



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA



Facultad de Ingeniería Química
Colegio de Ingeniería Ambiental

**Evaluación de la calidad fisicoquímica y microbiológica
de la microcuenca RH18Ae de la zona de San Pedro
Atlixco - San Baltazar Atlimeyaya - Metepec, Puebla.**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
Licenciatura en Ingeniería Ambiental**

**PRESENTA
Mildred Nolasco Espíndola**

**DIRECTOR DE TESIS
Dr. José Víctor Rosendo Tamariz Flores**

**CO-ASESOR DE TESIS
M.C. Leticia Gómez Velázquez**

Puebla, noviembre 2025

Agradecimientos

A mis padres, por enseñarme que con amor, esfuerzo y constancia es posible alcanzar cualquier meta, y por brindarme siempre su apoyo incondicional.

A mis hermanos, por ser un sostén fundamental y un ejemplo de vida, y a mis sobrinos, cuyo amor y compañía fueron un refugio en momentos de dificultad y de gran estrés.

A Alí, quien, aunque no esté presente, fue una fuente constante de motivación, y a Maura, por acompañarme y apoyarme en muchas noches de desvelo. Asimismo, agradezco a esa persona que formó parte importante de mi vida durante varios años, cuya compañía y apoyo me impulsaron a crecer y a cumplir una promesa personal.

Expreso mi profundo agradecimiento al Dr. Tamariz, por su sabiduría y orientación; a la M.C. Leticia, por su invaluable apoyo y guía durante el desarrollo de esta tesis; y a la M.T. Eréndira, por sus enseñanzas, su amistad y por mostrarme que con compromiso y dedicación todo es posible.

Finalmente, agradezco a los amigos que encontré en este camino y que permanecieron a mi lado en las buenas y en las malas. Este trabajo está dedicado a todas las personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron a la culminación de este proyecto y al cierre de una etapa fundamental en mi formación.

Contenido

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.	2
CAPITULO I. ANTECEDENTES.....	4
1.1. Planteamiento del problema	4
1.2. Justificación	7
1.3. Objetivos	9
1.3.1. Objetivo general.....	9
1.3.2. Objetivos específicos	9
1.4. Hipótesis	10
1.5. Antecedentes generales	10
1.5.1. Disponibilidad del agua potable a nivel mundial.....	10
1.5.2. Disponibilidad de agua potable en México.	12
1.6. Antecedentes específicos	13
1.6.1. Contaminación del río Nexapa	13
1.6.2 Contaminación del agua en la microcuenca RH18Ae en los municipios de Atlixco-Tianguismanalco.....	14
1.7. Bases teóricas.....	15
1.7.1. Propiedades importantes del agua.	15
1.7.2. Calidad del agua	16
1.7.3. Parámetros fisicoquímicos en la calidad del agua	18
1.7.4. Metales pesados	23

1.7.5. Parámetros microbiológicos en la calidad del agua	24
1.7.6. Contaminación del agua.	26
1.7.7. Impactos negativos de la contaminación del agua en la salud pública.	36
CAPITULO II. METODOLOGÍA	43
2.1. Descripción de las zonas de muestreo.....	44
2.1.1. Tianguismanalco	44
2.1. 2. Atlixco.....	45
2.2. Muestreo	48
2.3. Parámetros fisicoquímicos, metales y microbiológicos del agua.....	50
2.3.1. Fisicoquímicos	50
2.3.2. Metales	54
2.3.3. Microbiológicos	55
2.4. Determinación aproximada del Índice de Calidad del Agua	56
2.5. Determinación de las fuentes de contaminación	59
CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
3.1. Resultados de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de temporada de lluvias en los municipios de San Pedro Atlixco-San Baltazar Atlimeyaya-Metepec, Puebla.....	60
3.1.1. Parámetros fisicoquímicos.....	60
3.1.2. Resultados microbiológicos	62
3.1.3. Resultados de metales	63
3.2. Resultados de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de temporada de secas en los municipios de San Pedro Atlixco-San Baltazar Atlimeyaya-Metepec, Puebla.....	64

3.2.1. Parámetros fisicoquímicos.....	64
3.2.2. Resultados microbiológicos.	66
3.2.3. Resultados de metales.	67
3.3. Índice de Calidad del Agua (ICA)	68
3.3.1. Resultados del ICA	68
3.3.2. Comparación de temporada de lluvia- secas.	69
3.4. Resultados según la NOM-127-SSA1-2021.....	70
3.4.1. Resultados significativos de NOM-127-SSA1-2021 en temporada de lluvia.	70
3.4.1.1. <i>Resultados microbiológicos en temporada de lluvia.</i>	70
3.4.1.2. <i>Resultado de metales en temporada de lluvia.</i>	71
3.4.2. Resultados relevantes de NOM-127-SSA1-2021 en temporada de secas	73
3.5. Comparación entre el mes de lluvias 2024 y secas 2025 de la NOM-127-SSA1-2021.....	77
3.5.2. Comparación de microbiológicos.....	77
3.5.3. Comparación de resultados de metales	78
3.6. Resultados según la RENAMECA para calidad de agua superficial	83
3.6.1. Calidad de agua RENAMECA para cuerpos lóticos	83
3.7. Revisión bibliográfica del origen de la contaminación en la microcuenca RH18 Ae.	85
3.7.1. Origen natural.	85
3.7.2. Origen antrópico.	91
3.8. Discusión	94
CONCLUSIONES.....	97
BIBLIOGRAFÍA.....	100

Resumen

La presente tesis tiene como objetivo evaluar la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua en la microcuenca RH18Ae en las localidades de San Pedro Atlixco, San Baltazar Atlimeyaya y Metepec, Puebla. El estudio se desarrolló considerando los factores ambientales y antrópicos que influyen en las comunidades analizadas.

La metodología fue de tipo experimental y documental, basada en análisis reconocidos a nivel nacional e internacional, con el fin de obtener una aproximación de la calidad del agua conforme a los criterios de la Comisión Nacional del Agua, la Fundación Nacional de Saneamiento de los Estados Unidos, y la Norma Oficial Mexicana NMX-127-SSA1-2021 para agua de uso y consumo humano, además de una revisión bibliográfica para identificar posibles fuentes de contaminación.

Los resultados evidencian una contaminación microbiológica significativa, y alteraciones fisicoquímicas asociadas a la presencia de metales, atribuibles a descargas pluviales clandestinas y a las características volcánoclasticas del suelo, el cual representa un riesgo por el arrastre de metales durante los procesos de erosión y deslave, siendo un problema relevante para la salud de la población.

A partir de estos hallazgos, se concluye que es necesario fortalecer la evaluación y gestión del recurso hídrico, así como regular las actividades rurales que puedan afectar su calidad y disponibilidad a corto plazo. De igual manera, se propone promover estudios más específicos sobre el impacto de la calidad del agua en esta región, dado su alto interés para los habitantes locales, con el fin de contribuir al desarrollo sustentable y a una adecuada toma de decisiones.

Introducción.

El agua ha sido reconocida por numerosos autores como una fuente esencial de vida, debido a sus propiedades únicas, las cuales resultan fundamentales en los procesos biológicos. Se estima que hace mil millones de años, este recurso fue el medio en el que surgieron las primeras formas de vida en el planeta Tierra, como resultado de procesos biológicos primitivos, entre ellos la fotosíntesis realizada por el primer microorganismo, el fitoplancton.

En el transcurso de la evolución humana se ha buscado que los asentamientos se ubiquen en zonas adyacentes a cuerpos de agua para su supervivencia y desarrollo. En la actualidad, el agua continúa siendo una de las materias primas esenciales en el día a día, empleándose prácticamente en todos los sectores productivos, incluyendo la industria, la generación de energía y la producción de alimentos. De esta manera se consolida como uno de los principales recursos de uso y consumo humano.

No obstante, su relevancia no se limita al ser humano. El agua cumple un rol insustituible en el mantenimiento de la homeostasis de los ecosistemas, la regulación climática global y el funcionamiento integral de todos los organismos vivos.

En el planeta Tierra, se estima que existen aproximadamente 1,386 millones de kilómetros cúbicos cubiertos de agua, lo que equivale a cerca del 70% de la superficie terrestre. La mayor proporción de esta cantidad corresponde al agua en estado líquido, aunque también se encuentra presente en forma sólida, como hielo, y en su estado gaseoso, como vapor. Estos estados físicos, son esenciales en la

dinámica natural de la Tierra, ya que participan en el ciclo hidrológico, un proceso dinámico y continuo de intercambio de agua entre la atmósfera, la litosfera y la biosfera, a través de mecanismos como la evaporación, condensación, precipitación, infiltración y escorrentía. Dichas interacciones entre el agua, la atmósfera y el suelo, permiten la renovación natural del recurso hídrico y regulan múltiples funciones ecológicas, climáticas y geológicas, siendo esenciales para la sostenibilidad de los ecosistemas y para el abastecimiento de agua dulce en el planeta.

El agua puede clasificarse de acuerdo con diversos criterios, sin embargo, una de las tipologías ampliamente aceptadas es aquella que se basa según su porcentaje de sales. Desde esta perspectiva, se divide en agua dulce y salada, la primera se caracteriza químicamente por presentar una concentración de sales inferior al 0.01% y la salada contiene alrededor del 3%.

A pesar de que el volumen total de este recurso en la Tierra es vasto, el agua dulce representa apenas el 3% del total, y de esta, solo una fracción mínima se encuentra disponible en forma líquida en ríos, lagos y acuíferos subterráneos, ya que el resto se halla retenido en glaciares, casquetes polares y zonas de difícil acceso. Esta escasa disponibilidad convierte al agua dulce en un recurso estratégico y vulnerable, cuya gestión sostenible se ha convertido en una prioridad global frente al crecimiento poblacional, la urbanización acelerada y los efectos del cambio climático.

La limitada disponibilidad de agua dulce resalta la importancia de las cuencas hidrográficas, ya que estas actúan como sistemas naturales de recolección y distribución del agua. Las cuencas regulan el flujo, recargan mantos freáticos y sustentan ecosistemas y comunidades humanas. Estas representan un valor

importante en el sustento de la vida, ya que, sin una gestión adecuada, la calidad y cantidad del agua disponible pueden verse seriamente afectadas, poniendo en riesgo el equilibrio ambiental y el acceso al recurso hídrico.

CAPITULO I. ANTECEDENTES

1.1. Planteamiento del problema

En México, aproximadamente el 60% del agua potable proviene de los cuerpos de agua superficiales (IMCO, 2023). De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua en 2023, México cuenta con una red hidrográfica de 633 mil kilómetros de longitud, donde destacan 50 ríos por los que fluye el 85.7% del escurrimiento superficial, y cuyas cuencas cubren el 65% de la superficie nacional.

México se encuentra conformado por 1,471 cuencas hidrológicas agrupadas por la CONAGUA en 37 regiones hidrológicas (RH) para sistematizar la información, análisis, diagnósticos, programas y acciones con relación a la calidad, cantidad, uso y explotación del agua (SEMARNAT, 2010). Las RH se encuentran conformadas por una o varias cuencas hidrológicas.

Uno de los principales elementos en riesgo dentro de las regiones hidrológicas es la calidad del agua, en particular la de los cuerpos de agua superficiales, debido a su alta susceptibilidad a la contaminación. Esta problemática se debe, en gran medida, a actividades antrópicas que alteran su composición fisicoquímica y biológica. Las principales causas de afectación son: el escurrimiento de fertilizantes, las descargas de aguas negras y el vertido de aguas residuales industriales que no han sido tratadas adecuadamente (Denchak, 2023).

En México, diversos organismos gubernamentales establecen parámetros para el monitoreo de la calidad del agua. Entre ellos destacan la CONAGUA, la Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua (RENAMECA) y la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-2021. Estas entidades y regulaciones definen los criterios utilizados para calcular el Índice de Calidad del Agua (ICA), que clasifica el estado del recurso en una escala de 0 a 100%, donde 0% representa agua muy contaminada y 100% es considerada como calidad óptima (SEMARNAT, 2020).

El ICA se basa en diversos indicadores fisicoquímicos y microbiológicos como: demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, oxígeno disuelto, coliformes fecales, coliformes totales, conductividad eléctrica, alcalinidad, dureza total, cloruros, pH, sólidos suspendidos totales, presencia de metales pesados, entre otros (SEMARNAT, 2020).

Cada año la CONAGUA publica estadísticas del agua en México, en su informe más reciente, correspondiente al año 2023, identificó varios cuerpos de agua superficial que presentan altos niveles de contaminación de acuerdo con el Índice de Calidad del Agua (ICA).

A nivel nacional, el 9.5% del agua fue clasificada como contaminada y el 4.2% como fuertemente contaminada por su concentración de Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO_5). Por la Demanda Química de Oxígeno (DQO), el 30.6% se catalogó como contaminada y el 5.4% como fuertemente contaminada. Para los Sólidos Suspendidos Totales (SST), el 10.3% presentó contaminación y el 5.8% se ubicó en la categoría de fuertemente contaminada. Finalmente, para el parámetro de los coliformes fecales (CF), determinó que el 31% estaba contaminada y un preocupante 34.2% fue clasificada como fuertemente contaminada (CONAGUA, 2023).

Estos datos evidencian las condiciones críticas de la calidad del agua en México, así como la preocupante disponibilidad del recurso para su aprovechamiento humano. Actualmente, varias entidades del país enfrentan severos problemas de escasez hídrica. De acuerdo con López (2019), aproximadamente el 10% de la población nacional carece de acceso al agua potable, lo que refleja una crisis que va más allá de la contaminación y la gestión del recurso.

En el estado de Puebla, una parte significativa de la población enfrenta limitaciones en el acceso regular al agua potable, ya que no dispone del recurso de forma continua o diaria. En muchos casos, el suministro se reduce a un promedio de tres veces por semana, lo que refleja una disponibilidad intermitente y deficiente. A pesar de la gravedad de esta situación, en los últimos años no se han generado registros oficiales actualizados que permitan evaluar con precisión la disponibilidad de agua a nivel estatal. No obstante, según Zambrano (2023), ha señalado que únicamente 3 de cada 10 hogares en la entidad reciben agua de manera diaria.

Cabe destacar que, en algunas zonas periféricas del estado, particularmente en aquellas cercanas a cuerpos de agua como ríos, ciertos pobladores tienen la posibilidad de acceder directamente a estas fuentes superficiales para cubrir sus necesidades básicas. Sin embargo, esta práctica no siempre garantiza la potabilidad del recurso, lo que plantea riesgos adicionales para la salud pública. Un ejemplo representativo de la problemática se observa en los municipios de Tianguismanalco y Atlixco, con énfasis en las localidades de San Pedro Atlixco, San Baltazar Atlimeyaya y, en menor medida, Metepec. En esta región, el territorio es atravesado por una microcuenca del río Nexapa, perteneciente a la Región Hidrológica 18Ae (RH18Ae). Este cuerpo de agua ha adquirido un importante valor según los locatarios y esto no solo por sus características naturales, sino también por su relevancia turística, económica y social.

El río Nexapa constituye una fuente vital para las comunidades aledañas, ya que de él dependen para diversas actividades cotidianas, incluyendo el abastecimiento doméstico, las labores agropecuarias, así como el desarrollo de actividades recreativas y turísticas. Sin embargo, esta estrecha dependencia hace necesario evaluar con rigurosidad las características de la calidad del agua, ya que su uso directo sin tratamiento previo puede implicar riesgos para la salud humana y para la sostenibilidad de los ecosistemas locales. La presencia de contaminantes físicos, químicos o biológicos, producto de descargas residuales o del uso intensivo del suelo, podría comprometer la integridad del recurso y limitar sus posibles usos.

Por lo tanto, el objetivo de la presente tesis es analizar las características físicas, químicas y biológicas del agua de la microcuenca RH18Ae en temporada de lluvias y secas con el fin de evaluar su calidad y determinar si su uso representa un riesgo o es apto para la salud de la población. Además, esta investigación pretende determinar las posibles causas de origen antropogénico y natural que se están incidiendo negativamente en la calidad del agua del río Nexapa.

1.2. Justificación

Durante años, la población mexicana ha enfrentado problemas relacionados a la disponibilidad de agua potable, debido a deficiencias en la infraestructura. Actualmente, México atraviesa una crisis severa del recurso hídrico, particularmente en las regiones centro y norte del país (CONAGUA, 2023), lo que ha generado una creciente preocupación por la gestión y calidad de los recursos hídricos a nivel nacional.

Dentro de este contexto, la cuenca del río Nexapa adquiere una relevancia particular, ya que abarca diversos municipios del estado de Puebla, entre ellos

Atlixco y Tianguismanalco. Estas localidades no solo dependen del agua para el abastecimiento básico, sino también para actividades económicas, recreativas y turísticas. Atlixco, designado como Pueblo Mágico, destaca por su abundante producción de flores, motivo por el cual ha sido reconocido como un lugar "donde todo crece". Esta riqueza natural se atribuye a su clima templado, la fertilidad de sus suelos —enriquecidos por la actividad volcánica del Popocatepetl— y la disponibilidad de agua superficial que atraviesa la región.

Las localidades del municipio de Tianguismanalco, como San Baltazar Atlimeyaya y San Pedro Atlixco, se caracterizan por la crianza de truchas en sus canales de agua, y por una pequeña cascada que atrae a visitantes y familias interesadas en disfrutar del entorno natural. Estas actividades no solo aportan valor turístico y cultural, sino que también dependen directamente de la calidad del agua proveniente de la cuenca del río Nexapa.

Por lo tanto, considerando el uso intensivo y diversificado del recurso hídrico en estas zonas, ya sea con fines ecológicos, económicos o turísticos, resulta imprescindible llevar a cabo una evaluación integral de su calidad, tanto en términos físicoquímicos como microbiológicos. Esta evaluación busca aportar evidencia preliminar sobre el grado de cumplimiento de los estándares de calidad del agua necesarios para sus distintos usos como base para orientar evaluaciones posteriores respecto a su aptitud para el consumo humano y viabilidad para sostener las actividades productivas que dependen de este recurso. Por lo tanto, existe la necesidad de generar información confiable y actualizada que contribuya a la evaluación del recurso hídrico

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Evaluar la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua, a partir de una estimación del Índice de Calidad del Agua (ICA) propuesto por la CONAGUA en algunos puntos de la microcuenca, así como de los parámetros establecidos en la NOM-127-SSA1-2021, considerando las variaciones entre la temporada de lluvias y la temporada seca

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua a través de la NOM-127-SSA1-2021, agua para uso y consumo humano.
- Calcular el Índice de Calidad del Agua (ICA) con base en los parámetros evaluados, utilizando la metodología oficial propuesta por CONAGUA.
- Comparar los resultados de la calidad del agua obtenidos durante la temporada de lluvias y la temporada seca, con el fin de identificar variaciones estacionales en los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.
- Verificar la presencia de contaminación microbiológica y de metales pesados en el agua, mediante el análisis de parámetros específicos establecidos en la NOM-127-SSA1-2021.
- Determinar las principales fuentes de contaminación de origen antropogénico o natural que afectan la calidad del agua.

1.4. Hipótesis

La calidad del agua en los cuerpos hídricos de los municipios de Atlixco y Tianguismanalco no cumplen con los parámetros establecidos en la NOM-127-SSA1-2021 para agua potable, ni con los criterios del Índice de Calidad del Agua (ICA) emitido por la CONAGUA para aguas superficiales. Esto puede representar riesgos para la salud humana y para el ambiente, independientemente de las variaciones estacionales.

1.5. Antecedentes generales

1.5.1. Disponibilidad del agua potable a nivel mundial.

El agua es el núcleo del desarrollo de todas las comunidades a nivel mundial. Sin embargo, millones de personas aún enfrentan serias dificultades para acceder a este recurso en las condiciones adecuadas, tanto en términos de disponibilidad como de calidad.

Esta situación ha sido documentada según la Organización de las Naciones Unidas, la cual ha reunido los principales desafíos del agua en el mundo (ONU), entre los que se destacan los siguientes:

- I. Alrededor de 2 200 millones de personas carecen de acceso a servicios de agua potable gestionados de forma segura y 115 millones de ellas la consumen directamente de fuentes superficiales, que suelen estar expuestas a altos niveles de contaminación por desechos humanos, animales e industriales (OMS/UNICEF, 2023a).

- II. El saneamiento inadecuado afecta negativamente la calidad del agua. Se estima que 3 500 millones de personas no disponen de servicios de saneamiento gestionados de forma segura, lo cual facilita la contaminación de cuerpos de agua por residuos orgánicos e incrementa el riesgo de enfermedades. Además, 419 millones de personas aún practican la defecación al aire libre, lo que agrava los problemas de contaminación fecal en fuentes hídricas (OMS/UNICEF, 2023b).
- III. La OMS ha estimado que mejorar las condiciones de agua, saneamiento e higiene podría evitar la muerte de 1.4 millones de personas al año, incluyendo la de 1,000 niños menores de cinco años cada día (OMS/UNICEF, 2023c).

Por otra parte, el 80% de las aguas residuales generadas a nivel mundial son vertidas nuevamente al ambiente sin tratamiento ni reutilización (ONU, 2018), lo que afecta directamente la calidad de ríos, lagos y acuíferos. Este fenómeno no solo degrada los ecosistemas acuáticos, sino que también reduce la disponibilidad de agua limpia para consumo humano y uso agrícola.

La situación se agrava en regiones con alto estrés hídrico, donde la presión sobre los recursos disponibles es mayor. Según la FAO, alrededor del 10% de la población mundial vive en países que enfrentan un estado crítico de escasez de agua. (FAO/ONU, 2024).

Además, se estima que el sector agrícola utiliza cerca del 70% del agua dulce extraída en el mundo, y en muchos casos, el uso de agroquímicos contribuye a la contaminación de fuentes hídricas (FAO, 2021).

1.5.2. Disponibilidad de agua potable en México.

El suministro de agua dulce de fácil acceso para consumo humano es alrededor de 0,003% del volumen total de agua (Marín, 2009).

Durante los últimos años México ha comenzado a evidenciar de manera progresiva los impactos negativos asociados a la escasez hídrica, fenómeno que se ha intensificado en las regiones centro y norte del país debido al aumento de las sequías. De acuerdo con datos del Banco Mundial, en el país la disponibilidad promedio anual per cápita pasó de 10 mil metros cúbicos en 1960 a 4 mil en 2012. Estimando que para el año 2030, esta disponibilidad podría reducirse por debajo de los 3 mil metros cúbicos por habitante al año (IMCO, 2023).



Figura 1 ¿Quién consume más agua en México? IMCO, 2023.

El sector agropecuario destaca como el principal consumidor de agua a nivel nacional (IMCO, 2020).

1.6. Antecedentes específicos

1.6.1. Contaminación del río Nexapa

El río Nexapa nace aproximadamente a 20 km al norte de la ciudad de Atlixco, sobre la falda oriental del volcán Popocatepetl, alimentado en su porción alta por los deshielos del volcán, del lado occidental, recibe aportaciones del río Cantarranas y de las barrancas, también tiene como afluentes a los ríos Atotonilco y Atila. Cuenta con una elevación de 4,610 m s.n.m. y desemboca a 677 m s.n.m. en la subcuenca Bajo Atoyac en el municipio de Cohetzala, Puebla, en un trayecto de longitud de 217.5 km. (Navarro, A & Cruz, J., (2023).

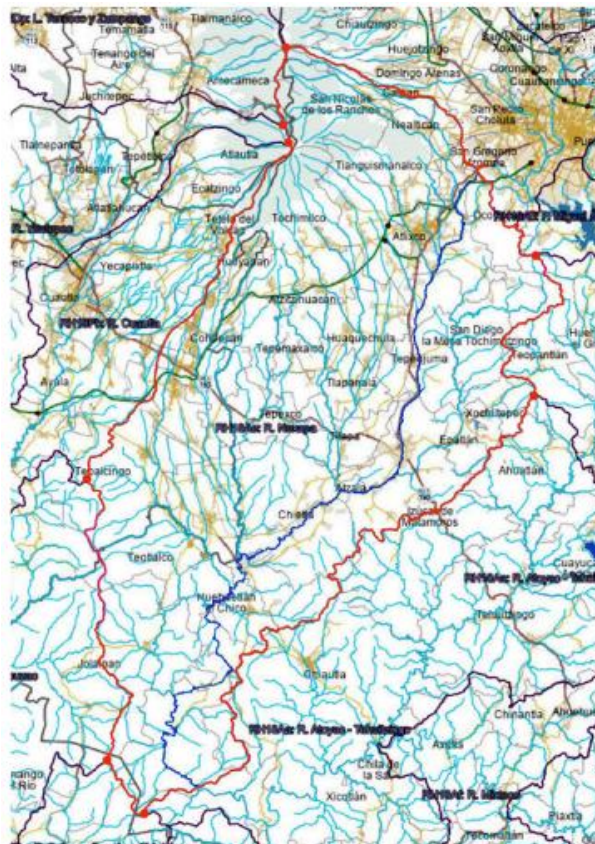


Figura 2. El río Nexapa y su cuenca, 2023, Navarro, A. & Cruz, J.

A pesar de que el río Nexapa es alimentado en gran medida por los deshielos del volcán Popocatepetl, investigaciones académicas realizadas por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) han demostrado que presenta una alta carga de contaminación por coliformes fecales (Torralba et al., 2014). También, se ha detectado la presencia de metales pesados como plomo, zinc, cadmio, cobre, arsénico y cromo, estos dos últimos superan los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT (Torralba et al., 2014).

Otras fuentes académicas como la Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros (UTIM), reveló que en las aguas residuales que corren en el río Nexapa se han identificado unos 400 componentes dañinos, pero “lamentablemente son usadas para regar nuestros cultivos en la región Mixteca y sur de la entidad poblana”. (Navarro, A. cómo se citó en Álvarez, E. 2024).

1.6.2 Contaminación del agua en la microcuenca RH18Ae en los municipios de Atlixco-Tianguismanalco.

Las regiones de Atlixco y Tianguismanalco se encuentran entre los municipios que son atravesados por el río Nexapa. A lo largo de este tramo, se han llevado a cabo diversos estudios para evaluar la calidad del agua, entre los cuales destaca uno realizado en el año 2002 por Silva et al., de acuerdo con los criterios establecidos en la NOM-001-ECOL-1996 y la NOM-127-SSA1-1994, los resultados revelaron que la calidad del agua es deficiente por, diversos contaminantes que exceden los límites máximos permisibles establecidos por las normas. Entre los principales contaminantes detectados se encuentran coliformes fecales, coliformes totales, nitritos, cadmio (Cd), nitrógeno amoniacal (N amoniacal), sustancias activas al azul de metileno (SAAM) durante las estaciones de primavera y verano, así como cromo (Cr) específicamente en la temporada de verano.

De acuerdo con Silvia et al. (2023), la presencia de estos contaminantes se debe, en gran medida, a la infiltración de aguas residuales en los mantos freáticos que pueden mezclarse con drenajes municipales, descargas industriales o fuentes superficiales contaminadas. Además, el agua de los ríos en la región tiende a mezclarse con aguas residuales y a arrastrar grandes cantidades de residuos sólidos. Los manantiales también presentan niveles significativos de contaminación, atribuibles al manejo inadecuado por parte de la población local y del turismo. Los escurrimientos naturales se ven afectados por la acumulación de desechos y la actividad ganadera no regulada, que utiliza estas fuentes de agua para abreviar y refrescarse, contribuyendo a su degradación (Silvia, et al., 2023).

