

Preservación del agua en Sinaloa, México, a través del monitoreo instrumentado de la calidad del agua. Estudio de Caso: Río Presidio

Water preservation in Sinaloa, Mexico, through instrumented water quality monitoring. Case study: Presidio River

Kimberly Mendivil-García¹, Leonel Ernesto Amabilis-Sosa^{1*}, Adriana Roé-Sosa², Melissa Payán-Villalva³

¹CONAHCYT-TECNM/ITCuliacán, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Av. Juan de Dios Bátiz 310, 80220 Culiacán, Sinaloa, México. Correo-e (*e-mail*): leonel.as@culiacan.tecnm.mx, Tel. +52 5559099023

²Universidad Tecnológica de Culiacán, Coordinación de Ingeniería en Tecnología Ambienta, Carretera a Imala s/n. 80014 Culiacán, Sinaloa, México

³TECNM/ITCuliacán, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Av. Juan de Dios Bátiz 310, 80220 Culiacán, Sinaloa, México

*Autor a quien debe dirigirse la correspondencia / *Author to whom correspondence should be addressed*

Recibido: Enero 15, 2023 / *Received: January 15, 2023*

Aceptado: Febrero 15, 2023 / *Accepted: February 15, 2023*

Resumen

En México y muchos países se cuenta con redes de monitoreo de la calidad del agua. Sin embargo, dichos monitoreos no han sido utilizados para la toma de decisiones por la falta de criterios técnicos. En la presente investigación se estudió la distribución espacial y temporal de la calidad del agua del río Presidio, ubicado en el estado de Sinaloa, en México. Este río destaca por la diversidad de actividades que se realizan en sus riberas, desde actividades mineras, agricultura intensiva hasta incluso acuicultura. La red de monitoreo cuenta con ocho sitios de muestreo distribuidos en la cuenca baja, media y alta. A través de un Sistema de Información Geográfica se identificaron las proporciones de uso del suelo, asociándolo con los valores de todos los parámetros de calidad del agua en cada sitio de muestreo. Cada valor fue comparado con lineamientos internacionales para evaluar la calidad de cuerpos de agua superficiales (dado que en México no existen tales lineamientos). Posteriormente, los sitios fueron agrupados mediante un análisis no supervisado de conglomerados. Con el análisis de los resultados, en una siguiente etapa se propondrán criterios adaptados a la red de monitoreo de la CONAGUA y nuevas herramientas tecnológicas de seguimiento en tiempo real que permitan preservar el recurso hídrico, relacionados con las problemáticas ambientales identificadas entre las que destacaron la eutrofización, la presencia de metales pesados en todo el cauce del río y la presencia de patógenos en la desembocadura del río Presidio. Se sugieren, además, las mediciones en tiempo real de variables relacionadas con las problemáticas identificadas (p. ej., pH para metales y nitrógeno). Los criterios resultantes para el río Presidio podrían ser útiles para la mayoría de las cuencas hidrológicas si se consideraran las proporciones de uso del suelo en sus riberas y se hiciera un análisis técnico-económico de factibilidad.

Palabras clave: Río Presidio de México, distribución espacial de la calidad del agua, impacto ambiental en cuencas hidrológicas, metales pesados en el río

Abstract

In Mexico and many countries there are water quality monitoring networks. However, such monitoring has not been used for decision making due to the lack of technical criteria. In the present investigation, the spatial and temporal distribution of the water quality of the Presidio River, located in the state of Sinaloa, in Mexico, was studied. This river stands out for the diversity of activities carried out on its banks, from mining activities, intensive agriculture to even aquaculture. The monitoring network has eight sampling sites distributed in the lower, middle and upper basin. Through a Geographic Information System, the proportions of land use were identified, associating it with the values of all water quality parameters at each sampling site. Each value was compared with international guidelines to evaluate the quality of surface water bodies (since such guidelines do not exist in Mexico). Subsequently, the sites were grouped using unsupervised cluster analysis. With the analysis of the results, in a next stage criteria adapted to the CONAGUA monitoring network and new technological tools for real-time monitoring will be proposed that allow preserving the water resource, related to the environmental problems identified, among which the most notable were the eutrophication, the presence of heavy metals throughout the riverbed and the presence of pathogens at the

mouth of the Presidio River. Real-time measurements of variables related to the identified problems are also suggested (e.g., pH for metals and nitrogen). The resulting criteria for the Presidio River might be useful for most hydrological basins if the proportions of land use on its banks were to be considered and a technical-economic feasibility analysis were to be carried out.

Keywords: Mexico's Presidio River, water quality distribution, environmental impact in hydrologic basins, heavy metals in the river

INTRODUCCIÓN

El riesgo ocasionado por la ineficiencia o ausencia de los sistemas de tratamiento es creciente por la tendencia creciente de la población y presencia de nuevos contaminantes (Rashid et al., 2021). A nivel de cuenca, las aguas residuales domésticas representan solamente una fuente de contaminación. La calidad y cantidad del agua para los servicios ecosistémicos se ve amenazada por actividades industriales y lo intensivo de las actividades primarias como la agricultura, la ganadería y la acuicultura (Akhtar et al., 2021; Bouaroudj et al., 2019).

Derivado de lo anterior, la Comisión Nacional de Agua de México, CONAGUA, realiza monitoreos de la calidad de agua en las principales cuencas del país. En promedio, se cuenta con registro de diferentes parámetros desde hace 12 años (CONAGUA, 2020, 2022). Al realizar los análisis de la calidad del agua, se encuentran resultados contundentes sobre el impacto de los diferentes usos del suelo. Sin embargo, la falta de lineamientos en México y la falta de criterios para los tomadores de decisiones han impedido que se desarrollen políticas públicas para mitigar los impactos ya existentes.

Se han realizado estudios en México utilizando estas bases de datos, tales como el de Vázquez-Ochoa et al. (2021). Ellos utilizaron una base de datos de la CONAGUA de la cuenca del río Soto la Marina, ubicada en Tamaulipas. Desarrollaron un modelo hidrológico de disponibilidad y calidad del agua de la cuenca que considera el cambio climático mediante la regionalización de dos modelos de circulación global con el propósito de analizar el comportamiento de la cuenca. Se evaluó la calidad del sistema espacio-temporal mediante la determinación de demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno y oxígeno disuelto, además de temperatura, en 15 sitios de muestreo, modelando el abatimiento del oxígeno disuelto. Se elaboraron vectores de hidrología, monitoreo y calidad del agua. Las concentraciones de los contaminantes valorados presentaron un incremento en la presa que regula la corriente principal de la cuenca y obteniendo predicciones adversas en el río, con respecto a la calidad del agua.

