



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA**

**Macroinvertebrados acuáticos como apoyo en la
evaluación de la calidad del agua y su relación con el
cambio de uso de suelo en las subcuencas San Diego y
Almoloya**

Tesis que para obtener el grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS DEL AGUA

Presenta:

I.A.I. Martha Sánchez Estrada

Tutora académica: Dra. Marivel Hernández Téllez

Tutores adjuntos: Dra. Mercedes Lucero Chávez

Dr. Miguel Ángel Gómez Albores

Noviembre 2025

Resumen

La presente investigación identifica que los cuerpos de agua superficial en las subcuencas San Diego y Almoloya presentan diferentes grados de perturbación, ocasionados por las actividades antropogénicas e impactan negativamente en la biodiversidad de macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores en la calidad del agua superficial, y se encuentra estrechamente relacionado el cambio de uso de suelo por lo que a través de técnicas de teledetección se determinaron las tendencias del cambio de las cobertura del suelo entre los años de 2014 al 2024, mismas que se identificaron a través de recorridos de campo. Se empleó el índice Biological Monitoring Working Party (BMWP) que clasifica la tolerancia de macroinvertebrados a la contaminación y se respalda con el análisis fisicoquímico para establecer la calidad del agua.

Las actividades antropogénicas que predominan por mayor número de familias que las realizan y se caracterizan por generar contaminación puntual son la elaboración de productos lácteos, la elaboración de pirotecnia y la fábrica papelera. Mientras que las actividades como agricultura, ganadería, entre otros, son consideradas contaminación difusa.

La identificación de cambios en el uso de suelo en las subcuencas San Diego y Almoloya durante el periodo 2014-2024 se realizó a partir de imágenes multiespectrales (Landsat-8 para 2014 y Sentinel-2 para 2024), utilizando una clasificación supervisada. Este análisis sobre una superficie total de 208.07 km² reveló tendencias importantes. Se documentó una notable reducción en la superficie destinada a la agricultura, pasando de 85.5 km² en 2014 a 74.4 km² en 2024. Similarmente, las áreas afectadas por incendios disminuyeron de 13.8 km² a 5.4 km². Por otro lado, se registró un crecimiento en la cobertura de bosque, que aumentó de 17.0 km² en 2014 a 19.0 km² en 2024. El suelo urbano también mostró una expansión, de 26.8 km² a 28.1 km², y los cuerpos de agua tuvieron un ligero incremento, de 2.1 km² a 2.2 km² en el mismo periodo.

Para evaluar la calidad del agua mediante el uso de macroinvertebrados acuáticos y parámetros fisicoquímicos, se seleccionaron cuidadosamente cuatro cuerpos de agua estratégicamente ubicados en el municipio de Almoloya de Juárez, Estado de México. Esta selección incluyó la identificación de un cuerpo de agua en la subcuenca media y otro en la subcuenca baja para cada una de las dos subcuencas en estudio. Específicamente, en la subcuenca San Diego, se analizaron los sitios denominados 'Los Tules', en la comunidad de Paredón Ejido, y 'San Diego', situado en la comunidad homónima. Por otro lado, en la subcuenca Almoloya, el estudio abarcó los cuerpos hídricos de

'Talleres', perteneciente a la localidad de San Mateo Tlachichilpan, y 'Colinas', ubicado adyacente al fraccionamiento Colinas del Sol.

Se realizaron dos muestreos, el primero al final de las lluvias en noviembre de 2024 y el segundo en el período de inicios de lluvias en junio de 2025. El valor global del índice BMWP/Méx, refleja que:

- El cuerpo de agua identificado como “San Diego”, ubicado en la parte baja de la subcuenca de mismo nombre, presentó el mayor número de familias comparado con el resto de los sitios; donde se registraron 16 familias, con un puntaje de 81 del índice BMWP/Méx, lo que indica una calidad del agua regular con contaminación moderada.
- El cuerpo agua llamado “Los tules”, ubicado en la parte media de la subcuenca San Diego, presenta la misma calidad del agua; donde se registraron 14 familias, sumando 65 puntos del índice BMWP/Méx.
- El cuerpo de agua, conocido como, “los talleres”, ubicado en la parte media de la subcuenca Almoloya, registró 9 familias, sumando un puntaje de 36 del índice BMWP/Méx, lo que indica una calidad del agua mala con contaminación.
- El cuerpo de agua “Colinas”, ubicado en la parte baja de la subcuenca Almoloya, fue de muy mala con extremada contaminación, al recolectar solamente 1 familia con 1 punto del índice BMWP/Méx.

El resultado de la recolección de los macroinvertebrados acuáticos en el mes de noviembre de 2024 fue de un total de 26 familias, mientras que en el mes de junio de 2025 se recolectaron un total de 39 familias, el aumento de número de familias de macroinvertebrados en junio, sugieren que en la temporada de lluvias hay mejores índices de diversidad, relacionado estrechamente con los registros de la calidad del agua mejorada durante la temporada de lluvias, atribuido al efecto de la dilución de contaminantes durante esta temporada.

Palabras clave: macroinvertebrados, calidad del agua, cambio de uso de suelo.

Abstract

This research identifies that the surface water bodies in the San Diego and Almoloya sub-basins present different degrees of disturbance, due to anthropogenic activities, which negatively impact the biodiversity of aquatic macroinvertebrates as bioindicators of surface water quality. This disturbance is closely related to changes in land use. Therefore, through remote sensing techniques, the land cover change trends were determined for the years 2014 to 2024, which were also verified through field surveys. The Biological Monitoring Working Party (BMWP) index, which classifies the tolerance of macroinvertebrates to pollution, was used in conjunction with physicochemical analysis to establish water quality.

The predominant anthropogenic activities, characterized by the largest number of families performing them and generating point-source pollution, are the dairy production, fireworks manufacturing, and the paper factory. Meanwhile, activities such as agriculture, livestock, among others, are considered diffuse pollution.

The identification of land use changes in the San Diego and Almoloya sub-basins during the 2014-2024 period was carried out using multispectral images (Landsat-8 for 2014 and Sentinel-2 for 2024), employing a supervised classification. This analysis, over a total area of 208.07 km², revealed important trends. A notable reduction was documented in the area dedicated to agriculture, decreasing from 85.5 km² in 2014 to 74.4 km² in 2024. Similarly, areas affected by fires decreased from 13.8 km² to 5.4 km². On the other hand, growth was recorded in forest cover, which increased from 17.0 km² in 2014 to 19.0 km² in 2024. Urban land also showed expansion, from 26.8 km² to 28.1 km², and water bodies had a slight increase, from 2.1 km² to 2.2 km² in the same period.

To assess water quality using aquatic macroinvertebrates and physicochemical parameters, four water bodies were carefully selected, strategically located in the municipality of Almoloya de Juárez, State of Mexico. This selection included the identification of one water body in the middle sub-basin and one in the lower sub-basin for each of the two sub-basins under study. Specifically, in the San Diego sub-basin, the sites named 'Los Tules', in the community of Paredón Ejido, and 'San Diego', located in the namesake community, were analyzed. In the Almoloya sub-basin, the study covered the water bodies of 'Talleres', belonging to the San Mateo Tlachichilpan locality, and 'Colinas', located adjacent to the Colinas del Sol subdivision.

Two samplings were conducted: the first at the end of the rainy season in November 2024 and the second at the beginning of the rainy season in June 2025. The global value of the BMWP/Mex index reflects the following:

- The water body identified as “San Diego”, located in the lower part of the sub-basin of the same name, presented the highest number of families compared to the other sites; 16 families were recorded, with a BMWP/Mex score of 81, indicating Regular water quality with Moderate pollution.
- The water body called “Los Tules”, located in the middle part of the San Diego sub-basin, presented the same water quality; 14 families were recorded, with a total of 65 points on the BMWP/Mex index.
- The water body, known as “Los Talleres”, located in the middle part of the Almoloya sub-basin, recorded 9 families, totaling a score of 36 on the BMWP/Mex index, indicating Poor water quality with Pollution.
- The water body “Colinas”, located in the lower part of the Almoloya sub-basin, was of Very Poor quality with Extreme Pollution, collecting only 1 family with a score of 1 on the BMWP/Mex index.

The result of the aquatic macroinvertebrate collection in November 2024 was a total of 26 families, while in June 2025 a total of 39 families were collected. The increase in the number of macroinvertebrate families in June suggests that there are better diversity indices during the rainy season, which is closely related to records of improved water quality during the rainy season, attributed to the dilution effect of pollutants during this season.

Keywords: macroinvertebrates, water quality, and land use change

Índice

Resumen.....	5
Abstract	7
Índice.....	9
Índice de tablas.....	11
Índice de figuras.....	12
1. Introducción.....	14
2. Antecedentes	15
2.1 Cuencas hidrográficas.....	15
2.2 Contaminación	15
2.2.1 Actividades antropogénicas	18
2.3 Agua.....	19
2.3.1 Agua residual	20
2.4 Gestión integral de los recursos hídricos.....	21
2.4.1 Marcos normativos de México de agua.....	21
2.5 Monitoreo de la calidad del agua	24
2.5.1 Bioindicadores	25
2.5.2 Macroinvertebrados como bioindicadores en la calidad de agua.....	26
2.5.3 Análisis de Sensibilidad	27
2.5.3.1 Índice Biological Monitoring Working Party (BMWP) y su modificación para México (BMWP/Méx.).....	27
2.5.4 Técnicas para coleccionar macroinvertebrados	30
2.5.4.1 Técnica de piedras y hojarasca.....	30
2.5.4.2 Técnica de red de patada	31
2.5.4.3 Técnica de red Surber.....	31
2.6 Investigaciones utilizando macroinvertebrados	32
2.7 Sistemas de Información Geográfica (SIG)	33
2.7.1 La teledetección.....	34
2.7.2 Satélites	36
2.7.3 Landsat	37
2.7.4 Sentinel.....	38
2.7.5 Firmas espectrales	39
2.7.6 Investigaciones utilizando teledetección	40
2.7.7 Parámetros fisicoquímicos en la calidad del agua	41
3. Justificación.....	42
4. Hipótesis.....	43
5. Objetivo general	44

5.1	Objetivos específicos	44
6.	Materiales y Métodos	45
6.1	Zona de estudio	45
6.2	Determinación de los sitios de muestreo.....	47
6.3	Materiales.....	47
6.4	Métodos.....	49
7.	Metodología.....	49
7.1.	Obtención y procesamiento de imágenes satelitales	49
7.1.1	Análisis de cambios de uso y cobertura de suelo	50
7.2	Identificación de actividades antropogénicas.....	51
7.3	Inventario y caracterización de agua superficial	52
7.4	Análisis hidrológico	52
7.4.1	Selección de cuerpos de agua para evaluación.....	53
7.5	Evaluación mediante bioindicadores.....	53
7.5.1	Análisis estadístico	54
7.6	Análisis de parámetros fisicoquímicos.....	55
8.	Resultados	56
8.1	Análisis de cambios de uso y cobertura de suelo	56
8.1.1	Inventario de agua superficial	65
8.1.2	Escurrimientos.....	71
8.2	Identificación de actividades antropogénicas.....	72
8.2.1	Actividades Económicas Primarias	72
8.2.2	Actividades Económicas Secundarias	74
8.2.3	Actividades Económicas Terciarias	76
8.3	Evaluar contaminación hídrica.....	77
8.3.1	Recolecta e identificación de macroinvertebrados acuáticos	77
8.3.1.1	Descripción de las familias de macroinvertebrados acuáticos en las subcuencas San Diego y Almoloya	76
8.3.1.2	Análisis estadístico	79
8.3.1.4	Parámetros fisicoquímicos.....	81
9	Conclusiones	87
10	Recomendaciones.....	91
11	Referencias bibliográficas.....	93
12	Anexos	102

