes emergentes, como esteroides, hormonas, disruptores endocrinos, productos farmacéuticos y de cuidado personal, también pueden generar efectos persistentes y potencialmente perjudiciales para la salud humana y animal (Ahamad et al., 2020; Gómez-Regalado et al., 2023; González-González et al., 2022).

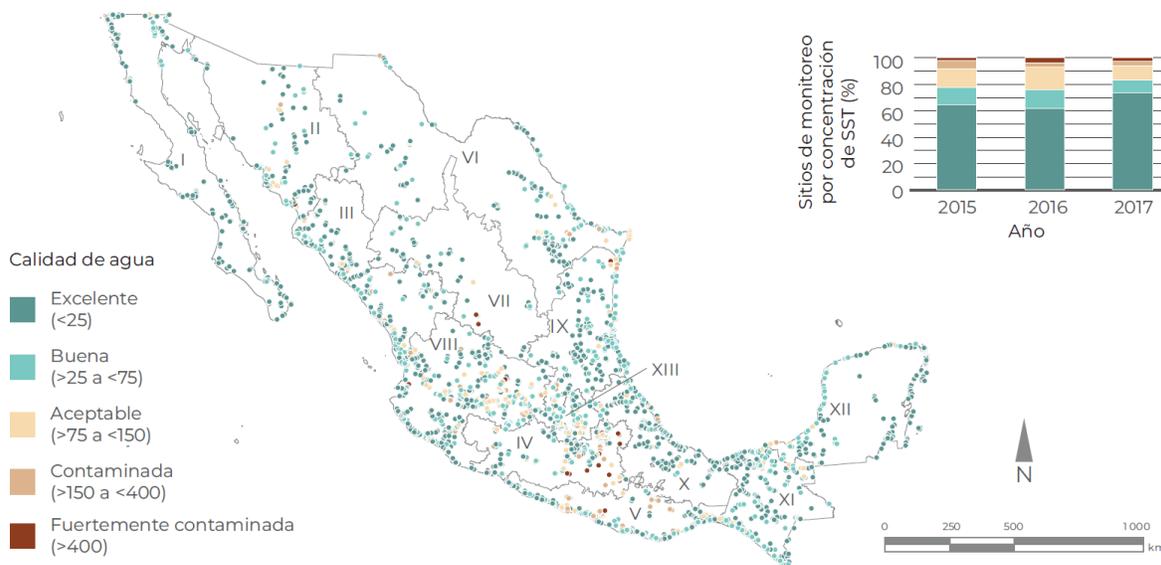
En el suelo, la presencia de metales pesados es un factor relevante en la calidad ambiental. Aunque algunos están presentes de forma natural en este compartimento, las actividades antropogénicas han incrementado significativamente sus concentraciones, superando con frecuencia los niveles naturales y generando efectos negativos (Adimalla et al., 2020). Entre los metales pesados más comunes introducidos en el suelo por la actividad humana se encuentran el plomo, el cadmio y el mercurio (Mirsal, 2008). Por otro lado, los plaguicidas se acumulan en el suelo debido a las prácticas agrícolas (Man et al., 2013; Tarafdar & Sinha, 2017). Además de su potencial incorporación a los alimentos cultivados que compromete su seguridad y calidad, la escorrentía puede arrastrarlos hacia los cuerpos de agua, contribuyendo a su contaminación y afectando los ecosistemas acuáticos (Adimalla et al., 2020; Kumar-Das, 2020; Yañez et al., 2018).

Dada la complejidad en la distribución de estos contaminantes, el uso de herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha resultado fundamental para su monitoreo y análisis. Estas tecnologías permiten identificar la distribución espacial de diversos contaminantes sin necesidad de extensos muestreos. A través de representaciones basadas en coordenadas geográficas, es posible mapear la localización y concentración de contaminantes mediante puntos georreferenciados, mostrando información como el número de contaminantes, sus concentraciones específicas o categorías de contaminación (Chang, 2018).