1.7. Bases teóricas.

1.7.1. Propiedades importantes del agua.

El agua es una molécula formada por tres átomos: dos de hidrógeno y uno de oxígeno. En ella, el átomo de oxígeno actúa de forma negativa, mientras que el extremo del hidrógeno actúa de positivo, formando un enlace covalente polar simple que le confiere al agua su naturaleza polar. Gracias a esta polaridad, las moléculas de agua pueden interactuar entre sí mediante puentes de hidrógeno, en los cuales las regiones con carga negativa del oxígeno atraen las regiones con carga parcialmente positiva de los hidrógenos de moléculas vecinas (Arora, 2017).

Desde el punto de vista organoléptico, el agua se caracteriza por ser incolora, inodora e insípida.

El punto de ebullición del agua a la presión de una atmósfera a nivel del mar es de 100°C, y su punto de congelación en las mismas condiciones es de 0°C. Su densidad máxima se alcanza a los 3.8°C, siendo de 1g/mL. Tiene una tensión

superficial muy elevada. Además, presenta un calor específico de $1 \text{ cal/}^{\circ}\text{C}\cdot\text{g}$, lo que le permite absorber grandes cantidades de calor con mínimos cambios de temperatura, esto le confiere la propiedad de ser un termorregulador del clima (Marín, 2009).

El agua es considerada el disolvente universal, debido a que es el líquido que más sustancias disuelve, por ser una molécula polar. Esta propiedad se debe a su capacidad para formar puentes de hidrógeno con otras sustancias que pueden presentar grupos polares o con carga iónica. (Marín, 2009).

1.7.2. Calidad del agua

La calidad del agua es un atributo que refleja sus condiciones físicas, químicas y biológicas, esto permite determinar su aptitud para un uso en específico, en su evaluación se emplean diferentes parámetros que permiten identificar si el recurso cumple con los estándares establecidos para consumo humano, uso agrícola, recreativo o industrial (CONAGUA, 2015).

En México, la calidad del agua se mide sistemáticamente a través de la Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua (RENAMECA) operada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Esta red emplea el Índice de Calidad del Agua (ICA), como una herramienta que permite evaluar y comparar los niveles de contaminación. El ICA se define como el grado de contaminación existente en el agua, si es cercano o igual a 0% indican condiciones muy contaminadas y valores del 100% reflejan excelentes condiciones (SEMARNAT, 2011). El valor numérico de este índice se determinaba inicialmente mediante la evaluación de 18 parámetros. No obstante, la CONAGUA ha señalado que dicho índice presenta un carácter parcial y no refleja con precisión las condiciones reales de la calidad del agua. En consecuencia, se optó por sustituir los parámetros originales por tres indicadores

representativos de la influencia de las actividades humanas sobre el recurso hídrico: la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO_5) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST) (CONAGUA, 2020).

Otro modelo ampliamente utilizado para la evaluación de la calidad del agua es el Índice de Calidad del Agua de la National Sanitation Foundation (ICA-NSF), propuesto por Brown y colaboradores, y desarrollado por la Fundación de Sanidad Nacional de los Estados Unidos. Este método permite comparar la calidad del agua en distintos tramos de un mismo cuerpo hídrico, a partir de la evaluación de nueve parámetros: coliformes fecales, pH, DBO_5 , nitratos, fosfatos, cambio de temperatura, turbidez, sólidos disueltos totales (SDT) y oxígeno disuelto (OD) (Corrales, 2017).

La CONAGUA ha definido indicadores específicos divididos según la clasificación del agua. En el caso del agua superficial, los parámetros considerados son 8: DBO_5 , DQO, SST, Coliformes fecales (CF), *Escherichia coli* (E_COLI), Enterococos fecales (ENTEROC_FEC), porcentaje de saturación de Oxígeno Disuelto (OD%) y Toxicidad aguda (TOX). Por otro lado, los indicadores empleados para evaluar la calidad del agua subterránea son: Fluoruros (Fluo), Coliformes fecales (CF), Nitrógeno de Nitratos (N_NO_3), Arsénico Total (As_Tot), Cadmio Total (Cd_Tot), Cromo Total (Cr_Tot), Mercurio Total (Hg_Tot), Plomo Total (Pb_Tot), Alcalinidad (Alc_Tot), Conductividad eléctrica (Cond_elec), Dureza Total (Dur_Tot), Sólidos Disueltos Totales (SDT), Hierro Total (Fe_Tot) y Manganeseo Total (Mn_Tot) (CONAGUA, 2024).

La interpretación de los resultados de los indicadores se complementa mediante un sistema gráfico de semáforos, para facilitar su comprensión. En cuerpos de agua superficial se interpreta de la siguiente manera: si uno o más de los siguientes

parámetros DBO5, DQO, ENTEROC_FEC, y/o TOX, incumplen, entonces el semáforo será de color rojo; si los parámetros anteriores cumplen, pero uno o más de los siguientes parámetros: SST, %OD, CF y/o E_COLI, incumplen, el semáforo será amarillo; y, cuando se da el cumplimiento de todos los indicadores, el semáforo será verde. Para agua subterránea el semáforo se considera de la siguiente manera: Fluo, CF, N_NO₃, As_Tot, Cd_Tot, Cr_Tot, Hg_Tot y Pb_Tot, incumplen, entonces el semáforo será color rojo; si los parámetros anteriores cumplen, pero uno o más de los siguientes parámetros: Alc_Tot, Cond_elec, Dur_Tot, SDT, Fe_Tot y Mn_Tot, incumplen, el semáforo será amarillo; y, cuando se da el cumplimiento de todos los indicadores, el semáforo será verde (CONAGUA, 2024).

La Secretaría de Salubridad y Asistencia (SSA) ha determinado una normativa para la regulación y promoción de la salud en cuanto al agua desde 1994 en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1. Establece los límites máximos permisibles de la calidad del agua para el uso y consumo humano. Esta normativa extiende mucho más sus parámetros abarcando especificaciones sanitarias: físicas, químicas (metales y metaloides), microbiológicas, fitotoxinas, radiactividad, desinfección, subproductos de desinfección- trihalometanos, ácidos haloacéticos, aniones, carbonilos; compuestos orgánicos sintéticos (SSA, 2021).

1.7.3. Parámetros fisicoquímicos en la calidad del agua

1.7.3.1. Sabor y olor

El sabor y el olor constituyen percepciones humanas sensoriales de la calidad del agua. Los compuestos inorgánicos relativamente simples suelen generar sabores ácidos o salados, mientras que los compuestos orgánicos más complejos están asociados con sabores dulces o amargos. Por su parte, los olores se originan principalmente por la liberación de gases derivados de la descomposición de

materia orgánica o por la presencia de sustancias añadidas a las aguas residuales (Arora, 2017).

1.7.3.2. Temperatura

La temperatura es el promedio de la energía cinética de las moléculas de agua, se establece por la absorción de radiación en las capas superiores del líquido. Se expresa en una escala lineal, comúnmente en grados Celsius o Fahrenheit, y constituye una variable fundamental en la calidad del agua. (Arora, 2017)

Este parámetro influye directamente en la mayoría de los procesos biológicos que ocurren en los ecosistemas acuáticos. Por ejemplo, especies como la trucha y el salmón requieren temperaturas frías para poder sobrevivir y reproducirse. Asimismo, afecta la tasa de fotosíntesis de las algas y otras plantas acuáticas, las tasas metabólicas de los organismos, su sensibilidad a desechos tóxicos, parásitos y enfermedades. Además, afecta la solubilidad de los gases disueltos en el agua, como el oxígeno disuelto, cuya concentración disminuye a medida que la temperatura aumenta (Fernández, 2012).

1.7.3.3. Potencial de hidrógeno (pH)

Se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno en una solución (Arora, 2017). La escala de pH tiene un comportamiento logarítmico y se extiende de 0 (muy ácida) a 14 (muy alcalina), siendo 7 la neutralidad.

Este parámetro es fundamental, ya que influye en diversos procesos físicos, químicos y biológicos del agua. Un pH bajo representa uno de los factores que contribuyen al deterioro de la calidad de este medio, debido a que, en estas condiciones se incrementa la solubilidad de minerales y metales, lo que puede

facilitar la liberación de compuestos potencialmente tóxicos. Además, afecta la capacidad de los microorganismos para retener agua y minerales, debido a que sus estructuras celulares pueden verse comprometidas. También los macroorganismos, como los peces se ven impactados negativamente, ya que, dependen de un rango específico para poder vivir y reproducirse, por lo que un pH bajo puede afectar su metabolismo y capacidad para respirar (Lee, 2023).

Aunque el rango óptimo para la mayoría de las aguas superficiales se sitúa entre 6.5 a 9, en el contexto agrícola se prefiere un pH ligeramente más ácido, ya que favorece la dilución de nutrientes. Esto facilita que las plantas absorban los compuestos que necesitan para crecer y reduce las tasas de aplicación de fertilizante necesarias para alcanzar los objetivos de rendimiento (Lee, 2023).

1.7.3.4. Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad es una medida de la capacidad de una solución para conducir corriente eléctrica mediante los iones disueltos que contiene, aunque esto está influenciado directamente por la temperatura. En el caso del agua, la CE se expresa en $\mu\text{S}/\text{cm}$ a una temperatura de 25°C .

Este parámetro proporciona información sobre la concentración total de sales solubles presentes en el agua: a mayor valor de la CE, mayor es la concentración de sales en la solución y viceversa (Rivas). En cuerpos de agua natural como ríos o arroyos, el contenido salino tiende a incrementarse a lo largo de su trayecto, debido a la disolución de minerales del suelo y otras especies químicas.

En el contexto del estudio de la calidad del agua, la conductividad es un indicador importante, ya que permite evaluar de forma indirecta el grado de mineralización. Por lo tanto, la medición de su capacidad para conducir la corriente eléctrica puede

emplearse como parámetro predictivo de su dureza: cuanto mayor es la dureza del agua, mayor es su conductividad (Aranda et al.).

1.7.3.5. Alcalinidad

La alcalinidad es la capacidad del agua para neutralizar ácidos, bases y mantener estable su nivel de pH, es decir, aunque el agua presente un pH aparentemente neutro, una baja alcalinidad implica que este valor pueda alterarse fácilmente, por ejemplo, ante fenómenos como la lluvia ácida o la adición de productos químicos. En cambio, una alta alcalinidad permite que el agua resista a contaminaciones repentinas sin sufrir cambios sustanciales en su equilibrio ácido-base, ya que los compuestos presentes actúan neutralizando dichos agentes (Lee, 2023).

En términos de consumo humano, la alcalinidad no representa un riesgo significativo. Sin embargo, en el uso agrícola, puede tener implicaciones importantes. Cuando se combina con un alto contenido de calcio, puede formarse bicarbonato de calcio, lo cual da lugar a suelos alcalinos. Esto eleva el pH del suelo e impide la disponibilidad de ciertos nutrientes esenciales para las plantas, aun cuando estos se encuentren presentes en el sustrato (Suller et al., 2013, como se citó en Rivas).

1.7.3.6. Dureza Total

La dureza del agua representa una medida de la cantidad de metales alcalinotérreos en el agua, principalmente de los iones calcio y magnesio, expresadas como mg CaCO_3/L . Aunque la ingestión de agua con distintos niveles de dureza no se asocia de manera directa con efectos adversos para la salud humana, su cuantificación adquiere relevancia desde una perspectiva económica y técnica. En particular, concentraciones elevadas pueden propiciar la precipitación de sales a altas

temperaturas, lo que conlleva la formación de incrustaciones o sarro en sistemas de tubería (Aranda).

1.7.3.7. Sólidos Suspendidos Totales

Los sólidos suspendidos totales (SST) constituyen un parámetro que cuantifica la concentración total de materia orgánica en suspensión y/o coloidal, además de la cantidad de sólidos sedimentables. Estas partículas suelen estar asociadas principalmente a procesos de erosión de suelo y descargas de aguas residuales. Niveles elevados de SST aumentan la turbidez del agua, lo que reduce la penetración de luz solar, esto afecta el proceso de fotosíntesis, limita el desarrollo de la vegetación acuática y la biodiversidad (Hach).

1.7.3.8. Oxígeno Disuelto

El oxígeno disuelto (OD) en el agua proviene principalmente de dos fuentes: la difusión del oxígeno de la atmósfera y la fotosíntesis. El OD se expresa de dos maneras, como mg O₂/L o como un porcentaje de saturación, en relación con la temperatura del agua.

La disponibilidad de oxígeno disuelto es un indicador clave de las condiciones biológicas y bioquímicas del medio acuático (Wetzel, 2000). Valores bajos de OD pueden reflejar una alta actividad bacteriana, asociada con procesos de descomposición orgánica, lo que puede comprometer la calidad del agua y afectar negativamente a los ecosistemas.

1.7.3.9. Cloruros

El cloruro es un anión inorgánico ampliamente distribuido en la naturaleza en forma de sales. Se forma cuando el elemento cloro, gana un electrón o bien cuando compuestos como el cloruro de sodio se encuentra disociado (Pal, 2017).

Por su papel esencial en los procesos fisiológicos de animales y seres humanos, el cloruro es a veces denominado la “reina de los electrolitos” (Pal, 2017). Sin embargo, cuando se presenta en altas concentraciones, puede ser un indicador de contaminación, ya sea por aguas residuales, infiltración de agua marina o uso excesivo de fertilizantes y sales en áreas agrícolas. Además, su presencia en exceso puede afectar los procesos fisiológicos de los organismos acuáticos, alterar el equilibrio iónico del ecosistema, aumentar la conductividad eléctrica y la corrosividad del agua (Pal, 2017).

1.7.4. Metales pesados

Un metal pesado se refiere a un elemento químico metálico que se caracteriza por tener una densidad relativamente alta y ser tóxico o venenoso en bajas concentraciones. Estos son componentes naturales del entorno geológico, pero pueden ingresar al cuerpo humano a través de los alimentos, el agua potable y el aire, en pequeñas cantidades (Lee, 2017).

Algunos metales pesados como el cobre, el selenio y el arsénico, son esenciales para el metabolismo humano y actúan como oligoelementos. Sin embargo, en concentraciones altas, pueden, volverse tóxicos, causando diversas enfermedades graves (Lee, 2017).

1.7.5. Parámetros microbiológicos en la calidad del agua

La calidad biológica del agua puede verse comprometida por la presencia de bacterias del grupo coliforme, las cuales actúan como indicadores de contaminación microbiológica, en particular de origen fecal o pluvial. Este grupo pertenece a la familia Enterobacteriaceae e incluye a los coliformes totales, los coliformes fecales (o termotolerantes) y, de forma más específica, a *Escherichia coli* (*E. coli*) (Li et al., 2012).

Aunque el agua contaminada puede contener una amplia variedad de patógenos, los coliformes han sido ampliamente utilizados como indicadores debido a que su detección es sencilla, rápida y accesible, en comparación con otros métodos microbiológicos más complejos o costosos. Por ello, son herramientas clave en la evaluación sanitaria del agua para consumo humano, recreación y uso agrícola.

1.7.5.1. Coliformes totales

Los coliformes totales son un grupo amplio de bacterias Gram negativas en forma bacilos capaces de fermentar la lactosa a temperatura de 35 a 37 ° C con producción de ácido y gas (CO₂) en 24 horas, aerobias o anaerobias facultativas, son oxidasa negativa, no esporulados y presentan actividad enzimática β-galactosidasa (Larrea et al, 2012). Aunque algunas especies pueden tener un origen fecal, muchas otras se encuentran en ambientes como el suelo, por lo que su presencia indica una contaminación general, no necesariamente fecal. Además su presencia se considera un indicio de contaminación reciente o persistente.

1.7.5.2. Coliformes fecales o termotolerantes

Los coliformes fecales o termotolerantes, denominados así por su capacidad para desarrollarse a temperaturas de hasta 45°C, constituyen un subgrupo dentro de los

coliformes totales. Están conformados principalmente por *Escherichia coli*, aunque también pueden encontrarse, en menor porción, otras especies como *Citrobacter freundii* y *Klebsiella pneumoniae* (Larrea et al, 2012).

Entre los coliformes fecales, solo *Escherichia coli* se considera un indicador confiable de contaminación fecal reciente, dada su estrecha asociación con el sistema digestivo de animales de sangre caliente, ya que las demás especies pueden tener un origen ambiental. Por esta razón, diversos autores han sugerido reemplazar la denominación coliformes fecales por coliformes termotolerantes, término que refleja de forma más precisa sus características fisiológicas y su capacidad para desarrollarse a temperaturas elevadas (Chiroles et al., 2007; Narváez et al., 2008).

1.7.5.3. *Escherichia coli*

Es una enterobacteria gramnegativa, anaerobia facultativa que forma parte de la microbiota intestinal normal de los seres humanos y los animales homeotermos. Esta bacteria es excretada diariamente en grandes cantidades a través de las heces, en un rango que oscila entre 10^8 y 10^9 unidades formadoras de colonias (UCF) por gramo de materia fecal (Larrea, 2009).

Dentro de esta especie bacteriana existen cepas o subtipos que pueden comportarse de maneras distintas, ya que algunas son inofensivas, pero otras pueden estar involucradas en diversas infecciones intestinales y extraintestinales como un patógeno oportunista (Denamur, 2021).

A pesar de que viven en el intestino de especies homeotermos, estudios como el de Wang y Doyle (1998) determinaron la supervivencia de *Escherichia coli* 0157:H7 enterohemorrágica en agua: municipal filtrada y esterilizada en autoclave, de

embalse y de dos lagos recreativos durante un período de 91 días a 8, 15 y 25 °C. Dicho estudio reveló que *E. coli* O157:H7 es un patógeno resistente que puede sobrevivir durante largos periodos en agua, especialmente a bajas temperaturas, a 8°C aproximadamente puede persistir más de 3 meses.

Otro estudio realizado en 2022 por Moreno et al. evaluó la supervivencia de *E. coli* en aguas recreativas de río Fuerte, ubicado en Sinaloa, México. Los resultados mostraron que esta bacteria puede permanecer activa durante 16 días aproximadamente en el agua, esto en temporada de febrero a abril. Además, el estudio resaltó la presencia de altas concentraciones de materia orgánica, las cuales proveen un suministro constante de nutrientes que favorece la persistencia y supervivencia de estas bacterias en el ecosistema acuático.

1.7.6. Contaminación del agua.

La contaminación del agua se define como la presencia de componentes o factores químicos, físicos o biológicos que deterioran su calidad en relación con algún uso determinado (Schweitzer, 2018). Esta contaminación puede ser de origen antropogénico o natural.

1.7.6.1. Contaminación por fuentes puntuales y no puntuales.

La contaminación de fuentes no puntuales se caracteriza por la dispersión de contaminantes provenientes de múltiples orígenes difusos, sin que exista un punto específico e identificable de emisión. Este tipo de contaminación representa un desafío significativo para su monitoreo, regulación y control. Por el contrario, la contaminación puntual se origina en una ubicación concreta y fácilmente identificable, lo que facilita su gestión. (Rodrigo et al., 2025).

Entre los principales orígenes de la contaminación por fuentes no puntuales se encuentran los procesos de escorrentía superficial que arrastran materiales contaminantes desde suelos agrícolas, urbanos o naturales.

Las fuentes puntuales comprenden sitios específicos de descarga, como vertederos mal gestionados o sin impermeabilización, que generan lixiviados que pueden filtrarse al subsuelo; fugas en tanques de almacenamiento subterráneo de hidrocarburos o productos químicos; sistemas de alcantarillado con infraestructura deteriorada, así como fosas sépticas o pozos ciegos mal diseñados, que pueden permitir la infiltración de aguas negras contaminadas con patógenos y aguas residuales generadas en actividades ganaderas (Rodrigo et al, 2025).

1.7.6.2. Eutrofización

La eutrofización es un proceso de enriquecimiento excesivo de nutrientes, se origina por una aplicación excesiva o inadecuada de fertilizantes. Aunque los nutrientes pueden provenir de fuentes naturales, la eutrofización antropogénica se debe a actividades agropecuarias e industriales. Las consecuencias incluyen floraciones algales que a veces son tóxicas. Al morir, estas algas son degradadas por microorganismos, los cuales agotan el oxígeno disuelto (Vammen & Vaux, 2019). Esta condición, impide la supervivencia de otras especies y da lugar a ambientes acuáticos insalubres, con mal olor, coloración anormal y pérdida de biodiversidad.

1.7.6.3. Salinización

La salinización del agua subterránea es un proceso de deterioro de la calidad del recurso hídrico, caracterizado por el incremento en la concentración de sales disueltas, como cloruros (Cl^-), sodio (Na^+), sulfatos (SO_4^{2-}) o bicarbonatos. Este

fenómeno puede ser resultado de procesos naturales o por actividades humanas antropogénicas (Rodrigo et al, 2025).

Una de las principales causas antrópicas suele estar relacionada con el manejo inadecuado del agua de riego en la agricultura. En suelos con deficiente capacidad de drenaje, la aplicación excesiva de agua favorece la acumulación de sales en la zona radicular. Estas sales pueden percolar hacia capas más profundas del suelo, alcanzando los niveles freáticos y de esta manera contribuir al aumento de la salinidad del agua subterránea. Por otra parte, existen fuentes naturales que pueden aumentar estos niveles de sales, por ejemplo, por la disolución de minerales presentes en formaciones geológicas salinas, como los depósitos de yesos o halitas, que liberan iones al agua subterránea a medida que esta circula por los estratos del subsuelo (Rodrigo et al, 2025).

1.7.6.4. Lluvia ácida

La lluvia ácida puede tener dos orígenes: uno antropogénico y otro natural. El primero está estrechamente vinculada al desarrollo industrial, la quema de combustibles fósiles y de vegetación. Por otro lado, la lluvia ácida se asocia a las emisiones de gases volcánicos, se caracteriza por tener concentraciones altas de ácido sulfúrico y nítrico. Estos ácidos se forman al reaccionar con el trióxido de azufre y el dióxido de nitrógeno con el agua (Montalvo & Escobar, 2011).

El contacto de grandes cantidades de lluvia ácida con diversos cuerpos hídricos conlleva a una alteración del pH.

1.7.6.5. Microbiológica

La contaminación microbiológica puede originarse por actividades antropogénicas, como por procesos naturales. Entre las fuentes antropogénicas destacan la ausencia de sistemas de tratamiento que operen de manera eficiente, la falta de mantenimiento y modernización de las infraestructuras ya existentes; el diseño inadecuado o la ubicación incorrecta de pozos sépticos, las fugas en redes de alcantarillado, el vertido de lixiviados sin tratamiento provenientes de residuos orgánicos o estiércoles, así como las inundaciones que transportan materia fecal hacia el subsuelo (Rodrigo et al, 2025).

Por otro lado, existen fuentes naturales de contaminación, como la infiltración de aguas superficiales contaminadas con sedimentos, partículas de suelo o materia orgánica que contienen coliformes presentes de manera natural en el ambiente (Alex & Njau, 2020).

1.7.6.6. Metales

La presencia de metales en el agua puede tener un origen natural o antrópico. En el primer caso, en muchas regiones del mundo la contaminación es de carácter geogénico, es decir, producto de la disolución natural de minerales que contienen estos elementos. En el segundo caso, la fuente está asociada a actividades industriales como la minería, la metalurgia, la fabricación de baterías, pigmentos, así como a una gestión inadecuada de residuos industriales o vertederos no controlados, cuyos lixiviados transportan estos compuestos al subsuelo y posteriormente a los cuerpos de agua. Asimismo, la contaminación puede relacionarse a malas prácticas agrícolas, relacionado al uso de pesticidas y plaguicidas (Rodrigo et al., 2025).

Arsénico (As)

El arsénico es un metaloide que puede encontrarse de manera natural en el agua subterránea, principalmente debido a su presencia en la corteza terrestre. Aunque las fuentes superficiales suelen verse menos afectadas, también pueden contener arsénico como consecuencia de tres principales fuentes naturales de contaminación: la actividad hidrotermal, los depósitos minerales y los sedimentos cenozoicos. En Latinoamérica, las zonas afectadas por arsénico —identificadas en 14 países de América Central y del Sur— se localizan predominantemente en la región circumpacífica, asociado con el Cinturón o Anillo de Fuego del Pacífico (Fig.3). En esta área, la presencia de arsénico se relaciona con la actividad magmática, particularmente con la emisión de cenizas volcánicas y la formación de depósitos de sulfuros (Masuda, 2018).

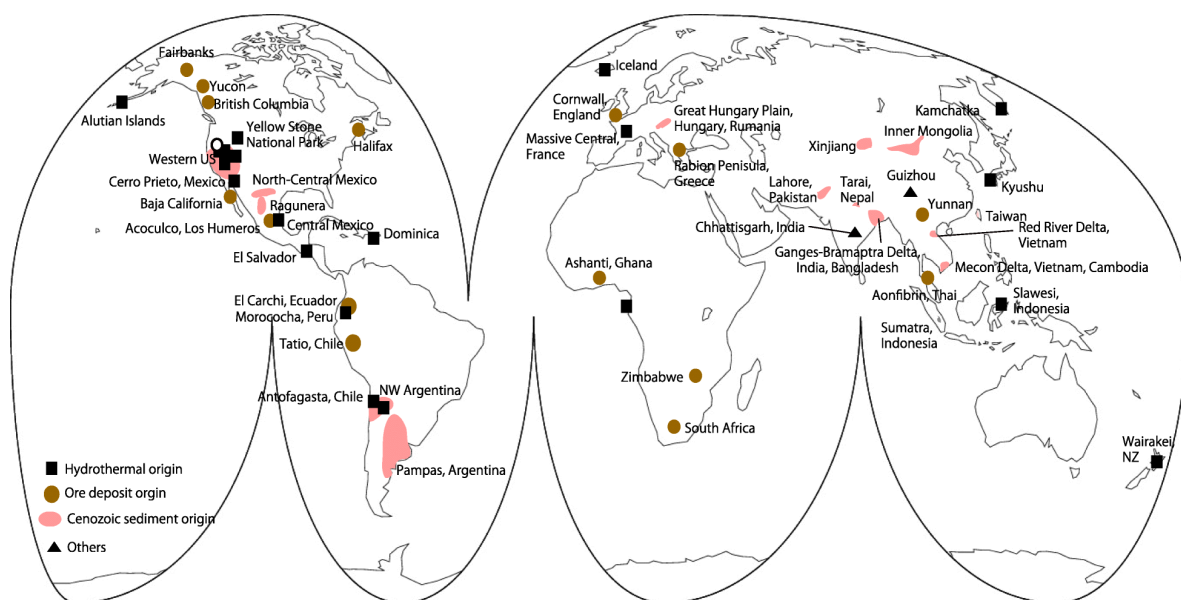


Figura 3. Mapa mundial de contaminación por arsénico, 2018, Masuda, H.

A estos aportes naturales se suman fuentes de origen antrópico, entre las que destacan la minería, la quema de combustibles fósiles y determinadas prácticas agrícolas. Una causa común es la combustión de carbón, el cual libera compuestos arsenicales a la atmósfera, que posteriormente pueden depositarse y lixiviarse hacia los cuerpos de agua, contribuyendo de manera significativa a su contaminación (Goddard, 2024).