En el noroeste del país, Puente-Miranda et al. (2023) determinaron el índice de la calidad del agua, ICA, en cinco observatorios participativos ubicados en el norte de México haciendo uso de la red de monitoreo de la CONAGUA. Además de generar mapas y cuadros que presentan la información sobre la calidad del agua y zonas de riesgo, se determinó la calidad de agua con los índices de León y del Consejo Canadiense de Ministros de 'Medio' Ambiente, así como la calidad microbiológica con base en los reportes de coliformes fecales.

Por su parte, Mendivil-García et al. (2021) también utilizaron la red de monitoreo de calidad de agua de la CONAGUA para establecer escenarios futuros de la calidad del agua de la región hidrológica de Sinaloa. Considerando el efecto aditivo de las tendencias de cobertura agrícola, calentamiento global y crecimiento poblacional de la zona para el 2030. Por medio de un análisis de la distribución espacial en sistemas de información geográfica y monitoreos de nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT) se obtuvieron proyecciones de cobertura agrícola. Los resultados indicaron que, con solamente un incremento del 12% en la población actual, las descargas de fuentes puntuales dirigidas al río no permitirán el desarrollo de vida acuática de interés comercial. Así mismo, se generaría 12.5% más de cobertura agrícola, la cual requerirá volúmenes de agua no sostenibles sin afectar la dotación.

La presente investigación tiene como objetivo: Analizar la calidad del agua de una cuenca hidrológica que cuenta con diversos usos del suelo, característicos por contar con indicadores ambientales.

En una siguiente etapa se propondrán criterios adaptados a la red de monitoreo de la CONAGUA y nuevas herramientas tecnológicas de seguimiento en tiempo real que permitan preservar el recurso hídrico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El agua de la cuenca del río Presidio es utilizada para las actividades humanas. La cuenca del río Presidio abarca una superficie de 6,932 km². La principal corriente superficial lleva el mismo nombre de la cuenca con una longitud total de 215 km (CONSELVA, 2022). En términos fisiográficos, la zona hidrológica se localiza entre la Sierra Madre Occidental y la Provincia Llanura Costera del Pacífico, con Subprovincia Llanura Costera de Mazatlán (INEGI, 2001). El área de estudio se caracteriza por ser heterogénea en el clima. En la parte montañosa predomina el clima templado-subhúmedo con el 41% del área total. En las zonas centrales y costeras, que es el 40% del área, se presenta un clima cálido y subhúmedo. Por su parte, cerca del 16% del área total corresponde a la parte alta y presenta un clima semifrío y semihúmedo. El otro 3% de la zona corresponde a pequeñas zonas montañosas y costeras con climas semiáridos fríos y cálidos, respectivamente. Los regímenes de precipitación ocurren con lluvias en verano y en invierno, por lo que el estiaje es de febrero a mayo (CONAGUA, 2020). Así, la temperatura media anual es de 24.6°C, con temperaturas máximas en el mes de junio y mínimas en enero. La precipitación media anual es de 782 mm y la evaporación potencial media anual de 1,720 mm (SEGOB, 2016). En cuanto a su geología, "la zona está ocupada por depósitos metavolcánicos, intercalados con horizontes de esquisto, filita, cuarcita y lava. Esta secuencia subyace a rocas del cretácico inferior y superior, el primero formado por andesita y cubierto por un conjunto masivo de rocas de arrecife calcáreas laminadas de rivadas fósiles del Albiano" (CONAGUA, 2020).

En la cuenca hidrológica del río Presidio se encuentra la reciente Presa Picachos, así como algunos embalses menores, como la Presa derivadora Siqueiros y, en la llanura costera, la presa de almacenamiento Los Horcones. La presa Siqueiros está localizada sobre el río Presidio, inmediatamente aguas arriba del poblado del mismo nombre y a 18 km del poblado Villa Unión. Se usa para el riego de una superficie de 8,383 ha de la margen derecha y al menos 2,000 ha de su margen izquierda, lo que equivale a un volumen de 89.5 hm³/año, para el cultivo de frijol, hortalizas, granos, forrajes y perennes. La presa de almacenamiento Los Horcones se encuentra sobre el arroyo Miravalle, afluente del río Presidio por la margen derecha, con una capacidad de 14 hm³ anuales, para el beneficio de 1,050 ha. Se cuenta además con un canal principal y canales de distribución, estructuras de operación y servicios y diques, como parte del sistema de conducción del canal principal, los cuales almacenan 6.2 hm³, beneficiando 2,153 ha de cultivo. El canal principal cuenta con una capacidad hidráulica de proyecto de 15 m³/s. En la margen izquierda se cuenta con un canal principal revestido de concreto y canal de tierra, con una capacidad hidráulica de 2 m³/s. También hay una red de canales secundarios, que están en operación desde 1970 (CONAGUA, 2020). El agua de la cuenca del río Presidio es utilizada para las actividades económicas de 1,036 comunidades en los estados de Durango y Sinaloa, principalmente las ciudades El Salto en Durango y Mazatlán, Concordia y Villa Unión en Sinaloa (CONSELVA, 2022).

Muestreo y determinaciones analíticas

La red de muestreo corresponde a la establecida por el organismo de cuenca Pacífico Norte de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2022). El monitoreo de la calidad del agua del río Presidio se lleva a cabo en ocho sitios de muestreo a lo largo de la cuenca (Tabla 1). Las muestras fueron colectadas de manera bimestral en el periodo de 2018 a 2021, lo que corresponde a 24 muestras para cada sitio de muestreo, 192 muestras en total. El transporte y preservación de las muestras fueron realizados por los laboratorios certificados de la CONAGUA. En la Figura 1 se observa la distribución de la red de monitoreo sobre la cuenca del río Presidio. El monitoreo comprende un total de 41 parámetros analizados para cada una de las 192 muestras. Se abarcan parámetros relacionados con la materia orgánica disuelta, metales pesados, parámetros físicos y parámetros microbiológicos. Para el presente estudio se utilizaron aquellos parámetros relacionados con los usos del suelo mayoritarios en

la cuenca: Agricultura, minería y asentamientos urbanos. Así, se comprenden nutrientes como el nitrógeno amoniacal (NH_3) y fósforo total (PT); elementos potencialmente tóxicos como As, Ni y Cr y, finalmente, los asociados con las descargas municipales como los agentes microbiológicos, coliformes fecales y *Escherichia coli*.