Índice de tablas

Tabla 1. Material empleado para la elaboración de fuegos artificiales.	19
Tabla 2. Calidad de agua según la sensibilidad de macroinvertebrados.	28
Tabla 3. Tipos de satélites artificiales.	37
Tabla 4. Características de las Bandas Landsat 8.....	38
Tabla 5. Características de las Bandas Sentinel-2.....	39
Tabla 6. Matriz de error 2024 del mapa de uso de suelo de las subcuencas San Diego y Almoloya.....	59
Tabla 7. Uso de suelo calculado en kilómetros cuadrados (km ²).....	60
Tabla 8. Cuerpos de agua identificados.	72
Tabla 9. Valor y producción pecuario y acuícola en Almoloya de Juárez, Estado de México.	73
Tabla 10. Población total emigrante en el Estado de México de 2010 al 2020.....	76
Tabla 11. Macroinvertebrados recolectados en el cuerpo de agua "San Diego".....	79
Tabla 12. Macroinvertebrados recolectados en el cuerpo de agua "Los tules".....	81
Tabla 13. Macroinvertebrados recolectados en la presa “Los talleres”.	81
Tabla 14. Macroinvertebrados recolectados en la presa “Colinas”.....	76
Tabla 15. Resultado de la prueba Kruskal-Wallis.....	80
Tabla 16. Índices Jaccard de similitud y distancia.	80
Tabla 17. Valores de pH obtenidos en los cuerpos de agua evaluados.	82
Tabla 18. Valores de conductividad eléctrica y temperatura obtenidos en los cuerpos de agua evaluados.	82
Tabla 19. Los valores de nitratos y fosfatos obtenidos en los cuerpos de agua evaluados.	83
Tabla 20. Los valores de DQO obtenidos en los cuerpos de agua evaluados.	85
Tabla 21. Clasificación de agua según sus valores de DQO.	86
Tabla 22. Identificación del cuerpo de agua.	102
Tabla 23. Determinar el índice BMWP/Méx	103
Tabla 24. Cuerpos de agua superficial reportados por CONABIO.....	104
Tabla 25. Cuerpos de agua superficial reportados por INEGI.	106

Índice de figuras

Figura 1. Familias de macroinvertebrados y su puntuación del BMWP/Méx.	29
Figura 2. Representación de datos en un Sistema de Información geográfica (Olaya, 2014 y ESRI, 2016).....	34
Figura 3. Componentes de la teledetección: fuente de energía, sensores, cubierta terrestre, sistemas de recepción, tratamiento digital y visual, y usuario final.....	35
Figura 4. Partes del espectro electromagnético: longitud de ondas (m), tipo y fuente de radiación, frecuencia (Hz) y energía de fotón (Ev).....	36
Figura 5. Diferentes tipos de cubiertas según su firma espectral.	40
Figura 6. Subcuencas San Diego y Almoloya.....	46
Figura 7. Métodos para desarrollar el proyecto investigación.	49
Figura 8. Red tipo "D" para muestreo de macroinvertebrados acuáticos.....	54
Figura 9. Mapa de la zona de estudio en el municipio de Almoloya de Juárez, Estado de México...	56
Figura 10. Firmas espectrales de cobertura de suelo en la zona de estudio para 2014 y 2024, respectivamente.	57
Figura 11. Uso de suelo en las subcuencas San Diego y Almoloya.....	58
Figura 12. Uso de suelo en las subcuencas San Diego.....	61
Figura 13. Uso de suelo en las subcuencas Almoloya.	61
Figura 14. Cambios dinámicos en el uso y la cobertura del suelo en las subcuencas de San Diego y Almoloya entre 2014 y 2024.	62
Figura 15. Pérdidas y ganancias de uso de suelo en la subcuenca San Diego.	64
Figura 16. Pérdidas y ganancias de uso de suelo en la subcuenca Almoloya.	64
Figura 17. Índice de Agua en Superficie Terrestre en las subcuencas San Diego y Almoloya para el periodo 2014 y 2024, respectivamente.....	66
Figura 18. Índice de Sequía de Diferencia Normalizada en las subcuencas San Diego y Almoloya para el periodo 2014 y 2024, respectivamente.	67
Figura 19. Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado en las subcuencas San Diego y Almoloya para el periodo 2014 y 2024, respectivamente.	68
Figura 20. Ríos perenes y cuerpos de agua superficial reportados por CONABIO, INEGI y TerrSet en las subcuencas de San Diego y Almoloya.	69
Figura 21. Valores de precipitación anual en las subcuencas San Diego y Almoloya.....	70
Figura 22. Esguimientos en las subcuencas de San Diego y Almoloya y puntos de muestreo.	71
Figura 23. Cultivo de maíz blanco en el Estado de México, INEGI 2023.....	73

Figura 24. Proceso general para llevar a cabo el rastreo de tras patio.	74
Figura 25. Ubicación de actividades antropogénicas de diferentes sectores económico.	77
Figura 26. Cuerpo de agua “San Diego”.....	78
Figura 27. Cuerpo de agua “Los tules”.....	80
Figura 28. Cuerpo de agua “Talleres”.....	74
Figura 29. Cuerpo de agua “Colinas”.	75
Figura 30. Agrupamiento jerárquico de la similitud de las familias de macroinvertebrados recolectados.....	81

1. Introducción

La superficie terrestre se ha visto directamente afectada por actividades antropogénicas en más del 70%, informó el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPBES, 2019). La interacción entre actividades antropogénicas y ecosistemas se desarrolla, dentro del territorio de una cuenca; originando posibles problemáticas, y surgen actores tomadores de decisiones para la atención adecuada de problemas sectoriales dispersos. Estas intervenciones cambian con el tiempo y se ajustan según el aprendizaje derivado de las acciones llevadas a cabo en los ecosistemas (Cotler, 2004).

Los recursos hídricos responden de manera sensible a las transformaciones del paisaje y han experimentado alteraciones importantes a nivel global como consecuencia de los cambios intensivos y extensivos en el uso del suelo y la cobertura vegetal (Hernández Ramos, 2023).

En México se carece de información precisa sobre la magnitud de la contaminación por el sector agropecuario hacia los recursos hídricos, porque no hay información oficial sobre la fuente difusa de contaminación existente por el empleo de insumos, como fertilizantes y pesticidas (Fall, 2015). Entre los métodos actuales más comunes utilizados para conocer la calidad de las aguas, están las técnicas fundamentadas en la respuesta y la sensibilidad de las comunidades biológicas como bioindicadores (monitoreo biológico) (Leaño Sanabria & Pérez Barriga, 2020), las cuales son respaldadas en algunos casos por evaluaciones fisicoquímicas.

De acuerdo con INEGI (2016), y el Atlas Urbano de la Cuenca Hidrológica del Río Lerma (Comité editorial del Gobierno del Estado de México, 2011), la cuenca que abarca el Estado de México forma parte de la región hídrica Lerma-Toluca, también conocida como Curso Alto del Río Lerma (CARL), y por su extensión territorial, la Cuenca fue dividida en 20 subcuencas, considerando los escurrimientos superficiales más relevantes y los cuerpos de agua existentes, para este caso de estudio se considera Presa Ignacio Ramírez, a su vez es dividida (SEGOB, 2013), para esta investigación fueron tomadas a consideración las siguientes:

- La Subcuenca Almoloya (de Juárez), con superficie geográfica de 93.88km².
- La Subcuenca de San Diego, que comprende una superficie de 112.92 km².

En las zonas altas de las subcuencas se presentan conflictos ambientales como la tala ilegal y la erosión del suelo. Las áreas intermedias, por su parte, son vulnerables a procesos de deforestación, incendios, erosión y contaminación. Finalmente, en las subcuencas se descargan aguas residuales

domésticas, residuos provenientes de actividades agrícolas como pesticidas y fumigantes, así como desechos industriales generados por la Fábrica Papelera conocida como 'El Nevado' (Magallán, 2010). En la actualidad, herramientas basadas en la teledetección facilitan el análisis de cambios en el uso y cobertura del suelo ocasionados principalmente por las actividades antropogénicas (Jaramillo Coronel et al., 2025).

2. Antecedentes

2.1 Cuencas hidrográficas

Las cuencas hidrográficas, entendidas como unidades espaciales, se delimitan de manera natural por el flujo de las aguas superficiales, determinado por la configuración del relieve y las características topográficas, lo que da lugar a la formación de diversos ecosistemas (SEMARNAT-CONAGUA, 2018).

Los ecosistemas ofrecen una variedad de beneficios, tanto de forma directa como indirecta, conocidos como servicios ecosistémicos. Estos desempeñan un papel esencial en el mantenimiento y la mejora del bienestar humano (Assessment, 2001; TEEB, 2010). Sin embargo, la pérdida rápida y extendida de biodiversidad pone en riesgo el equilibrio y la funcionalidad de los ecosistemas, comprometiendo también la provisión de servicios ecosistémicos esenciales para el bienestar de las generaciones actuales y futuras (Plaza Agredo & Romero Jaramillo, 2021).

Los principales factores que ponen en riesgo la capacidad de la naturaleza para contribuir al bienestar humano incluyen la transformación de áreas terrestres y marinas, la explotación excesiva de los recursos biológicos y los niveles crecientes de contaminación que intensifican el cambio climático (IPBES, 2019).

2.2 Contaminación

Como consecuencia de diversas acciones humanas, entre ellas la combustión de combustibles fósiles, las actividades mineras, el uso de aguas residuales para riego y la reutilización de lodos, se genera contaminación en distintos entornos (Su et al., 2011).

Actividades perjudiciales como la expansión de las actividades agrícolas, junto con la aplicación intensiva de fertilizantes y pesticidas, han incrementado la presión sobre los ecosistemas, la suma de contaminantes puntuales y difusos es el resultado de la fractura de ecosistemas (Zhuang et al., 2018).

El uso de fertilizantes y pesticidas tiene como objetivo principal incrementar significativamente el rendimiento agrícola y resguardar los cultivos frente a posibles ataques de plagas (Su et al., 2011), no obstante, su uso excesivo y las prácticas inadecuadas en el manejo del suelo contribuyen significativamente a su deterioro y pérdida de calidad (Mahmoud & Ghoneim, 2016), se ha identificado que únicamente el 1% del pesticida aplicado alcanza efectivamente a la plaga objetivo, mientras que el porcentaje restante se dispersa en el suelo, el agua y el aire, generando contaminación en distintas fases de la cadena alimentaria (Azizullah et al., 2011; Su et al., 2011).