Cadmio (Cd)

El cadmio (Cd) es un oligoelemento no esencial ampliamente distribuido en el ambiente (Kubier et al., 2019). Su origen se asocia tanto a fuentes naturales como antrópicas. Entre los procesos naturales destacan las elevadas concentraciones de zinc, dado que el cadmio está presente como un componente menor en casi todos los concentrados de zinc; su afinidad calcófila; así como la desintegración y erosión de rocas sedimentarias, particularmente aquellas con mineralización de esfalerita en dolomitas y calizas (SGC, 2020). Asimismo, fenómenos como la actividad volcánica, las inundaciones y la presencia de óxidos hidratados, minerales arcillosos y materia orgánica pueden incrementar su concentración. En cuanto a las fuentes antrópicas destacan la quema de combustibles fósiles; la fabricación de pigmentos, pinturas, baterías; el uso de lodos, fertilizantes fosfatados y pesticidas que contienen cadmio en la agricultura, y la disposición inadecuada de residuos en vertederos (Kubier et al., 2019).

Cromo (Cr)

El cromo es un elemento relativamente abundante en la corteza terrestre y está de forma natural en el aire, agua, suelo y plantas (Świątkowska, 2023). Se encuentra en rocas ígneas básicas y ultrabásicas, así como en las rocas metamórficas y

sedimentarias que se producen cuando las rocas que contienen cromita se alteran por el calor o la erosión (Nieva, 2025).

La contaminación antrópica está relacionada a la minería y la metalurgia, la producción de acero y aleaciones metálicas, la fabricación de pinturas, el procesamiento de madera y papel, el teñido y el aumento del contenido de cromo en las aguas residuales. Además, la caída de cenizas producidas por la incineración de carbón o residuos municipales para la generación de energía y la producción de fertilizantes de segunda generación contribuyen al elevado contenido de Cr (VI) en el suelo y el agua (Tumolo et al., 2020).

Cobre (Cu)

El cobre se encuentra en el ambiente principalmente en tres estados de valencia: metálico (Cu^0), monovalente Cu (I) y bivalente Cu (II). Este elemento suele estar presente en menas, siendo los minerales más importantes la calcopirita (CuFeS_2), la cuprita (Cu_2O) y la malaquita ($\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$). Estos minerales se localizan en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, y su liberación al suelo y agua generalmente ocurre por meteorización y oxidación de las rocas. Sin embargo, la concentración, por ejemplo, en agua suele ser baja, ya que la mayoría de estos minerales son poco solubles en agua bajo condiciones normales (NIH, 2000).

Por otro lado, las actividades humanas contribuyen significativamente a la liberación de cobre al ambiente. Entre las principales fuentes se encuentran las operaciones mineras, junto con la incineración de materiales. La liberación al agua se produce por la erosión del suelo, los vertidos industriales, descargas de plantas de tratamiento de aguas residuales y el uso de pinturas antiincrustantes (NIH, 2000).

Hierro (Fe)

El hierro es un elemento abundante en la superficie de la tierra. A medida que el agua se infiltra a través del suelo y las rocas, puede disolver minerales que contienen hierro y transportarlos hacia las aguas subterráneas. Las principales fuentes de Fe incluyen los suelos, las capas arcillosas cercanas al acuífero y a las actividades humanas. El hierro presente en aguas subterráneas se encuentra en diferentes estados de oxidación, principalmente como Fe^{2+} y Fe^{3+} , y su liberación ocurre mediante diversos procesos de disolución (Zahidul & Golam, 2024).

En condiciones naturales, el hierro se encuentra asociado a minerales como hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4), goethita (FeOOH), siderita (FeCO_3) y sulfuros como la pirita (FeS_2), presentes en rocas sedimentarias, metamórficas e ígneas. En conjunto, estos minerales representan aproximadamente el 5 % de la corteza terrestre y constituyen la principal fuente geológica de hierro en las aguas subterráneas (Secretaría de Economía, 2013).

Por otro lado, el Fe puede incorporarse al agua a través de procesos antropogénicos. Entre estos, la deposición de hierro en aerosol, ya que, la quema de combustibles fósiles libera ácidos inorgánicos que pueden disolver el Fe del polvo mineral, así como la emisión directa durante la incineración de dichos combustibles (Pinedo et al., 2020). Además, la contaminación de aguas subterráneas por hidrocarburos, como en casos de derrames, constituye otra vía de aporte de origen humano (Palmucci et al., 2016).

Manganeso (Mn)

El Manganeso (Mn) es un elemento pesado que está presente de manera abundante en la corteza terrestre, representando aproximadamente el 0,1% de la misma. Aunque no se encuentra de manera libre como un metal, forma parte de

más de cien minerales, incluyendo sulfuros, óxidos, carbonatos, silicatos, fosfatos y boratos (Meza, 2022).

El comportamiento del manganeso es análogo al del hierro. En su forma primaria se encuentra asociado a magmas básicos y de acidez media, y puede ser fraccionado y transportado mediante soluciones acuosas de origen hidrotermal. Mediante procesos de intemperismo, el manganeso se separa de sus minerales originales y migra hasta depositarse por sedimentación química. Este elemento es particularmente soluble en aguas que contienen dióxido de carbono, lo que facilita su incorporación a las aguas superficiales y subterráneas (Rodríguez et al., 2005).

En ecosistemas acuáticos, el Mn se encuentra inicialmente en su forma reducida y soluble, como Mn (II) y posteriormente es oxidado a la forma insoluble como MnO₂. Este proceso redox afecta la calidad del agua, ya que contribuye a la turbidez, altera el color y puede generar un sabor metálico perceptible (Meza, 2022)

Adicionalmente, el manganeso tiene múltiples aplicaciones industriales que constituyen fuentes potenciales de contaminación. Se emplea en la producción de baterías, aceros, pesticidas, fertilizantes y cerámicas, así como en la gasolina mediante el aditivo tricarbonilo metilciclopentadienilo de manganeso (MMT). (Rodríguez et al., 2005).

Níquel (Ni)

El níquel (Ni) es un elemento ampliamente distribuido en el ambiente y constituye aproximadamente el 3% de la corteza terrestre. Este elemento se encuentra principalmente en forma de compuestos como óxidos, sulfuros y silicatos, presentes en minerales como garnierita, pentlandita y pirrotita, los cuales se localizan en rocas

máficas y ultramáficas, también en suelos derivados de procesos de meteorización y pedogénesis (El-Naggar et al., 2021).

Puede incorporarse a los ecosistemas terrestres y acuáticos mediante fuentes naturales, como la erosión de suelos ricos en Ni, la meteorización y la actividad volcánica. Estas partículas pueden ser transportadas por el viento y depositadas en cuerpos de agua. Adicionalmente, los procesos hidrotermales disuelven estos minerales incorporándolos a las aguas superficiales y subterráneas (El-Naggar et al., 2021).

Asimismo, el níquel puede incorporarse al ambiente como resultado de actividades humanas, incluyendo la galvanoplastia, vertederos, minería, efluentes industriales, lodos de depuradora municipal, quema de combustibles fósiles y fabricación de pigmentos, aumentando su concentración en aguas superficiales y subterráneas (Rizwan et al., 2024).

Plomo (Pb)

El plomo y sus compuestos se encuentran ampliamente distribuidos en el ambiente, detectándose en el aire, en plantas y animales destinados al consumo humano, en el agua potable y en cuerpos superficiales como ríos, lagos y océanos, así como en el polvo y en el suelo. Sin embargo, su presencia se debe principalmente a actividades de origen antrópico, ya que resulta poco común hallarlo de forma natural en concentraciones significativas (Rubio et al., 2004).

Uno de los factores que explica su amplia dispersión es su uso histórico e intensivo en múltiples procesos industriales, incluyendo la fabricación de pigmentos, recubrimientos, envases, ungüentos, baterías eléctricas, bebidas alcohólicas y diversas aplicaciones en la metalurgia (Rubio et al., 2004).

Selenio (Se)

En aguas naturales, el selenio se encuentra en cuatro estados de oxidación: Se (VI) como oxianión selenato (SeO_4^{2-}), Se (IV) como anión selenito (HSeO_3^- y SeO_3^{2-}), el Se (-II) como biselenuro (HSe^-) y como una variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos y el selenio elemental, Se (0), siendo este último un coloide (Torres et al., 2015).

El selenio se encuentra ampliamente distribuido en el ambiente y, aunque en concentraciones bajas cumple un papel esencial en ciertos procesos biológicos, a niveles elevados se convierte en un contaminante tóxico. Su presencia y movilidad en el medio están determinadas por diversos procesos naturales y antropogénicos, entre los que destacan: la actividad volcánica, la quema de combustibles fósiles, la meteorización de rocas fosfáticas, lutita, rocas ígneas y suelos, el transporte de aguas subterráneas, la precipitación de minerales, escorrentía agrícola y urbana, así como reacciones de reducción y oxidación de carácter químico o microbiano. A ello se suma la absorción y liberación metabólica por parte de organismos vegetales y animales, que contribuye a su ciclo biogeoquímico (McNeal & Balistrieri, 1989).

1.7.7. Impactos negativos de la contaminación del agua en la salud pública.

Los efectos negativos en la salud desarrollados por el consumo de agua contaminada pueden ser desde una irritación leve, enfermedades gastrointestinales graves, hasta efectos a largo plazo como cáncer, esterilidad y anomalías en el desarrollo físico y neurológico de niños (Forde et al., 2019).

1.7.7.1. Problemas de salud relacionados a parámetros fisicoquímicos del agua

pH

Las aguas demasiado ácidas presentan la capacidad de disolver metales, los cuales, al ser ingeridos, pueden ejercer efectos adversos sobre la salud. La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 establece que el rango aceptable de pH para agua potable se sitúa entre 6.5 a 8.5. Valores extremos pueden causar desde irritación en las mucosas y órganos internos, hasta procesos de ulceración (Galvin, 2003 como se citó en Pérez, 2016).

Conductividad/ salinidad

Es importante aclarar que, aunque la CE no constituye un contaminante en sí misma, valores anormalmente altos o bajos pueden generar efectos indirectos sobre la salud, ya que reflejan la concentración y tipo de sales disueltas en el agua. Una conductividad elevada, puede tener implicaciones significativas para la salud renal. Rivera et al., (2024) señalan que el consumo de agua con altas concentraciones de sal obliga a los riñones a trabajar más para mantener el equilibrio de líquidos y electrolitos, lo que puede provocar un agotamiento renal. Asimismo, favorece la formación de cálculos, debido a la cristalización de la sal, y se ha sugerido que puede causar un daño en los túbulos e incluso, contribuir al desarrollo de una enfermedad crónica.

Dureza Total

De acuerdo con la NOM-127-SSA1-2021, el límite máximo permisible para este parámetro es de 500 mg/L como CaCO_3 . Aunque algunos autores señalan que concentraciones superiores a este valor no representan un riesgo potencial significativo para la salud humana. Investigaciones como las reportadas por Pérez (2016) destaca que, el calcio es necesario para la formación y mantenimiento de los huesos y el magnesio interviene en diversos procesos metabólicos, sin embargo su

ingesta en exceso puede ocasionar efectos adversos que van desde aspereza en la piel y endurecimiento del cabello, hasta la formación de cálculos renales, incremento en la incidencia de ataques cardíacos y posibles alteraciones del sistema nervioso, además de estar asociados con ciertos tipos de cáncer. No obstante, es importante aclarar que los beneficios y riesgos para la salud continúan siendo objeto de debate (Pérez, 2016).

Por su parte, el mismo autor señala que concentraciones inferiores a 100 mg/L, puede reducir la capacidad amortiguadora del agua, volviéndose más corrosiva para las tuberías, lo que podría favorecer la presencia de metales pesados como cobre, zinc, plomo y cadmio (Pérez, 2016).

Metales

La exposición humana a los metales pesados tiende a diversos efectos tóxicos que afectan diferentes tejidos y sistemas orgánicos debido a su capacidad de bioacumulación. La bioacumulación se define como el proceso mediante el cual una sustancia química se acumula en un organismo en relación con su concentración en el ambiente (Schäfer et al., 2015). La toxicidad de un elemento depende de diversos factores, incluyendo las propiedades del metal en cuestión, la dosis, la ruta de exposición y la duración de la exposición (aguda o crónica), así como del grado de bioacumulación y su habilidad para biomagnificarse (Jomova et al., 2025).

Arsénico (As)

El arsénico puede existir en dos formas: orgánica e inorgánica. Las moléculas de arsénico orgánico, que contienen átomos de carbono en su estructura, se consideran no tóxicos, o considerablemente menos tóxicas que sus contrapartes inorgánicas. En contraste, el arsénico inorgánico es altamente tóxico para los

humanos y no apto para el consumo. Este último se encuentra en el suelo, los sedimentos y las aguas subterráneas. Se produce de forma natural mediante la meteorización de minerales y menas, aunque también puede estar involucrado a actividades mineras o industriales (Goddard, 2024).

La toxicidad del As se manifiesta tanto en exposiciones agudas como crónicas.

La primera es, definida como un contacto breve y generalmente único, puede ocasionar síntomas como dolor abdominal, vómitos, mialgias, eritema en la piel, parestesias en las extremidades y deterioro progresivo de las respuestas motoras y sensoriales, pudiendo llegar a ocasionar la muerte (Goddard, 2024).

En contraste, la exposición crónica, resultante de una ingesta y/o contacto prolongado repetido durante largos periodos, se asocia a un amplio espectro de efectos adversos para la salud. Entre ellos se encuentra: impactos en el sistema sanguíneo; diabetes mellitus; impactos oculares, cardiovasculares, gastrointestinales, en el hígado, riñones, así como en los sistemas inmunológico y respiratorio; deterioro del sistema nervioso y un incremento significativo en el riesgo de diversos tipos de cáncer (Goddard, 2024).

Cadmio (Cd)

La intoxicación aguda por exposición oral al cadmio (Cd) se manifiesta clínicamente con síntomas como náuseas, vómitos, dolor abdominal, cefalea y, en numerosos casos, diarrea severa acompañada de colapso sistémico (Matek at al., 2004). Por otro lado, la intoxicación crónica por Cd, conocida como enfermedad de *itai-itai* —descrita por primera vez en Japón a inicios del siglo XX—, se caracteriza por disfunción tubular renal, osteomalacia y osteoporosis, debido a la competencia del cadmio con el calcio y otros elementos esenciales. Asimismo, la exposición crónica

se ha vinculado con alteraciones en el metabolismo de la glucosa, incremento en la incidencia de cáncer de mama y pulmón, así como con un mayor riesgo de infarto cerebral e insuficiencia cardíaca (Kubier et al., 2019).

Cromo (Cr)

En el ambiente, el cromo puede encontrarse principalmente en dos estados de oxidación: trivalente (Cr III) y hexavalente (Cr VI), siendo este último generalmente de origen antropogénico. Durante varias décadas, el Cr (III) se consideró un micronutriente esencial, necesario para el metabolismo normal de carbohidratos, proteínas y lípidos. No obstante, investigaciones recientes han cuestionado esta clasificación, y la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) ya no lo reconoce como esencial para la salud humana, sugiriendo que su función es más farmacológica que nutricional (Świątkowska, 2023). Por su parte, el Cr (VI) es altamente tóxico, con efectos que van desde irritación cutánea hasta daño al ADN y desarrollo de cáncer, dependiendo de la dosis, la vía de exposición y la duración del contacto (Tumolo et al., 2020).

Cobre (Cu)

Aunque el cobre es reconocido como un micronutriente esencial y está presente en diversos órganos, su forma oxidativa bivalente (Cu^{2+}) puede resultar altamente tóxica. La exposición aguda a esta clase de oxidación puede inducir trastornos gastrointestinales, mientras que la exposición crónica se asocia hepatotoxicidad (NIH, 2000).

En situaciones de sobreexposición severa, el cobre puede favorecer el desarrollo de patologías graves, incluyendo cáncer, enfermedades neurodegenerativas y aceleración del envejecimiento celular, debido a su participación en reacciones

redox que generan especies reactivas de oxígeno (ROS). Estas ROS ejercen efectos citotóxicos, ya que, induce a la peroxidación lipídica de las membranas celulares, desestabilizando su integridad y alterando la función celular. Además, puede oxidar proteínas y desnaturalizar ácidos nucleicos (ADN y ARN), comprometiendo la estabilidad genética y los procesos metabólicos (Feoktistova & Clark, 2018).

Hierro (Fe)

Aunque el hierro es un elemento esencial para la salud humana debido a su papel fundamental en procesos metabólicos, su exceso puede resultar altamente perjudicial e incluso letal. La acumulación crónica de hierro en tejidos puede provocar enfermedades graves como la hemosiderosis y la hemocromatosis, las cuales se caracterizan por depósitos excesivos de hierro en órganos vitales. Asimismo, niveles elevados de hierro se han asociado con la aparición de diabetes, embolia pulmonar y diversas enfermedades cardiovasculares, lo que evidencia su potencial toxicidad en condiciones de exposición prolongada o ingesta excesiva (Zahidul & Golam, 2024).

Manganeso (Mn)

El manganeso (Mn) es un elemento traza requerido en mínimas cantidades para el crecimiento, desarrollo y función de los seres humanos, pero en exceso puede ser un potente neurotóxico, debido a que origina desórdenes neurológicos relativo al mal de Parkinson's (Meza, 2022).

Níquel (Ni)

La exposición a niveles elevados de níquel (Ni) puede provocar una amplia gama de efectos tóxicos en la salud humana. Entre estos se incluyen reacciones alérgicas, enfermedades cardiovasculares, fibrosis pulmonar, cáncer de pulmón y alteraciones renales. Asimismo, se ha documentado que el níquel puede inducir trastornos hematológicos tanto en humanos como en modelos animales (Rizwan et al., 2024).

A nivel celular, la toxicidad del Ni se asocia con disfunciones mitocondriales y la generación de estrés oxidativo, aunque los mecanismos moleculares subyacentes no están completamente esclarecidos. Estudios recientes han demostrado que la exposición al níquel puede inducir cambios epigenéticos, incluyendo alteraciones en los patrones de metilación del ADN en el genoma, lo que puede contribuir al desarrollo de cáncer (Rizwan et al., 2024).

Plomo (Pb)

Los efectos tóxicos del plomo representan un riesgo severo para la salud humana. En casos de exposición crónica, este metal puede afectar directamente al cerebro y al sistema nervioso central, provocando convulsiones, coma e incluso la muerte, particularmente en infantiles. Los niños que sobreviven a un episodio de intoxicación severa suelen presentar secuelas permanentes, entre ellas retraso en el desarrollo cognitivo, alteraciones en el comportamiento y déficit en el aprendizaje (OMS, 2019).

Además, la exposición al plomo se asocia con afectaciones en otros sistemas del organismo, incluyendo el renal, cardiovascular, hematológico y gastrointestinal, lo que evidencia su carácter multisistémico y de alta toxicidad (Ávalos, 2023).

Selenio (Se)

Una vez desarrollada la toxicosis por selenio, se observan numerosos efectos adversos en la salud. En humanos, uno de los signos característicos es el aliento con olor a ajo, alteraciones fisiológicas y metabólicas que incluyen reducción en las tasas de reproducción, crecimiento y en las respuestas inmunes. Asimismo, caída del cabello, decoloración y caída de las uñas, síntomas neurológicos (cefaleas pérdida de memoria), dolor muscular y articular, malestar gastrointestinal, fatiga, cirrosis hepática, e incluso la muerte (Symon et al., 2024).

1.7.7.2. Problemas de salud relacionados a parámetros microbiológicos en agua

La Organización Mundial de la Salud (OMS) y los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC) establecen la calidad del agua potable mediante pruebas para detectar la presencia de coliformes totales, que pueden contener bacterias fecales como *Escherichia coli*. Esta última constituye el agente patógeno responsable con mayor frecuencia de diarrea gastrointestinal sanguinolenta y complicaciones potencialmente fatales (Ravindra et al., 2015).

Diversos estudios han documentado que ciertas cepas de *E. coli*, han sido la causa de brotes de infección de gastroenteritis aguda a gran escala en países desarrollados donde aproximadamente el 20 % de los casos desarrollaron complicaciones fatales; aumento del riesgo de morbilidad y mortalidad en poblaciones susceptibles (Ravindra et al., 2015).

CAPITULO II. METODOLOGÍA

Esta tesis corresponde a un estudio experimental, centrado en la recolección, análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

2.1. Descripción de las zonas de muestreo

El análisis del agua se realizó de manera estratégica durante las temporadas secas y lluvia, con el fin de identificar variaciones estacionales. Para ello, se recolectaron un total de 9 muestras en puntos estratégicamente seleccionados como se muestra en la tabla 1, a lo largo del recorrido de la cuenca RHAe- Río Nexapa, considerando zonas del uso intensivo del agua y descargas potenciales dentro de los municipios de Tianguismanalco (San Pedro Atlixco y San Baltazar Atlimeyaya) y Atlixco (Metepec).

Cuadro 1. Definición estratégica de puntos de muestreo. Edición propia.

Muestra	Definición estratégica
MP1	Cascada "El Ovni". Intersección entre los municipios de Tianguismanalco y Atlixco. Punto final del río de San Pedro Atlixco.
MP2	"Barranca". Presunto punto de descarga de aguas residuales.
MP3	Sitio de mezcla entre el flujo descendente de la cascada y la descarga final del canal proveniente de locales.
MP4	Previo a cascada, pero con descarga final del canal proveniente de locales.
MP5	Cascada "San Pedro Atlixco". Punto de gran atractivo turístico en la zona de Tianguismanalco
MP6	Sitio de canal antes del comienzo de locales.
MP7	Zona de lavaderos y sitio de abrevadero o refrescamiento para el ganado.
MP8	Área dedicada a la crianza de trucha, situada en San Baltazar Atlimeyaya. Inicio de la comunidad de San Baltazar Atlimeyaya
MP9	Punto de "nacimiento". Zona de suministro de agua para uso potable por parte de los pobladores

2.1.1. Tianguismanalco

Las localidades de San Pedro Atlixco y San Baltazar Atlimeyaya forman parte de los 20 asentamientos que integran el municipio de Tianguismanalco. Este municipio se localiza entre los paralelos 18° 56' y 19°04' de latitud norte, los meridianos 98° 24' y 98° 35' de longitud oeste, con una altitud que oscila entre 1 940 y 2 220 m. Colinda al norte con los municipios de San Nicolás de los Ranchos y Nealtican; al este con

los municipios de Nealtican, San Jerónimo Tecuanipan, Santa Isabel Cholula y Atlixco; al sur con el municipio de Atlixco; al oeste con Atlixco, Tochimilco y San Nicolás de los Ranchos (INEGI, 2010).

2.1.1.1. Clima

La temperatura en este municipio oscila de 6° C a 25°C, alcanzando los valores más altos entre marzo y finales de mayo (Weather Spark). La precipitación anual varía de 900 a 1 100 mm. El clima predominante es templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad, con un promedio de 91.39% (INEGI, 2010a).

2.1.1.2. Uso de suelo y vegetación

El área presenta un predominio de suelos arenosol (71.02%), seguidos por regosol (14.04%), phaeozem (7.25%), andosol (5.38%) y fluvisol (0.82%). El uso del suelo se orienta principalmente a actividades agrícolas (47.09%) y en menor proporción, a zonas urbanas (1.49%). La cobertura vegetal está compuesta mayormente por bosque (49.77%) y, en menor medida por pastizal (1.65%) (INEGI, 2010a)

2.1. 2. Atlixco

Metepec es una localidad del municipio de Atlixco. Se ubica entre los paralelos 18° 48' y 19° 00' de latitud norte; los meridianos 98° 19' y 98° 36' de longitud oeste, con una altitud que varía entre 1 600 y 3 000 m. Colinda al norte con Tochimilco, Tianguismanalco y Santa Isabel Cholula; al este con Santa Isabel Cholula, Ocoyucan, Teopantlán y San Diego la Mesa Tochimiltzingo; al sur San Diego la Mesa Tochimiltzingo, Huaquechula y Atzitzihuacán; al oeste Atzitzihuacán y Tochimilco (INEGI, 2010b).

2.1.2.1. Clima

La temperatura en Atlixco varía entre 10° C a 28° C, aunque en ocasiones excepcionales puede alcanzar hasta los 31° C, registrándose los valores más altos entre marzo y finales de mayo (Weather Spark). La precipitación anual se encuentra en un rango de 900 a 1 300 mm. El clima predominante es templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad, con un promedio de 34.71 % (INEGI, 2010b).

2.1.2.2. Uso de suelo y vegetación

El área de Atlixco presenta suelos dominantes de tipo fluvisol (36.12%), seguidos por phaeozem (17.41%), leptosol (12.65%), arenosol (12.19%), regosol (5.18%), durisol (0.94%) y andosol (0.54%). Su uso está destinado principalmente en la agricultura con un 70.20% y, en menor medida, en zonas urbanas (14.29%). Su vegetación está compuesta por bosque con un 12.93%, pastizal un 1.38% y otros tipos de vegetación (0.52%) (INEGI, 2010b).

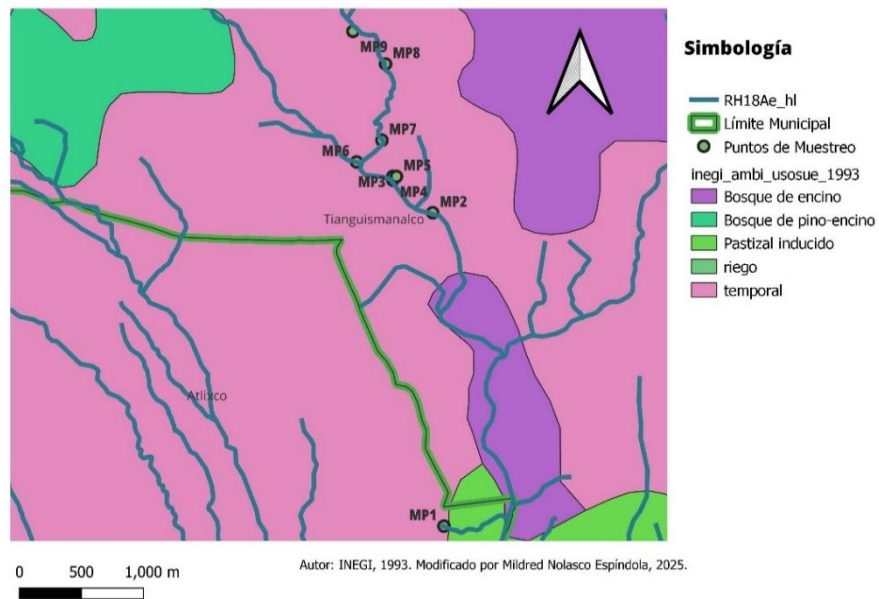


Figura 4. Vegetación de puntos de interés en los municipios de Atlixco y Tianguismanalco

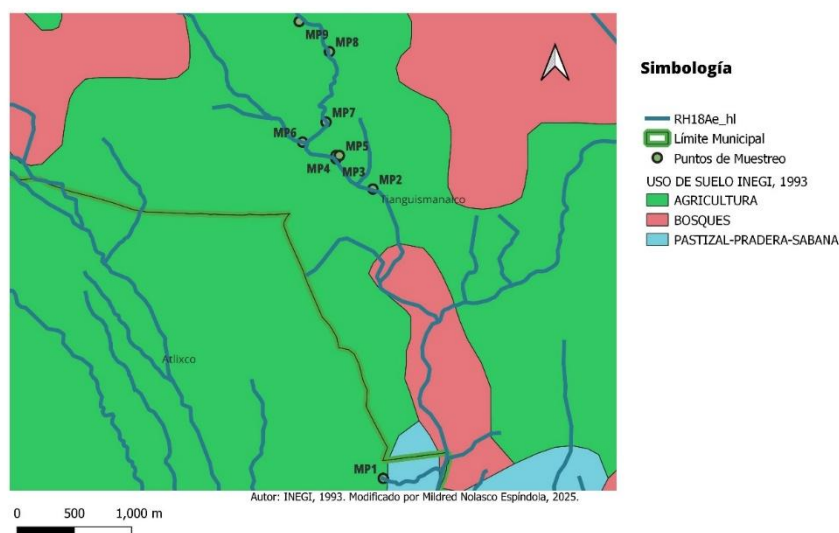


Figura 5. Uso de suelo en puntos de interés en Tianguismanalco-Atlixco, Puebla

2.2. Muestreo

Se llevaron a cabo los procedimientos sanitarios para el muestreo, como lo describe la norma NOM-230-SSA1-2002, de agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua.