Tabla 1. Ubicación de los sitios de muestreo sobre la cuenca del río Presidio

ID	Sitio	Ubicación	
		Longitud	Latitud
RP1	Río Presidio 5	-106.20435	23.47734
RP2	Río Presidio 4	-106.20650	23.40973
RP3	Río Presidio 3	-106.24526	23.34692
RP4	Río Presidio 2	-106.23394	23.25677
RP5	Río Presidio 1	-106.23032	23.18233
RP6	Puente Villa Unión	-106.22384	23.19095
RP7	El Walamo	-106.25272	23.14056
RP8	Desembocadura río Presidio	-106.29271	23.09396

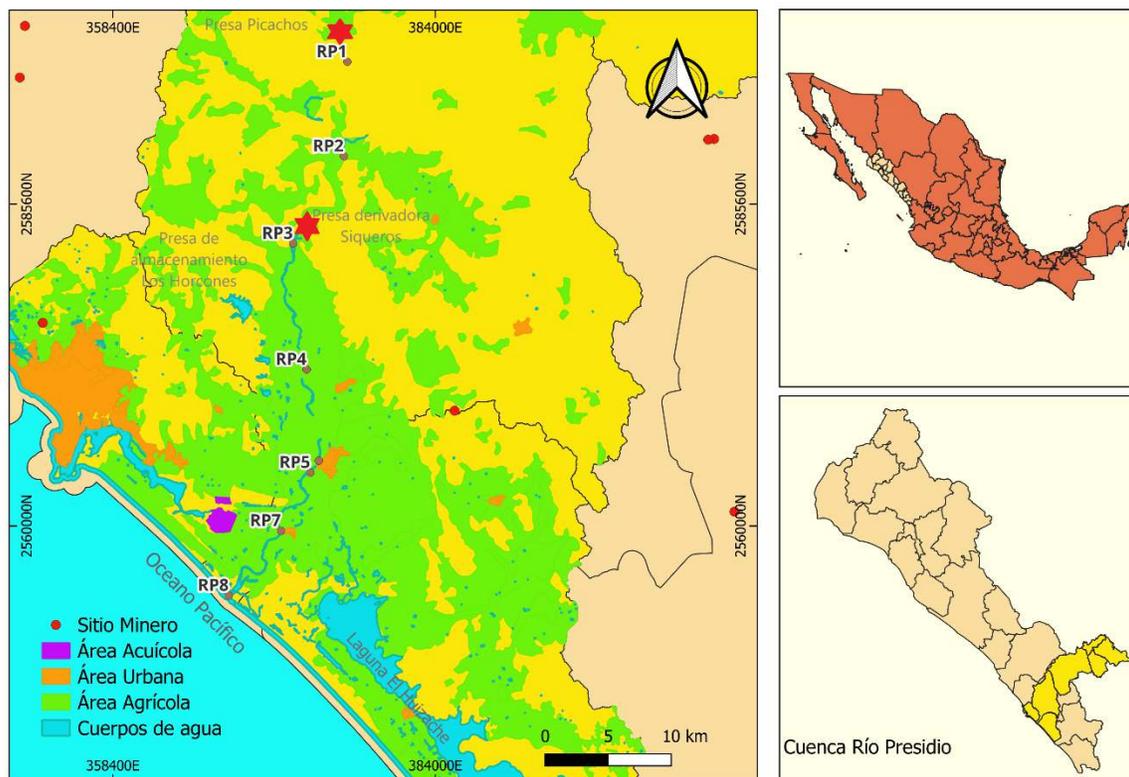


Figura 1. Distribución de la red de monitoreo de CONAGUA sobre la cuenca del río Presidio

Comparación de calidad del agua con referencias internacionales

Para determinar el nivel de influencia antropogénica sobre la calidad del agua del río Presidio se utilizaron como referencia lineamientos internacionales. Para metales pesados, se utilizaron las *guidelines* de *British Columbia Water Quality Guideline* (BCWQG, 2021), *US Environmental Protection Agency* (USEPA, 1999) y *Agencia Sueca para la Protección Ambiental* (SEPA –Naturvårdsverket-, 2015). En la Tabla 2, se muestran los límites máximos permisibles para cada metal de acuerdo con cada referencia internacional y con la norma oficial mexicana correspondiente a la calidad de efluentes que se vierten a cuerpos nacionales, agua y suelos (DOF, 2021a).

Tabla 2. Límites máximos permisibles para metales pesados en aguas superficiales

Referencia	Límite máximo permisible (mg/L)		
	As	Cr	Ni
BCWQG (2021)	0.005	-	-
EPA(1986)	0.15	0.011	0.052
SEPA(2015)	0.05	0.0034	0.004
NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF, 2021a)	< 0.2	< 1	< 2

Para determinar el nivel de influencia ocasionado por los asentamientos humanos sobre la cuenca del río Presidio se utilizaron los parámetros de coliformes fecales y de *Escherichia coli*. La presencia de estos agentes microbiológicos fue comparada con la referencia internacional de la provincia de British Columbia de Canadá (BCWQG, 2021) y la norma oficial mexicana vigente (DOF, 2021a). En la Tabla 3 se muestran los límites máximos permisibles alusivos para ambas referencias.

Tabla 3. Límites máximos permisibles para agentes microbiológicos en aguas superficiales

Referencia	Límite máximo permisible (NMP/100mL)	
	Coliformes fecales	<i>E. coli</i>
BCWQG Recreacional(2021)	-	≤ 200
BCWQG Irrigación (2021)	≤ 200	≤ 77
NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF, 2021a)	-	250

En cuanto a la influencia de los nutrientes, PT y NH₃, asociados con la actividad agrícola de la región, se consideró lo establecido por la USEPA y la BCWQG. El límite máximo permisible de PT recomendado por la USEPA es de 0.01 mg/L en agua superficial (USEPA, 1999). Para establecer el límite máximo permisible de NH₃, en la BCWQG (2021) se consideró la temperatura y pH del agua en el sitio de muestreo, como lo establece esta entidad. Con ello, se procedió a calcular el pH y temperatura promedio de cada sitio de muestreo para determinar el límite máximo permisible y contrastarlo con las mediciones obtenidas en los muestreos.

Análisis espacial de la calidad del agua del río Presidio

El análisis espacial de la calidad del agua en la cuenca del río Presidio se realizó mediante el uso de técnicas de análisis tipo conglomerados ('cluster' en inglés) (AC). El análisis se realizó por medio de un AC jerárquico con los valores promedio de los parámetros mencionados para cada sitio de muestreo, en el periodo de 2018-2022, usando el método Ward y la distancia Euclidiana como medida de similitud. El software utilizado para este y todos los análisis estadísticos fue Minitab 15 para Windows. La zona de estudio fue subdividida en áreas con varianzas similares de los parámetros de calidad del agua.

Con base en esto se dividió la zona de estudio en áreas delimitadas por su concentración de contaminantes y/o nutrientes. Este análisis se realizó de forma anual. Una vez obtenidos los conglomerados, en cada uno de ellos se evaluó la fracción de los diferentes tipos de uso del suelo a través del sistema de información geográfica QGIS. Esto tuvo como propósito identificar de manera estadística la relación del uso del suelo sobre la calidad del agua del río.