Diferentes cultivos, entre los que destacan el maíz, el arroz, el algodón y el trigo, han presenciado directamente los efectos del uso excesivo de los pesticidas y de malas prácticas, con el fin de incrementar el volumen de la producción (Jin et al., 2015).

En México, se estima que se utilizan más de 900 tipos de pesticidas, con volúmenes anuales de aplicación que oscilan entre las 395 y las 13,163 toneladas (García-Gutiérrez & Rodríguez-Meza, 2012), contaminando directamente al suelo y de manera indirecta al ganado y ser humano, esta contaminación es de tipo difusa para cuerpos acuáticos que se utiliza para el riego en la agricultura (Velázquez-Chávez et al., 2022).

Los pesticidas y fertilizantes no se absorben únicamente mediante el suelo (Deknock et al., 2019), también son trasladados por el aire (Wong et al., 2024), y en presencia de lluvias con fenómenos de escorrentía e inundaciones, los contaminantes se dispersan ampliando el rango de afectación.

Actualmente, cerca de un tercio de la superficie terrestre está dedicada a la agricultura, para ello, ha transformado el hábitat natural en cultivos (Landeros-Sánchez et al., 2011). La creciente demanda global de productos agrícolas, junto con la ampliación de las zonas cultivables, constituye factores clave que impulsan la deforestación (Armenteras & Rodríguez Eraso, 2014). También, esta actividad ha provocado la desaparición de numerosas especies, ya que en México se ha perdido aproximadamente el 45 % de los bosques templados y el 27 % de los bosques tropicales, con una tendencia creciente en la deforestación (Andrade, 2016).

El deterioro de la calidad del suelo agrícola reduce la productividad de los cultivos, poniendo en peligro la seguridad alimentaria mundial, especialmente al considerar la necesidad de incrementar la producción de alimentos para el año 2050. (Hou et al., 2020). Además del suelo, el agua es otro

recurso vulnerable, porque el constante uso del recurso hídrico empleado en sistemas de riego compromete la disponibilidad de este (Hou et al., 2020; Neri Guzmán & Medina Ortega, 2019).

El riego agrícola representa aproximadamente el 70 % del consumo mundial de agua y constituye un factor limitante clave para el rendimiento de numerosos cultivos (Andrade, 2016). En México, durante 2017, el 76 % del agua se destinó a actividades agrícolas, irrigando una superficie de 6.5 millones de hectáreas, lo cual ha impactado tanto la calidad como la disponibilidad del recurso hídrico. Esta alta demanda de agua y suelo ha contribuido a una disminución en la producción alimentaria (Llamas-Covarrubias, 2019).

En México, el sector agrícola enfrenta bajos niveles de productividad que dificultan abastecer a toda la población, influenciados por la diversidad climática, hidrológica, fisiográfica y cultural del país (Neri Guzmán & Medina Ortega, 2019). Mientras la producción alcanza alrededor de 23 millones de toneladas, el consumo nacional ronda los 39 millones. Además, en ciertas regiones se observa una significativa disminución de tierras cultivables debido a la limitada disponibilidad y la competencia por el agua (Santillán-Fernández et al., 2021).

La producción disminuye en la agricultura por la influencia del abandono de tierras agrícolas, porque estas ya no cuentan con nutrientes naturales; para solucionar la problemática de la alteración en los ecosistemas, que afectan al sector agrícola, el gobierno en conjunto con organizaciones privadas ha realizado estrategias nacionales e internacionales, una de estas estrategias es la participación de México en la Agenda para el año 2030 y los Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES).

La Agenda del año 2030 tiene varios objetivos, entre ellos, “el manejo sustentable de los recursos para la agricultura: el cuidado adecuado del suelo, la reducción de las muertes y de enfermedades generadas por los productos químicos, el agua limpia, la reducción de la deforestación para campos de cultivo y la protección de la biodiversidad del suelo”.

Afortunadamente, aumenta la conciencia en la población sobre mantener una salud hídrica de los cuerpos de agua, al igual que las fuentes que los dañan, aunque aún existe el reto de identificar las fuentes de contaminación no puntuales, o difusas, las cuales son reconocidas como las principales causas de la contaminación de los cuerpos de agua. Mientras que las fuentes de contaminación puntuales se detectan en las descargas como en fábricas o plantas depuradoras (Di Luzio et al., 2004).

Dentro de las fuentes de contaminación no puntuales destacan las actividades y factores que generan impactos negativos, como la expansión de las actividades agrícolas y la aplicación intensiva de pesticidas y fertilizantes (Zhuang et al., 2018).

2.2.1 Actividades antropogénicas

Las acciones humanas que transforman el uso del suelo y alteran la cobertura vegetal pueden generar impactos significativos en los procesos que sostienen diversos servicios ecosistémicos, entre ellos la regulación, el abastecimiento y la retención del agua (Ávila-García et al., 2020; Martínez-Retureta et al., 2020).

El cambio de uso y cobertura del suelo, que en la mayoría de los casos implican convertir paisajes naturales en áreas agrícolas, terrenos en áreas urbanizadas para fines residenciales o comerciales, cuando no se controla, a menudo resulta en graves daños ambientales (Onyango & Opiyo, s. f.), principalmente, los ríos y los arroyos se convierten en los más afectados (Rodríguez-Téllez et al., 2012), estos representan una fuente clave para el abastecimiento, la agricultura y el impulso del desarrollo sustentable; no obstante, en muchas áreas urbanas se han convertido en receptores de descargas industriales (Bhuiyan et al., 2015).

Además de la contaminación, factores como el aumento de la población, la expansión de las áreas agrícolas y urbanas, así como la explotación intensiva derivada del crecimiento económico, han contribuido significativamente a la degradación y pérdida de los ecosistemas acuáticos y su biodiversidad (Aznar-Sánchez et al., 2019).

Los ecosistemas brindan una amplia gama de beneficios económicos a través de lo que se conoce como servicios ecosistémicos. Estos servicios incluyen la provisión de alimentos, agua, madera, medicinas y otros recursos vitales para la economía. La población económicamente activa en el municipio de Almoloya de Juárez, Estado de México, se divide en los sectores primario, secundario y terciario, que representan el 46.6 %, 15.9 % y 34.06 %, respectivamente (Secretaría de Agricultura, 2014).

Las actividades primarias comprenden la obtención de recursos directamente del entorno natural, e incluyen prácticas como la agricultura, la ganadería, la pesca, la minería y el aprovechamiento forestal. Las actividades económicas secundarias son actividades donde se transforman las materias primas en productos elaborados; llamadas también sector industrial, donde participan desde pequeños

talleres hasta grandes fábricas; mientras el sector económico terciario incluye una amplia gama de servicios, entre ellos el turismo, el comercio, las comunicaciones, los servicios financieros y el transporte (Morales, 2012).

La pirotecnia mexicana, es una actividad que goza de una fama internacional por su profundo arraigo cultural y su naturaleza artesanal; los cuales se fabrican a partir de pólvora negra, a la que se añaden diferentes minerales y compuestos químicos para crear efectos especiales de colores (IMEPI, 2022)

El Instituto Mexiquense de la Pirotecnia (IMEPI) reporta materiales base para la elaboración de fuegos artificiales, los cuales se observan en la Tabla 1, la elaboración de materia pirotécnica producida en esta comunidad representa en 50% de la producción nacional.

Tabla 1. Material empleado para la elaboración de fuegos artificiales.

Material	Función
Pólvora negra	Se utiliza como propulsor para lanzar los fuegos artificiales al aire. El carbono es uno de sus componentes principales, que proporciona el combustible.
Dextrina	Se usa para formar pequeñas esferas que volarán más alto y brillarán con más intensidad cuando exploten.
Minerales	Se agregan para crear diferentes colores. Por ejemplo, el sodio que produce el color amarillo, el estroncio produce el color rojo, y el bario produce el color verde.
Aglutinantes o pegamentos	Se utilizan para facilitar la unión de las mezclas, los más usados son las dextrinas, gomas y harina de trigo.

2.3 Agua

El agua es una sustancia compuesta por una molécula que contiene un átomo de oxígeno unido a dos átomos de hidrógeno (H₂O). En su forma pura, presenta un pH neutro de 7, lo que indica que no posee carácter ácido ni básico (Müller-Esterl, 2019).

El agua es uno de los elementos más abundantes del planeta, aunque su distribución no es uniforme. Existen principalmente dos tipos de reservas naturales: agua salada y agua dulce. Esta última es la

que suele asociarse con condiciones adecuadas para el consumo humano. Sin embargo, es importante señalar que gran parte del agua dulce existente en la Tierra no está fácilmente disponible para su uso (García-Berthou et al., 2015).

El agua se puede considerar como el elemento más común y aunque ocupa una gran parte del planeta Tierra, esta se encuentra distribuida de diferente forma; en primera instancia se reconocen dos tipos de reservas naturales de agua; salada y dulce comúnmente a este tipo de agua se le asocia con ser aquella que reúne las características óptimas para el consumo humano, no obstante, es importante mencionar que gran parte del agua dulce que se puede encontrar en el planeta no se encuentra disponible (Pérez Zarate & Pichardo Rasso, s. f.).

2.3.1 Agua residual

El agua residual se reconoce como el contaminante predominante en cuerpos de agua, proveniente de diversas actividades como las domésticas, industriales, ganaderas y agrícolas. Estas aguas, que se generan durante procesos de producción, manipulación o transformación, incluyen líquidos residuales, aguas de procesos y aguas de drenaje (Cajacuri et al., 2013).

Existen diferentes tipos de aguas residuales, Maya Monar (2018) menciona que la clasificación más común es realizada por su origen:

- Aguas residuales domésticas o aguas negras: Se trata de aguas generadas por actividades humanas como la eliminación de heces y orina, la higiene personal, la preparación de alimentos y la limpieza del hogar. Estas aguas contienen altas concentraciones de materia orgánica, microorganismos, así como residuos de jabón, detergentes y grasas.
- Aguas blancas: Se originan a partir de la precipitación atmosférica, el riego y la limpieza de calles, parques y espacios públicos. Son comunes en regiones con lluvias frecuentes.
- Aguas residuales industriales: Estas provienen de las operaciones de fábricas y plantas industriales. Pueden contener sustancias como aceites, detergentes, ácidos, antibióticos y dependiendo del tipo de industria, residuos de origen animal, vegetal, químico o mineral.
- Aguas residuales agrícolas: Estas aguas se generan en áreas rurales como resultado de las actividades agrícolas. Frecuentemente provienen de fuentes urbanas y, en muchos casos, se emplean para riego, ya sea con o sin tratamiento previo.

2.4 Gestión integral de los recursos hídricos

Díaz-Pulido et al. (2009) determinan que el agua es un recurso ambiental, económico y social, es esencial para el desarrollo sostenible. No obstante, factores como el aumento poblacional, el nivel de riqueza y la creciente demanda de recursos representan desafíos importantes que cimentan la crisis mundial del agua, la gestión efectiva y una gobernanza sin intereses personales logran pausar e incluso la disminución de la crisis hídrica (Moriarty et al., 2006).