Adicionalmente, la integración de técnicas de muestreo in situ y métodos de interpolación permite estimar concentraciones en áreas sin datos disponibles, facilitando la cartografía de los patrones de

distribución espacial de contaminantes mediante representaciones en mapas digitales. Esto no solo ayuda a identificar zonas con altos niveles de contaminación, sino que también proporciona información fundamental para el diseño de estrategias de mitigación y políticas ambientales. La capacidad de los SIG para visualizar y analizar datos espaciales mejora la comprensión de la distribución de contaminantes y respalda una gestión más eficaz basada en datos, contribuyendo a la protección de los ecosistemas y la salud humana.

Figura 1. Ejemplo de representación de la distribución de los sitios de monitoreo de sólidos suspendidos totales y su clasificación en relación con la calidad del agua.



Fuente: Semarnat, (2019)

En este contexto, la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se utiliza comúnmente para evaluar la contaminación orgánica del agua, ya que mide la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica presente. Valores elevados de DQO indican una alta carga de contaminantes orgánicos, lo que puede deteriorar la calidad del agua y tener efectos adversos en los ecosistemas acuáticos. Su aplicación está ampliamente respaldada en estudios de monitoreo ambiental, debido a su sensibilidad ante descargas de aguas residuales y actividades agrícolas. En particular, la representación espacial de los valores de DQO mediante SIG permite identificar zonas críticas de contaminación orgánica, facilitando el análisis de su distribución y posibles fuentes de origen (Borja et al., 2008; Mora et al., 2021; Vallidevi et al., 2020).

El impacto de la contaminación en los cuerpos de agua es particularmente evidente en ríos de gran relevancia ecológica y social. Un caso de interés es el río Nexapa, un recurso hídrico ubicado en el estado de Puebla que nace en las faldas del Popocatepetl y mantiene un flujo constante gracias a los deshielos. A lo largo de su recorrido hacia la Mixteca, recibe aportes de diversos afluentes, desempeñando un papel importante en el riego agrícola de la zona y en la conservación de diversos ecosistemas. En este sentido, su relevancia radica no solo en su función ecológica, sino también en el sustento que proporciona a las comunidades que dependen de él.

Sin embargo, el río Nexapa, vital para las comunidades de Puebla, enfrenta una grave contaminación que demanda atención urgente; conocer a fondo sus niveles de contaminación, mediante herramientas como los SIG y parámetros de calidad de agua como la Demanda Química de Oxígeno (DQO), es necesario para dimensionar el impacto en la salud humana, expuesta a enfermedades transmitidas por agua contaminada, y en el ecosistema, donde la alteración de la calidad del agua amenaza la biodiversidad acuática y la sostenibilidad de las actividades agrícolas. La información resultante de estos estudios es esencial para impulsar acciones de remediación y conservación, garantizando así un futuro más saludable para las poblaciones y el entorno natural que dependen de este importante afluente. Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo es aplicar herramientas de SIG y mediciones de DQO para cartografiar y analizar la contaminación en el río Nexapa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio

El río Nexapa se ubica en la región hidrológica No. 18 del Balsas, dentro de la cuenca del río Atoyac, subcuenca del río Nexapa (INEGI, 2010). Nace al norte del municipio de Santa Isabel Cholula, alimentado por los ríos Xalapexco y Huiluapam, y recorre alrededor de 176 kilómetros a lo largo del estado de Puebla, atravesando 12 municipios hasta su desembocadura en el río Atoyac, en el municipio de Cohetzala, Puebla. El clima en la región varía de templado subhúmedo a semicálido subhúmedo, hasta cálido subhúmedo (INEGI, 2022). En las riberas del río predominan las actividades agrícolas, destacando la agricultura de riego anual y semipermanente, seguida por la agricultura de temporal anual y la presencia de asentamientos humanos (INEGI, 2021). Entre

estos, destacan ciudades como Atlixco e Izúcar de Matamoros, que juegan un papel importante en la dinámica socioeconómica de la región. Si bien no se trata de una zona altamente industrializada, en la región existen diversas actividades comerciales e industriales, entre ellas la acuicultura, la fabricación de agroquímicos, la minería y pequeñas industrias dedicadas a la elaboración de alimentos (INEGI, 2020).