Así, la propuesta de criterios para la preservación del agua en Sinaloa se basó en diseñar medidas de prevención y mitigación para cada una de las actividades relacionadas con los subgrupos formados en el análisis de conglomerados. Las actividades de los subgrupos se derivan del análisis de uso del suelo obtenido que genera QGIS. Cada una de las medidas de mitigación y prevención que se propondrán consideran los desarrollos tecnológicos actuales basados en mediciones en tiempo real. Asimismo, las medidas de mitigación están en función de los niveles de contaminación identificados en la cuenca hidrológica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Usos de suelo en la cuenca del río Presidio

En la Figura 1 se observó la cuenca del río Presidio, con los principales usos del suelo identificados. Como puede verse en dicha figura, no solamente se tienen actividades primarias, sino que también se identificaron sitios mineros al este y al oeste de la cuenca alta. Además, es evidente la agricultura intensiva en la cuenca media y baja, con una importante proporción urbana y acuícola. Por todo lo anterior, la calidad del agua del río Presidio es un indicador del impacto que todas las actividades antropogénicas puedan ocasionar en la cuenca y puede servir como modelo para otras cuencas hidrológicas que tengan al menos un uso del suelo identificado como la cuenca del río Presidio.

Metales pesados en la cuenca del río Presidio

El análisis de metales pesados indica la presencia de Cr en la corriente del río Presidio. La Figura 2 muestra que las concentraciones registradas en la cuenca son similares en la mayoría de los sitios de muestreo. Sin embargo, el promedio de cada sitio va en incremento conforme la corriente recorre la cuenca (río abajo), teniendo registros más altos en el sitio RP7 con valores promedio de 0.00741 ± 0.008 mg/L (Tabla 4). Esto puede deberse al mecanismo de transporte de flujo pistón que viene arrastrando este metal desde cuenca arriba hacia la zona más baja (Rojas-Vargas y García-Pérez, 2010).

Es importante mencionar de esta Tabla 4 que las desviaciones estándar no son una herramienta estadística confiable ya que son muestreos multiparamétricos de distintos puntos geográficos, por lo que solamente se pusieron algunos como ejemplificación de esta falta de congruencia. Esto puede corroborarse en las Figuras 2a y b donde se presentan los valores máximos y mínimos en cada punto de muestreo para los dos metales cromo y níquel y el metaloide arsénico.

Tabla 4. Concentraciones promedio y desviaciones estándar de los parámetros de calidad del agua en la cuenca del río Presidio

Sitio	Cromo	D.E.	Níquel	Arsénico	D.E.	<i>E. coli</i>	Coliformes	NH ₃	D.E.	PT
	(mg/L)*		(mg/L)	(mg/L)		(NMP)	fecales (NMP)	(mg/L)		(mg/L)
	Prom*	D.E.	Prom							
RP1	0.006	0.006	0.002	0.010	0.001	27	2904	0.22	0.2	0.09
RP2	0.006	0.005	0.001	0.010	0.001	84	2660	0.12	0.13	0.08
RP3	0.006	0.009	0.002	0.011	0.001	874	2539	0.11	0.1	0.14
RP4	0.007	0.007	0.003	0.011	0.005	537	537	0.12	0.09	0.15
RP5	0.006	0.006	0.002	0.011	0.005	1758	14554	0.15	0.12	0.17
RP6	0.005	0.002	0.002	0.010	0.001	7666	8803	0.11	0.08	0.12
RP7	0.007	0.008	0.003	0.018	0.005	1094	14030	0.2	0.15	0.22
RP8	0.005	0.003	0.001	0.010	0.001	3120	10430	0.1	0.07	0.11

*Prom: Promedio; D.E.: Desviación estándar

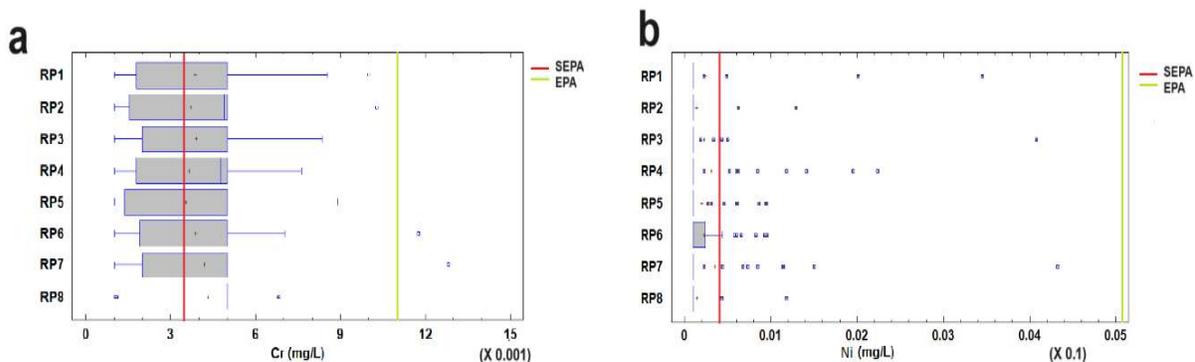


Figura 2a. Distribución de los metales pesados en la cuenca del río Presidio: **a** Cromo, **b** Níquel

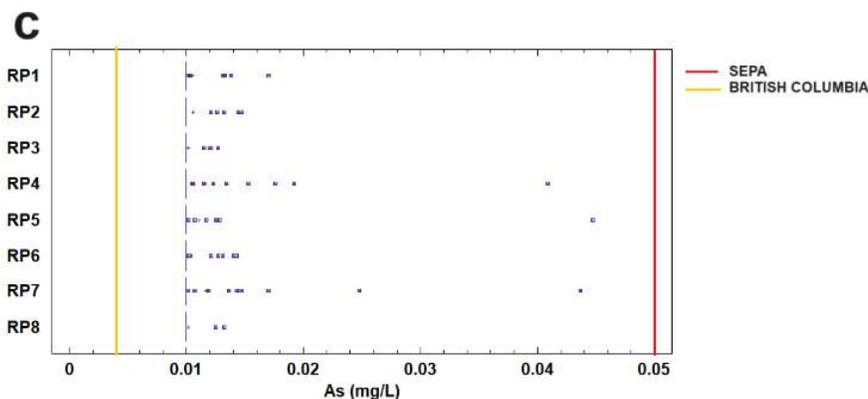


Figura 2b. Distribución de los metales pesados en la cuenca del río Presidio: **c** Arsénico

Por su parte, el Ni se encuentra en concentraciones con una mediana de 0.001 mg/L y promedios desde 0.001 a 0.003 mg/L, mismos que son aceptables por los estándares establecidos por la EPA ($\text{Ni} < 0.052 \text{ mg/L}$). Sin embargo, para el caso de los estándares establecidos por la SEPA de Suecia, en todos los sitios de muestreo existen muestras que rebasan este límite máximo ($\text{Ni} < 0.004 \text{ mg/L}$). Principalmente, el sitio RP7 es el que mantiene la concentración más alta registrada con 0.0432 mg Ni/L (Figura 2a con el inciso **b**).