De la Conferencia Internacional sobre Agua y el Medioambiente, celebrada en Dublín, Irlanda en 1992, surge la representación conceptual de la gestión integral de los recursos hídricos (GIRH), que radica en los cuatro principios rectores del agua (Cap-Net, Global Water Partnership (GWP) & European Union Water, 2008):

- El agua dulce es un recurso limitado y vulnerable, esencial para la vida, el desarrollo y el medioambiente.
- El desarrollo y la gestión de los recursos hídricos deberían basarse en un enfoque participativo, que involucre a los usuarios, a los moderadores y a los políticos en todos los niveles.
- Las mujeres tienen un papel central en la provisión, gestión y cuidado de los recursos hídricos.
- El agua tiene un valor económico en todos sus usos competitivos y debería ser reconocida como un bien económico además de un bien social.

Los Estados miembros de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) aprobaron la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible, que incluye 17 objetivos de desarrollo sostenible enfocados en diferentes problemáticas. Entre los objetivos mencionados con anterioridad, existen 2 los cuales son 6 y 11, que regularizan la afectación, que recibe el recurso hídrico:

- “Garantizar el agua limpia y su saneamiento” (6).
- “Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles” (11).

2.4.1 Marcos normativos de México de agua

En los marcos normativos de México, la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (de La Federación, 1988) define a los servicios ambientales como “los beneficios tangibles e intangibles, generados por los ecosistemas, necesarios para la supervivencia del sistema natural y biológico en su conjunto, y para que proporcionen beneficios al ser humano”. Algunos de estos beneficios o contribuciones de la naturaleza hacia las personas incluyen la provisión y calidad del

agua, el control de inundaciones, el suministro de alimentos, bonos de carbono, la retención de nutrientes y la intervención de la erosión (Koetse et al., 2018; Maes et al., 2013).

El Instituto Mexicano de la Competitividad A.C. (de Competitividad Urbana, 2020) identifica que son pocas las poblaciones urbanas en México que cuentan con una estrategia preventiva para crisis hídricas para intervenir o responder ante los efectos del cambio climático, y que consideren a la sociedad para que se involucren en su implementación. Y es nula la presencia de estrategia preventiva para crisis hídricas en zonas rurales.

Frente a este escenario, varios países, México entre ellos, han asumido el compromiso de implementar medidas enfocadas en la conservación, restauración y adaptación de prácticas productivas, con el fin de preservar y mejorar los ecosistemas y los servicios que estos proporcionan (White, 2019).

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) es la dependencia del Gobierno Federal de México encargada de la protección, restauración y conservación de los ecosistemas y recursos naturales, así como de la prevención y control de la contaminación. Su misión es promover el desarrollo sustentable y el equilibrio entre el crecimiento económico y la protección ambiental; tiene la facultad legal de crear, revisar y vigilar el cumplimiento de una gran parte de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) ambientales. Las NOM son el instrumento jurídico-técnico que la SEMARNAT utiliza para establecer: límites máximos permisibles, especificaciones técnicas, métodos de prueba, y requisitos obligatorios para proteger el medio ambiente y los recursos naturales (Ávila & Yurydia, 2024).

La NOM-001-SEMARNAT-1996, que define los límites máximos permisibles de contaminantes para las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, fue actualizada y reemplazada por la NOM-001-SEMARNAT-2021, la cual establece límites de contaminantes en aguas residuales que se descargan a cuerpos receptores nacionales, con el fin de proteger el ambiente, los principales cambios incluyen la inclusión de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la toxicidad y el color verdadero como nuevos parámetros, y un procedimiento para la evaluación de la conformidad. Esta norma entró en vigor el 11 de marzo de 2023, con algunas disposiciones y parámetros, como la toxicidad aguda, que tendrán vigencia posterior (DOF, 2022).

La NOM-002-SEMARNAT-1996 es fundamental en la regulación ambiental en México, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes que pueden tener las descargas de aguas

residuales de usuarios no domésticos (principalmente industriales, comerciales y de servicios) hacia los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. El objetivo de esta norma es proteger la infraestructura del sistema de alcantarillado (evitar corrosión, obstrucciones y explosiones); así como, asegura el proceso de tratamiento en las plantas municipales, evitando que contaminantes tóxicos o no biodegradables lo inhiban o dañen; y proteger la salud pública y el medio ambiente de los riesgos asociados a contaminantes vertidos en la red. La norma define los límites para diversos parámetros, incluyendo sólidos sedimentables, grasas y aceites, metales pesados (como plomo, mercurio, y cadmio), pH, y otros contaminantes específicos (SEMARNAT, 1998b).

La NOM-003-SEMARNAT-1997 es la tercera norma fundamental en la regulación de la calidad del agua en México y su enfoque principal es el reúso seguro de este recurso.

El Diario Oficial de la Federación en septiembre de 1998 (SEMARNAP, 1998a), publicó la NOM-003-SEMARNAT-1997: Aguas Residuales Tratadas para Reúso, establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que serán reutilizadas en servicios al público. El objetivo central de esta norma es proteger la salud humana y el medio ambiente al garantizar que el agua residual tratada sea apta para usos no potables, previniendo riesgos microbiológicos y químicos. La norma clasifica los límites de contaminantes según el nivel de contacto público que tendrá el agua tratada. Algunos de los usos que regula son:

- Riego de parques y jardines (donde el público tiene contacto ocasional).
- Llenado de lagos y canales artificiales recreativos (con actividades como paseos en lancha, remo o esquí).
- Fuentes de ornato.
- Lavado de vehículos.
- Usos industriales que impliquen contacto con el público.

A diferencia de las NOM-001-SEMARNAT-2021 y NOM-002-SEMARNAT-1996, que se centran en la descarga, la NOM-003-SEMARNAT-1997 pone un fuerte énfasis en los parámetros que representan un riesgo directo para la salud pública al reusarse el agua. La NOM-003-SEMARNAT-1997 (originalmente NOM-003-ECOL-1997) se mantiene vigente y es fundamental para fomentar el uso eficiente del agua y la economía circular en el país.

2.5 Monitoreo de la calidad del agua

La expansión demográfica y el crecimiento económico provocan graves consecuencias sobre el medio ambiente, principalmente, los recursos de agua superficial están sujetos a una fuerte presión ejercida por actividades antropogénicas como la agricultura, industrias, ganadería, pesca, entre otros; como resultado es el cambio de uso de suelo, y a través de escurrimiento se logra la alteración de la calidad del agua (Daouda et al., 2024).

Los escurrimientos son fenómenos dependientes de la precipitación, al existir precipitación, parte de ella se filtra a la tierra y otra parte se escurre hacia abajo, que circula por la superficie terrestre y llega a los cuerpos de agua, como ríos y lagos (Vázquez González, 2025).

Los escurrimientos superficiales, especialmente aquellos que provienen de áreas urbanas o agrícolas, pueden transportar aguas sucias y contaminantes a los lagos. Estos contaminantes pueden incluir basura, desechos industriales, agroquímicos y sedimentos, lo que afecta la calidad del agua y la salud del ecosistema lacustre (Correa de León, 2024).

Las subcuencas San Diego y Almoloya es formada por cuerpos de agua perennes, son aquellos que mantienen un caudal o volumen de agua de manera constante, a lo largo del año, existen casos como, los periodos de sequías extremas que provocan que el recurso hídrico escasea; En contraste, de los cuerpos de agua intermitentes, estos pierden su caudal o volumen en alguna época del año, y lo recuperan el agua en épocas de precipitación (Vázquez-Gómez & Mercado, s. f.).

La calidad del agua es la condición o características que manifiestan el estado en que se encuentra el agua, proporciona información sobre el equilibrio de un ecosistema (España, 2000).

Para determinar la calidad del agua, se emplean diversos parámetros indicadores que reflejan la influencia humana, ya que el vertido de desechos altera las propiedades y condiciones del recurso hídrico. Estos indicadores facilitan la predicción de variaciones y características en la calidad del agua mediante el análisis de múltiples índices (Akhtar et al., 2021), se sugiere que estos índices funcionen como herramientas sencillas para evaluar la calidad de los recursos hídricos, representando valores mediante números, rangos, descripciones verbales, símbolos o incluso colores (Tripathi & Singal, 2019).

2.5.1 Bioindicadores

Desde la década de los noventa, se han implementado nuevas herramientas denominadas bioindicadores, que permiten evaluar el estado del agua en estos sistemas mediante técnicas fundamentadas en la respuesta y sensibilidad biológica de las comunidades como bioindicadores (monitoreo biológico) (Leaño Sanabria & Pérez Barriga, 2020).

Se les llama bioindicadores o indicadores biológicos a los organismos que por su sensibilidad o tolerancia (normalmente es la sensibilidad) a varios parámetros (Vázquez et al., 2006) manifiestan cambios como consecuencia de las alteraciones en un ecosistema, los cuales muestran atributos biológicos como presencia-ausencia, abundancia y dominancia, entre otros, y que se pueden traducir como una medida de la salud de los ecosistemas (Temis-García, 2021).

Los bioindicadores son organismos que rápidamente reflejan el estado de diversos componentes del ecosistema, así como del entorno físico y biológico. También proporcionan información sobre la interacción de estos elementos con la estructura sociocultural de un área geográfica a lo largo del tiempo, ofreciendo señales claras sobre los cambios que ocurren, útiles para distintos grupos interesados (Vázquez et al., 2006).

Los bioindicadores según Gonzales-Zuarth et al. (2014) poseen atributos ecológicos, que originan sus habilidades para detectar la presencia y/o ausencia, de diversos factores que comprometen el equilibrio de su hábitat, y reciben el nombre de bioindicadores detectores: se trata de organismos que ante la presencia de estresores ambientales mueren.

Los bioindicadores son aquellos que deben cumplir con características específicas, como: (Li et al., 2010).

- Sensibilidad suficiente para advertir alteraciones del ambiente.
- Capaz de advertir el peligro directamente que corre el taxón e indirectamente todo el ecosistema.
- La intensidad del cambio del bioindicador está relacionada con la intensidad del estresor ambiental.
- Indica directamente la causa, y no sólo la existencia del cambio, estos cambios ocurren poco tiempo después del origen de la alteración, lo que permite evitar daños irreversibles en el ecosistema.

- El equilibrio de la población no se ven amenazado al tomar muestras periódicamente gracias a su abundancia.
- Conocer el origen del disturbio es de poca dificultad por su baja movilidad.
- No son frágiles por lo que se pueden manipular y transportar al laboratorio para su análisis.
- Presentan una amplia distribución que permite hacer comparaciones entre distintas poblaciones.
- Su identificación puede realizarse por personas que no cuenten con experiencia en el taxón.
- Los resultados son fáciles de interpretar, con ayuda de las guías establecidas.
- El equipo para su monitoreo es económico y sencillo.

Además, los bioindicadores aportan una percepción integrada y extendida en el tiempo sobre la calidad del agua, la facilidad de usar estos organismos, en comparación con los análisis químicos y su capacidad para acumular información que los análisis fisicoquímicos no revelan (Garcés et al., 2021).