Las muestras se recolectaron de forma manual en los puntos que señalados en el mapa de la figura 4, siguiendo el protocolo establecido por la normativa antes mencionada. Para los análisis fisicoquímicos se utilizaron botellas estériles de polietileno, mientras que para las determinaciones microbiológicas se emplearon vasos recolectores estériles de 100 mL.

En aquellos sitios donde las corrientes eran profundas y presentaban gran intensidad, se utilizó una cubeta como medio auxiliar para extraer el agua, mientras que en los puntos accesibles la recolección se efectuó de forma directa. En ambos casos, el recipiente (cubeta o frasco) se introdujo con el cuello orientado hacia abajo hasta una profundidad aproximada de 15 cm, en un punto representativo del canal y en sentido contrario a la corriente, con el fin de obtener una muestra homogénea.

En el caso de las muestras destinadas al análisis microbiológico, los frascos estériles se mantuvieron cerrados hasta encontrarse completamente sumergidos en el agua. Posteriormente, se abrieron y cerraron dentro del mismo cuerpo de agua, minimizando de esta manera el riesgo de contaminación externa. Todos los

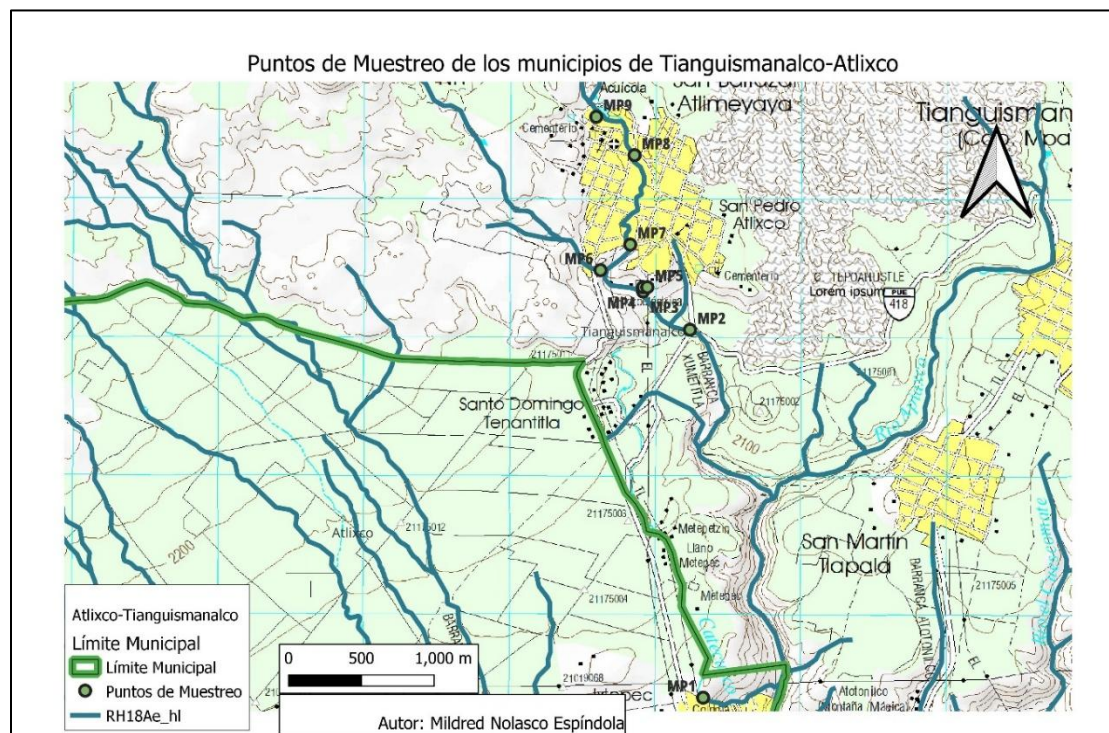


Figura 6. Puntos de muestreo de la microcuenca RH18 Ae de los municipios de Tianguismanalco-Atlixco

procedimientos se realizaron empleando guantes estériles, lo que aseguró la correcta manipulación de las muestras.

Posterior a la recolección, las muestras fueron preservadas en hieleras para mantener condiciones adecuadas de conservación a 4°C durante su traslado. Una vez ingresadas al laboratorio, se mantuvieron en refrigeración hasta el momento de su análisis, con el fin de evitar alteraciones en sus características fisicoquímicas y microbiológicas.

2.3. Parámetros fisicoquímicos, metales y microbiológicos del agua.

2.3.1. Fisicoquímicos

Los parámetros fisicoquímicos se determinaron de acuerdo con lo sugerido por las siguientes normas

Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas NMX-AA-007-SCFI-2013.

En la zona de recolección se extrajo un aproximadamente 1 L de agua en un envase de polietileno. La temperatura se midió inmediatamente utilizando un termómetro de vidrio.

Medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas NMX-AA-008-SCFI-2016.

Se determinó 12 horas después de la recolección, utilizando un potenciómetro electrónico de la marca Thermo Scientific previamente calibrado con soluciones buffer de pH 4,7 y 10.

Determinación de la conductividad electrolítica NMX-AA-093-SCFI-2000.

La muestra recolectada, se mantuvo a temperatura ambiente antes de la medición. El análisis se efectuó con un conductímetro de la marca Thermo Scientific previamente calibrado con soluciones patrón de referencia.

Determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas NMX-AA-012-SCFI-2001.

Este parámetro se determinó en campo utilizando un medidor de oxígeno disuelto marca Conductronic previamente calibrado. Durante la medición, el equipo se agitó de manera uniforme en la muestra.

Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas NMX-AA-034-SCFI-2015.

Se realizó únicamente en aquellas muestras que presentaban mayor turbidez, después de una selección visual. Las muestras seleccionadas fueron: MP2, MP4, MP5, MP6 y MP7, y se utilizó un volumen de 100 mL, previamente homogeneizado.

Antes del análisis, se prepararon los crisoles Gooch llevándolos a peso constante mediante ciclos de pesado y horneado a 105 °C durante 2 horas, hasta obtener una diferencia de peso menor a 0.0005 g entre dos mediciones consecutivas. Posteriormente, se humedeció un filtro con agua y se adhirió correctamente a la base del crisol, repitiendo el ciclo de pesado-horno hasta alcanzar nuevamente la estabilidad de 0.0005 g, enfriando siempre el crisol antes del pesado en un desecador.

Una vez obteniendo el peso constante del crisol con el filtro (m_2), se filtró el volumen de muestra seleccionado mediante un matraz Kitasato asistido por una bomba de

vació para agilizar el proceso. Posteriormente, la cápsula se llevó al horno a 105 °C durante una hora, se enfrió en el desecador y se repitió el ciclo de peso-horno hasta obtener una variación menor a 0.0005 g, registrándose este valor como m_6 .

$$SST = \frac{(m_6 - m_2)}{V} 1\,000\,000$$

Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas NMX-AA-036-SCFI-2001.

Se transfirieron 100 mL de cada muestra a un matraz Erlenmeyer de 250 mL. Inicialmente, se agregaron 2 gotas de disolución indicadora de fenolftaleína, observando la presencia o ausencia de un cambio de color hacia rosa. Al no presentarse el viraje, se precedió a añadir 2 gotas de disolución indicadora de naranja de metilo, evaluando el cambio de color a amarillo. A continuación, la muestra se tituló con ácido sulfúrico 0.025 N hasta alcanzar un viraje final de amarillo a color canela, registrándose el volumen final de ácido consumido en cada muestra para posteriormente efectuar el cálculo correspondiente.

$$\text{Alcalinidad total como } CaCO_3 \text{ en } \frac{mg}{L} = \frac{(A \times N)}{100} (50)(1\,000)$$

Donde

A es el volumen total gastado de ácido en la titulación al vire del anaranjado de metilo en mL.

N es la normalidad de la disolución de ácido.

100 es el volumen de la muestra en mL.

50 es el factor para convertir eq/L a mg $CaCO_3$ /L.

1000 es el factor para convertir mL a L.

Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas NMX-AA-073-SCFI-2001.

Para este análisis se empleó un volumen de 100 mL de muestra, verificando previamente que el pH se encontrara en un rango de 7 a 10. Posteriormente, se adicionó 1 mL de disolución indicadora de cromato de potasio y se procedió a la valoración con una disolución patrón de nitrato de plata, hasta observar el viraje de color amarillo a naranja rojizo. Finalmente, se registró el volumen de titulante consumido, el cual se utilizó para efectuar los cálculos correspondientes.

$$Cl^{-} \frac{mg}{L} = \frac{[(A - B) \times N \times 35,450]}{mL \text{ de muestra}}$$

Donde:

A son los mL de disolución de nitrato de plata gastados en la valoración de la muestra.

B son los mL de disolución de nitrato de plata gastados en la valoración del blanco.

N es la normalidad del nitrato de plata.

Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas NMX-AA-072-SCFI-200.

Se colocaron 50 mL de muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 mL, a los cuales se adicionaron 2 mL de disolución amortiguadora. Posteriormente, se incorporó una cantidad aproximada de 0.2 g del indicador eriocromo negro T. La muestra se tituló con una disolución de EDTA 0.02 M, agitando continuamente hasta la desaparición

de los últimos matices rojizos, observándose en el punto final un cambio de color de rojizo a azul. El volumen de titulante consumido se registró para su posterior aplicación en la ecuación correspondiente al cálculo de la dureza total.

$$\text{Dureza total como } CaCO_3 \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{V_{EDTA} \times M_{EDTA}}{V_{MUESTRA}} 100\,091$$

Donde:

V_{EDTA} es el volumen de titulante (EDTA) para valorar la muestra.

M_{EDTA} es la concentración de EDTA, mol/L.

$V_{MUESTRA}$ es el volumen de alícuota de muestra tomada.

100091 es el peso atómico del carbonato de calcio en mg/mol.

2.3.2. Metales

EPA Método SW-846 3015A: Digestión ácida asistida por microondas de muestras y extractos acuosos

- Arsénico, cadmio, cobre, cromo, hierro, manganeso, níquel, plomo y selenio.

Para los análisis de los metales, se inició con una digestión ácida: 45 mL de muestra y 5 mL de HNO_3 , en un sistema de microondas de modelo MARS. Posteriormente, las muestras digeridas fueron enviadas a la Dirección de Innovación y Transferencia de Conocimiento (DITCO) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, donde se llevaron a cabo los análisis correspondientes en un Espectrofotómetro de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-Masas).

2.3.3. Microbiológicos

NMX-AA-042-SCFI-2015. Enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y *Escherichia coli* – método del número más probable en tubos múltiples.

- Coliformes fecales - NMX-AA-042-SCFI-2015
- Coliformes totales - NMX-AA-042-SCFI-2015
- *Escherichia coli* - NMX-AA-042-SCFI-2015

Las pruebas se llevaron a cabo en el Centro de Investigación en Ciencias Microbiológicas de la BUAP, siguiendo los lineamientos normativos correspondientes.

En primera instancia, se llevó a cabo la prueba presuntiva, utilizando diluciones seriadas de 10^{-1} a 10^{-7} . Dichas diluciones fueron inoculadas en caldo lactosado con rojo de fenol, conteniendo un tubo Durham invertido, y se incubaron a 35 °C durante 24 horas. La presencia de gas y turbidez del tubo invertido después de las horas establecidas se interpretó como un resultado positivo, lo que permitió proceder con la prueba confirmativa.

La prueba confirmativa se generó a partir de los tubos con resultado positivo en la prueba presuntiva, se sembraron 10 µL en caldo EC MUG, también con tubos Durham invertidos, e inoculados a 37 °C, durante 24 horas. La generación de gas y turbidez se consideró indicativa de la presencia de coliformes fecales.

Finalmente, para la confirmación de *E. coli*, los tubos positivos a la prueba confirmativa fueron sembrados en tubos con caldo lactosa bilis verde brillante,

incubados a una temperatura de 44 °C por 24 horas, examinando la producción de gas y turbidez para reconocer como evidencia concluyente de la presencia de dicha bacteria.

Una vez concluidos los análisis en laboratorio, la expresión de los resultados se llevó a cabo mediante la aplicación de las tablas del número más probable (NMP), las cuales permiten estimar la densidad de microorganismos en las muestras analizadas con base en la probabilidad estadística de ocurrencia.

La interpretación de los resultados obtenidos se comparó con los límites máximos permisibles establecido por la norma NOM-127-SSA1-2021 y los Indicadores de la Calidad del Agua establecidos por la CONAGUA.

2.4. Determinación aproximada del Índice de Calidad del Agua

La aproximación de la evaluación numérica del “ICA”, se realizó con técnicas multiplicativas y ponderadas con la asignación de pesos específicos de Brown. Para calcular el Índice de Brown se utilizó una suma lineal ponderada de los subíndices que se expresan de la siguiente manera:

$$ICA = \sum_{i=1}^4 (Sub_i * w_i)$$

Para determinar el valor aproximado del “ICA” es necesario sustituir los datos en la ecuación anterior obteniendo los Subi de distintas gráficas como se explicará a continuación, dicho valor se multiplica por sus respectivos wi de la siguiente tabla y se realiza la sumatoria de los 4 resultados.

Cuadro 2. Ponderación de subindicadores. Corrales, L., 2017.

<i>i</i>	<i>Sub_i</i>	<i>w_i</i>
1	Coliformes fecales	0.15
2	pH	0.12
3	Cambio de temperatura	0.10
4	Saturación de Oxígeno Disuelto	0.17

Para el cálculo de los Sub_i se determinaron de las siguientes gráficas.

Para coliformes fecales con un valor menor a 100,000 NMP/100 mL, se buscó el valor en el eje de (X) en la Figura 1 y se procedió a interpolar al valor en el eje de las (Y).

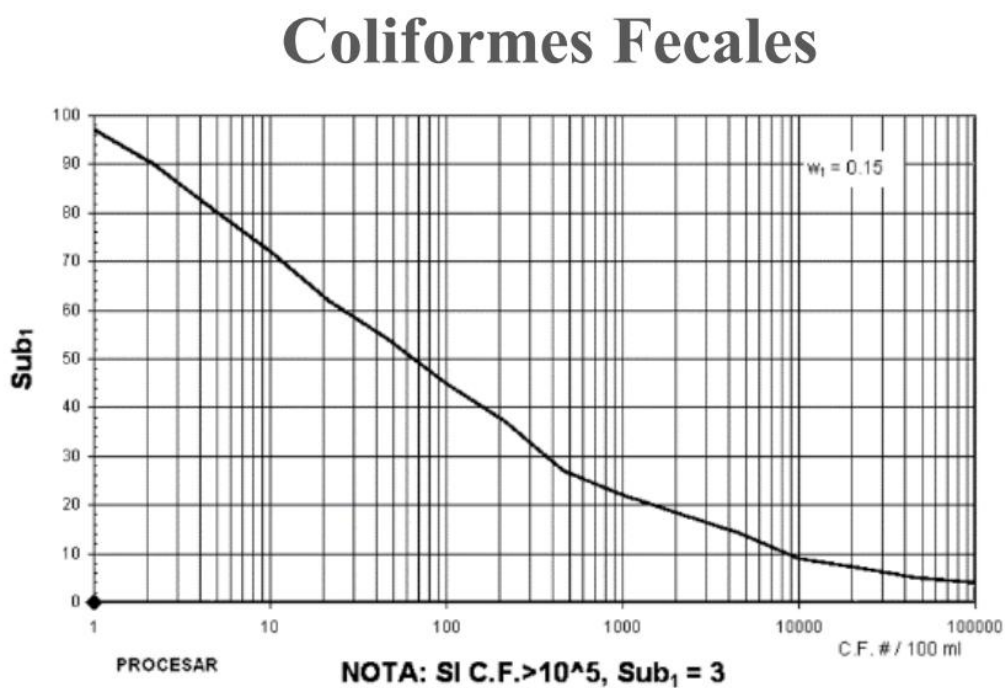


Figura 7. Valoración de la calidad de agua de coliformes fecales. Corrales, L., 2017

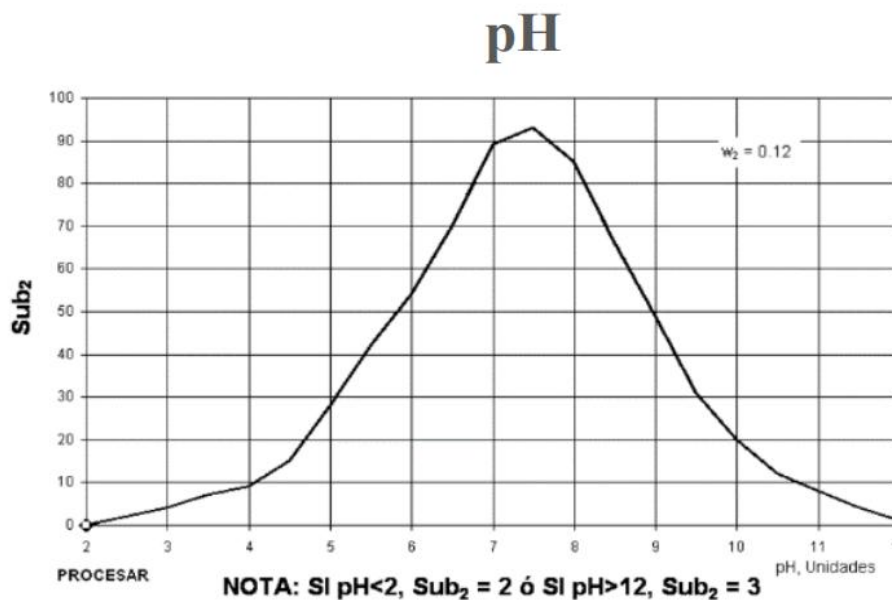


Figura 7. Valoración de la calidad de agua en función de pH. Corrales, L., 2017

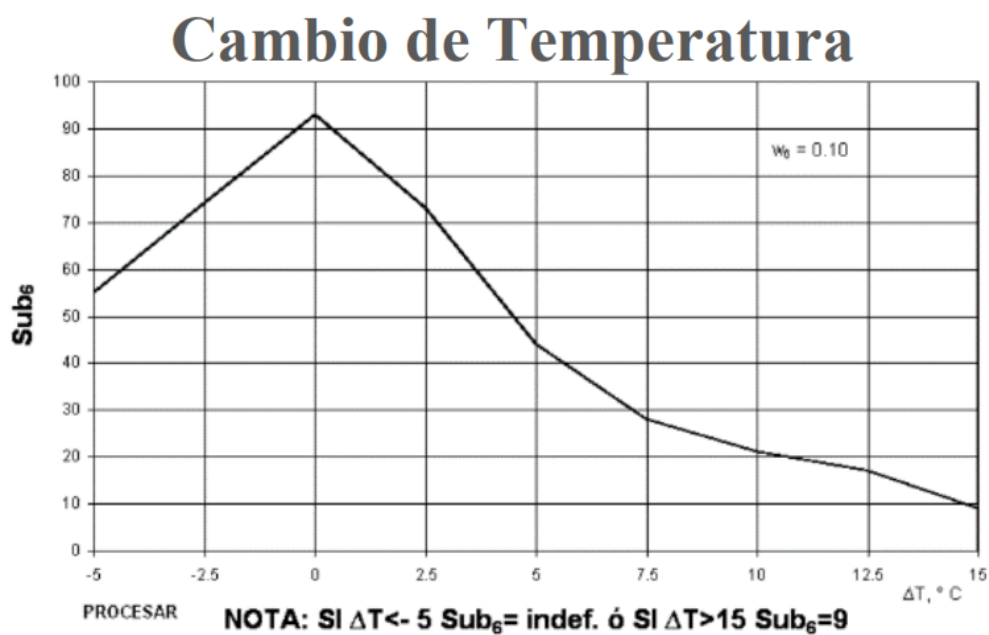


Figura 8. Valoración de la calidad de agua en función de la temperatura. Corrales, L., 2017

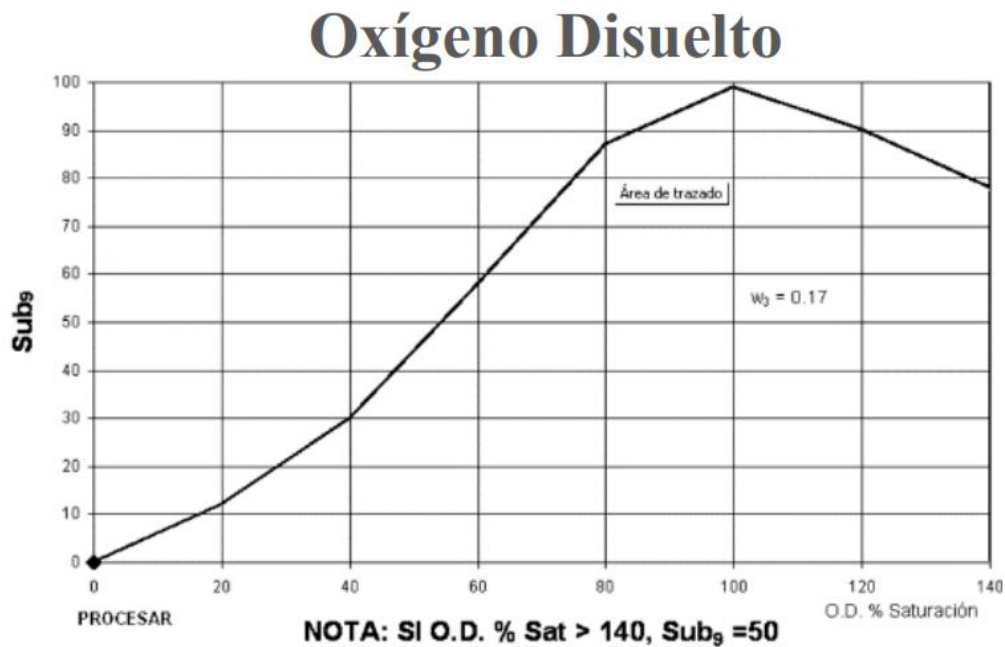


Figura 8. Valoración de la calidad de agua en función de la temperatura. Corrales, L., 2017

Finalmente se determinará un porcentaje final aproximado para la estimación del ICA con la determinación de los 4 parámetros analizados.

2.5. Determinación de las fuentes de contaminación

La identificación de los posibles orígenes de contaminación en la cuenca se realizó a partir de una revisión bibliográfica, con el propósito de establecer una aproximación fundamentada que permita comprender los factores y fuentes potenciales responsables de la presencia de contaminantes en el sistema hídrico.

CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de temporada de lluvias en los municipios de San Pedro Atlixco-San Baltazar Atlimeyaya-Metepec, Puebla.

3.1.1. Parámetros fisicoquímicos.

Cuadro 3. Resultados análisis fisicoquímicos en temporada de lluvias.

Muestra	Parámetro analizado	Valor obtenido	Clasificación
MP1	OD%	97.9	Excelente
	pH	7.1	Dentro del límite permisible
	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	159.6	Excelente para riego
	Alcalinidad (CaCO_3 mg/L)	69.8	Baja
	Dureza T. CaCO_3 (mg/L)	68.06	Dentro del límite permisible
	Cloruros Cl^- (mg/L)	0.052	Dentro del límite permisible
	SST (mg/L)	-	-
MP2	OD%	109.2	Excelente
	pH	7.2	Dentro del límite permisible
	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	161.6	Excelente para riego
	Alcalinidad (CaCO_3 mg/L)	74	Baja
	Dureza T. CaCO_3 (mg/L)	72.0	Dentro del límite permisible
	Cloruros Cl^- (mg/L)	0.058	Dentro del límite permisible
	SST (mg/L)	70	Buena calidad
MP3	OD%	72.2	Excelente
	pH	7.6	Dentro del límite permisible
	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	152.2	Excelente para riego
	Alcalinidad (CaCO_3 mg/L)	73.8	Baja
	Dureza T. CaCO_3 (mg/L)	68.0	Dentro del límite permisible
	Cloruros Cl^- (mg/L)	0.035	Dentro del límite permisible
	SST (mg/L)	-	-
MP4	OD%	129.4	Aceptable
	pH	7.5	Dentro del límite permisible
	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	151.7	Excelente para riego
	Alcalinidad (CaCO_3 mg/L)	74	Baja

	Dureza T. CaCO_3 (mg/L)	80.07	Dentro del límite permisible
	Cloruros Cl^- (mg/L)	0.029	Dentro del límite permisible
	SST (mg/L)	10	Excelente
MP5	OD%	168	Fuertemente contaminada
	pH	7.4	Dentro del límite permisible
	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	155.7	Excelente para riego
	Alcalinidad (CaCO_3 mg/L)	71.2	Baja
	Dureza T. CaCO_3 (mg/L)	80.073	Dentro del límite permisible
	Cloruros Cl^- (mg/L)	0.157	Dentro del límite permisible
	SST (mg/L)	20	Excelente
MP6	OD%	147.1	Contaminada
	pH	7.2	Dentro del límite permisible
	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	154.7	Excelente para riego
	Alcalinidad (CaCO_3 mg/L)	70	Baja
	Dureza T. CaCO_3 (mg/L)	64.05	Dentro del límite permisible
	Cloruros Cl^- (mg/L)	0.041	Dentro del límite permisible
	SST (mg/L)	10	Excelente
MP7	OD%	109.29	Excelente
	pH	7.2	Dentro del límite permisible
	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	154.8	Excelente para riego
	Alcalinidad (CaCO_3 mg/L)	75	Media
	Dureza T. CaCO_3 (mg/L)	68.06	Dentro del límite permisible
	Cloruros Cl^- (mg/L)	0.041	Dentro del límite permisible
	SST (mg/L)	20	Excelente
MP8	OD%	105.8	Excelente
	pH	7.1	Dentro del límite permisible
	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	153.3	Excelente para riego
	Alcalinidad (CaCO_3 mg/L)	76	Baja
	Dureza T. CaCO_3 (mg/L)	64.05	Dentro del límite permisible
	Cloruros Cl^- (mg/L)	0.035	Dentro del límite permisible
	SST (mg/L)	-	-
MP9	OD%	111.76	Buena calidad
	pH	6.9	Dentro del límite permisible
	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	167.73	Excelente para riego
	Alcalinidad (CaCO_3 mg/L)	83.2	Media
	Dureza T. CaCO_3 (mg/L)	136.12	Dentro del límite permisible
	Cloruros Cl^- (mg/L)	0.058	Dentro del límite permisible
	SST (mg/L)	-	-

En el cuadro 3 podemos observar los análisis de los parámetros fisicoquímicos en la temporada de lluvias, donde vemos una ligera linealidad con los datos. La clasificación se distribuye entre la NOM-127-SSA1-2021 y datos de la RENAMECA de calidad de agua.