Finalmente, para el As se registraron concentraciones promedio de 0.010 a 0.018 mg/L, siendo la del sitio RP7 la que registró la concentración más alta ($0.018 \pm 0.005 \text{ mg/L}$). Asimismo, las concentraciones máximas observadas oscilaron entre 0.013 y 0.044 mg/L, registrándose esta última en el sitio RP5. Con respecto de los estándares internacionales, la cuenca del río Presidio cumple con el límite establecido por la SEPA ($\text{As} < 0.05 \text{ mg/L}$). Sin embargo, las concentraciones rebasan a lo establecido por la entidad canadiense British Columbia Water Quality Guidelines ($\text{As} < 0.005 \text{ mg/L}$). Dentro de los criterios establecidos por la normativa mexicana (NOM-001-SEMARNAT-2021), los dos metales pesados y el metaloide cumplen con las concentraciones permitidas en corrientes de agua superficial ($\text{Cr} < 1 \text{ mg/L}$, $\text{Ni} < 2 \text{ mg/L}$, $\text{As} < 0.2 \text{ mg/L}$).

A pesar de lo arriba mencionado, es de suma importancia considerar la vigilancia mediante análisis de laboratorio certeros de contaminantes persistentes como los elementos potencialmente tóxicos estudiados, especialmente, de metaloides como el As, que se encuentran en niveles traza en los cuerpos de agua. Naturalmente, si el agua del río Presidio fuera a emplearse para consumo humano directo, debería seguir la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-2021 (DOF, 2021b): Cr total 0.05 mg/L, Ni 0.07 mg/L, As 0.025 mg/L. Esto deberá tomarse en cuenta para las comunidades que sí usen el río Presidio para consumo humano directo recomendando tratamientos de potabilización. Especialmente para el arsénico está la Tabla 5 de la norma que señala que deberá reducirse a 0.01 mg/L paulatinamente hasta 2029.

Parámetros microbiológicos

En el análisis de los parámetros microbiológicos, se observó que a lo largo de la cuenca se registran altas concentraciones de coliformes fecales y *E. coli* en la corriente del río Presidio. La presencia promedio de contaminación por patógenos oscila entre 2,539 y 14,554 NMP coliformes fecales/100 mL, observándose el promedio más alto en el sitio RP5 (Figura 3, Tabla 4). La mediana más alta se registra en el sitio RP8, correspondiente a la desembocadura del río sobre el Océano Pacífico, con una concentración de 6,700 NMP coliformes fecales/100mL. Mientras que el sitio RP7 registra la concentración máxima más alta de la cuenca con 198,630 NMP/100mL.

Con base en los estándares de la normativa mexicana para corrientes que se vierten en el río debe cumplirse esto: $1,000 < \text{CF} \leq 10,000 \text{ NMP/100mL}$, por lo que se considera que el agua del río Presidio

se encuentra en su fase "Contaminada" por estos agentes microbiológicos. Y si se toma la NOM-127-SSA1-2021 en su Tabla 6 de la norma (DOF, 2021b) está aún más contaminado:

<i>E. coli</i> o Coliformes termotolerantes	<1.1 ó No detectable	NMP/100 mL
	<1	UFC/100 mL
	Ausencia	Ausencia o Presencia/100mL

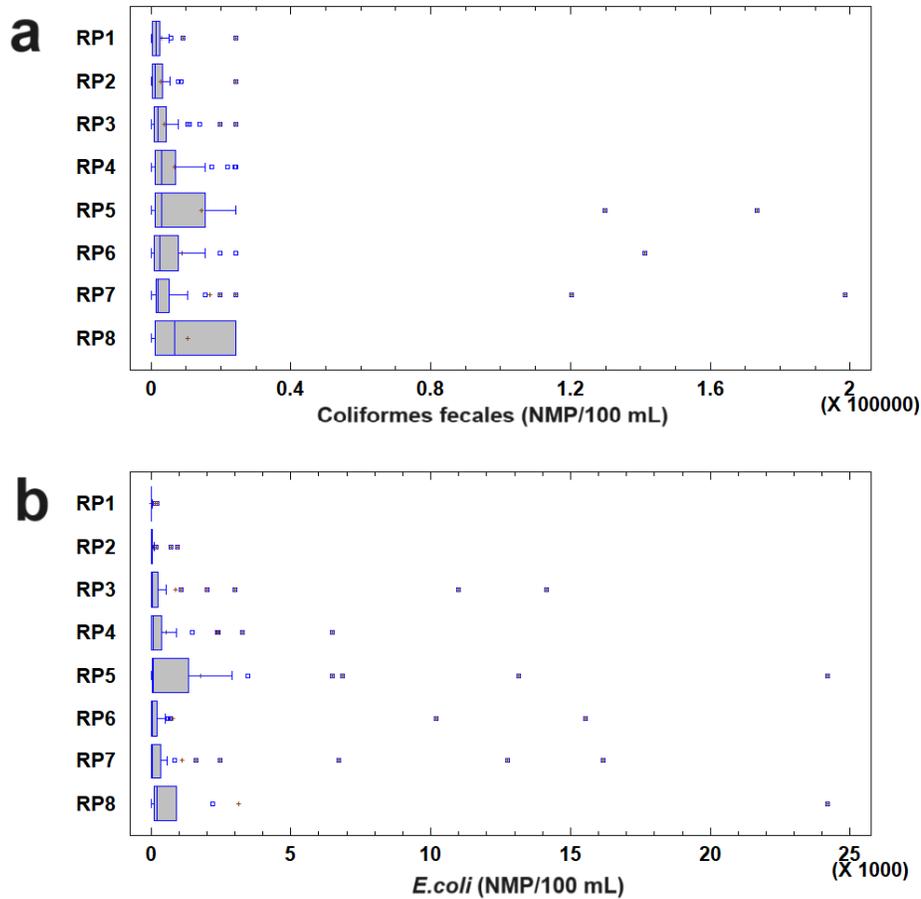


Figura 3. Distribución de agentes microbiológicos en la cuenca del río Presidio

Dentro de los agentes microbiológicos destaca un parámetro para medir la calidad del agua, *Escherichia coli*. El microorganismo *E. coli* tiene registros en la cuenca que van desde 27 hasta 3,120 NMP/100mL, observándose el promedio más alto en el sitio RP8, correspondiente a la desembocadura del río. Además, los sitios RP8 y RP5 fueron los que presentaron concentraciones máximas más altas a lo largo de la cuenca con concentraciones de hasta 24,196 NMP/100mL. De acuerdo con la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF, 2021a), la cual establece que el límite máximo permisible de este patógeno en aguas superficiales, la concentración permitida es de 250 NMP/100mL como promedio mensual. Es importante mencionar que los estándares internacionales consideran diferentes parámetros dependiendo del uso que se le dará al recurso hídrico.