Muestreo y análisis de agua

Se realizaron tres campañas de muestreo durante 2022, con un intervalo aproximado de tres meses entre cada una. Estas se programaron para representar tres momentos clave del ciclo hidrológico: temporada de secas (22 de enero), inicio de lluvias (5 de mayo) y temporada de lluvias (10 de agosto). Los muestreos se llevaron a cabo en siete puntos distribuidos a lo largo de 47 km del cauce del río Nexapa. El primer punto de muestreo se ubicó seis kilómetros después de la confluencia de los ríos Xalapexco y Huilupam, mientras que el último se localizó 150 metros después de la planta de tratamiento del municipio de Izúcar de Matamoros (Figura 2).

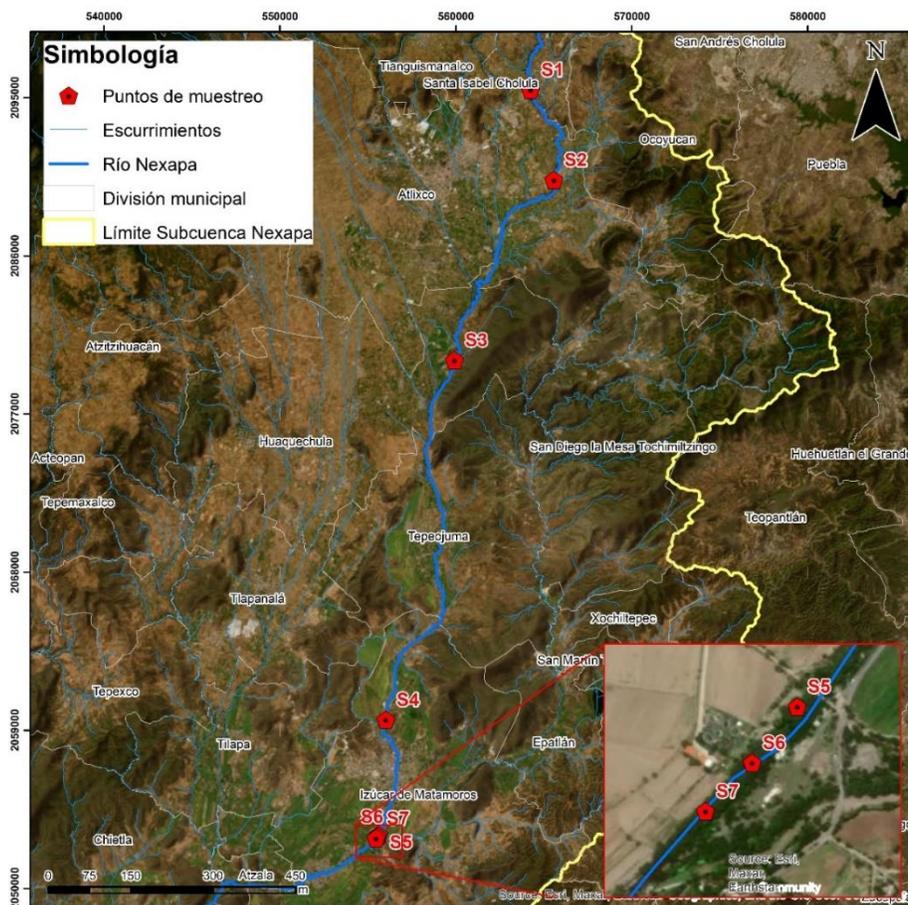
Los muestreos se realizaron siguiendo las directrices de las normas NMX-AA-003-1980 y NMX-AA-014-1980. Se recolectaron muestras de 1 L en botellas de polietileno, preservadas a 4 °C para evitar su degradación. El análisis de DQO se efectuó dentro de las 12 horas posteriores a la recolección para garantizar la integridad de las muestras. Las coordenadas de los puntos de muestreo se detallan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Coordenadas de los puntos de muestreo en el río Nexapa.