3.1.2. Resultados microbiológicos

Cuadro 4. Resultados análisis microbiológico en temporada de lluvias.

Parámetro	Muestra				LP
	MP1	MP2	MP3	MP7	
	UFC.mL-1				<1 UFC.mL-1
Coliformes totales	9.5	45 000	25	25	FLP
Coliformes fecales	9.5	45 000	9.5	25	FLP
<i>E. coli</i>	4.5	2 000	9.5	25	FLP

*FLP: Fuera del límite permisible

LP: Límite Permisible

En el cuadro 4 se presenta la clasificación de los resultados conforme a la NOM-127-SSA1-2021, la cual establece que, para todos los grupos de coliformes, el valor permitido debe ser menor a 1 Unidad Formadora de Colonias por mililitro (UFC mL⁻¹). Los elementos subrayados corresponden al punto de muestreo que presenta niveles de contaminación significativamente superiores en comparación con el resto de los sitios evaluados.

3.1.3. Resultados de metales

Cuadro 5. Resultados metales en temporada de lluvias.

NOM-127-SSA1-2021										
Temporada de lluvias										
Metal (mg/L)	Muestra									LP (mg/L)
	MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	MP6	MP7	MP8	MP9	
As	0.126	0.106	0.146*	0.115	0.127	0.118	0.129	0.099	0.112	0.025
Cd	0.055	0.054	0.054	0.053	0.055	0.054	0.054	0.056*	0.052	0.005
Cr	0.069*	0.066	0.062	0.063	0.060	0.055	0.066	0.053	0.063	0.05
Cu	0.051*	0.042	0.042	0.040	0.040	0.041	0.040	0.035	0.035	2
Fe	0.362	0.438*	0.265	0.248	0.187	0.210	0.208	0.138	0.201	0.3
Mn	0.087*	0.085	0.083	0.085	0.086	0.086	0.085	0.083	0.087*	0.15
Ni	0.054	0.049	0.045	0.046	0.050	0.044	0.070*	0.050	0.055	0.07
Pb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01
Se	0.027*	0.010	0.004	0.008	0.019	0.015	0	0	0	0.04

FLP: Fuera del límite permisible

DLP: Dentro del límite permisible

LP: Límite permisible

*: Elementos con el valor más alto registrado en la temporada

En el cuadro 5 se presenta la clasificación de los metales durante la temporada de lluvias, de acuerdo con lo establecido en la NOM-127-SSA1-2021. Los valores con asterisco corresponden a los elementos que registraron las concentraciones más elevadas en distintos puntos de muestreo.

3.2. Resultados de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de temporada de secas
en los municipios de San Pedro Atlixco-San Baltazar Atlimayaya-Metepec, Puebla.

3.2.1. Parámetros fisicoquímicos

Cuadro 6. Resultados de parámetros fisicoquímicos en temporada de secas.

Muestra	Parámetro analizado	Valor obtenido	Clasificación
MP1	OD%	84.57	Excelente
	pH	7.9	Dentro del límite permisible
	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	182.1	Excelente para riego
	Alcalinidad (CaCO_3 mg/L)	50.6	Baja
	Dureza T. CaCO_3 (mg/L)	108.09	Dentro del límite permisible
	Cloruros Cl^- (mg/L)	0.047	Dentro del límite permisible
	SST (mg/L)	-	-
MP2	OD%	69.74	Buena calidad
	pH	7.9	Dentro del límite permisible
	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	191.56	Excelente para riego
	Alcalinidad (CaCO_3 mg/L)	52.2	Baja
	Dureza T. CaCO_3 (mg/L)	80	Dentro del límite permisible
	Cloruros Cl^- (mg/L)	0.053	Dentro del límite permisible
	SST (mg/L)	80	Buena calidad
MP3	OD%	81.5	Excelente
	pH	7.84	Dentro del límite permisible
	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	182.4	Excelente para riego
	Alcalinidad (CaCO_3 mg/L)	48.8	Baja
	Dureza T. CaCO_3 (mg/L)	104.095	Dentro del límite permisible
	Cloruros Cl^- (mg/L)	0.035	Dentro del límite permisible
	SST (mg/L)	-	-
MP4	OD%	61.34	Buena calidad
	pH	7.8	Dentro del límite permisible
	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	181.7	Excelente para riego
	Alcalinidad (CaCO_3 mg/L)	48.8	Baja
	Dureza T. CaCO_3 (mg/L)	104.095	Dentro del límite permisible
	Cloruros Cl^- (mg/L)	0.053	Dentro del límite permisible
	SST (mg/L)	15	Excelente

MP5	OD%	130	Contaminada
	pH	7.9	Dentro del límite permisible
	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	181.16	Excelente para riego
	Alcalinidad (CaCO_3 mg/L)	51.8	Baja
	Dureza T. CaCO_3 (mg/L)	104.09	Dentro del límite permisible
	Cloruros Cl^- (mg/L)	0.047	Dentro del límite permisible
	SST (mg/L)	20	Excelente
MP6	OD%	92.9	Excelente
	pH	7.6	Dentro del límite permisible
	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	182.23	Excelente para riego
	Alcalinidad (CaCO_3 mg/L)	49.8	Baja
	Dureza T. CaCO_3 (mg/L)	104.095	Dentro del límite permisible
	Cloruros Cl^- (mg/L)	0.059	Dentro del límite permisible
	SST (mg/L)	15	Excelente
MP7	OD%	65.54	Buena calidad
	pH	7.5	Dentro del límite permisible
	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	183.133	Excelente para riego
	Alcalinidad (CaCO_3 mg/L)	50.1	Baja
	Dureza T. CaCO_3 (mg/L)	104.095	Dentro del límite permisible
	Cloruros Cl^- (mg/L)	0.052	Dentro del límite permisible
	SST (mg/L)	20	Excelente
MP8	OD%	26.54	Contaminada
	pH	7.2	Dentro del límite permisible
	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	179.6	Excelente para riego
	Alcalinidad (CaCO_3 mg/L)	49.2	Baja
	Dureza T. CaCO_3 (mg/L)	100.09	Dentro del límite permisible
	Cloruros Cl^- (mg/L)	0.041	Dentro del límite permisible
	SST (mg/L)	-	-
MP9	OD%	84.03	Excelente
	pH	7.3	Dentro del límite permisible
	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	192.7	Excelente para riego
	Alcalinidad (CaCO_3 mg/L)	52.4	Media
	Dureza T. CaCO_3 (mg/L)	116.10	Dentro del límite permisible
	Cloruros Cl^- (mg/L)	0.053	Dentro del límite permisible
	SST (mg/L)	-	-

En el cuadro 6 podemos observar los análisis de los parámetros fisicoquímicos en la temporada de secas. La clasificación se distribuye entre la NOM-127-SSA1-2021 y datos de la RENAMECA de calidad de agua

3.2.2. Resultados microbiológicos.

Cuadro 7. Resultados análisis microbiológico en temporada de secas.

Parámetro	Muestra				LP
	MP1	MP2	MP3	MP7	
	UFC.mL-1				<1 UFC.mL-1
Coliformes totales	11.5	45 000	4.5	4.5	FLP
Coliformes fecales	9.5	45 000	1.5	2.5	FLP
<i>E. coli</i>	9.5	45 000	1.5	2.5	FLP

*FLP: Fuera del Límite permisible

LP: Límite Permisible

En el cuadro 7 se presenta la clasificación de los resultados conforme a la NOM-127-SSA1-2021, la cual establece que, para todos los grupos de coliformes, el valor permitido debe ser menor a 1 Unidad Formadora de Colonias por mililitro (UFC mL⁻¹). Los elementos subrayados corresponden al punto de muestreo que presenta niveles de contaminación significativamente superiores en comparación con el resto de los sitios evaluados.

3.2.3. Resultados de metales.

Cuadro 8. Resultados análisis de metales en temporada de secas.

NOM-127-SSA1-2021											
Temporada de secas											
Metal (mg/L)	Muestra									FLP	LP (mg/L)
	MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	MP6	MP7	MP8	MP9	DLP	
As	0.329*	0.318	0.255	0.218	0.235	0.202	0.139	0.266	0.112		0.025
Cd	0.011*	0.007	0.011*	0.007	0.009	0.010	0.008	0.007	0.008		0.005
Cr	0.025	0.037	0.047	0.037	0.045	0.038	0.047	0.049*	0.045		0.05
Cu	0.043	0.045	0.043	0.047	0.090*	0.049	0.046	0.042	0.050		2
Fe	0.209	0.159	0.185	0.148	0.224	0.162	0.125	0.131	0.233*		0.3
Mn	0.005	0.010	0.005	0.005	0.016*	0.005	0.004	0.004	0.007		0.15
Ni	0.050	0.055	0.055	0.061*	0.044	0.037	0.023	0.056	0.035		0.07
Pb	0.192	0.158	0.188	0.211*	0.074	0.059	0.201	0.202	0.114		0.01
Se	0.186	0.238	0.239	0.224	0.255*	0.195	0.217	0.210	0.171		0.04

FLP: Fuera del límite permisible

DLP: Dentro del límite permisible

LP: Límite permisible

*: Elementos con el valor más alto registrado en la temporada

En el cuadro 8 se presenta la clasificación de los metales durante la temporada de secas, de acuerdo con lo establecido en la NOM-127-SSA1-2021. Los valores con asterisco corresponden a los elementos que registraron las concentraciones más elevadas en distintos puntos de muestreo.

3.3. Índice de Calidad del Agua (ICA)

3.3.1. Resultados del ICA

Cuadro 9. Resultados aproximados del ICA en temporada de lluvias.

Punto	Parámetro	Sub i	wi	Subi*wi	Suma ICA	Clasificación parcial
MP1	Coliformes F.	78	0.15	11.7	47.77	Mala
	pH	91	0.12	10.92		
	Temperatura	90	0.1	9		
	Oxígeno Disuelto	95	0.17	16.15		
MP2	Coliformes F.	8	0.15	1.2	37.44	Mala
	pH	91	0.12	10.92		
	Temperatura	90	0.1	9		
	Oxígeno Disuelto	96	0.17	16.32		
MP3	Coliformes F.	78	0.15	11.7	44.76	Mala
	pH	90	0.12	10.8		
	Temperatura	90	0.1	9		
	Oxígeno Disuelto	78	0.17	13.26		
MP7	Coliformes F.	97	0.15	14.55	48.58	Mala
	pH	91	0.12	10.92		
	Temperatura	90	0.1	9		
	Oxígeno Disuelto	83	0.17	14.11		

Cuadro 10. Resultados aproximados del ICA en temporada de secas

Punto	Parámetro	Sub i	wi	Subi*wi	Suma ICA	Clasificación parcial
MP1	Coliformes F.	74	0.15	11.1	46.69	Mala
	pH	87	0.12	10.44		
	Temperatura	90	0.1	9		
	Oxígeno Disuelto	95	0.17	16.15		
MP2	Coliformes F.	8	0.15	1.2	32.54	Mala
	pH	87	0.12	10.44		
	Temperatura	90	0.1	9		
	Oxígeno Disuelto	70	0.17	11.9		
MP3	Coliformes F.	98	0.15	14.7	49.46	Mala
	pH	90	0.12	10.8		
	Temperatura	90	0.1	9		
	Oxígeno Disuelto	88	0.17	14.96		
MP7	Coliformes F.	82	0.15	12.3	43.46	Mala
	pH	94	0.12	11.28		
	Temperatura	90	0.1	9		
	Oxígeno Disuelto	64	0.17	10.88		

En los Cuadros 9 y 10 se presentan los resultados de la microcuenca RH18Ae en los que se efectuaron al menos cuatro de los nueve análisis requeridos para el cálculo del Índice de Calidad del Agua (ICA). Las muestras proceden de las localidades de Metepec, San Pedro Atlixco y San Baltazar Atlimeyaya (puntos 1, 2, 3 y 7). Debido a la disponibilidad de datos, el ICA calculado en este estudio corresponde a una aproximación parcial basada en cuatro parámetros (pH, cambio de temperatura, OD, coliformes fecales); por tanto, debe interpretarse como una estimación preliminar de la calidad del agua y no como el valor completo establecido por la metodología oficial de CONAGUA.

3.3.2. Comparación de temporada de lluvia- secas.

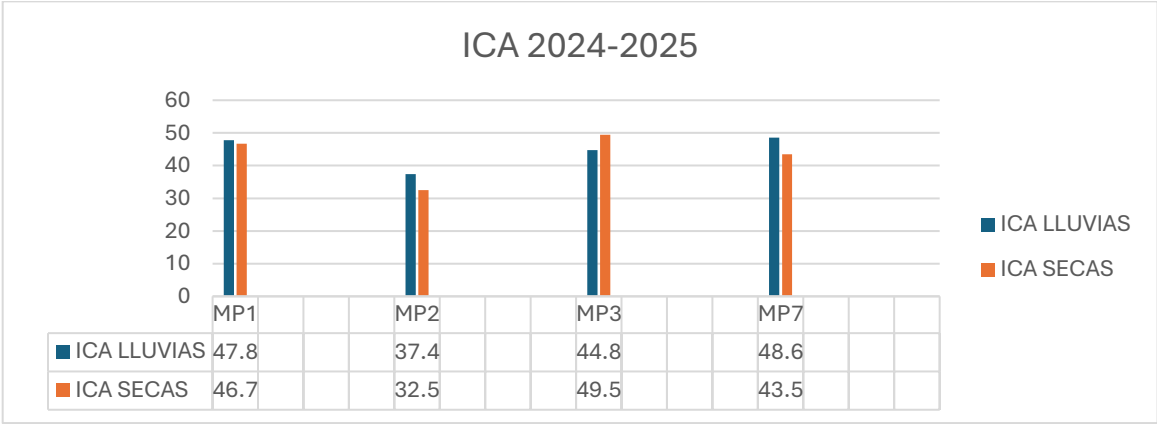


Figura 9. ICA en temporada de lluvia y secas

En la figura 9 se observa una ligera variación entre los resultados correspondientes a la temporada de lluvia y secas. No obstante, dicha diferencia no se considera significativa, ya que ambas épocas se encuentran dentro de la misma categoría de calidad. Sin embargo, es importante señalar que las condiciones climáticas propias de cada estación del año generan variaciones que, aunque sutiles, resultan evidentes en los parámetros analizados.

3.4. Resultados según la NOM-127-SSA1-2021

3.4.1. Resultados significativos de NOM-127-SSA1-2021 en temporada de lluvia.

3.4.1.1. Resultados microbiológicos en temporada de lluvia.

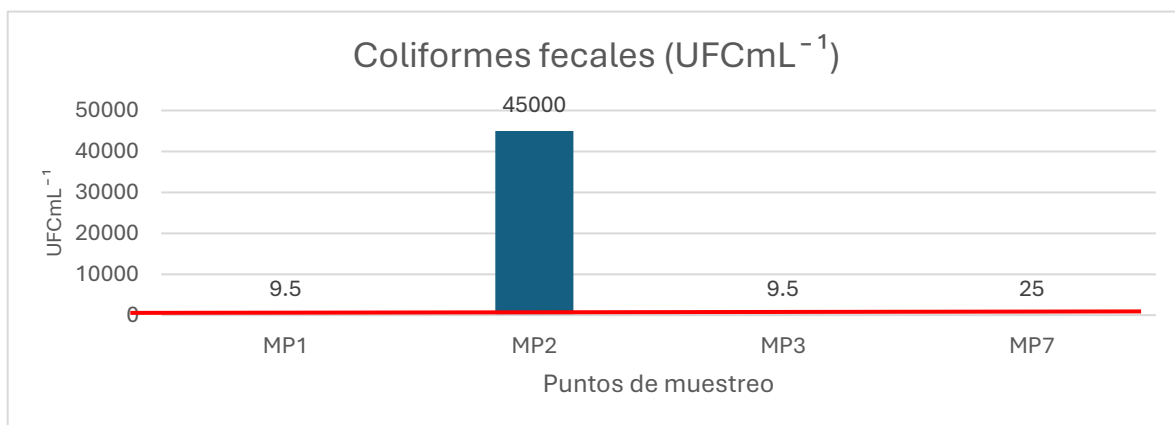


Figura 10. Coliformes fecales en temporada de lluvia

De acuerdo con la NOM-127-SSA1-2021, el límite máximo permisible para coliformes fecales en agua para consumo humano es menor a 1 UFC/mL. En los cuatro puntos analizados, las concentraciones registradas superaron este umbral.

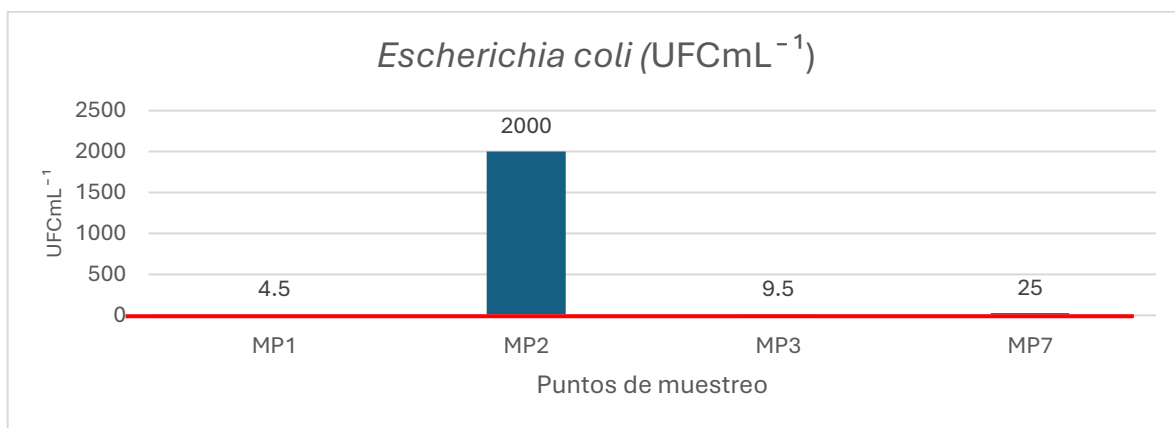


Figura 11. *E. Coli* en temporada de lluvia.

De manera similar, la NOM-127-SSA1-2021 establece que el límite máximo permisible para *E. Coli* en agua para consumo humano es menor a 1 UFC/mL. En los cuatro puntos analizados, las concentraciones obtenidas superaron este valor.

3.4.1.2. Resultado de metales en temporada de lluvia.

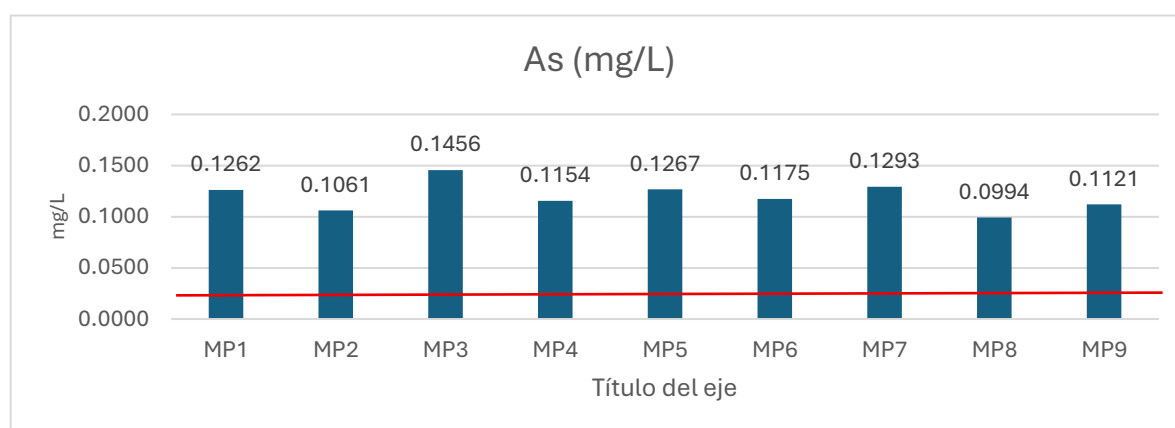


Figura 12. Arsénico en temporada de lluvia.

La normativa establece un límite máximo permisible (LMP) de 0.025 mg/L para arsénico. En las nueve muestras analizadas, las concentraciones registradas superaron dicho valor, indicando el incumplimiento.

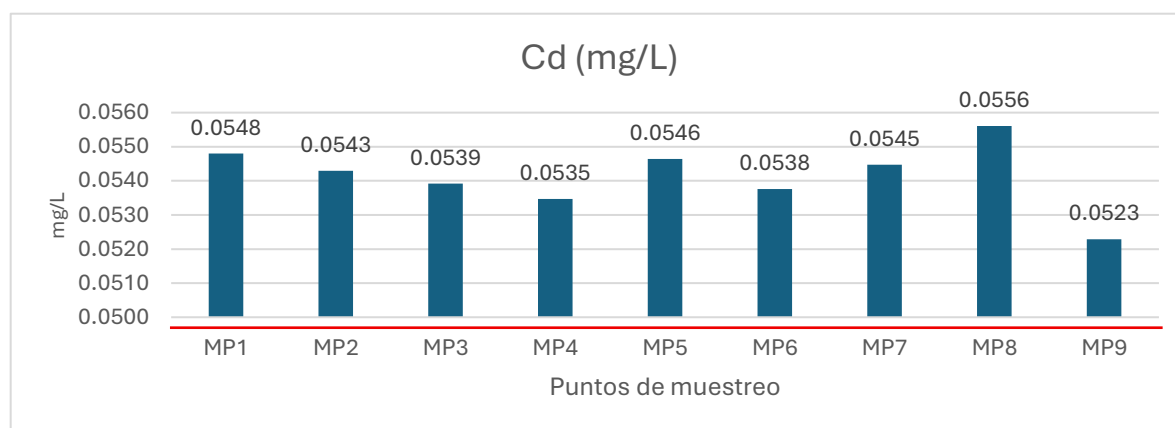


Figura 13. Cadmio en temporada de lluvia.

La normativa establece un límite máximo permisible (LMP) de 0.005 mg/L para cadmio. En las nueve muestras analizadas, las concentraciones registradas superaron dicho valor, lo que indica el incumplimiento.

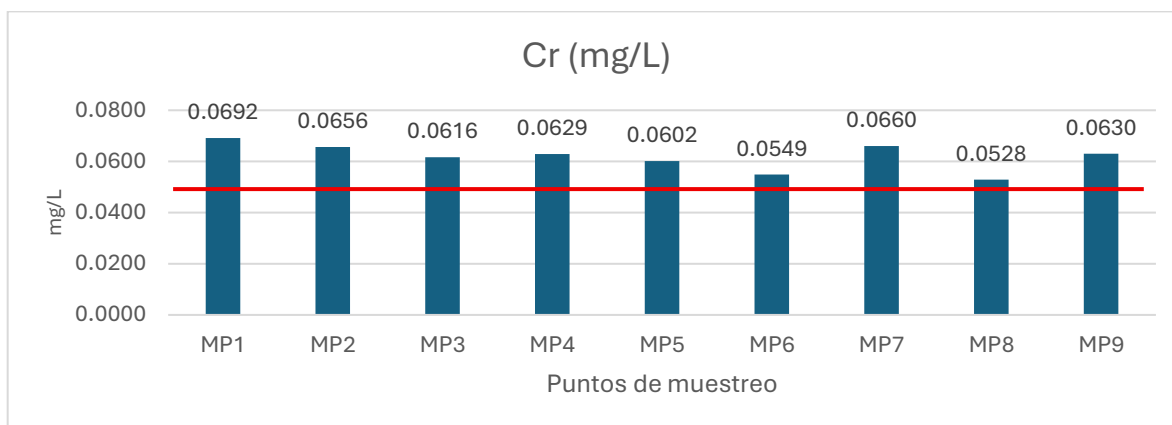


Figura 14. Cromo en temporada de lluvia.

La normativa establece un límite máximo permisible (LMP) de 0.05 mg/L para cromo. En las nueve muestras analizadas, las concentraciones registradas superaron dicho valor, indicando el incumplimiento.

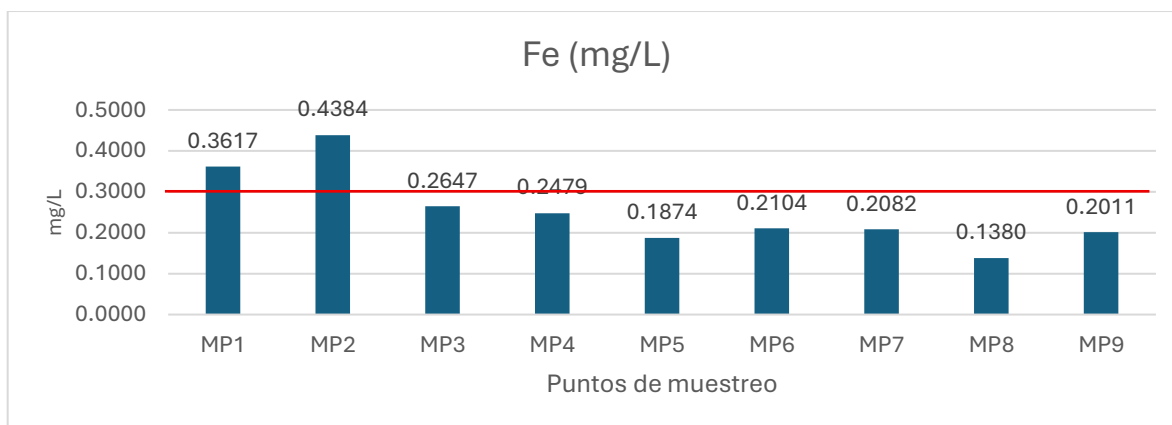


Figura 15. Hierro en temporada de lluvia.

La normativa establece un límite máximo permisible (LMP) de 0.30 mg/L para este parámetro. En las muestras analizadas, únicamente los puntos MP1 y MP2 excedieron este límite, evidenciando un incumplimiento puntual de la norma en estas localidades.