En el caso del río Presidio, el agua se usa principalmente para el riego de cultivos agrícolas y sustento de actividades domésticas. La *British Columbia Water Quality Guidelines* establece que, para riego agrícola, el agua debe cumplir un límite máximo permisible de 1000 NMP/100mL, por lo que RP5, RP7 y RP8 no cumplen con esta consideración (Figura 3).

Por su parte, la desembocadura es sobre el Océano Pacífico por lo que el agua de esa zona está estrechamente relacionada con actividades recreativas. Para este uso el límite máximo permisible es de ≤ 200 NMP *E. coli* /100 mL. Para este servicio, el agua de la desembocadura que llega al Océano Pacífico tampoco cumple con los requerimientos ya que el promedio de este sitio asciende a 3,120 NMP/100mL. Por su parte, los sitios que cumplen con este límite son RP2 y RP1. Todo lo anterior implica que, para consumo humano, definitivamente se requiere un tratamiento de potabilización completo (DOF, 2021b).

Nutrientes

La distribución de los nutrientes sobre la cuenca del río Presidio se establecieron por medio de los parámetros NH_3 y PT. Para determinar la magnitud de su presencia en el agua superficial se consideró la *British Columbia Water Quality Guideline* (BCWQG, 2021), la cual hace su referencia considerando el pH y temperatura del agua para determinar el límite máximo permisible de este nutriente. La Figura 4 muestra la distribución de los nutrientes sobre la cuenca del río Presidio, mientras que la Tabla 5 muestra el límite máximo permisible de NH_3 con base en el pH y temperatura del sitio de muestreo.

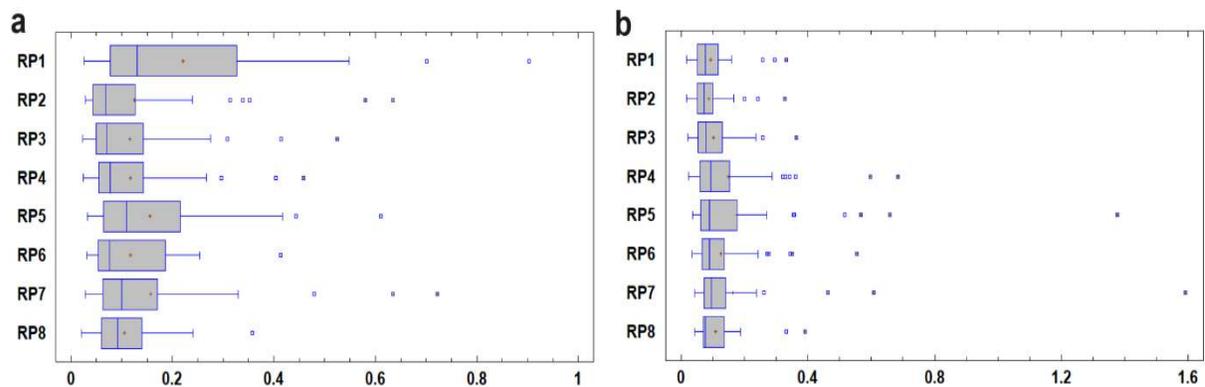


Figura 4. Distribución del NH_3 (mg/L) y el fósforo total, PT (mg/L) (medido como fosfatos) en la cuenca del río Presidio

Tabla 5. Distribución espacial de NH_3 y pH en el río Presidio

Sitio de muestreo	pH	Temperatura del agua (°C)	NH_3 (mg/L)	Límite máximo permisible NH_3 (mg/L) (DOF, 2021a)	Límite máximo permisible NH_3 (mg/L) (DOF, 2021b)*
RP1	7.9	28.5	0.155	0.904	0.50
RP2	7.9	28.6	0.117	0.904	0.50
RP3	8.0	27.8	0.115	0.762	0.50
RP4	8.3	27.4	0.125	0.396	0.50
RP5	7.8	25.9	0.221	1.070	0.50
RP6	7.8	28.6	0.117	1.070	0.50
RP7	7.9	28.9	0.156	0.904	0.50
RP8	7.9	28.3	0.105	0.904	0.50

*NOM-127-SSA1-2021 (DOF, 2021b): Nitrógeno amoniacal (N-NH_3) 0.50 mg/L, pH 6.5 a 8.5

Se observa que las concentraciones promedio de NH_3 registradas en los sitios de muestreo van desde 0.10 a 0.22 mg/L. La concentración promedio más alta se observa en el sitio RP1, que es el mismo que registra la concentración máxima más alta con 0.902 mg/L. Este sitio se ubica aguas debajo de una

comunidad por lo que alguna fuente puntual de contaminación pudiera estar alterando la concentración de este sitio con respecto del resto los sitios. De acuerdo con lo establecido por la normatividad internacional, los sitios de muestreo cumplen con lo establecido por la BCWQG (2021) para proteger la vida acuática, al estar por debajo de los límites máximos permisibles. De la misma forma, para uso y consumo humano directo todos los sitios de muestreo cumplen con lo establecido por la NOM-127-SSA1-2021, ya que ninguno excede 0.50 mg/L, que es la concentración de NH_3 .

Por su parte, el pH cumple con los estándares establecidos por las dos normas oficiales mexicanas consideradas (DOF, 2021a,b), las cuales mencionan que las aguas superficiales como ríos deben permanecer en un intervalo de 6-9 UpH y para consumo humano directo 6.5 a 8.5 UpH.

Para el caso del PT, las entidades mexicanas no tienen establecido un límite máximo permisible para este nutriente. Sin embargo, con base en la USEPA ha establecido un límite recomendado de 0.1 mg PT /L para ríos y, de esta forma, evitar el crecimiento excesivo de algas (Litke, 1999). La distribución que presenta el PT en la cuenca del río presidio muestra que las concentraciones promedio del nutriente va desde 0.08 mg/L a 0.22 mg/L, observándose el promedio más alto en el sitio RP7 y reportándose la concentración máxima más alta con 1.59 mg/L. De esta manera, se observa que solamente los sitios RP1 y RP2 cumplen con esta regulación internacional, mientras que el resto de la red de monitoreo excede este límite.

Distribución espacial de la calidad del agua de la cuenca del río Presidio

Para formar los conglomerados, el procedimiento comenzó con cada observación en un grupo separado. Luego combinó las dos observaciones que estaban más juntas para formar un nuevo grupo. Después de volver a calcular la distancia entre los grupos, se combinaron los dos grupos más cercanos entre sí. El proceso se repitió hasta que quedó un solo grupo. A medida que se van combinando los grupos, la distancia entre ellos se hace más grande, indicando que existe una mayor diferencia entre grupos.