Entre los organismos más utilizados como bioindicadores de los sistemas acuáticos dentro del monitoreo biológico, se encuentran los grupos de algas y plantas acuáticas, zooplancton, bacterias, algunas especies de peces y los macroinvertebrados acuáticos, siendo este grupo, el más utilizado (Velázquez-Velázquez & Vega Cendejas, 2004).

La ventaja más evidente dentro de las evaluaciones ambientales realizadas con bioindicadores es la parte económica, al momento de implementar es más barato, ya que no se necesitan equipos costosos que requieran de un largo tiempo de entrenamiento para usarlos, como el requerido para los análisis fisicoquímicos (Ramírez et al., 2019).

2.5.2 Macroinvertebrados como bioindicadores en la calidad de agua

Se llaman macro porque son grandes, visibles al ojo humano, miden entre 2 milímetros y 6 centímetros; mientras que, se llaman invertebrados porque no tienen huesos, y acuáticos porque viven en los lugares con abundante agua (Barba-Álvarez et al., 2013).

Los estudios fisicoquímicos manifiestan información en el momento actual en el cual se recolecta la muestra, mientras que el monitoreo biológico, refleja las condiciones actuales y pasadas del cuerpo hídrico. Los grupos acuáticos más demandantes para ser realizar monitoreo de la calidad del agua en

cuerpos de agua superficial; son los macroinvertebrados por ser muy abundantes, de simple reconocimiento, presentes en la mayoría de los ecosistemas de agua dulce, proceso de recolección sencillo y económico (Gamboa et al., 2008).

Dentro de los macroinvertebrados, el grupo más extenso y presente en los ecosistemas acuáticos son los insectos en sus diferentes ciclos de vida (larval, ninfas y fase adulta), estos manifiestan rápidamente cambios en el número de habitantes en presencia de alteraciones fisicoquímicas del entorno donde habitan, en algunas condiciones las agrupaciones de insectos van desapareciendo (Eguía-Lis & Perla, 2007).

2.5.3 Análisis de Sensibilidad

La existencia de análisis que toman en cuenta el grado de sensibilidad que tienen las diferentes familias de macroinvertebrados a los contaminantes; determina la calidad del agua, como el índice BMWP/Méx.

2.5.3.1 Índice Biological Monitoring Working Party (BMWP) y su modificación para México (BMWP/Méx.)

El Índice Biótico BMWP se desarrolló en Gran Bretaña en 1970, se estableció como un método sencillo y rápido para la evaluación de la calidad del agua utilizando los macroinvertebrados acuáticos como indicadores biológicos (Ariza, 2016).

El índice BMWP es un método evaluador de calidad del agua, basándose únicamente en la presencia o ausencia de los macroinvertebrados, el cual emplea la identificación de organismos acuáticos a nivel taxonómico de familia (Alonso, 2018).

El éxito del índice BMWP llegó a varios países del mundo, para su aplicación se realizó una adaptación para México (BMWP/Méx.), la cual se encuentra publicada en el “Protocolo de muestreo de macroinvertebrados en aguas continentales para la aplicación de la norma de caudal ecológico, 2014”.

El índice BMWP proporciona valores de 1 a 10 al grado de sensibilidad de los macroinvertebrados acuáticos por familia, el 1 indica al menos sensible o con mayor tolerancia a la contaminación, y así, gradualmente, hasta el 10, que señala al más sensible (Holt & Miller, 2010).

El índice BMWP para un cuerpo de agua, es el resultado de la suma de los valores asignados a cada familia de macroinvertebrados identificados en el caso de estudio. De acuerdo con esta sensibilidad se clasifican en cinco grupos, como se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Calidad de agua según la sensibilidad de macroinvertebrados.

Nivel de calidad	BMWP	Color
Aguas de calidad excelente	> 120	Azul
Aguas de calidad buena, no contaminadas o no alteradas de manera sensible	101 - 120	Azul
Aguas de calidad regular, eutrofia	61 - 100	Verde
Aguas de calidad mala, contaminada	36 – 60	Amarillo
Aguas de calidad mala, muy contaminada	16 - 35	Naranja
Aguas de calidad muy mala, extremadamente contaminada	< 15	Rojo

A continuación, se enlista en Figura 1 las familias que conforman el BMWP/Méx. y su puntuación (Pineda et al., 2014).



Figura 1. Familias de macroinvertebrados y su puntuación del BMWP/Méx.

Los macroinvertebrados acuáticos comprenden una enorme diversidad de grupos como insectos, moluscos, anélidos, crustáceos, y otros; estos, presentan un amplio espectro de tolerancia a diferentes tipos de contaminación, el índice BMWP/Méx asigna un puntaje de tolerancia a la contaminación a cada familia. El puntaje que va de 8 a 10, agrupan familias de macroinvertebrado como Perlidae, Perlodidae, Leuctridae y Capniidae; que requieren de aguas muy limpias, bien oxigenadas y estables. El requerimiento de excelente calidad del agua, de estas familias de macroinvertebrados acuáticos radica en que se caracterizan por tener branquias laminares o filamentosas externas muy expuestas y delicadas, sensibles a la baja oxigenación y partículas de sólidos (Cuevas et al., 2024).

Las familias moderadamente tolerantes a contaminación son asignadas con puntaje que va de 4 a 7 del índice BMWP/Méx. Están presentes en agua de calidad buena a regular. Por ejemplo, las familias como Coenagrionidae, Gomphidae y Libellulidae. La Familia como Gammaridae, de 7 puntos, poseen un exoesqueleto y branquias protegidas (Jaramillo Coronel et al., 2025).

Las familias Elmidae, Dytiscidae y Haliplidae, que reciben valores alrededor de 4 puntos, por su tolerancia moderada a contaminantes gracias a sus adaptaciones para almacenar aire o respirar bajo el agua. Mientras que las familias muy tolerantes con puntuación de 1 a 3; prosperan en aguas contaminadas o con baja oxigenación. Su presencia abundante indica mala calidad del agua. Por ejemplo, la familia Oligochaeta, se caracterizan por ser gusanos segmentados que respiran cutáneamente y pueden vivir en ambientes reducidos de oxígeno; y se alimentan de materia orgánica en descomposición. La familias como Chironomidae, generalmente, larvas que tienen hemoglobina para captar oxígeno en ambientes donde falte el oxígeno en alguna parte de su cuerpo; son recolectores de detritos y se alimentan de bacterias que proliferan en aguas orgánicamente enriquecidas (Domínguez & Fernández, 2009; Roldán Pérez & Ramírez Restrepo, 2022).

2.5.4 Técnicas para coleccionar macroinvertebrados

Existen varias técnicas para coleccionar macroinvertebrados, se selecciona la técnica según las condiciones del cuerpo de agua, las facilidades del medio, las posibilidades y habilidades que tenga para elaborar ciertos materiales; la técnica elegida deberá utilizarse en todas las áreas seleccionadas, al igual que el tiempo y superficie empleado en la primera recolecta, (Carrera Reyes & Fierro Peralbo, 2001) resaltan tres técnicas descritas a continuación.

2.5.4.1 Técnica de piedras y hojarasca

En esta técnica se buscan macroinvertebrados en las piedras y hojas que se encuentran en el fondo, en la superficie, en la orilla del cuerpo de agua, con vegetación flotante, es recomendable hacerlo en

ríos correntosos y con piedras grandes. No se recomienda realizar esta técnica en ríos que tienen fondo arenoso o arcilloso y que no tienen hojarasca en las orillas.

La colección de los macroinvertebrados debe realizarse de 30 a 60 minutos, durante este tiempo se debe buscar cuidadosamente los macroinvertebrados entre las piedras y en la hojarasca; para facilitar la búsqueda, use una lupa, pinzas y colóquelos en un frasco (etiquetado con el nombre del cuerpo de agua y la fecha) con alcohol.

2.5.4.2 Técnica de red de patada

Esta técnica consiste en atrapar macroinvertebrados, removiendo el fondo del río; uno de los miembros de la pareja da 'patadas', removiendo el fondo, la otra coloca la red río abajo para atraparlos.

Se utiliza en ríos medianamente torrentosos por los que se puede caminar, y poseen cualquier tipo de sustrato: construir con una malla plástica o metálica de aproximadamente un metro cuadrado, la malla debe ser de 0,5 a 1 milímetro.

Para realizar esta técnica se recomienda definir la extensión del muestreo (10, 20 ó 30 metros), caminar con su pareja lentamente corriente arriba, una persona camina espaldas a la corriente removiendo el fondo con ayuda de su extremidad; la otra persona camina de frente a la corriente para recibir el material recolectado en la red. La red debe estar con ligera inclinación para evitar derrame del material recolectado.

Al tener el material recolectado, levantar la red por los dos extremos con la ayuda de su pareja, para colocarlo en un recipiente con agua; seguido de enjuagar el material para identificar los macroinvertebrados del resto de material, con la ayuda de una pinza manipular los organismos para depositarlos en un frasco con alcohol, etiquetado. La etiqueta debe llevar el nombre del sitio, fecha y participantes en la recolección.

2.5.4.3 Técnica de red Surber

Es una técnica para recolectar macroinvertebrados con una red sujeta a un marco metálico con forma de D, durante el muestreo se remueve el fondo del río de poca profundidad (no mayor a 45 centímetros) con corrientes lentas y fondo de piedras pequeñas, no es recomendable realizar este muestreo donde el fondo sea de arena o lodo.

Para elaborar la red, emplear un marco, de 30 cm de diámetro; para formar una D; enseguida, al marco colocar una red en forma de cono de 40 a 45 centímetros de profundidad, esta red puede ser de plástico o tela fina resistente, y con un ojo de red o malla de 0,5 a 1 milímetro. Debe muestrearse un sitio de 30 a 40 metros, con 10 ó 15 puntos de muestreo.

La técnica de red Surber se realiza al ingresar la red corriente abajo, remover con la mano el fondo que ingreso a la red durante un minuto; evitar bloquear la corriente de agua para facilitar el ingreso de materiales a la red, y verter el contenido en una base blanca (debe haber una para cada punto de muestreo), con el fin de separar a los macroinvertebrados, con la ayuda de una pinza manipular los organismos para depositarlos en un frasco con alcohol, etiquetado. La etiqueta debe llevar el nombre del sitio, fecha y participantes en la recolección.

2.6 Investigaciones utilizando macroinvertebrados

A continuación, se presentan diferentes investigaciones que resalta la relación que existe entre los macroinvertebrados y la calidad de agua.

Se empleo macroinvertebrados acuáticos para evaluar el grado de contaminación de una laguna tabasqueña (Martínes et al., 2025) donde se realizaron colectas en dos puntos de la laguna, cerca de descargas de agua residual y pluvial y dos más en los puntos más alejados de las descargas de agua residual.

Se evaluó la composición de macroinvertebrados acuáticos y la calidad del agua en la subcuenca del río Cotón, Baja Verapaz; donde se muestreó en la parte baja, media y alta durante la época seca y lluviosa del año 2023 (Correa de León, 2024).