3.4.2. Resultados relevantes de NOM-127-SSA1-2021 en temporada de secas

3.4.2.1. Resultados microbiológicos en temporada de secas.

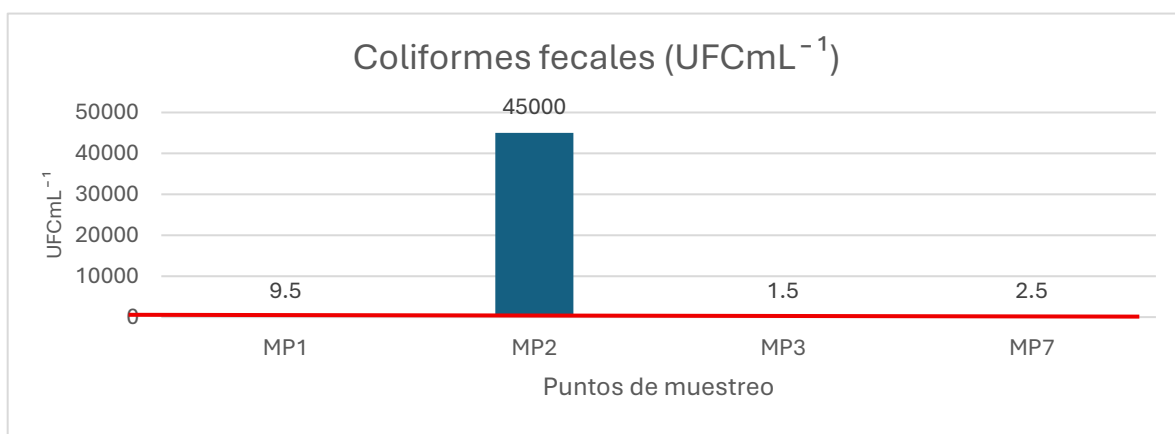


Figura 16. Coliformes fecales en temporada de secas

De acuerdo con la NOM-127-SSA1-2021, el límite máximo permisible para coliformes fecales en agua para consumo humano es menor a 1 UFC/mL. En los cuatro puntos analizados, las concentraciones registradas superaron este umbral.

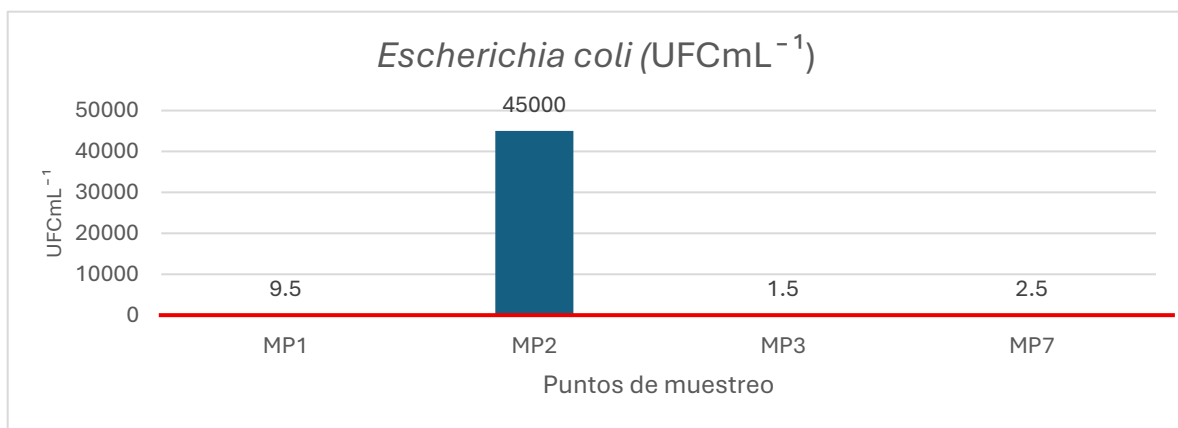


Figura 17. *E. Coli* en temporada de secas

De manera similar, la NOM-127-SSA1-2021 establece que el límite máximo permisible para *E. Coli* en agua para consumo humano es menor a 1 UFC/mL. En los cuatro puntos analizados, las concentraciones obtenidas superaron este valor.

3.4.2.1. Resultado de metales en temporada de secas

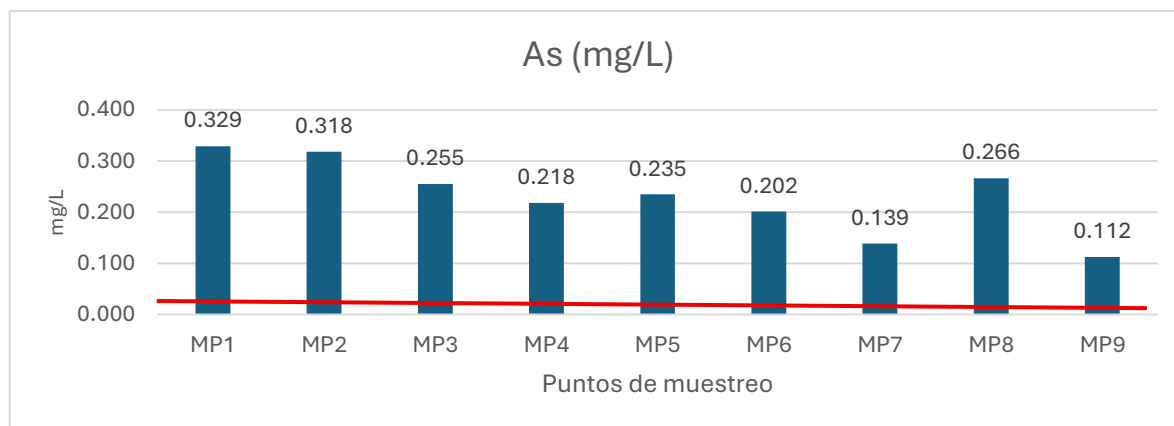


Figura 18. Arsénico en temporada de secas

La normativa establece un límite máximo permisible (LMP) de 0.025 mg/L para este parámetro. En las nueve muestras analizadas, las concentraciones registradas superaron dicho valor, indicando el incumplimiento.

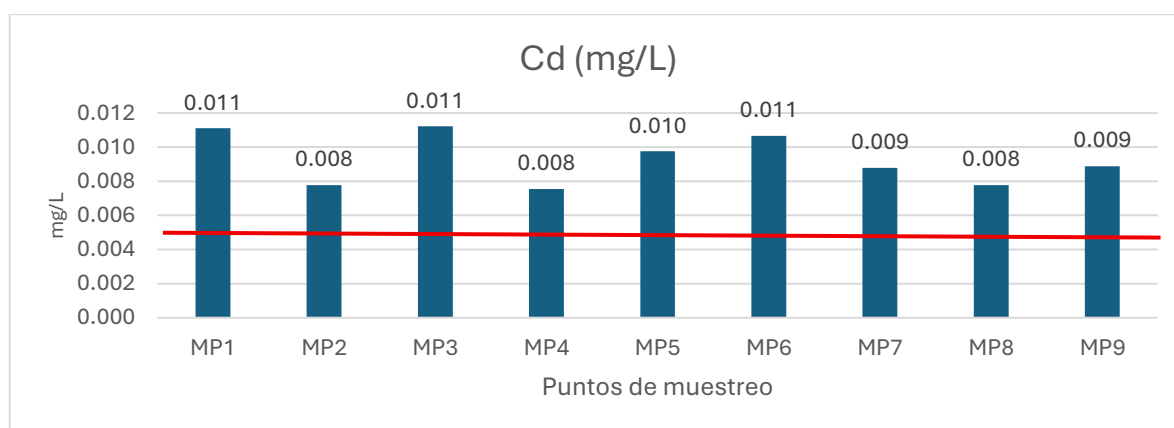


Figura 19. Cadmio en temporada de secas

La normativa establece un límite máximo permisible (LMP) de 0.005 mg/L para cadmio. En las nueve muestras analizadas, las concentraciones registradas superaron dicho valor, lo que indica el incumplimiento.

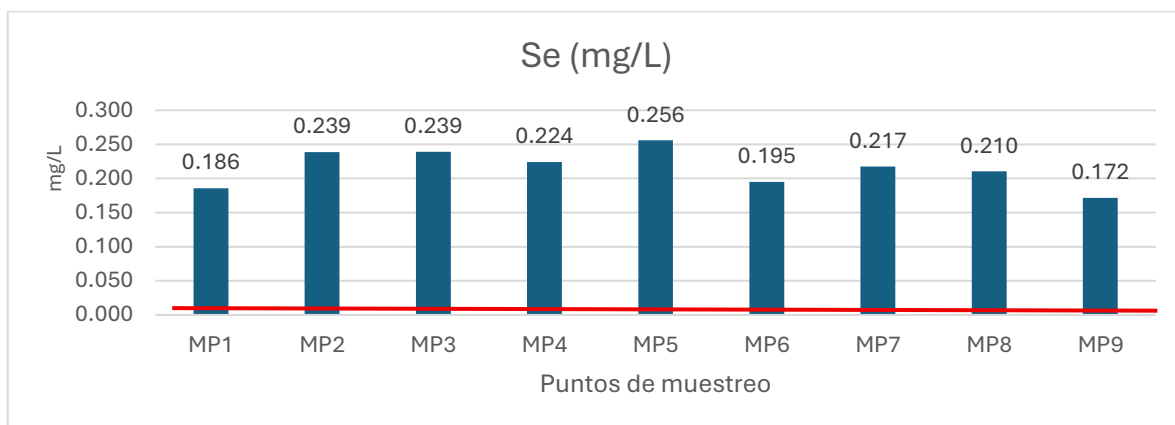


Figura 20. Selenio en temporada de secas

La normativa establece un límite máximo permisible (LMP) de 0.04 mg/L para selenio. En las nueve muestras analizadas, las concentraciones registradas se mantuvieron por encima de dicho umbral lo que indica el incumplimiento.

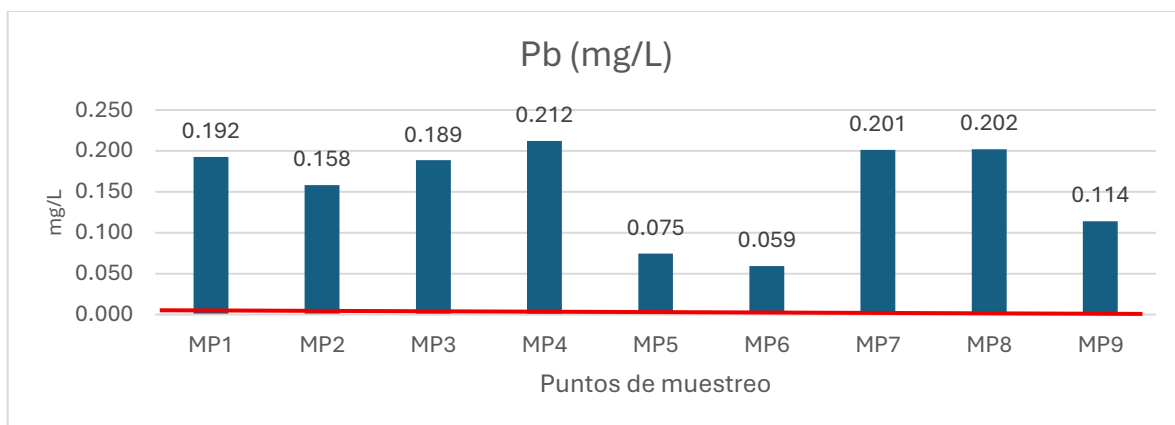


Figura 21. Plomo en temporada de secas

La normativa establece un límite máximo permisible (LMP) de 0.01 mg/L plomo. En las nueve muestras analizadas, las concentraciones registradas se mantuvieron por encima de dicho umbral lo que indica el incumplimiento.

3.5. Comparación entre el mes de lluvias 2024 y secas 2025 de la NOM-127-SSA1-2021

3.5.2. Comparación de microbiológicos.

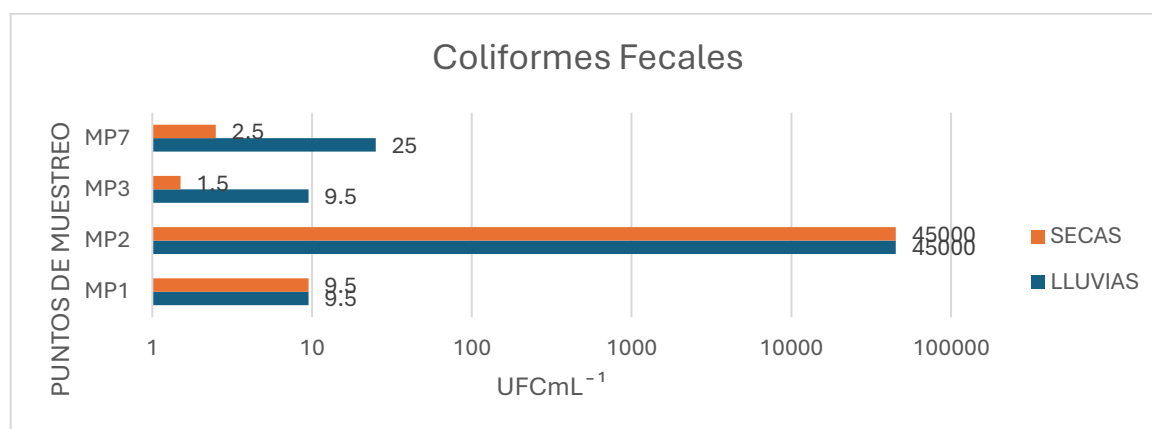


Figura 22. Comparación de coliformes fecales entre la temporada de lluvia y secas

En la figura 22, se observa que los puntos 1 y 7 tienen un comportamiento similar en cuanto a las variaciones estacionales. En contraste, en los puntos 3 y 7 se registra un descenso en las unidades formadoras de colonias en la temporada de lluvias, lo cual puede atribuirse al incremento de la temperatura. Es importante señalar que la presencia de estas bacterias constituye un indicador de contaminación reciente, ya que no poseen la capacidad de aclimatarse en los cuerpos de agua.

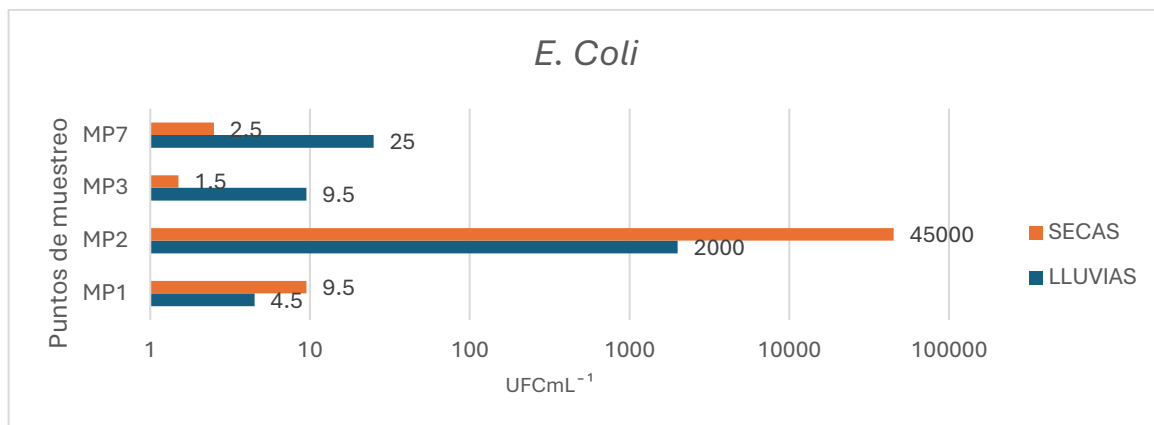


Figura 23. Comparación de *E. Coli* entre la temporada de lluvia y secas

Se observa un descenso en las unidades formadoras de colonias en la temporada de lluvias, lo cual puede atribuirse al incremento de la temperatura.

3.5.3. Comparación de resultados de metales

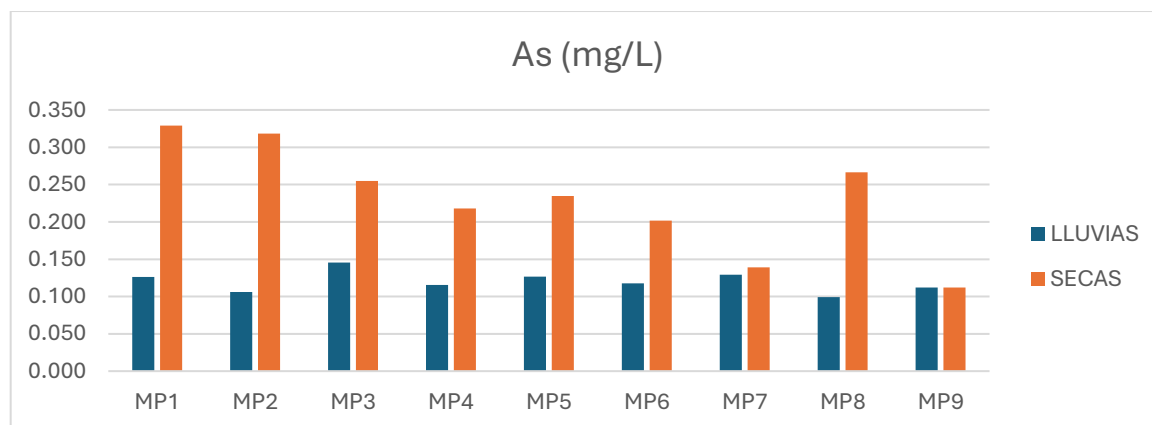


Figura 24. Comparación de arsénico entre la temporada de lluvia y secas

En la figura 24, se observa un incremento en los mg/L de arsénico en la temporada de secas, lo cual puede atribuirse al incremento de la temperatura, ya que con esto se logra una mayor concentración de los contaminantes por la disminución del volumen de agua que teóricamente ocurre en temporadas de seca.

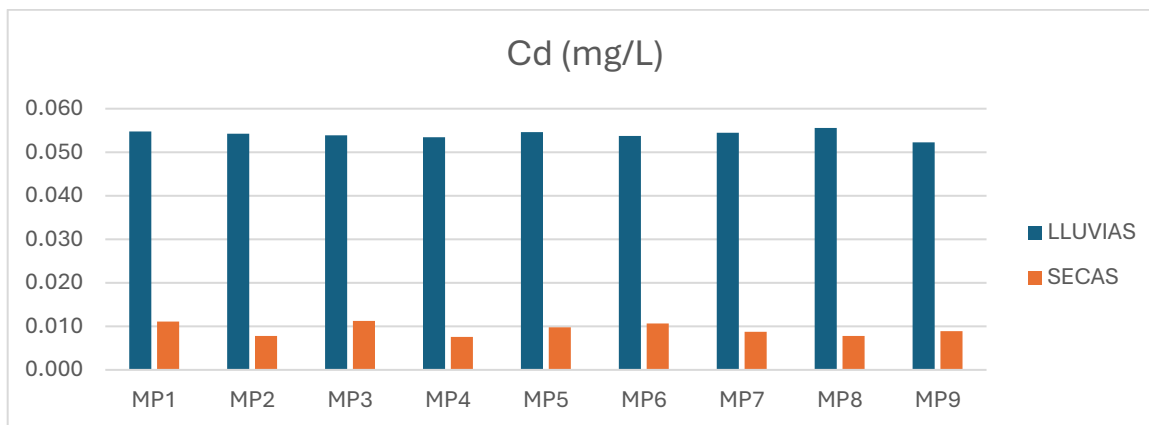


Figura 25. Comparación de cadmio entre la temporada de lluvia y secas

En la figura 25 se observa un incremento en la concentración de cadmio (mg/L) durante la temporada de lluvias. Este comportamiento puede explicarse por diversos factores. En México, la dinámica agrícola suele seguir dos ciclos de cultivo: el de primavera–verano, que inicia en abril y concluye en septiembre del mismo año, y el de otoño–invierno, que comienza en junio y finaliza en marzo del año siguiente (SADR, 2019). Tras la cosecha, es común preparar los suelos para el siguiente ciclo mediante la aplicación de fertilizantes fosfatados, lo cual podría incrementar la solubilidad de cadmio (Nicoleta et al, 2022). Con la llegada de las lluvias, el agua de escorrentía puede disolver o arrastrar estos metales presentes en el suelo hacia los cuerpos de agua. Por otro lado, en la temporada seca la disponibilidad de agua es menor, lo cual reduce la capacidad de dilución del cadmio y puede dar lugar a concentraciones más bajas. Es importante destacar que este patrón sugiere la posible existencia del metal en fase sólida en sedimentos o partículas del suelo, aunque eso no implica necesariamente su remoción completa del sistema acuático.

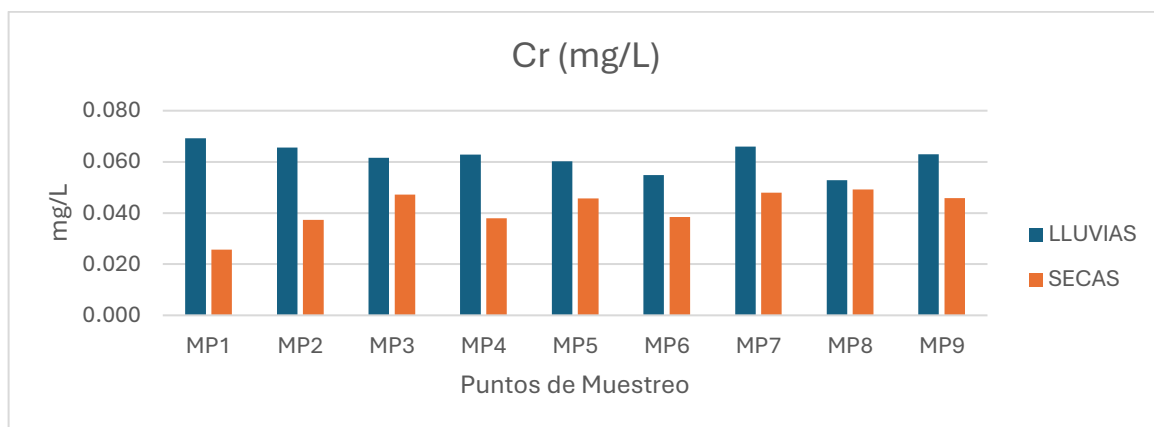


Figura 26. Comparación de cromo entre la temporada de lluvia y secas

En la figura 26 se observa un incremento en la concentración de cromo (mg/L) durante la temporada de lluvias. Este comportamiento podría estar relacionado con la actividad volcánica del Popocatepetl, ya que la emisión de cenizas y gases volcánicos puede liberar metales pesados que posteriormente son incorporados a los cuerpos de agua a través de la precipitación. Por otra parte, en la temporada de secas la disminución del arrastre de suelos reduce la incorporación de este elemento, lo que sugiere que una fracción del cromo presente en el agua podría tener un origen en los suelos adyacentes.

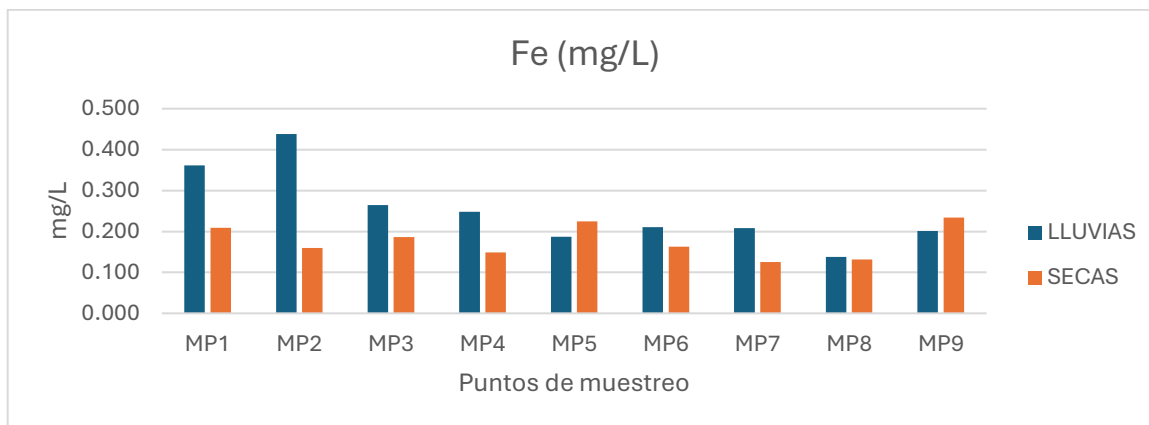


Figura 27. Comparación de hierro entre las temporadas de lluvia y secas

En la figura 27 se observa un ligero incremento en la concentración de hierro durante la temporada de lluvias. Este fenómeno puede atribuirse a que, conforme el agua pluvial se infiltra a través del suelo y las formaciones rocosas, disuelve minerales que contienen hierro, los cuales son posteriormente transportados hacia los cuerpos de agua superficiales.

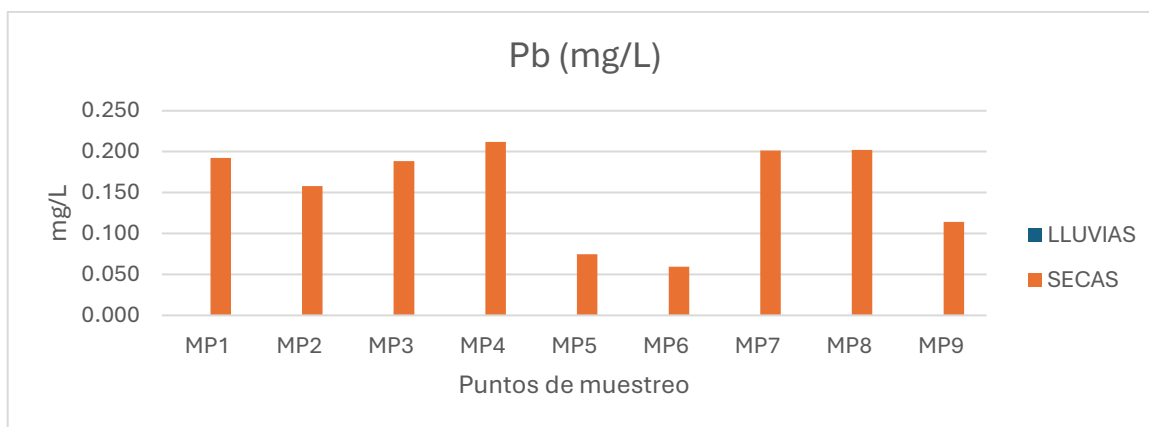


Figura 28. Comparación de plomo entre las temporadas de lluvia y secas

En la figura 28 se observa la ausencia de este metal durante la temporada de lluvias; sin embargo, en la temporada de secas se registra una concentración significativa.

Este comportamiento resulta complejo de explicar, ya que se atribuye principalmente a fuentes antrópicas. La marcada variación entre temporadas, pasando de un valor de 0 mg/L a una concentración superior al límite máximo permisible (LMP), evidencia la influencia de actividades humanas y plantea la necesidad de un análisis más detallado sobre los posibles orígenes de dicha contaminación.

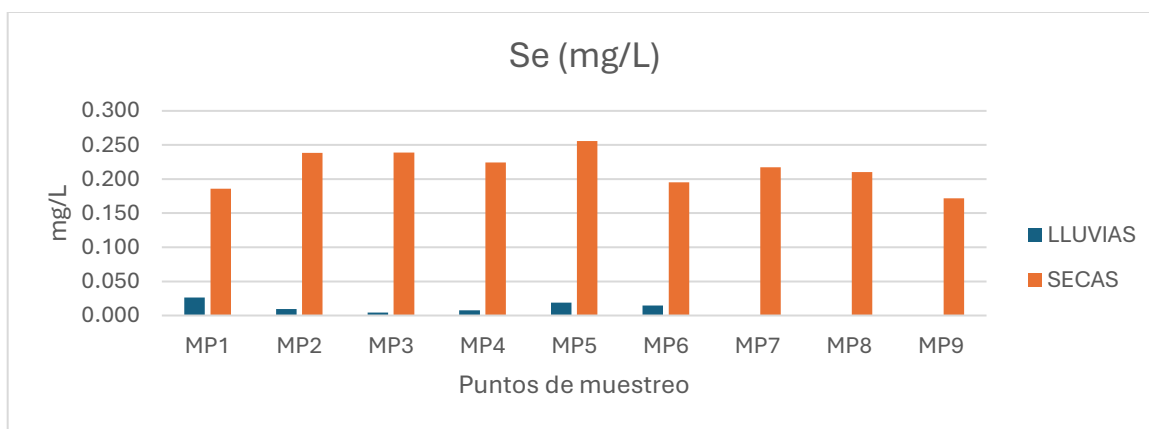


Figura 29. Comparación de selenio entre las temporadas de lluvia y secas

La variación estacional observada en la figura 29 en la concentración de selenio muestra una diferencia considerable, ya que durante la temporada de secas se registra un incremento significativo. Aunque el origen de este elemento puede estar asociado a procesos naturales, como la actividad volcánica o la meteorización de rocas, la marcada diferencia entre una temporada y otra sugiere con mayor probabilidad un aporte de carácter antrópico pudiendo asociarse a la quema de combustibles fósiles.