En la Figura 5, se observa que un primer grupo está formado por los sitios RP1, RP2 y RP7. A pesar de que geográficamente los sitios se encuentran distantes entre sí, comparten similitud en concentraciones de NH_3 , que está asociado a descargas de fuentes puntuales. Por la localización de los sitios RP1 y RP2, es evidente que la zona cuenta con fosas sépticas en comunidades de menos de 10,000 habitantes. Esto se infiere al tener similitud en las concentraciones de coliformes fecales y *Escherichia coli* registrados en los monitoreos, ya que comparten similitud en las medianas y promedios de estos agentes microbiológicos.

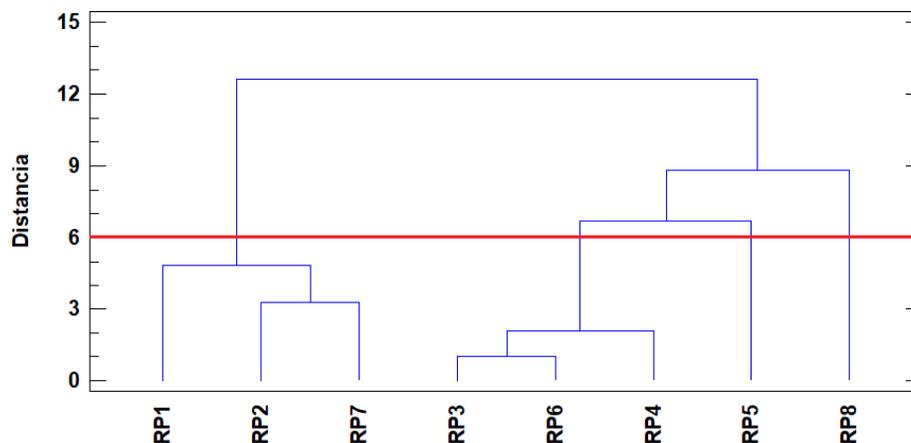


Figura 5. Dendrograma de los sitios de muestreo en la cuenca del río Presidio $n = 192$

Por otro lado, los sitios RP3, RP6 y RP4 forman un segundo grupo. Estos sitios se encuentran de forma contigua sobre suelo agrícola. De esta forma la similitud entre ellos está basada en las concentraciones de NH₃ y PT donde presentan concentraciones promedio y máximas similares entre sí, las cuales van de 0.11 a 0.12 mg NH₃/L y 0.413 a 0.634 mg PT/L. Un tercer y cuarto grupos están determinados por los sitios RP5 y RP8 de manera individual. Esto ocurre debido a que las concentraciones de los parámetros de calidad de agua son muy diferentes al resto de los sitios de la red de monitoreo. En el caso particular del RP5, muestra concentraciones muy altas de NH₃ y Cr, por lo que se infiere que la zona urbana está impactando con alguna descarga puntual sobre el cuerpo de agua. Por su parte, el sitio RP8 es el sitio que mayor concentración de coliformes fecales tiene, así como de *Escherichia coli*. Además, también es el que menor cantidad muestra de PT, metales, metaloides y NH₃ por lo que al estar en la desembocadura y tener vegetación nativa de la zona pudiera estar ocurriendo un proceso de fitorremediación.

Propuesta de criterios técnicos para la cuenca del río Presidio

Con base en el análisis de la información recabada en las secciones anteriores, en la Tabla 6 se indican los criterios a considerar para la gestión de la calidad y disponibilidad del agua en cuencas hidrológicas con actividades intensivas. Es importante considerar que dichos criterios incluyen emplear nuevas tecnologías basadas en la aplicación de sensores y control automático, combinado con análisis estadísticos multivariante.

Tabla 6. Posibles criterios técnicos derivados del análisis de la situación de la cuenca del río Presidio. Las Instancias internacionales se refiere a cualquiera que considere lineamientos para cuerpos de agua lóticos o corrientes de agua fluyendo en una misma dirección como la USEPA (1999), SEPA (2015) y la *British Columbia Water Quality Guideline (BCWQG, 2021)*

Criterio técnico	Medida de mitigación sugerida
Los niveles de elementos potencialmente tóxicos exceden, al menos una vez al año, lineamientos internacionales sobre calidad del agua en ríos	Implementación de sistemas de tratamiento enfocados a la recuperación de metales en la industria minera
Los niveles de elementos potencialmente tóxicos muestran una clara tendencia a incrementarse	Supervisión y control de presas de jales Monitoreo de metales en fauna y sedimentos Incorporación del seguimiento en tiempo real del pH para conocer los estados de oxidación de los metales
En un tercio de los puntos de muestreo de la cuenca media y baja se exceden en al menos dos ocasiones los LMP de coliformes en la descarga Los niveles de coliformes en aguas superficiales son tan altos que exceden los LMP de descarga de aguas residuales En la desembocadura de los ríos, los valores de coliformes exceden el 50% del máximo recomendado para descargas de aguas residuales	Descentralización de los sistemas de tratamiento de aguas residuales Inspección de la red de drenaje sanitario de las comunidades de la cuenca alta, media y baja Garantía de eficiencia de los sistemas de desinfección Inclusión del seguimiento en tiempo real de la transparencia en los sitios de la cuenca baja
Los niveles de nitrógeno amoniacal en la cuenca baja se encuentran por arriba del recomendado por instancias internacionales Los niveles de fósforo total en la cuenca media y baja exceden 0.1 mg/L	Descentralización de los sistemas de tratamiento de aguas residuales Control en el uso de tensoactivos a través de programas de concientización y sustitución de productos químicos Reingeniería de plantas de tratamiento con sistemas secundarios capaces de remover nutrientes Procurar contar con soluciones basadas en la naturaleza como los humedales artificiales y naturales que naturalmente captan nutrientes. Considerar la reforestación de humedales naturales y plantear la obligatoriedad para quienes deseen instalar granjas acuícolas de restaurar los humedales destruídos al momento de hacerlo y al término de su actividad

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio de la calidad del agua a nivel de cuenca hidrológica permite analizar de manera integral el grado, las fuentes y el movimiento de los diferentes contaminantes que pueden liberarse a los ecosistemas acuáticos. Actualmente el río Presidio denota problemas de elementos potencialmente tóxicos, nutrientes y presencia de patógenos, desde la cuenca media hasta la desembocadura del río.

La combinación de herramientas de sistemas de información geográfica, estadística multivariante y análisis detallado de la calidad del agua que permitirán en una siguiente etapa establecer criterios técnicos y medidas de mitigación enfocados a resarcir el impacto ambiental identificado, y de esta manera preservar la calidad del agua que se utiliza como suministro de actividades económicas y domésticas.