Durante los años 2022 y 2023 se llevó a cabo un estudio en cuatro ríos de la zona alta de la Cuenca Hidrológica Río Actopan en el Estado de Veracruz para determinar la influencia de la calidad del agua y del uso del suelo en la biodiversidad de macroinvertebrados acuáticos (Pérez Hernández, 2024).

2.7 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los SIG, según SIGSA, (2022), tienen la capacidad para el análisis de ubicación espacial y de organizar la información en capas formando mapas; son herramientas que esenciales para el análisis, presentación e interpretación de la superficie terrestre.

De acuerdo con Olaya (2014), los SIG se componen de cinco elementos principales:

- El dato, que actúa como el insumo esencial y otorga sentido a los demás componentes del sistema, con características específicas como forma y propiedades.
- Conjunto de métodos, que abarca las formulaciones y técnicas aplicadas a los datos.
- El software es la aplicación informática responsable de procesar los datos y ejecutar los métodos, permitiendo la manipulación de la información.
- El hardware hace referencia al equipo de cómputo necesario para operar el software SIG, cuya capacidad depende del tamaño de la comunidad de usuarios y de la clase de datos que se manejan.
- Usuarios son quienes diseñan, administran y utilizan el software

La información puede ser representada en dos modelos de información geográfica (Olaya, 2014 y ESRI, 2016), representado en la Figura 2.

- **Modelo Ráster:** Se distingue por su organización sistemática en múltiples unidades pequeñas, conformadas por una matriz de celdas o píxeles distribuidos en un patrón de filas y columnas, en su interior recogen información que las describe.
- **Modelo Vector:** Su principal característica es que se representa por entidades geométricas (puntos, líneas y polígonos).

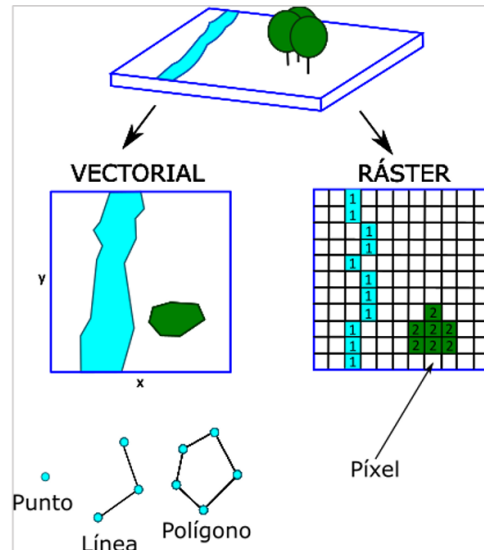


Figura 2. Representación de datos en un Sistema de Información geográfica (Olaya, 2014 y ESRI, 2016).

2.7.1 La teledetección

Existen herramientas que ayudan a comprender las tendencias, causas y consecuencias de cambios ambientales, por ejemplo, la realización de mapas y su visualización (Hesping, 2020), a través de teledetección, que se refiere a la recopilación de información geoespacial desde el espacio o el aire (Willis, 2015), ha sido aplicadas por numerosos investigadores para detectar, clasificar y monitorear los cambios en el uso y la cobertura del suelo (Demir et al., 2012; Salmon et al., 2013).

La energía reflejada es la información que generan los satélites a través percepción remota y transmitida a los SIG, se fundamenta en la respuesta espectral, que se denomina firma espectral de diversos elementos de la superficie como cuerpos de agua, cubierta vegetal, establecimientos urbanos, entre otros (Basan et al., 2017).

La teledetección presenta ventajas respecto a las tradicionales, entre las ventajas del uso de la teledetección destacan el uso de observaciones consistentes, precisas y adecuadas, sobre el patrón de distribución de cambio de uso y cobertura del suelo en una extensión geográfica (Rogan & Chen, 2004; Willis, 2015), es de cobertura global y exhaustiva, perspectiva panorámica, observación multiescala, información en tiempo real y registro digital de la información (Chuvienco, 1991), además requiere menor tiempo, utiliza menor mano de obra y los costos son inferiores (Willis, 2015).

A continuación, en la Figura 3, se muestra los componentes de la teledetección.

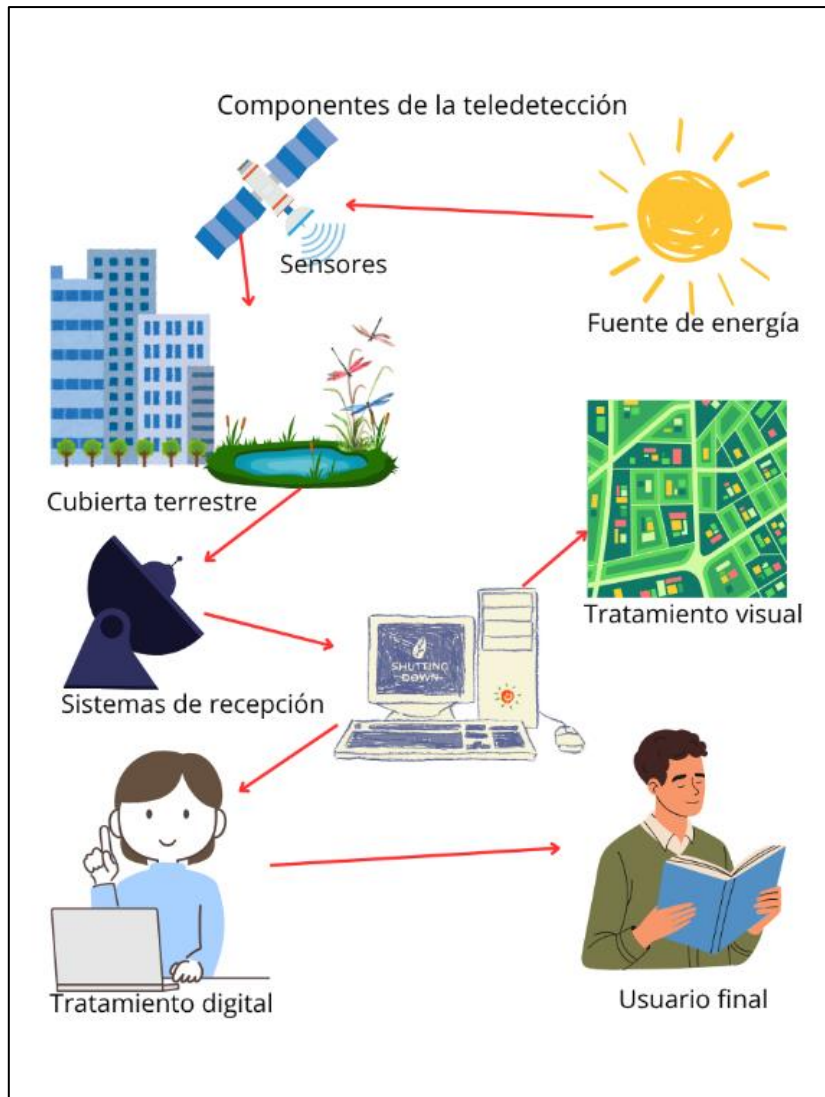


Figura 3. Componentes de la teledetección: fuente de energía, sensores, cubierta terrestre, sistemas de recepción, tratamiento digital y visual, y usuario final.

A continuación, en la Figura 4 se muestra los diferentes partes del espectro electromagnético.

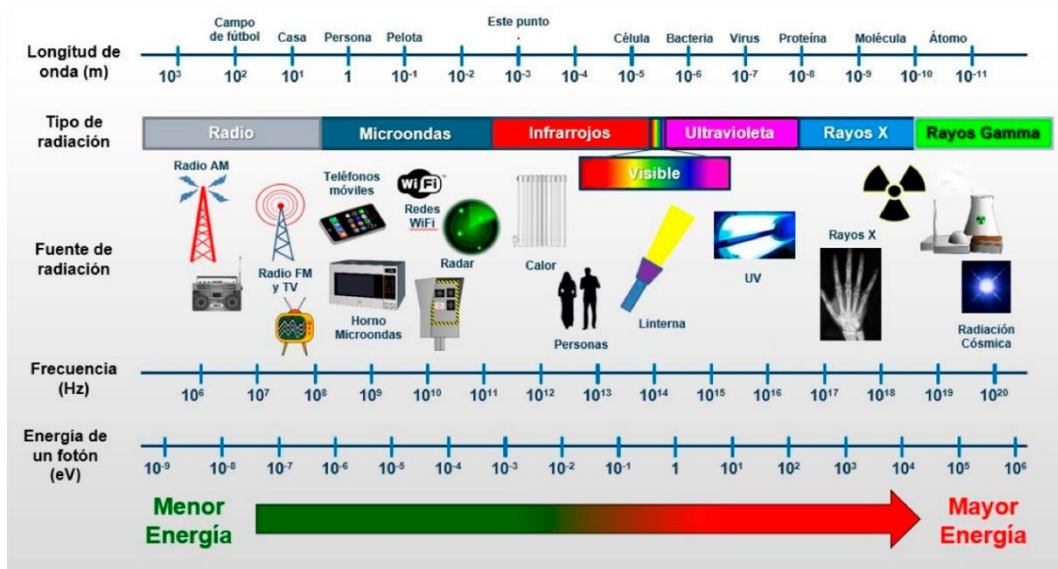


Figura 4. Partes del espectro electromagnético: longitud de ondas (m), tipo y fuente de radiación, frecuencia (Hz) y energía de fotón (Ev).

Obtenido en <https://acortar.link/8ZhPP1>.

Labrador et al. (2012) menciona que las regiones del espectro más representativas son:

- Región visible abarca entre $0.4 \mu\text{m}$ y $0.7 \mu\text{m}$.
- Región infrarroja (IR), que se divide en tres categorías: infrarrojo cercano (NIR) entre 0.7 y $1.3 \mu\text{m}$, infrarrojo medio (SWIR) entre 1.3 y $3 \mu\text{m}$, e infrarrojo térmico (TIR) entre 3 y $100 \mu\text{m}$.

2.7.2 Satélites

Según la NASA, "un satélite natural es un objeto que se encuentra en órbita alrededor de un planeta, luna u otro cuerpo celeste", también existen satélites artificiales, los cuales son objetos que se colocan en órbita alrededor de un planeta o un cuerpo celeste para realizar diversas funciones, existen diferentes satélites artificiales sin embargo tienen características en común, por ejemplo:

- Órbita: se mueven alrededor de un cuerpo celeste.
- Propulsión: utilizan sistemas de propulsión para mantenerse en órbita o cambiar de órbita.
- Antenas y equipos: transmiten y reciben información.
- Paneles solares: generan energía eléctrica.
- Sensores y cámaras: recopilan datos e imágenes.

(NASA, s. f.).

Los diferentes tipos de satélites artificiales se observan en la Tabla 3.

Tabla 3. Tipos de satélites artificiales.