Punto de muestreo	Coordenadas UTM	
	X	Y
S1	564241.71	2095448.58
S2	565563.59	2090320.73
S3	559912.93	2080068.26
S4	556017.05	2059608.22
S5	555621.37	2053051.17
S6	555539.31	2052948.89
S7	555454.56	2052860.74

Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Ubicación de los puntos de muestreo



Fuente: elaboración propia

Análisis de Demanda Química de Oxígeno

A cada muestra se le determinó la demanda química de oxígeno usando el kit HI 93754C-25 de la marca Hanna Instruments, el cual se desarrolla conforme a lo descrito OECD 301 “Guideline for Testing of Chemicals” (OECD, 2001). La lectura se realizó en un fotómetro electrónico de la misma marca modelo HI83325-01

Sistema de Información Geográfica

Los datos obtenidos de las concentraciones de DQO en los diferentes puntos de muestreo fueron integrados en un entorno SIG para generar una capa de puntos con su localización y valores analíticos.

Asimismo, a partir de los datos del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) (CONAGUA, 2022), se identificaron las descargas de aguas residuales que llegan al río Nexapa, ya sea de forma directa o a través de sus afluentes y otros escurrimientos. También se analizaron datos del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) (INEGI, 2020) para identificar posibles fuentes puntuales de contaminación asociadas a actividades económicas en la región. Además, se incorporó la información del uso de suelo para reconocer fuentes difusas de contaminación (INEGI, 2021).

Esta información se procesó en un entorno SIG lo que permitió representar espacialmente las presiones antropogénicas sobre el río Nexapa. Todos los datos fueron georreferenciados utilizando el sistema de coordenadas UTM Zona 14 N, basado en el elipsoide WGS 84, y procesados cartográficamente en ArcGIS 10.8.

RESULTADOS

El Cuadro 2 muestra los resultados de la DQO en cada uno de los sitios para cada muestreo, así como su promedio. Como puede observarse, el nivel de contaminación, reflejado por el valor de la DQO, es alto en todos los puntos de muestreo y se identifican en la categoría de contaminada a fuertemente contaminada de acuerdo con la escala de indicadores de la calidad del agua superficial de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RENAMECA) (CONAGUA, 2023).

De acuerdo con esta clasificación, se considera agua contaminada cuando los valores de DQO son mayores a 40 y menores o iguales a 200 mg/L, mientras que se clasifica como fuertemente contaminada cuando la DQO supera los 200 mg/L. Este último nivel corresponde a cuerpos de agua con un fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas, tanto municipales como no municipales.

En la Figura 2 se presentan los valores promedio de DQO obtenidos en cada punto de muestreo. El primer sitio de muestreo se ubica antes de la zona urbana de Atlixco, pero el agua ya ha recibido influencia de actividades previas a lo largo de su cauce. A pesar de no encontrarse en una zona altamente urbanizada, el valor promedio de DQO es alto (221 mg O₂/L), lo que indica la presencia

de contaminación. No obstante, este punto presenta la menor concentración de DQO en comparación con los demás sitios de muestreo.

Cuadro 2. Resultados de los análisis de DQO.

Sitio de muestreo	Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)			
	M1	M2	M3	Promedio
S1	420	120	122.5	220.8
S2	515	315	150	326.7
S3	410	360	156	308.7
S4	315	285	139.5	246.5
S5	ND	405	131.5	268.3
S6	945	635	737.5	772.5
S7	520	255	369.5	381.5