Esta metodología podría ser aplicable a diferentes cuencas hidrológicas de México y en cualquiera que cuente con programas o redes de monitoreo de la calidad del agua. Estas pueden ser robustecidas añadiendo técnicas de seguimiento en tiempo real de variables claves identificadas como en el presente estudio.

Con base en los resultados, es evidente la necesidad de un estudio de factibilidad técnica y económica de la implementación de tecnologías en el proceso de monitoreo de calidad del agua en la cuenca del río Presidio, lo que generaría futuras investigaciones que darían soporte a los hallazgos encontrados en esta primera etapa.

GLOSARIO

Términos y siglas	Significado
AC	Técnicas de análisis tipo conglomerados ('cluster' en inglés)
CONAHCYT-TECNM/ITCuliacán	Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías-Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Culiacán, México
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Gobierno de México, Ciudad de México, México
Cuerpos de agua lóticos o corrientes	Son las masas de agua que se mueven siempre en una misma dirección como ríos, manantiales, riachuelos, arroyos, ramblas (https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/aguas-superficiales/categorias_y_tipos_de_masas_de_agua.html)
ICA	Índice de la calidad del agua
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México ¹⁹
Presa de jales	Obra de ingeniería para el almacenamiento y disposición final de los jales, cuya construcción y operación ocurren simultáneamente. De acuerdo con el Diccionario de Aztequismos de Don Luis Cabrera, los jales son depósitos de arenas metalíferas, desechos del beneficio de los minerales, acumulados cerca de las haciendas del beneficio. Xales, plural de Xal. El sonido de la (letra catalana y vasca usada al inicio de la Conquista Española de México para el sonido 'sh' que no existe en español) y que se transformo en J (como en México). Etimología: Plural en español de <i>xalli</i> , arena o partícula muy fina (Cabrera, 2002)
Sistema de información	Se empleó para evaluar la fracción de los diferentes tipos de uso del suelo

¹⁹ Nota de los(as) editores(as): La letra I era de Informática pero en el sexenio anterior del Gobierno de México la parte de información se eliminó aunque las siglas se mantuvieron

Términos y siglas	Significado
geográfica QGIS	de la zona de estudio

RECONOCIMIENTOS

Los dos primeros autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías por el financiamiento económico otorgado a través de la beca 633513. Además, el tema es parte del proyecto de Investigadores por México 2572.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akhtar, N., Syakir-Ishak, M.I., Bhawani, S. A., Umar, K., 2021. Various natural and anthropogenic factors responsible for water quality degradation: A review. *Water*. 13(19): 2660. <https://doi.org/10.3390/w13192660>
- Bouaroudj, S., Menad, A., Bounamous, A., Ali-Khodja, H., Gherib, A., Weigel, D.E., Chenchouni, H. 2019. Assessment of water quality at the largest dam in Algeria (Beni Haroun Dam) and effects of irrigation on soil characteristics of agricultural lands. *Chemosphere*. 219:76-88.
- BCWQG. 2021. British Columbia Water Quality Guidelines. British Columbia Ministry of Environment and Climate Change Strategy. Canadá. <https://www2.gov.bc.ca/gov/content/environment/air-land-water/water/water-quality/water-quality-guidelines/approved-water-quality-guidelines>
- Cabrera, L. 2002. Diccionario de aztequismos. Luis Cabrera no llevo a conocer la versión final de su Diccionario, que fue puesto en orden y revisado por J. Ignacio Dávila Garibi y que ahora se publica por primera vez. Para tal efecto Luis Reyes García revisó los términos nahuas y Esteban Inciarte los que aparecen en latín. Colofón, S.A. 5a Ed. ISBN 968-867-038-3. Ciudad de México, México
- CONAGUA. 2020. Informe. Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. https://sigaqis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/sinaloa/DR_2509.pdf
- CONAGUA. 2022. Información de calidad del agua. <https://app.conagua.gob.mx/ica/Contenido?n1=1&n2=1>
- CONSELVA. 2022. Reporte. CONSELVA. <https://conselva.org/conoce-tu-cuenca-rio-presidio/#:~:text=El%20r%C3%ADo%20principal%20nace%20en,Concordia%20y%20Rosario%20en%20Sinaloa>
- DOF. 2021a. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. SEMARNAT, Ciudad de México, Mexico. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0
- DOF. 2021b. Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Diario Oficial de la Federación (DOF: 02/05/2022). Gobierno de México. Ciudad de México, México. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0
- EPA. 1986. GUIDELINE Quality Criteria for Water. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-10/documents/quality-criteria-water-1986.pdf>
- INEGI. 2001. Mapa. <https://www.inegi.org.mx/temas/fisiografia/#descargas>
- Litke, D.W. 1999. Reporte. <https://pubs.usgs.gov/wri/wri994007/>
- Mendivil-García, K., Amábilis-Sosa, L.E., Roé-Sosa, A., Náhuat, L.V. 2021. Escenarios futuros de la calidad del agua del río Culiacán, México. Efectos del calentamiento global, cobertura agrícola y crecimiento poblacional. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*. 12(30):46-57.
- Puente-Miranda, D.G., Valenzuela-García, I., Alarcón-Herrera, M. 2023. Determinación histórica de índices de calidad del agua en observatorios participativos en el norte de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 39:127-137. doi: <https://doi.org/10.20937/RICA.54525>
- Rashid, I.S., Parveen, A., Muhammad J.I., Murid, H. 2021. A state-of-the-art review on wastewater treatment techniques: The effectiveness of adsorption method. *Environmental Science and Pollution Research*. 28:950-9066. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12395-x>
- Rojas-Vargas, A., García-Pérez, A. 2010. Análisis de la curva de distribución del tiempo de residencia en un sistema de lixiviación. *Tecnología Química*. 30(1):61-68. doi: <https://doi.org/10.1590/2224-6185.2010.1.%25x>
- SEGOB. 2016. Acuerdo. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_to_doc.php?codnota=5451865
- SEPA. 2015. Sweden Environmental Protection Agency. REGULATION. Swedish Agency for Sea and Water Management, regulation HVMFS 2015. <https://www.havochvatten.se/download/18.39e6d68414ca353051f2d15d/1429085661%20024/HVMFS+2015-4-ev.pdf>
- USEPA. 1999. Review of Phosphorus Control Measures in the United States and Their Effects on Water Quality. U.S. Geological Survey. United States Environmental Protection Agency. Denver, Colorado, Estados Unidos.
- Vázquez-Ochoa, L.A., Correa-Sandoval, A., Vargas-Castilleja, R.d.C., Vázquez-Sauceda, M.d.I.L., Rodríguez-Castro, J.H. 2021. Modelo hidrológico, calidad del agua y cambio climático: Soporte para la gestión hídrica de la cuenca del río Soto la Marina / *Hydrological model, water quality and climate change: support for the integral management of the Soto la Marina river watershed*. *Ciencia UAT*. 16(1):