Tipos de satélites	Características	Ejemplo
Satélites de observación terrestre	Monitorean el clima, el medio ambiente y los recursos naturales	Landsat y Sentinel
Satélites de comunicaciones	Transmiten información y señales de comunicación	Intelsat y SES
Satélites científicos:	Estudian el universo y los fenómenos espaciales	Hubble y Kepler
Satélites meteorológicos	Predicen el clima y monitorean los patrones climáticos	EUMETSAT
Satélites de navegación:	Proporcionan ubicación y tiempo	GPS y GLONASS

Obtenido en NASA, s. f.; Intelsat., s. f.; NOAA., s. f.; GPS, s. f.

Para desarrollar la presente investigación se empleó información recabada por los satélites artificiales Landsat y Sentinel, son ambos utilizados para la observación terrestre, pero tienen diferencias en su diseño, funcionamiento y objetivos.

2.7.3 Landsat

El lanzamiento del primer Landsat en 1972 marcó el inicio de la serie y se cuenta con datos históricos disponibles desde ese año, aunque la obtención de datos disponibles gratuitamente es a partir de 2008, es operado por NASA/USGS. El satélite Landsat tiene mayor énfasis en estudios científicos y de cambio climático a largo plazo recomendable en decenas de años, tiene resolución espacial de 15 hasta 30 metros (dependiendo del modelo), el periodo de revisita es de 16 o 18 días, dependiendo del modelo (USGS, 2008).

Para este caso de estudio, se utilizan los productos de Landsat 8, lanzado en el 2013, el cual consta de objetivos científicos clave como recopilar y archivar datos de imágenes multiespectrales (Guamán Guaño, 2021). Las imágenes del satélite Landsat 8 están compuestas por 11 bandas, como se aprecia en la Tabla 4.

Tabla 4. Características de las Bandas Landsat 8.

Bandas	Resolución espacial	Longitud de onda	Descripción
Banda 1	30 m	0.43-0.45 nm	Ultra azul (Costa y Aerosol)
Banda 2	30 m	0.45-0.51 nm	Azul
Banda 3	30 m	0.53-0.59 nm	Verde
Banda 4	30 m	0.64-0.67 nm	Rojo
Banda 5	30 m	0.85-0.88 nm	Infrarrojo Cercano (NIR)
Banda 6	30 m	1.57-1.65 nm	Onda Corta Infrarrojo (SWIR 1)
Banda 7	30 m	2.11-2.29 nm	Onda Corta Infrarrojo (SWIR 2)
Banda 8	15 m	0.50-0.68 nm	Pancromática
Banda 9	30 m	1.36-1.38 nm	Nubes
Banda 10	100 m	10.60-11.19 nm	Infrarrojo Térmico
Banda 11	100 m	11.50-12.51 nm	Infrarrojo Térmico

Obtenido de <https://acortar.link/IJViS3>

2.7.4 Sentinel

El Programa Copernicus, lanzado por la Unión Europea en 2014, es una iniciativa de Observación de la Tierra y su atmósfera que planea colocar en órbita un total de 11 satélites de baja altitud, conocidos como la constelación SENTINEL. Estos satélites están equipados con instrumentos ópticos, radar y radiométricos, que permiten recopilar datos valiosos sobre la evolución del planeta, sus océanos, atmósfera, cultivos, infraestructuras y otros aspectos relacionados con la dinámica terrestre y la actividad humana (Aparicio, s. f.).

En esta investigación se contemplan los productos de SENTINEL-2, porque este satélite tiene la misión de realizar la medición de la reflectancia espectral terrestre para el monitoreo de la agricultura, vigilar la salud de la vegetación y la detección de cambios en la superficie terrestre (Morales, 2017).

Las imágenes producto del satélite Sentinel-2, tienen un tiempo de revista de cada 5 días, están compuestas por 13 bandas, se caracterizan por tener una resolución espacial de 10-60 m y son multispectrales (Gayo Febrero et al., s. f.), como se aprecia en la Tabla 5.

Tabla 5. Características de las Bandas Sentinel-2.

Banda	Resolución espacial	Longitud de onda	Descripción
B1	50 m	443 nm	Ultra azul (Costa y Aerosol)
B2	10.m	490 nm	Azul
B3	10 m	560 nm	Verde
B4	10 m	665 nm	Rojo
B5	20 m	705 nm	Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)
B6	20 m	740 nm	Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)
B7	20 m	783 nm	Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)
B8	10 m	842 nm	Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)
B8a	20 m	865 nm	Rojo de borde (RedEdge)
B9	60 m	940 nm	Vapor de agua
B10	60 m	1375 nm	Nubes
B11	20 m	1610 nm	Onda Corta Infrarrojo (SWIR)
B12	20 m	2190 nm	Onda Corta Infrarrojo (SWIR)

Obtenido de <https://acortar.link/gFfqjJ>

2.7.5 Firmas espectrales

Los satélites artificiales además de brindar una imagen también proporcionan información específica como lo es las firmas espectrales; las cuales son el resultado del comportamiento de la radiación reflejada o emitida por un objeto o tipo de superficie, cada objeto o superficie tiene su propia firma espectral (Giraldo, 2016; Sánchez Heras, 2025).

Los científicos analizan firmas espectrales, las cuales reflejan características físicas, químicas y biológicas mediante la radiación que emite ciertas longitudes de onda del espectro electromagnético. Cuando la radiación solar atraviesa la atmósfera, cada tipo de superficie interactúa con ella absorbiendo algunas longitudes de onda y reflejando otras (Flores-Garnica et al., 2022).

A continuación, en la Figura 5, se identifican diferentes tipos de cubiertas según su firma espectral.

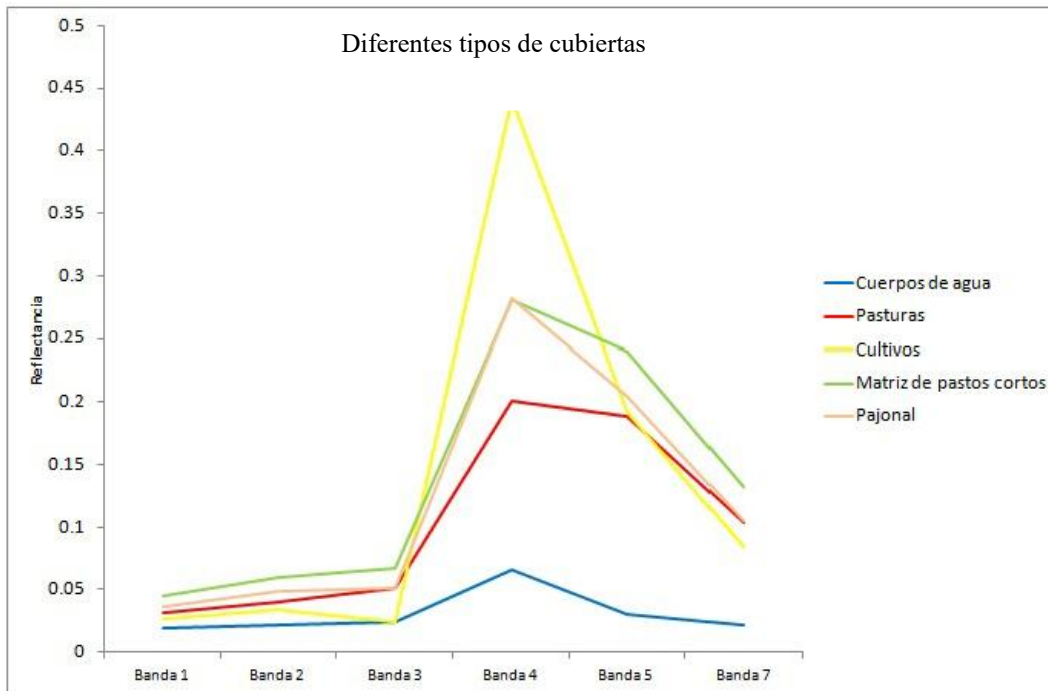


Figura 5. Diferentes tipos de cubiertas según su firma espectral.

Obtenido de <https://acortar.link/60teFs>

2.7.6 Investigaciones utilizando teledetección

La cobertura de suelo indica la cubierta vegetal y manifiesta el material que cubre la superficie terrestre, incluyendo vegetación, agua, suelo, construcciones y otros elementos naturales o artificiales; mientras que el uso del suelo se caracteriza por presencia de actividades antropogénicas desarrolladas en las coberturas, mencionadas anteriormente, la interacción entre ambas implica dinámica en el uso de suelo (Hernández-Cavazos et al., 2023; Sandoval-García et al., 2021).

La teledetección es una herramienta estratégica, mediante el análisis multiespectral de imágenes satelitales, permite evaluar y analizar la salud de ecosistemas, incluyendo la calidad del agua en cuerpos superficiales (Carrasco Vela, 2019).

A continuación, se presentan diferentes investigaciones que resalta la relación que existe entre la teledetección y la calidad de agua.

En Turquía, se empleó la percepción remota para identificar y delimitar humedales, lo que facilitó la detección de contaminación hídrica en la reserva de la biosfera de la Mancha Húmeda (Pérez Ortega, 2011).

En Argentina, se desarrollaron modelos para estimar respuestas basadas en los niveles de clorofila y la profundidad del disco de Secchi, correlacionándolos con variables espectrales obtenidas de las bandas 1, 2, 3 y 4. En este estudio se aplicaron técnicas de percepción remota utilizando datos del satélite Landsat 5TM, complementados con análisis físicos y químicos. Así, se caracterizó y validó la calidad del agua en el embalse Río Tercero, concluyendo que se trata de agua dulce adecuada para riego agrícola, pero no apta para consumo humano (Ledesma et al., 2013).

En México, se identificaron los cuerpos de agua ubicados en la Sierra Madre Occidental con el objetivo de elaborar un inventario que abarcara los diferentes tipos de vegetación presentes en esa región. Para ello, se emplearon 120 imágenes captadas por el satélite Sentinel-2 (Espinoza et al., 2020).

2.7.7 Parámetros fisicoquímicos en la calidad del agua

Los indicadores de calidad son herramientas métricas empleadas para evaluar la eficiencia de los procesos y el nivel de cumplimiento de las normas establecidas. En el caso del agua, estos indicadores comprenden parámetros físicos, químicos y biológicos que determinan su adecuación para diversos usos, como consumo humano, riego o industria. Estos indicadores permiten clasificar el agua según su grado de contaminación y determinar si es apta para un uso específico (Guataquira Rincón, 2023).

Los parámetros fisicoquímicos empleados durante la evaluación de la calidad del agua, proporcionando información química del agua, así como sus propiedades físicas del agua, entre los parámetros fisicoquímicos se encuentran: potencial de hidrógeno (pH), temperatura (T), oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (σ), fósforo total (PT), demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno en forma de nitratos ($N-NO_3^-$), sulfatos (SO_4^{2-}) y alcalinidad (Alc), entre otros (Osorio Montor, s. f.)