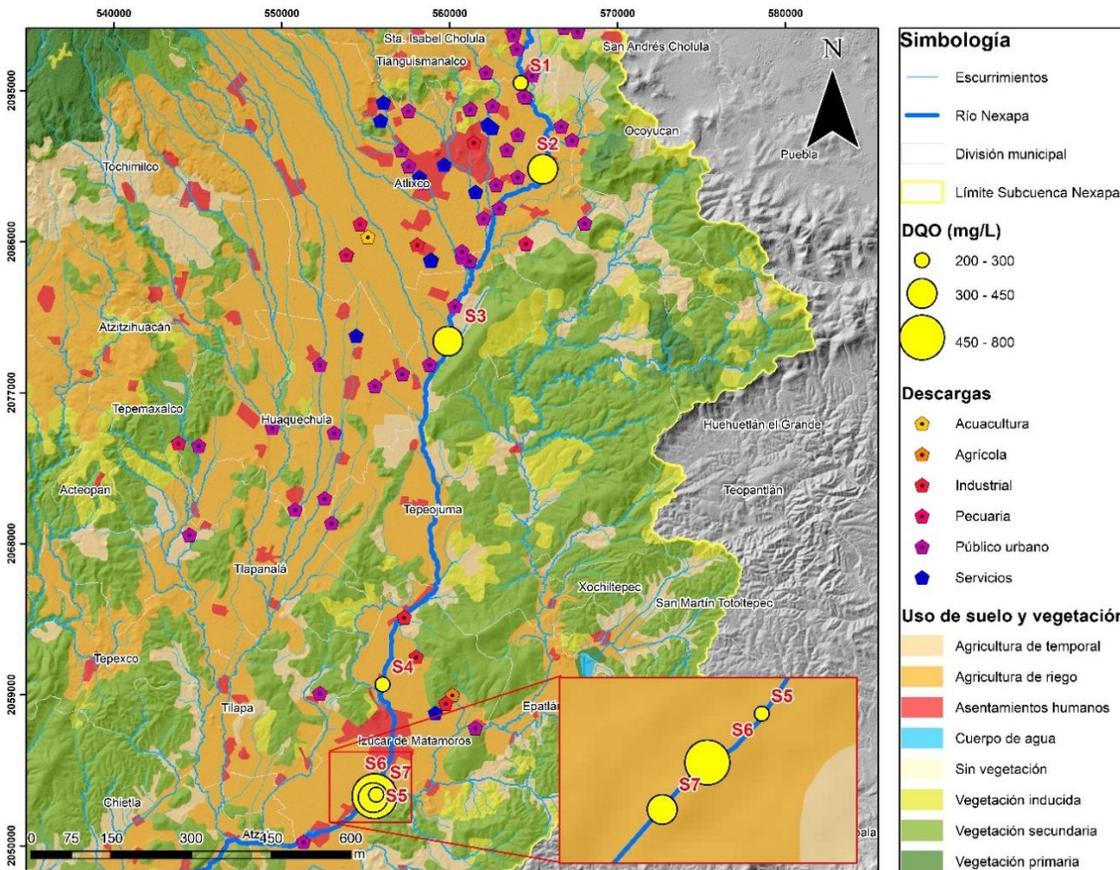
ND: No determinado

Fuente: elaboración propia

Los puntos de muestreo S2 y S3 presentan valores elevados promedio de DQO, con 327 mg O₂/L y 309 mg O₂/L, respectivamente. A pesar de que se encuentra en zona rurales, reciben aportes de múltiples escurrimientos y afluentes. Específicamente S2 recibe aportes provenientes tanto de áreas agrícolas como de asentamientos humanos de los municipios de Santa Isabel Cholula y Ocoyucan. En esta área confluyen diversas descargas de origen público urbano y de servicios, intensificando la degradación de la calidad del agua. Por su parte, el S3 se localiza en un área con actividad ganadera y agrícola cercana, lo que sugiere que los residuos orgánicos y los aportes de nutrientes de estas prácticas contribuyen a su nivel de contaminación. Además, el tramo del río en el que se ubica recibe escurrimientos y descargas de la zona urbana de Atlixco.

El punto de muestreo 4 presenta un valor promedio de DQO de 247 mg O₂/L, lo que indica una carga contaminante elevada. Esto pese a que, a diferencia de los puntos anteriores, este sitio recibe un menor número de escurrimientos y descargas antes de su cauce, lo que sugiere que la contaminación proviene principalmente de fuentes locales. Este punto se encuentra en una zona con una mayor presencia habitacional, por lo que es probable que los residuos domésticos sean descargados directamente al río sin un adecuado tratamiento. Además, la proximidad a áreas urbanas y periurbanas incrementa la posibilidad de aportes de aguas residuales domésticas y otros contaminantes urbanos.