3.6. Resultados según la RENAMECA para calidad de agua superficial

3.6.1. Calidad de agua RENAMECA para cuerpos lóticos

Cuadro 11. Calidad del agua RENAMECA en temporada de lluvia

		Clasificación código de colores y escala de calidad del agua del indicador						Semáforo
		Cumplimiento			Incumplimiento			
Indicador	Punto	Valor	Excelente	Buena Calidad	Aceptable	Contaminada	Fuertemente contaminada	Color amarillo en caso de incumplimiento
Porcentaje de OD (%)	MP1	97.97	70<OD<=110	50<OD<=70 Y 110<OD<=120	30<OD<=50 Y 120<OD<=130	10<OD<=30 Y 130<OD<=150	OD<=10 Y OD>150	Verde
	MP2	109.24						Verde
	MP3	72.26						Verde
	MP4	129.41						Verde
	MP5	168.06						Amarillo
	MP6	147.16						Amarillo
	MP7	109.29						Amarillo
	MP8	105.88						Verde
	MP9	111.76						Verde
SST	MP1	0	SST<=25	25<SST<=75	75<SST<=150	150<SST<=400	SST>400	Verde
	MP2	70						Verde
	MP3	0						Verde
	MP4	10						Verde
	MP5	20						Verde
	MP6	10						Verde
	MP7	20						Verde
	MP8	0						Verde
	MP9	0						Verde
Coliformes Fecales	MP1	9.5	CF<=100	100<CF<=200	200<CF<=1000	1000<CF<=10000	CF>10000	Verde
	MP2	45000						Amarillo
	MP3	9.5						Verde

	MP7	25						Verde
<i>Escherichia Coli</i>	MP1	4.5	EC<=250	250<EC<=500	500<EC<=1000	1000<EC<=10000	EC>100000	Verde
	MP2	2000						Amarillo
	MP3	9.5						Verde
	MP7	25						Verde

En el caso de las muestras MP2, MP5, MP6 y MP7, uno o dos parámetros presentan incumplimientos, por lo que su semáforo se clasificaría en amarillo. Destaca especialmente el punto MP2, que registra un alto nivel de contaminación microbiológica, lo cual coincide con lo esperado, dado que se considera un punto de descarga residual. Por su parte, las muestras MP5 y MP6 muestran indicadores de contaminación relacionados con el oxígeno disuelto (OD), lo que podría explicarse por su proximidad a la cascada. Las demás muestras presentan valores dentro del cumplimiento, por lo que su semáforo se clasificaría en verde.

Cuadro 12. Calidad del agua RENAMECA en temporada de secas.

		Clasificación código de colores y escala de calidad del agua del indicador						Semáforo
		Cumplimiento				Incumplimiento		
Indicador	Punto	Valor	Excelente	Buena Calidad	Aceptable	Contaminada	Fuertemente contaminada	Color amarillo en caso de incumplimiento
Porcentaje de OD (%)	MP1	84.57	70<OD<=110	50<OD<=70 Y 110<OD<=120	30<OD<=50 Y 120<OD<=130	10<OD<=30 Y 130<OD<=150	OD<=10 Y OD>150	Verde
	MP2	69.74						Verde
	MP3	81.51						Verde
	MP4	61.34						Verde
	MP5	130.25						Amarillo
	MP6	92.94						Verde
	MP7	65.54						Verde
	MP8	26.05						Amarillo
	MP9	84.03						Verde
SST	MP1	0	SST<=25	25<SST<=75	75<SST<=150	150<SST<=400	SST>400	Verde
	MP2	80						Verde
	MP3	0						Verde

	MP4	15						Verde
	MP5	20						Verde
	MP6	15						Verde
	MP7	20						Verde
	MP8	0						Verde
	MP9	0						Verde
Coliformes Fecales	MP1	9.5	CF<=100	100<CF<=200	200<CF<=1000	1000<CF<=10000	CF>10000	Verde
	MP2	45000						Amarillo
	MP3	1.5						Verde
	MP7	2.5						Verde
<i>Escherichia Coli</i>	MP1	9.5	EC<=250	250<EC<=500	500<EC<=1000	1000<EC<=10000	EC>10000	Verde
	MP2	45000						Amarillo
	MP3	1.5						Verde
	MP7	2.5						Verde

Las muestras MP2, MP5 y MP8 se clasificaron en el semáforo amarillo. En el caso de MP2, el incumplimiento se debió a contaminación microbiológica. La muestra MP5 presentó un valor de oxígeno disuelto (OD) alto, lo cual puede explicarse por su ubicación en la cascada. Por su parte, la muestra MP8 corresponde a un punto situado justo afuera de un local de crianza de truchas, lo que podría justificar la disminución en los niveles de OD.

3.7. Revisión bibliográfica del origen de la contaminación en la microcuenca RH18 Ae.

3.7.1. Origen natural.

3.7.1.1. Geología

La composición geológica de la región evidencia un claro predominio de rocas ígneas extrusivas, entre las que destacan principalmente el basalto y las formaciones de composición ácida, como dacitas y tobas ácidas. Esta característica

confirma el origen volcánico dominante del área (INEGI, 2010). Las rocas ígneas extrusivas, también denominadas rocas magmáticas, se forman a partir de la solidificación del magma o lava en la superficie terrestre (SFM, 2017).

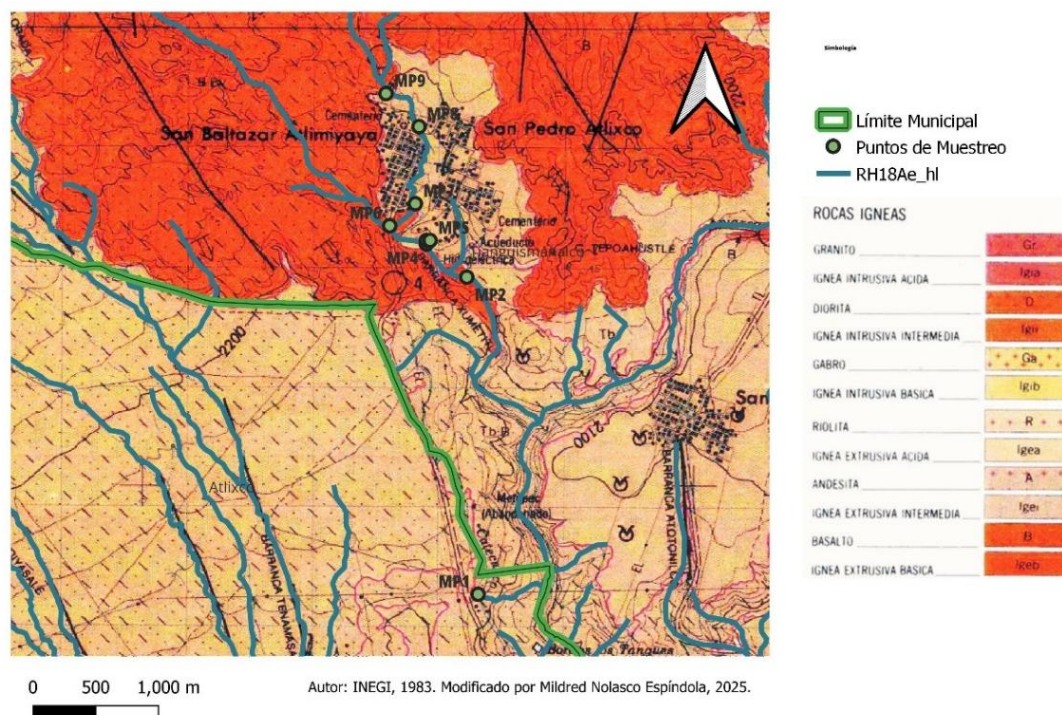


Figura 30. Geología de interés en las localidades de Atlixco y Tianguismanalco

3.7.1.2. Edafología

La composición de los suelos adyacentes a los cuerpos de agua está conformada principalmente por los siguientes tipos:

- Feozem háptico: Se caracteriza por presentar un horizonte A rico en materia orgánica y alta concentración de nutrientes. Su formación está

estrechamente relacionada con el intemperismo de las rocas de origen ígneo extrusivo (INEGI, 2001).

- Fluvisol éútrico: Corresponde a suelos formados por sedimentos fluviales. Se distinguen por presentar una saturación por bases superior al 50% (Vera et al., 2019).
- Litosol: Son suelos muy delgados, pedregosos y poco desarrollados (SEMARNAT).
- Regosol éútrico: Son suelos poco desarrollados cuya formación dependen de la litología. Horizonte A ócrico, puede o no presentar horizonte C. Su textura es media y el drenaje interno es moderado. Y su origen se debe a rocas ígneas extrusivas (INEGI, 2001).

En conjunto, estos tipos de suelo tiene un claro origen volcánico, lo que sugiere que los procesos de lavado y arrastre de materiales edáficos hacia los cuerpos de agua podrían contribuir a la composición química de estos.



Figura 31. Edafología de puntos de interés de los municipios de Atlixco y Tlanguismanalco.

3.7.1.3 Actividad volcánica

La ubicación de estos municipios se encuentra hacia el sureste del volcán Popocatepetl, dentro de la zona potencial de influencia por dispersión de cenizas, gases y materiales volcánicos. Durante las temporadas del muestreo, se realizó una revisión mensual del número de erupciones registradas, con el fin de evaluar la posible incidencia de la actividad volcánica en los niveles de contaminación observados en la zona de estudio.

La ceniza emitida por el volcán Popocatepetl ha sido objeto de diversas caracterizaciones desde 1994, con el propósito de identificar su composición química y su potencial impacto ambiental. En 2022, Santamaría et al. realizaron un análisis fisicoquímico mediante espectrofotometría de absorción atómica, en el cual identificaron la presencia de metales como Fe, Zn, Cu, Mg, Mn, Cr y Ni. Estos elementos después de ser emitidos a un proceso de lixiviación al entrar en contacto con el agua.

Durante otra investigación realizada en 2015, Rodríguez et al. analizaron 25 muestras de ceniza y suelo de erupciones recientes emitidas por el volcán Popocatepetl, confirmando la presencia de 8 metales traza: Zn, Pb, Ni, Hg, Cr, Cd, Cu, As. Los análisis revelaron que estos elementos se encontraban en formas parcialmente lixiviables, lo que indica su potencial movilidad al entrar en contacto con el agua y, en consecuencia, su posible incorporación a los suelos y cuerpos de agua cercanos, representando una fuente potencial de contaminación ambiental.

Cuadro 13. Monitoreo del volcán Popocatepetl noviembre- diciembre (temporada de lluvias). CENAPRED, 2025.

FECHA	# ERUPCIONES	ORIENTACIÓN
16-11-24	54	O

17-11-24	37	SO
18-11-24	88	SO
19-11-24	24	SO
20-11-24	56	NO
21-11-24	52	NO
22-11-24	35	O
23-11-24	16	O
24-11-24	45	ONO
25-11-24	25	ONO
26-11-24	23	O
27-11-24	40	O
28-11-24	54	O
29-11-24	16	SO
30-11-24	19	OSO
1-12-25	28	OSO
2-12-25	33	N
2-12-25	31	N
3-12-25	18	N
4-12-25	24	ONO
5-12-25	35	OSO
6-12-25	50	O
7-12-25	65	NO
8-12-25	23	NO
9-12-25	48	SO
10-12-25	118	SO
11-12-25	46	SO
12-12-25	71	O
13-12-25	32	SO
14-12-25	52	SO
15-12-25	26	O
16-12-25	50	OSO

En el cuadro 13 se observa que no existe una relación directa evidente entre la actividad volcánica registrada durante la temporada de lluvias y la calidad del cuerpo de agua analizada. Sin embargo, este resultado no descarta una posible influencia del material volcánico, ya que el periodo evaluado es limitado. Es importante considerar que los contaminantes asociados a la deposición de ceniza y partículas

volcánicas pueden permanecer en el agua y en el suelo durante periodos prolongados, por lo que su presencia no necesariamente está vinculada a erupciones recientes, sino también a eventos ocurridos en meses anteriores.

Cuadro 14. Monitoreo del volcán Popocatepetl mayo-junio (temporada de secas). CENAPRED, 2025.

FECHA	# ERUPCIONES	ORIENTACIÓN
13-05-25	13	SE
14-05-25	14	OS
15-05-25	21	SO
16-05-25	41	OSO
17-05-25	25	ONO
18-05-25	10	NO
19-05-25	13	NNO
20-05-25	31	O
21-05-25	16	ENO
22-05-25	50	NO
23-05-25	56	NO
24-05-25	34	ONO
25-05-25	71	N
26-05-25	37	ESE
27-05-25	59	O
28-05-25	42	NO
29-05-25	70	O
30-05-25	64	NE
31-05-25	70	S
1-06-25	49	SO
2-06-25	64	SO
3-06-25	54	SO
4-06-25	28	SO
5-06-25	124	SO
6-06-25	32	O
7-06-25	30	NO
8-06-25	38	ONO
9-06-25	33	O
10-06-25	61	O
11-06-25	73	O

12-06-25	29	NO
13-06-25	68	NO

En el cuadro 14 se aprecia una ligera relación directa entre la actividad volcánica registrada durante la temporada de secas y la calidad del cuerpo de agua analizado. Las orientaciones marcadas en rojo son aquellas que tienen vinculación con el área de estudio. No obstante, se llega a la misma conclusión que en la temporada de lluvias, es decir, que no se evidencia una influencia significativa inmediata de la actividad volcánica reciente sobre la calidad del agua, aunque esto no excluye posibles efectos acumulativos de eventos pasados.

3.7.2. Origen antrópico.

3.7.2.1. *Actividad Económicas*

En el municipio de Tianguismanalco, las localidades de San Pedro Atlixco y San Baltazar Atlimeyaya presentan como principales actividades económicas la agricultura y la crianza de animales, respectivamente, conforme a la información del Censo de Población y Vivienda 2020. Por su parte, el Ayuntamiento de Atlixco informó en 2021 que las actividades económicas predominantes en el municipio corresponden a la agricultura, el comercio y el turismo.

3.7.2.2. Actividad Minera.

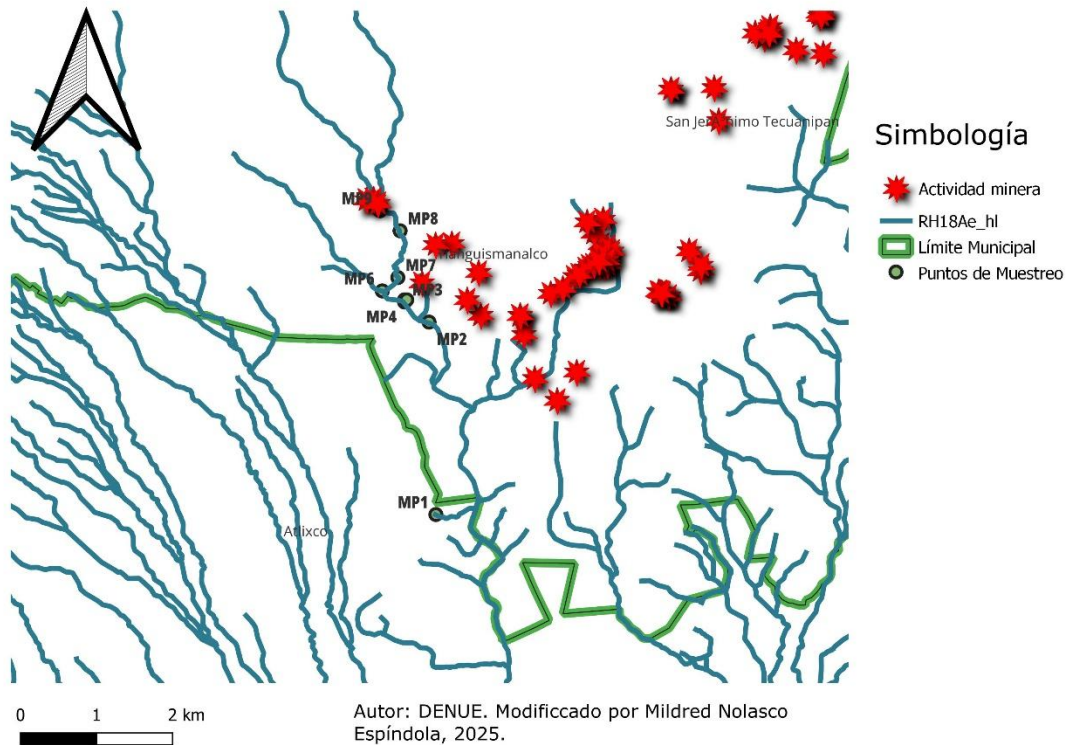


Figura 32. Actividad minera en los puntos de interés de Tianguismanalco-Atlixco, Puebla.

Según datos del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), el municipio de Tianguismanalco cuenta con aproximadamente 55 minas a cielo abierto dedicadas a la extracción de piedra.

Las canteras son zonas destinadas a la extracción de rocas, arena o minerales directamente de la superficie terrestre, con el propósito de obtener materiales utilizados principalmente para la construcción. (National Geographic).

Si bien esta actividad genera impactos negativos en el entorno paisajístico, así como procesos de contaminación y erosión del suelo, además de emisiones atmosféricas asociadas a la generación de polvo y ruido, la contaminación de los cuerpos de agua superficiales ha sido uno de los componentes menos estudiados en relación con los impactos ambientales ocasionados (Sucari et al., 2021).

No obstante, es importante considerar que la remoción de la cobertura superficial del suelo puede favorecer procesos de contaminación difusa, especialmente en zonas con litologías de origen volcánico-clástico, ya que estas rocas pueden contener trazas naturales de metales que, al exponerse, son susceptibles de liberarse hacia el ambiente.

3.7.2.2. Actividades agropecuarias

En el municipio de Tianguismanalco, la actividad productiva principal es la agropecuaria, destinándose aproximadamente 59% del suelo a la agricultura (PNUD, 2024). En contraste, en el municipio de Atlixco, el 57 % de la población se dedica al comercio y los servicios (PNUD, 2024a).

En el sector agrícola, es común el uso de fertilizantes y plaguicidas para maximizar la productividad. Aunque su aplicación controlada no representa un riesgo significativo, el uso inadecuado o excesivo de estos productos puede generar contaminación del suelo, y a través de procesos de arrastre superficial y lixiviación, los contaminantes pueden alcanzar cuerpos de agua superficiales o subterráneos. Esta dinámica es compleja y multifactorial, ya que la magnitud de la contaminación depende de factores como el tipo de suelo, la pendiente, la cantidad y frecuencia de aplicación, las condiciones hidrometeorológicas y las prácticas agrícolas locales (Benítez & Miranda, 2013). Por lo tanto, la actividad agrícola en la zona podría

representar una fuente difusa de contaminación, contribuyendo a la presencia de ciertos compuestos en el agua.

3.7.2.3. Descarga residual municipal

El Gobierno del Estado de Puebla, a través del Plan de Desarrollo Municipal de Tianguismanalco, Puebla (2018), reportó que el 90.60 % del municipio cuenta con servicio de drenaje. Por su parte, en el municipio de Atlixco, el INEGI informó en 2020 que la cobertura municipal de drenaje sanitario alcanza el 97.45 % de las viviendas.

A pesar de no contar con información oficial actualizada sobre la ubicación y el destino final de las descargas residuales municipales, es importante señalar que no se tiene identificado a este río como el receptor oficial de dichas descargas. No obstante, no se puede descartar la existencia de descargas clandestinas, que podrían estar aportando contaminantes de manera intermitente. Mientras que los parámetros fisicoquímicos analizados no evidencian una contaminación permanente de origen municipal, los parámetros microbiológicos muestran una contaminación fecal clara y significativa, lo que sugiere la presencia de aportes puntuales o difusos no controlados, posiblemente relacionados con conexiones irregulares o vertidos directos no autorizados.

3.8. Discusión

De manera general, se observó que los parámetros microbiológicos presentaron concentraciones superiores a los valores establecidos en la NOM-127-SSA1-2021, y que, de acuerdo con la RENAMECA, dichas concentraciones corresponden a una calidad de agua deficiente, puntualizado en el punto 2 (MP2). Esto evidencia la presencia constante de contaminación fecal en los cuatro puntos evaluados. En

contraste, la mayoría de los parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad, alcalinidad, dureza total y sólidos suspendidos totales) se mantuvieron dentro de los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos tanto en la NOM-127-SSA1-2021 como en los estándares de la RENAMECA, lo que sugiere una menor alteración en estos indicadores. No obstante, en el caso de los metales analizados, se registraron concentraciones que superan los valores normativos, lo cual representa un riesgo potencial para la salud humana y los ecosistemas acuáticos. Esto refleja la influencia combinada de fuentes antrópicas y naturales, tanto puntuales como difusas, dentro de la microcuenca.

En el análisis microbiológico, los coliformes totales, fecales y *Escherichia Coli* presentaron valores superiores a 1 UFC/mL —valor umbral establecido por la NOM-127-SSA1-2021— en los cuatro puntos de muestreo y en ambas temporadas analizadas. El valor más alto se registró durante la temporada de lluvias en MP2, con 45 000 UFC/ML, lo que indica contaminación fecal reciente. Este comportamiento sugiere la presencia de descargas clandestinas a lo largo del trayecto de la microcuenca, particularmente en MP2, donde se presume la existencia de una vena principal de descarga y donde el flujo del agua es reducido, favoreciendo la concentración excesiva de microorganismos. Además, se observó que durante el periodo de lluvias hubo un ligero incremento en las concentraciones, lo cual coincide con lo reportado por Wang y Doyle (1998), quienes determinaron que *Escherichia coli* 0157:H7 sobrevive mejor a temperaturas bajas (alrededor de 8°C), pudiendo persistir por más de 3 meses.

En comparación con estudios previos, los coliformes fecales y totales presentaron concentraciones superiores a las reportadas por Silva et al. en 2002, quienes encontraron valores de 30 y 24 000 NMP 100 mL⁻¹ en de verano y primavera, respectivamente, en el tramo del río Nexapa que atraviesa el municipio de

Tianguismanalco. Investigaciones más recientes, como las realizadas por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla en 2023, registraron valores aún más elevados —entre 130 000 y 2 400 000 coliformes fecales— en dos puntos del río Nexapa, cerca del municipio de Izúcar de Matamoros. La presencia constante de contaminación microbiológica indica una condición sanitaria crítica del agua, lo que representa un riesgo directo para las comunidades que la utilizan sin un tratamiento previo adecuado.

En cuanto a la contaminación por metales, se detectó que seis de los 9 elementos analizados excedieron los LMP establecidos por la NOM-127-SSA1-2021. Durante la temporada de lluvias, los valores más altos fueron: Fe (0.438 ppm) > As (0.146 ppm) > Cr (0.069 ppm) > Cd (0.056 ppm). En la temporada de secas, se registraron valores elevados de As (0.329 ppm) > Pb (0.211 ppm) > Se (0.255 ppm) > Cd (0.011 ppm). La presencia de estos metales ha sido relacionada en estudios previos con la actividad volcánica. No obstante, las variaciones observadas entre temporadas pueden explicarse por la influencia de diversos factores ambientales. En particular, el proceso de lixiviación que ocurre cuando el material volcánico entra en contacto con el agua ha sido ampliamente documentado, dando origen a múltiples investigaciones que analizan su movilidad y aporte a los cuerpos hídricos. Rodríguez et al. (2015) sometieron distintos materiales volcánicos del volcán Popocatepetl (suelo estratificado y cenizas de diferentes años) a procesos de lixiviación y encontró que los elementos más fácilmente movilizables fueron As (74.72%) > Zn (44.64%) > Cu (42.50%) > Hg (32,86%) > Ni (20,61%) > Cd (20%) > Cr (9,37%) > Pb (6,94%). Aunque estos resultados sugieren que Cu y Ni podrían presentarse en mayores concentraciones, esto depende de factores locales como las concentraciones naturales en la zona y los límites normativos entre cada metal. De manera similar, Santamaría et al. (2022), caracterizaron el material particulado

del volcán Popocatepetl, encontrando mayores concentraciones de Fe, seguido de Mg, Zn, Mn, Cr, Cu y Ni. Tras un proceso de lixiviación, los metales más movilizables fueron Fe (1.87ppm) > Zn (0.241 ppm) > Cu (0.097 ppm) > Mg (0.051 ppm) > Mn (0.018 ppm) > Cr (0.011 ppm), lo que apoya la hipótesis de un aporte natural de origen volcánico.

Finalmente, los valores obtenidos en esta investigación fueron comparados con estudios anteriores realizados en el río Nexapa. Aunque la presencia de metales no había sido abordada de manera tan amplia previamente, Silva et al. (2002) reportaron concentraciones elevadas de Cd (0.006 mg/L), Cr (0.07 mg/L) y Pb (0.08 mg/L) en el tramo que atraviesa Tianguismanalco, evidenciando un incremento en la contaminación metálica a lo largo del tiempo. Asimismo, un estudio de la BUAP (2024) realizado por Tenorio et al. reportó la presencia de plomo, zinc, cadmio y cobre en concentraciones inferiores al límite permisible de la NOM-001-SEMARNAT, pero concentraciones de arsénico y cromo superiores a dicho límite.

CONCLUSIONES

Esta investigación tuvo como propósito evaluar la calidad microbiológica y fisicoquímica del agua en la microcuenca RH18 Ae, ubicada dentro de los municipios de Tianguismanalco y Atlixco, así como identificar posibles fuentes de contaminación y su impacto en la salud pública. El estudio se desarrolló en nueve puntos de muestreo durante dos periodos estacionales (temporada de lluvias y de secas), analizando parámetros clave que permitieron determinar el estado actual del cuerpo de agua.

Los resultados fisicoquímicos (pH y dureza total) se mantuvieron dentro de los rangos permisibles establecidos por la NOM-127-SSA1-2021. En contraste, los

parámetros microbiológicos superaron de forma consistente los límites normativos en cuatro de los nueve puntos analizados, evidenciando una contaminación reciente y directa.

El cálculo del Índice de Calidad del Agua (ICA), aunque constituye una aproximación, mostró que el agua presenta un equilibrio fisicoquímico general, aunque se obtuvo un valor general bajo debido a que únicamente se evaluaron 4 de 9 parámetros considerados en la metodología oficial. A pesar de ello, se observaron valores altos en parámetros individuales. En cuanto a la calidad microbiológica, los resultados confirman la existencia de una contaminación severa en diversos puntos de la cuenca.

En cuanto a los metales, se detectó la presencia de nueve elementos (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Se) en todos los puntos de muestreo durante ambas temporadas. Aunque las concentraciones variaron de forma dispersa e incluso algunos elementos estuvieron ausentes en ciertos sitios, se registraron excedencias de los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1-2021 en ambas temporadas.

- En temporada de lluvias, se observaron concentraciones elevadas de As, Cd, Cr y Fe.
- En temporada de secas, destacaron As, Cd, Pb y Se.

La comparación entre temporadas evidenció diferencias relativas en la presencia de metales y en el nivel de contaminación microbiológica. Estas variaciones se explican principalmente por la naturaleza volcánica del área de estudio, la disminución del caudal en temporada de secas y el aumento de la actividad volcánica, factores que favorecen la concentración de metales. En el ámbito microbiológico, se registró una

ligera disminución de la contaminación en los cuatro puntos durante la temporada de secas. La literatura consultada indica que ciertas cepas de *Escherichia coli* sobreviven mejor a temperaturas de aproximadamente 8 °C que a temperaturas más elevadas, lo cual explica las mayores concentraciones observadas en temporada de lluvias.

La revisión bibliográfica permitió atribuir la mayoría de los metales a orígenes volcánicos, ya sea por procesos geológicos o por la emisión de material particulado. No obstante, aunque varios estudios lo relacionan con actividad volcánica no se identificó evidencia que vincule directamente al volcán Popocatepetl como fuente de selenio. Por otro lado, la contaminación microbiológica parece provenir de canales clandestinos que descargan residuos al río, contribuciones que, aunque no masivas, representan un riesgo sanitario importante si no se controlan adecuadamente.

Estos hallazgos reflejan la necesidad urgente de mejorar el control de descargas residuales y de alertar a la población que a pesar de que fisicoquímicamente el agua no representa una amenaza inmediata, la presencia de metales en concentraciones elevadas constituye un riesgo para la salud pública, especialmente por su efecto acumulativo a largo plazo.

En conclusión, se cumplió el objetivo general de caracterizar la calidad del agua de la microcuenca RH18 Ae e identificar los parámetros de mayor relevancia. Asimismo, se alcanzaron los objetivos específicos, al reconocer las variaciones estacionales y los parámetros de mayor riesgo sanitario, dejando esta investigación como un primer acercamiento para la determinación integral del ICA de la cuenca en estudios futuros.

BIBLIOGRAFÍA

- Alex, R., & Njau, K. (2020). *Factors affecting distribution of coliforms bacteria in semi-arid groundwater sources—Tanzania*. International Journal of Biosciences, 16(4), DOI: <https://doi.org/10.12692/ijb/16.4.487-499>
- Álvarez, E. (2024). *Contaminación en Río Nexapa: el puente infeccioso entre Puebla e Izúcar*. E-Consulta. Recuperado de: <https://www.e-consulta.com/nota/2024-02-09/municipios/contaminacion-en-rio-nexapa-el-puente-infeccioso-entre-puebla-e-izucar>
- Aranda, M., et al. (s.f.) Evaluación e importancia de la calidad del agua como uso cotidiano. Análisis de la dureza del agua: determinación de Calcio y Magnesio. Universidad de Sevilla. Recuperado de: <https://idus.us.es/server/api/core/bitstreams/3bb674db-47bc-485c-8552-1dab429a4cb4/content>
- Arora, P. (2017). *Physical, Chemical and Biological Characteristics of Water*. Editorial: e-PG Pathshala. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/322419790_Physical_Chemical_and_Biological_Characteristics_of_Water_e_Content_Module
- Avalos, Y. (2023). *Contaminación por plomo en suelo, agua, alimentos y sus efectos en los seres humanos*. InternacionalCreative Commons DOI: <https://doi.org/10.36955/RIULCB.2023v10n2.006>
- Benítez, P. & Miranda, C. (2013). *Contaminación de aguas superficiales por residuos de plaguicidas en Venezuela y otros países de Latinoamérica*. Rev. Int. Contaminación Ambiental. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/370/37028958001.pdf>

- Centro de Investigación en Política Pública (IMCO). (2023). <https://imco.org.mx/situacion-del-agua-en-mexico/#:~:text=Agua%20superficial,.ubica%20en%20la%20zona%20norte>
- . Chiroles, S., González, M., Torres, T., Valdés, M. & Domínguez, I. (2007). *Bacterias indicadoras de contaminación fecal en aguas del río Almendares (Cuba)*. Hig Sanid Ambient. Recuperado de: [https://saludpublica.ugr.es/sites/dpto/spublica/public/inline-files/bc51015c5d937c3_Hig.Sanid_Ambient.7.222-227\(2007\).pdf](https://saludpublica.ugr.es/sites/dpto/spublica/public/inline-files/bc51015c5d937c3_Hig.Sanid_Ambient.7.222-227(2007).pdf)
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Calidad del agua: parámetros e interpretación*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/manuales-de-agua-potable-alcantarillado-y-saneamiento>
- CONAGUA. (2020). *Calidad del agua*. Gobierno de México. Recuperado de: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2020/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/approot/dgeia_mce/html/RECUADROS_INT_GLOS/D3_AGUA/D3_AGUA04/D3_R_AGUA05_01.htm
- CONAGUA. (2024). *Indicadores de Calidad del Agua*. Gobierno de México. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conagua/es/articulos/indicadores-de-calidad-del-agua?idiom=es>
- CONAGUA. (2025a). *Resultados de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RENAMECA)*. Gobierno de México. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conagua/articulos/resultados-de-la-red-nacional-de-medicion-de-calidad-del-agua-renameca?idiom=es>
- CONAGUA. (2025b). *Inspección y Vigilancia*. Gobierno de México. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conagua/documentos/derechos-y-obligaciones-de-los-usuarios-ante-una-visita-de-inspeccion>

- Corrales, L. & Fung, E. (2017). *Diseño de un Sistema de monitoreo de los co-beneficios generados por la iniciativa REDD+ MbA de El Salvador*. CATIE. Recuperado de: <https://srt.snet.gob.sv/isr/links/ICA.pdf>
- Denamur, E., Clermont, O., Bonacorsi, S. & Gordon, D. (2021). *The population genetics of pathogenic Escherichia coli*. Nature Reviews Microbiology. Recuperado de: <https://www.nature.com/articles/s41579-020-0416-x#access-options>
- Denchak, M. (2023). *Water Pollution: Everything you need to know*. NRDC. Recuperado de: <https://www.nrdc.org/stories/water-pollution-everything-you-need-know>
- DENUE. (2025). *Actividad económica*. INEGI. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx>
- El-Naggar, et al. (2021). *Nickel in soil and water: Sources, biogeochemistry, and remediation using biochar*. Journal of Hazardous Materials. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126421>
- EPA. (2007). *SW-846 Test Method 3015A: Microwave Assisted Acid Digestion of Aqueous Samples and Extracts*. Recuperado de: <https://www.epa.gov/hw-sw846/sw-846-test-method-3015a-microwave-assisted-acid-digestion-aqueous-samples-and-extracts>
- Feoktistova, L. & Clark, Y. (2018). *El metabolismo del cobre. Sus consecuencias para la salud humana*. Medisur. 16(4). Recuperado de: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1727-897X2018000400013&script=sci_arttext
- Fernández, A. (2012). *El agua: un recurso esencial*. Química Viva. 11(3). Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/863/86325090002.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). *Progress on the level of water stress*. Recuperado de:

https://www.unwater.org/sites/default/files/2024-12/SDG6_Indicator_Report_642_Progress-of-water-stress_2024_EN.pdf

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *AQUASTAT - FAO's Global Information System on Water and Agriculture*. Recuperado de: <https://www.fao.org/aquastat/en/overview/methodology/water-use>

Goddard, J. (2024). *Arsenic in Drinking Water: Everything You Need to Know*. TAPCORE. Recuperado de: <https://mytapscore.com/blogs/tips-for-taps/arsenic-everything-you-need-to-know#section2>

Hach. (s.f.) *Sólidos (totales y disueltos)*. Recuperado de: <https://es.hach.com/parameters/solids>

INEGI. (2001). *Suelos*. Recuperado de: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825224028/702825224028_13.pdf

INEGI. (1983). *Atlixco. SPP*. Recuperado de: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/tematicas/Geologia_hist/702825641108.pdf

INEGI. (2010a). *Compendio de información geográfica municipal 2010 Tianguismanalco. Puebla. INEGI*. Recuperado de: https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21175.pdf

INEGI. (2010b). *Compendio de información geográfica municipal 2010 Atlixco. Puebla. INEGI*. Recuperado de: https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21019.pdf

Instituto Mexicano para la Competitividad. (2023). *Situación del agua en México*. Recuperado de: <https://imco.org.mx/situacion-del-agua-en-mexico/>

- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2019). *¿Qué es una cuenca?* Gobierno de México. Recuperado de: <https://www.gob.mx/imta/articulos/que-es-una-cuenca-211369>
- Islam, M., Shafi, S., Bandh, S. & Shameem, N. (2019). *Chapter 3- Impact of environmental changes and human activities on bacterial diversity of lakes*. Science Direct. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128174951000037>
- Jomova, K. et al. (2025). *Heavy metals: toxicity and human health effects*. SPRINGER NATURE LINK. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00204-024-03903-2>
- Kubier, A., Wilkin, R. & Pichler, T. (2019). *Cadmium in soils and groundwater: A review*. Appl Geochem. DOI: [10.1016/j.apgeochem.2019.104388](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104388)
- Larrea, J., Rojas, M., Romeu, B., Roja, N. & Heydrich, M. (2012). Bacterias indicadoras de contaminación fecal en la evaluación de la calidad de las aguas: Revisión de la literatura. Revista CENIC Ciencias Biológicas. 44(3). Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/1812/181229302004.pdf>
- Larrea, J., Rojas, M., Heydrich, M., Romeu, B., Rojas, N. & Lugo, D. (2009). *Evaluación de la calidad microbiológica de las aguas del Complejo Turístico Las Terrazas, Pinar del Río (Cuba)*. Hig Sanid Ambient. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/257957195_Evaluacion_de_la_calidad_microbiologica_de_las_aguas_del_Complejo_Turistico_Las_Terrazas_Pinar_del_Rio_Cuba
- Lee, L. (2023). *Caracterización de la calidad del agua y medio ambiente de los ríos*. Secretaría del Medio Ambiente de Coahuila. Recuperado de: <https://sma.gob.mx/wp-content/uploads/2023/11/ANEXO-1-Informe-de-Parametros-de-Calidad-del-agua.pdf>

- Li, E., Saleem, F., Edge, T. & Schellhorn, H. (2021). *Biological Indicators for Fecal Pollution Detection and Source Tracking: A Review*. MDPI. 9(11). DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9112058>
- López, P. (2019). *Sin acceso al agua potable, 10 por ciento de mexicanos*. GACETA UNAM. Recuperado de: <https://www.gaceta.unam.mx/sin-acceso-al-agua-potable-10-por-ciento-de-mexicanos/>
- Marín, G. (2009). *Manual de Química del agua: Teoría y Práctica*. EDITORIAL: UNIMAGDALENA. Recuperado de: <https://editorial.unimagdalena.edu.co/Content/ArchivosLibros/tempx1x2x3x4x5x6x7x8x9x0/librox1x2x3-3028/dd3f7af65eafbeb17a1b2647a0a40304.pdf>
- Masuda, H. (2018). *Arsenic cycling in the Earth's crust and hydrosphere: interaction between naturally occurring arsenic and human activities*. Prog Earth Planet Sci. 5(68). DOI: <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0224-3>
- Matek, M., Jureša, D., Marija, V. & Kostial, K. (2004). *Combined Early Treatment with Chelating Agents DMSA and CaDTPA in Acute Oral Cadmium Exposure*. Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology. 94 (3). DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1742-7843.2004.pto940304.x>
- Meza, L. (2022). *Evaluación de la remoción del Manganeseo de aguas superficiales para abastecimiento en zonas rurales utilizando la planta macrófita Eichhornia crassipes (Mart.) Solms- Laubach, conocida como Jacinto de Agua*. Universidad del Norte. Recuperado de: <https://manqlar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/10954/25998947.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Montalvo, F. & Escobar, D. (2011). *Lluvia ácida de origen volcánico*. SNET. Recuperado de: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/60209641/lluvia_acida20190805-

[80453-9cpt2t-libre.pdf?1565031343=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DLluvia+acida+de+origen+volcanico.pdf&Expires=1754606189&Signature=JbzxFHAJNr3eiRiJLjWMqIPr3A5ftjy5ayXVMU7A1LV0p12PwPMh6owtUqp~D1Y1JzgwhOZTi7mRq1BBs9GOuMwizLTzTKrA-fntZ5WStXOoLTG-ynJ5aMA9hfNoACqRfFrS5ZLq5R~EjzBEi7xxWANXspFM6fV85VcM-Rnaq-fVodf8fsHs9mlTXZBZ2uJVOKKR5RqXSBckexsAc6gU363YeJeWHv6y5Y2FN2KkOnXaSgFEbLOE3VmwXNIQQ4UCixEbGI1e0ceaaDPjvWk7jPuzNP09MAJYAj-FwgUodeXTKCRNW-YrxD3hZA74dwu3z0AbpwjPt4O7v~d8PegsVA &Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://www.researchgate.net/publication/3584539cpt2t-libre.pdf?1565031343=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DLluvia+acida+de+origen+volcanico.pdf&Expires=1754606189&Signature=JbzxFHAJNr3eiRiJLjWMqIPr3A5ftjy5ayXVMU7A1LV0p12PwPMh6owtUqp~D1Y1JzgwhOZTi7mRq1BBs9GOuMwizLTzTKrA-fntZ5WStXOoLTG-ynJ5aMA9hfNoACqRfFrS5ZLq5R~EjzBEi7xxWANXspFM6fV85VcM-Rnaq-fVodf8fsHs9mlTXZBZ2uJVOKKR5RqXSBckexsAc6gU363YeJeWHv6y5Y2FN2KkOnXaSgFEbLOE3VmwXNIQQ4UCixEbGI1e0ceaaDPjvWk7jPuzNP09MAJYAj-FwgUodeXTKCRNW-YrxD3hZA74dwu3z0AbpwjPt4O7v~d8PegsVA&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA)

Moreno, M., González, I., Chaidez, C. & López, O. (2022). *Supervivencia de escherichia coli y salmonella typhimurium en agua recreativa de río*. Revista Ra Ximhai 18(4). DOI: <https://doi.org/10.35197/rx.18.04.2022.09.mm>

McNeal, J. & Balistrieri, L. (1989). *Geochemistry and Occurrence of Selenium: An Overview*. L. W. Jacobs. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub23.c1>

Narváez, S., Gómez, M., & Acosta, J. (2008). *Coliformes termotolerantes en aguas de las poblaciones costeras y palafíticas de La Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia*. Acta Biológica Colombiana. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/3190/319028004009.pdf>

National Geographic. *Cantera*. Recuperado de: <https://education.nationalgeographic.org/resource/quarry/>

Navarro, A & Cruz, J. (2023). *La importancia de los ríos pequeños: el caso del río Nexapa*. Editorial: Consejo Editorial de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 10.29057/books.126.

- Nicoleta, A., et al. (2022). *Cd content in phosphate fertilizer: Which potential risk for the environment and human health?* Current Opinion in Environmental Science & Health. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100392>
- Nieva, R. (2025). *Serie de estudios sobre mercados mineros: Cromo*. Dirección Nacional de Promoción y Economía Minera. Recuperado de: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe_cromo.pdf
- NIH. (2000). *Copper in Drinking Water*. National Academy Press. Recuperado de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK225402/>
- Organización Mundial de la Salud-OMS (2019). *Intoxicación por plomo y salud*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>
- Organización Mundial de la Salud. (2023a). *Agua para consumo humano*. Recuperado de: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Organización de las Naciones Unidas. *Agua*. Recuperado de: <https://www.un.org/es/global-issues/water>
- Pal, S. & Chakraborty, K. (2017). *Different Aspects of Chloride In Freshwater: A Review*. International Journal of Current Trends in Science and Technology. 7(8). Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Kaushik-Chakraborty-5/publication/319416779_International_Journal_of_Current_Trends_in_Science_and_Technology_Different_Aspects_of_Chloride_In_Freshwater_A_Review/links/59a9108e458515eafa8cee58/International-Journal-of-Current-Trends-in-Science-and-Technology-Different-Aspects-of-Chloride-In-Freshwater-A-Review.pdf

- Palmucci, W., Rusi, S. & Di Curzio, D. (2016). *Mobilization processes responsible for iron and manganese contamination of groundwater in Central Adriatic Italy*. Environ Sci Pollut Res Int. 23(12). DOI: 10.1007/s11356-016-6371-4.
- Pérez, E. (2016). *Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica*. Tecnología en Marcha. 29(3). DOI: <http://dx.doi.org/10.18845/tm.v29i3.2884>
- Pinedo, P. et al. (2020). *Anthropogenic Asian aerosols provide Fe to the North Pacific Ocean*. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 117(45). DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2010315117>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2024). *Programa Municipal de Resiliencia Tianguismanalco*. Recuperado de: https://smadsot.puebla.gob.mx/images/riesgos/Actualizacion/Municipios/AC TUALIZACION/13PMR_Tianguismanalco.pdf
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2024a). *Programa Municipal de Resiliencia Atlixco*. Recuperado de: https://smadsot.puebla.gob.mx/images/riesgos/Actualizacion/Municipios/AC TUALIZACION/3PMR_Atlixco.pdf
- Ravindra, A., et al. (2015). *Comparison of coliform contamination in non-municipal waters consumed by the Mennonite versus the non-Mennonite rural populations*. Environmental Health and Preventive Medicine volume. Recuperado de: https://environhealthprevmed.biomedcentral.com/articles/10.1007/s12199-015-0472-4?utm_source=chatgpt.com
- Rivas, P. (s.f.) *Importancia del análisis de agua*. Informe frutihortícola. Recuperado de: https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/103288/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Rizwan, M., Usman, K. & Alsafran, M. (2024). *Ecological impacts and potential hazards of nickel on soil microbes, plants, and human health*. Chemosphere. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142028>
- Rodrigo, M., Rodrigo, J. & Cassiraga. (2015). *Principales contaminantes del agua subterránea*. Universitat Politècnica de Valencia. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/dccb6b71-aa50-492b-80ad-b77edf2a6371/content>
- Rodríguez, A., Villaseñor, M., Canet, C., Prol-Ledesma, M. & Camprubí, A. (2005). *Clasificación de los yacimientos de manganeso y ejemplos de depósitos mexicanos e internacionales*. Boletín de Mineralogía. Recuperado de: https://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/geoq/canetc/Art_3_Augusto.pdf
- Rodríguez, E. et al. (2015). *Enriquecimiento metálico de suelos tras la actividad eruptiva del volcán Popocatepetl de abril de 2012-2013, Puebla, México*. EPUB. 187(11). DOI: 10.1007/s10661-015-4938-z.
- Rubio, C., Martín, R., Revert, C., Lozano, G. & Hardisson, A. (2004). *El plomo como contaminante alimentario*. Revista de Toxicología. 21(2-3). Recuperado de: <https://www.fmed.uba.ar/sites/default/files/2018-03/7.pdf>
- Santamaría, J., et al. (2022). *Caracterización fisicoquímica de material particulado del Popocatepetl, trayecto Atlixco-Puebla, y su impacto en la salud y el ambiente*. EPUB. Recuperado de: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-62662022000100148
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019). *El ciclo agrícola, ¿cuándo se siembra y cuándo se cosecha?* Gobierno de México. Recuperado de: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-ciclo-agricola-cuando-se-siembra-y-cuando-se-cosecha>

- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial [SCFI]. (2001). *Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba*. (NMX-AA-072-SCFI-2001). Recuperado de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166788/NMX-AA-072-SCFI-2001.pdf>
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial [SCFI]. (2001). *Análisis de agua - determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba* (NMX-AA-036-1980). Recuperado de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166776/NMX-AA-036-SCFI-2001.pdf>
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial [SCFI]. (2001). *Análisis de agua - determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba* (NMX-AA-073-SCFI-2001). Recuperado de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166789/NMX-AA-073-SCFI-2001.pdf>
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial [SCFI]. (2000). *Análisis de agua- Determinación de la conductividad electrolítica- Método de Prueba* (NMX-AA-093-SCFI-2000). Recuperado de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166800/NMX-AA-093-SCFI-2000.pdf>
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial [SCFI]. (2016). *Análisis de agua- medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba* (NMX-AA-008-SCFI-2016). Recuperado de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166767/NMX-AA-008-SCFI-2016.pdf>
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial [SCFI]. (2001). *Análisis de agua - determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba* (NMX-AA-012-SCFI-2001).

Recuperado de:
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166768/NMX-AA-012-SCFI-2001.pdf>

Secretaría de Comercio y Fomento Industrial [SCFI]. (2015). *Análisis de agua - enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y Escherichia coli – método del número más probable en tubos múltiples* (NMX-AA-042-SCFI-2015). Recuperado de:
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166147/nmx-aa-042-scfi-2015.pdf>

Secretaría de Economía. (2013). *Perfil de Mercado del Hierro- Acero. Coordinación General de Minería*. Recuperado de:
https://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/minero/pm_hierro_acero_1013.pdf

Secretaría de Salubridad y Asistencia [SSA]. (2021). *Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua* (NOM-127-SSA1-2021). Recuperado de:
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022

SEMARNAT. (2010). *Atlas Agua*. Gobierno de México. Recuperado de:
https://gisviewer.semarnat.gob.mx/geointegrador/enlace/atlas2010/atlas_agua.pdf

SEMARNAT. (2011). *Indicadores de Calidad del Agua*. Gobierno de México. Recuperado de:
https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2013/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServlet28b9.html

- SEMARNAT. (2014). *Agua*. Recuperado de:
https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/00_mensajes/06_agua.html
- SEMARNAT (2020). *Calidad del agua*. Gobierno de México. Recuperado de:
https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2020/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/approot/dgeia_mce/html/RECUADROS_INT_GLOS/D3_AGUA/D3_AGUA04/D3_R_AGUA05_01.htm#:~:text=El%20ICA%20se%20define%20como,el%20agua%20en%20excelentes%20condiciones.
- Servicio Geológico Colombiano SGC. (2020). *Cadmio*. Recuperado de:
https://srvags.sgc.gov.co/Archivos_Geoportal/Amenaza_Sismica/Atlas_Geoquimico_2020/pdf/9.Cd.pdf
- Servicio Geológico Mexicano (2017). *Rocas ígneas*. Recuperado de:
<https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Rocas/Rocas-igneas.html>
- Silva, S., Muñoz, A., Isla, M. & Said, G. (2002). *Contaminación ambiental en la región de Atlixco: 1. Agua*. Terra Latinoamericana, 20(3). Recuperado de:
<https://www.redalyc.org/pdf/573/57320303.pdf>
- Schäfer, S. et al. (2015). *Bioaccumulation in aquatic systems: methodological approaches, monitoring and assessment*. ENVIRON SCI EUR. 27(1). DOI: [10.1186/s12302-014-0036-z](https://doi.org/10.1186/s12302-014-0036-z)
- Schweitzer, L., y Noblet, J. (2018). *Chapter 3.6 - Water Contamination and Pollution*. Green Chemistry: ELSEVIER. Recuperado de:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978012809270500011X>
- Sucari, A., et al. (2021). *Environmental impact assessment in the San Luis de Alba rock quarry, Puno, Perú*. DYNA. Recuperado de:
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0012-73532022000100195&lng=en&nrm=iso&tlng=es

- Symon, T., Murillo, D., Lugo, O. & Zenteno, T. (2024). *Selenio en la salud: La espada de doble filo*. Recursos Naturales y Sociedad. 10(2). DOI: <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0001>
- Świątkowska, I. (2023). *Implant metals and their potential toxicity*. Science Direct. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/topics/medicine-and-dentistry/chromium>
- Torralba, R., Cordero, I., Teutli, M., González, M., Vidal, G., Pérez, M. & González, M. (2024). *Río Nexapa presenta un alto grado de contaminación fecal, concluyen investigadores de la BUAP*. Boletines BUAP. Recuperado de: <https://www.boletin.buap.mx/node/3297#:~:text=Boletines%20BUAP-.R%C3%ADo%20Nexapa%20presenta%20un%20alto%20grado%20de%20contaminaci%C3%B3n,concluyen%20investigadores%20de%20la%20BUAP&text=A%20pesar%20de%20nacer%20en,alto%20grado%20de%20contaminaci%C3%B3n%20fecal.>
- Torres, J., Colina, M., Cano, Y., Rivas, Z. & Andrade, C. (2015). *Concentración de selenio en agua y en fracciones de sedimentos del río Catatumbo*. Multiciencias. 15(2). Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/904/90443048006.pdf>
- Tumolo, M. et al. (2020). *Chromium Pollution in European Water, Sources, Health Risk, and Remediation Strategies: An Overview*. Int J Environ Res Public Health. 17(15). DOI: doi: 10.3390/ijerph17155438.
- United Nations Organization. (2023b). *WHO/UNICEF Joint Monitoring Program for Water Supply, Sanitation and Hygiene (JMP) – Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2022: Special focus on gender*. Recuperado de: <https://www.unwater.org/publications/who/unicef-joint-monitoring-program-update-report-2023>

- United Nations Organization. (2018). *Water quality and wastewater*. Recuperado de: https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2018/10/WaterFacts_water_and_wastewater_sep2018.pdf
- Vammen, K. & Vaux, H. (2019). *Una visión general de la calidad del agua en las Américas*. Calidad del Agua en las Américas Riesgos y Oportunidades. IANAS. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Katherine-Vammen/publication/336778235_Calidad_de_Agua_en_las_Americas_Riesgos_y_Oportunidades_IANAS/links/5db1fa25299bf111d4c1167b/Calidad-de-Agua-en-las-Americas-Riesgos-y-Oportunidades-IANAS.pdf#page=30
- Vera, L. et al., (2019). *Principales suelos y particularidades de su formación del sistema Carrizal-Chone, Manabí, Ecuador*. INCA. 40 (2). Recuperado de: <https://www.redalyc.org/journal/1932/193262825006/html/>
- Rivera, V., Pérez, M. & Tejedor, E. (2024). *La Calidad del Agua y su Relación con la Salud Renal de los Habitantes de Zonas Costeras*. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/642421205.pdf>
- Wang, G. & Doyle, M. (1998). *Survival of Enterohemorrhagic Escherichia coli O157:H7 in Water*. Food Prot. 61(6). DOI: [10.4315/0362-028x-61.6.662](https://doi.org/10.4315/0362-028x-61.6.662)
- Wetzel, R. & Likens, G. (2000). *Dissolved Oxygen*. Limnological Analyses. Springer Nature Link. Recuperado de: https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3250-4_6
- Zahidul, M. & Golam, M. (2024). *Iron, manganese, and lead contamination in groundwater of Bangladesh: a review*. Water Practice & Technology. 19(3). DOI: 10.2166/wpt.2024.030
- Zambrano, J. (2023). *Puebla, sin acceso a agua potable en más de 669 mil viviendas*. Milenio. Recuperado de <https://www.milenio.com/politica/comunidad/puebla-sin-acceso-agua-potable-669-mil-viviendas>