Figura 2. Distribución espacial de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en el río Nexapa



Fuente: elaboración propia

Los puntos de muestreo S5, S6 y S7 se encuentran aguas debajo de la cabecera municipal del municipio de Izúcar de Matamoros, en un tramo donde la contaminación alcanza sus niveles más altos debido a la influencia de descargas urbanas y la planta de tratamiento de aguas residuales. Específicamente, el punto de muestreo 5 está ubicado aproximadamente 500 metros antes de la descarga de la planta de tratamiento. Aunque en este sitio la DQO ya es elevada (269 mg O₂/L), la contaminación se intensifica en los puntos siguientes.

El punto de muestreo 6, situado en las inmediaciones de la descarga de la planta de tratamiento, presenta el mayor nivel de contaminación registrado, con un valor de 773 mg O₂/L. Esto se debe a que, durante los días del muestreo, la planta no estaba operando, por lo que las aguas residuales

fueron vertidas al río sin tratamiento, funcionando como un drenaje directo de la ciudad. Más adelante, en el punto de muestreo 7, la concentración de DQO disminuye a 382 mg O₂/L, lo que sugiere un proceso de dilución parcial a medida que el río avanza. Sin embargo, los valores siguen reflejando una contaminación significativa, evidenciando el impacto de las descargas previas en la calidad del agua.

Es importante recordar que la DQO es una medida de la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar químicamente la materia orgánica presente en el agua. Esto incluye tanto la materia orgánica biodegradable (la que las bacterias pueden descomponer) como la no biodegradable (las bacterias pueden no descomponer). Una DQO alta indica que hay mucha materia orgánica en el agua, lo que puede agotar el oxígeno disuelto. Esto es perjudicial para los peces y otras formas de vida acuática, que necesitan oxígeno para sobrevivir, entonces, la DQO es un indicador clave de la contaminación del agua.

Cuando la DQO en el agua supera los 100 mg/L, es una señal de alarma: el agua está muy contaminada con materia orgánica, algunas de ellas podrían ser sustancias tóxicas que ponen en riesgo la salud si les usada para consumo humano. Por otro lado, una DQO elevada puede desencadenar una serie de efectos adversos en los ecosistemas acuáticos: reduce el oxígeno disuelto, afectando la vida aeróbica y disminuyendo la biodiversidad; altera los ciclos biogeoquímicos del nitrógeno, fósforo y azufre, generando eutrofización y liberación de gases tóxicos; impacta la biota acuática, inhibiendo la fotosíntesis y afectando la reproducción y crecimiento, todo ello desestabiliza el ecosistema y comprometiendo la salud ambiental.

CONCLUSIONES

La contaminación del río Nexapa, reflejada por valores determinados de DQO superiores a 100 mg/L, es un claro reflejo del impacto negativo de las actividades antropogénicas. Los asentamientos irregulares, las descargas de la industria ganadera y agrícola, la presencia de basureros y el funcionamiento intermitente de la PTAR han generado una carga orgánica excesiva, comprometiendo la calidad del agua y la salud del ecosistema.

La aplicación de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permitió integrar y analizar espacialmente los datos de calidad del agua, descargas residuales y uso de suelo, revelando zonas críticas de acumulación de contaminantes y posibles fuentes de origen. Esta metodología demostró ser útil para generar información geoespacial que contribuya a un diagnóstico más preciso y visualmente accesible de los patrones de contaminación.

Frente a este escenario, es urgente implementar acciones integrales de mitigación, saneamiento y gestión del territorio. Proteger la calidad del agua en el río Nexapa es esencial no solo para conservar la biodiversidad de sus ecosistemas, sino también para salvaguardar la salud y el bienestar de las comunidades que dependen de este recurso vital.

REFERENCIAS

- Adimalla, N., Chen, J., & Qian, H. (2020). Spatial characteristics of heavy metal contamination and potential human health risk assessment of urban soils: A case study from an urban region of South India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110406>
- Ahamad, A., Madhav, S., Singh, A. K., Kumar, A., & Singh, P. (2020). *Types of Water Pollutants: Conventional and Emerging* (pp. 21–41). https://doi.org/10.1007/978-981-15-0671-0_3
- Borja, A., Bricker, S. B., Dauer, D. M., Demetriades, N. T., Ferreira, J. G., Forbes, A. T., Hutchings, P., Jia, X., Kenchington, R., Marques, J. C., & Zhu, C. (2008). Overview of integrative tools and methods in assessing ecological integrity in estuarine and coastal systems worldwide. *Marine Pollution Bulletin*, 56(9), 1519–1537. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.07.005>
- Chang, K.-T. (2018). *Introduction to geographic information systems*. (Vol. 4). Boston: McGraw-Hill.
- CONAGUA. (2022). *Registro Público de Derechos de Agua (REPDA). Base de datos de títulos y permisos de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes*.
- CONAGUA. (2023). *Sistema Nacional de Información del Agua*.
- Gómez-Regalado, M. del C., Martín, J., Santos, J. L., Aparicio, I., Alonso, E., & Zafra-Gómez, A. (2023). Bioaccumulation/bioconcentration of pharmaceutical active compounds in aquatic

- organisms: Assessment and factors database. *Science of The Total Environment*, 861, 160638. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.160638>
- González-González, R. B., Sharma, P., Singh, S. P., Américo-Pinheiro, J. H. P., Parra-Saldívar, R., Bilal, M., & Iqbal, H. M. N. (2022). Persistence, environmental hazards, and mitigation of pharmaceutically active residual contaminants from water matrices. *Science of The Total Environment*, 821, 153329. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.153329>
- Henshaw, S. L., Curriero, F. C., Shields, T. M., Glass, G. E., Strickland, P. T., & Breyse, P. N. (2004). Geostatistics and GIS: Tools for Characterizing Environmental Contamination. In *Journal of Medical Systems* (Vol. 28, Issue 4).
- INEGI. (2010). *Red Hidrográfica de México, escala 1:50 000 edición: 2.0*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- INEGI. (2020). *Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE)*.
- INEGI. (2021). *Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000, Serie VII. Conjunto Nacional.*, escala: 1:250 000. edición: 1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2022). *Cartas Climatológicas. Climas: 1902-2011*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI.
- Kumar-Das, T. (2020). Health risk assessment of heavy metals in soil irrigated with paper mill effluent. *Annals of Plant and Soil Research*, 22(1), 1–8.
- Man, Y. B., Kang, Y., Wang, H. S., Lau, W., Li, H., Sun, X. L., Giesy, J. P., Chow, K. L., & Wong, M. H. (2013). Cancer risk assessments of Hong Kong soils contaminated by polycyclic aromatic hydrocarbons. *Journal of Hazardous Materials*, 261, 770–776. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.11.067>
- Mirsal, I. A. (Ed.). (2008). *Soil Pollution*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-70777-6>
- Mora, A., García-Gamboa, M., Sánchez-Luna, M. S., Gloria-García, L., Cervantes-Avilés, P., & Mahlknecht, J. (2021). A review of the current environmental status and human health implications of one of the most polluted rivers of Mexico: The Atoyac River, Puebla. *Science of the Total Environment*, 782, 146788. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146788>
- Semarnat. (2019). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, edición 2018*. www.gob.mx/semarnat

- Tarafdar, A., & Sinha, A. (2017). Cancer Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Soils and Sediments of India: A Meta-Analysis. *Environmental Management*, 60(4), 784–795. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0920-6>
- Vagi, M. C., Petsas, A. S., & Kostopoulou, M. N. (2021). Potential effects of persistent organic contaminants on marine biota: A review on recent research. In *Water (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 18). MDPI. <https://doi.org/10.3390/w13182488>
- Vallidevi, K., Gopinath, K. P., Nagarajan, K. K., Prakash, D. G., Sudhamsu, G., Sudhish, S., & Al-Zahrani, S. A. (2020). Water Pollution Monitoring through Remote Sensing. *Current Analytical Chemistry*, 17(6), 802–814. <https://doi.org/10.2174/1573411016666200206095055>
- Yañez, L. M., Alfaro, J. A., & Bovi Mitre, G. (2018). Absorption of arsenic from soil and water by two chard (*Beta vulgaris* L.) varieties: A potential risk to human health. *Journal of Environmental Management*, 218, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.048>