3. Justificación

Las subcuencas San Diego y Almoloya, localizadas en el municipio de Almoloya de Juárez, Estado de México, constituyen dos de las tres subcuencas con mayor extensión territorial dentro del sistema que desemboca en la Presa Ignacio Ramírez, seguidas de la subcuenca La Gavia. Estas pertenecen a la Región Hidrológica N°12 Lerma-Santiago y a la Cuenca Lerma-Toluca, ambas cuencas forman una zona de importante para la recarga de acuíferos en la entidad. Es relevante señalar que en las zonas altas de las subcuencas San Diego y Almoloya se enfrentan problemas de tala ilegal y erosión, mientras que en las áreas medias se presentan riesgos de deforestación, incendios, erosión y contaminación. Mientras que, en las zonas bajas, se registran vertederos de aguas residuales y residuos sólidos provenientes de la población local. Este último punto incide significativamente en la contaminación de la Presa Ignacio Ramírez, la cual es el principal cuerpo hídrico receptor. Las principales fuentes contaminantes de esta presa incluyen desechos domésticos, residuos agrícolas con pesticidas y plaguicidas, así como residuos industriales procedentes de la Fábrica Papelera 'El Nevado' (Dirección de Ecología, 2009).

Las subcuencas San Diego y Almoloya tienen varios cuerpos de agua superficiales, las características de los cuerpos de agua son diferentes en función de las actividades antropogénicas realizadas a su alrededor; por eso, conocer la situación actual de subcuencas en aspectos hídricos, como el estado de contaminación del agua, permitirá facilitar la toma de decisiones futuras sobre la seguridad hídrica. Un método que integra la información sobre la calidad del agua a largo plazo y permite identificar diferentes niveles de contaminación por su tolerancia a la misma son los macroinvertebrados, los cuales son excelentes indicadores de la calidad del agua (Springer, 2010). Debido a su estrecha relación con el sustrato que provoca alteración en el cuerpo acuático, se aconseja la evaluación físicas y químicas del agua (Álvarez & Pérez, 2007).

Los mapas facilitan la visualización de zonas que requieren una mayor atención, así como facilitan la toma de decisiones para implementar acuerdos que ayuden a manejar adecuadamente el uso de los recursos y del ordenamiento ecológico con base en elementos naturales y culturales (Escaname et al., s. f.)

4. Hipótesis

A mayor diversidad de actividades antropogénicas realizadas en las subcuencas de San Diego y Almoloya, se tendrán aguas superficiales con mayor grado de contaminación lo que se verá reflejado en las poblaciones de macroinvertebrados, en los parámetros fisicoquímicos del agua y cambios de cobertura de suelo.

5. Objetivo general

Establecer los posibles riesgos de contaminación del agua de las subcuencas de San Diego y Almoloya, por actividades antropogénicas, e identificar su situación de contaminación actual a través de parámetros fisicoquímicos y con ayuda de macroinvertebrados como bioindicadores.

5.1 Objetivos específicos

Considerando el contexto ambiental y la necesidad de información precisa en la región, la presente investigación se propone los siguientes objetivos:

1. **Identificar** las actividades antropogénicas presentes en las subcuencas de San Diego y Almoloya, analizando su impacto en el uso del suelo y los recursos hídricos.
2. **Comparar la evolución** de los cuerpos de agua superficiales en las subcuencas de San Diego y Almoloya durante el periodo de 2014 – 2024, utilizando técnicas de percepción remota para identificar cambios significativos en su extensión y calidad.
3. **Elaborar un inventario** de los cuerpos de agua en las subcuencas de San Diego y Almoloya, identificando y clasificando los recursos hídricos disponibles en la región.
4. **Analizar los efectos de la contaminación** sobre la distribución y diversidad de familias de macroinvertebrados en las subcuencas de San Diego y Almoloya, utilizando estos organismos como bioindicadores para evaluar la salud de los ecosistemas acuáticos.
5. **Evaluar la contaminación** generada por las actividades antropogénicas en los cuerpos de agua de las subcuencas, mediante la medición de parámetros fisicoquímicos y el análisis de macroinvertebrados como indicadores de calidad del agua.

6. Materiales y Métodos

6.1 Zona de estudio

La Cuenca Lerma-Chapala de 59,948 km², cuya cobertura incluye parcialidades del Estado de México (10 %), concentra parte importante de la actividad económica del país. Además, el 12.5 % de hectáreas para riego a nivel nacional se encuentra dentro de esta cuenca, representando a su vez la producción del 35 % del producto interno bruto (PIB). Para esta investigación se considera el municipio de Almoloya de Juárez, Estado de México, el cual forma parte de la cuenca Lerma - Chapala con 454 km² que representa el 95 % del territorio municipal (Master Planning, S.A. de C.V., 2016).

De acuerdo INEGI (2016), la cuenca que cubre al Estado de México perteneciente a la mencionada región hídrica Lerma-Toluca o Curso Alto del río Lerma (CARL), a la cual pertenecen las Subcuencas: Río Almoloya–Otzolotepec, Río Otzolotepec, Río Atlacomulco, Río Atlacomulco-Paso de Ovejas, Río Tlalpujahuá, Río Jaltepec, Río La Gavia, Río Tejalpa, Río Verdiguél, Río Otzolotepec, Río Sila, dentro del régimen estatal.

De acuerdo con el Atlas Urbano de la Cuenca Hidrológica del Río Lerma, publicado por el Gobierno del Estado de México, 2011, por su gran extensión, la Cuenca fue dividida en 20 subcuencas, tomando en cuenta los principales escurrimientos superficiales y cuerpos de agua, las cuales se enlistadas a continuación:

- | | | |
|--|--------------------------------|---|
| 1. Laguna de Almoloya del Río | 8. Arroyo Zarco | 15. Arroyos la Jordana y Santiago |
| 2. Arroyo Muerto y Xalatlaco | 9. Arroyo Temoaya | 16. Presa Tepeltitlán y Arroyo Jaltepec |
| 3. Arroyo Salazar | 10. Presa José Antonio Alzate | 17. Arroyo San Cayetano |
| 4. Arroyo Seco y San Mateo | 11. Arroyo Sila y San Bartolo | 18. Arroyo Tejalpa |
| 5. Corrientes Río San Lorenzo y arroyo el Jilguero | 12. Arroyo San Pedro del Rosal | 19. Corriente Río Verdiguél |
| 6. Corriente Río Zolotepec. | 13. Arroyo Tierra Blanca | 20. Presa Ignacio Ramírez |
| 7. Corriente Río Mayorazgo | 14. Arroyo el Salto | |

Esta última, la subcuenca Presa Ignacio Ramírez, a su vez es dividida (SEGOB, 2013), como se observa en la Figura 6, para esta investigación son consideradas:

- La subcuenca Almoloya (de Juárez), con extensión territorial de 95.03 km².
- La subcuenca de San Diego, que comprende una extensión de 112.88 km².

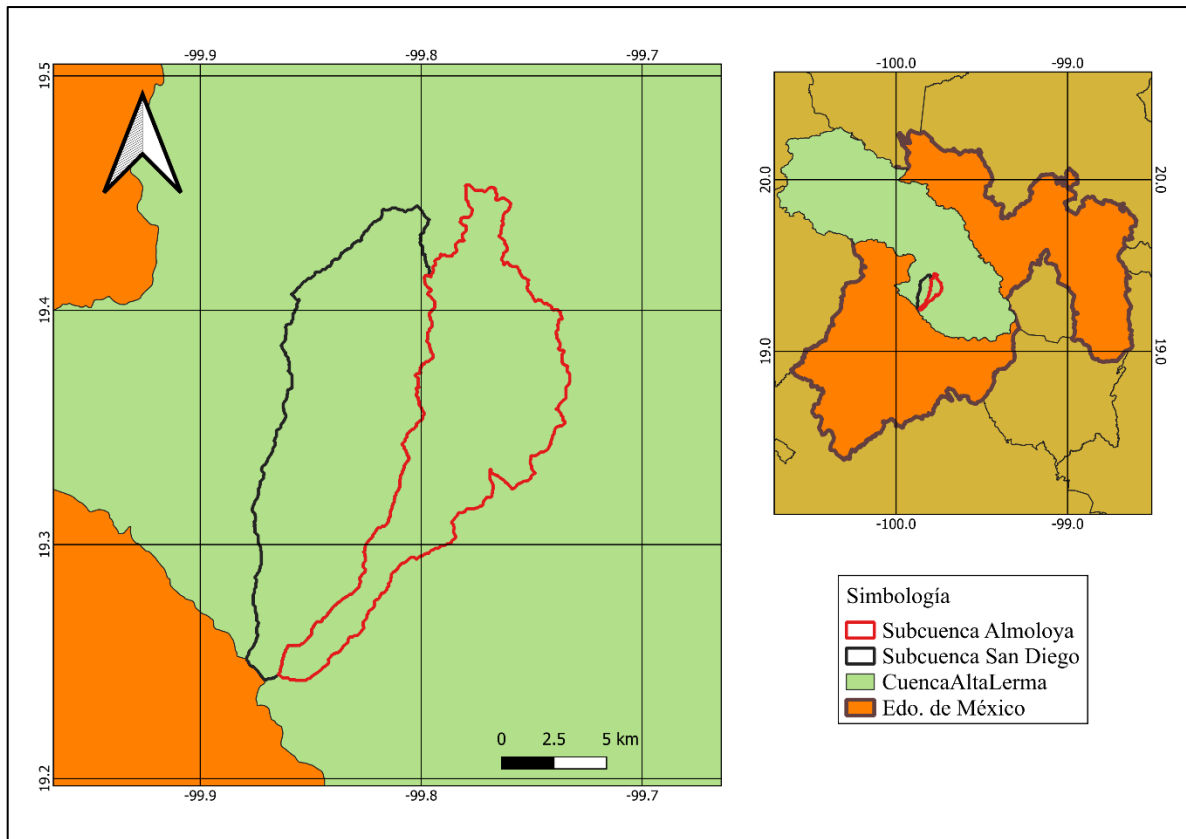


Figura 6. Subcuencas San Diego y Almoloya.

Ambas subcuencas son consideradas zona de estudio propuesta como parte de esta investigación, donde se localiza en el municipio de Almoloya de Juárez.

Almoloya de Juárez, Estado de México es identificado por INEGI con la clave geoestadística 15005, se ubica entre los paralelos 19° 14' y 19° 34' de latitud norte; los meridianos 99° 42' y 99° 58' de longitud oeste; altitud entre 2 500 y 3 800 m. Colinda al norte con los municipios de San Felipe del Progreso e Ixtlahuaca; al este con los municipios de Ixtlahuaca, Temoaya, Toluca y Zinacantepec; al sur con los municipios de Zinacantepec y Amanalco; al oeste con los municipios de Amanalco, Villa Victoria y San Felipe del Progreso. Ocupa el 2.15 % de la superficie del estado. Cuenta con 104 localidades y una población total de 147,653 habitantes. Los suelos predominantes del municipio son vertisol (54.57 %), phaeozem (18.21 %), andosol (17.65 %), planosol (1.69 %), luvisol (0.41 %) y cambisol (0.1 %). El clima predominante es templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor

humedad (86.46 %) y semifrío subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (13.54 %); con un rango de temperatura de 6 – 14°C y un rango de precipitación de 700 – 1 100 mm (NEGI, 2010).

El Atlas de Riesgos en el Municipio de Almoloya de Juárez (2016) reporta que:

- En el municipio de Almoloya de Juárez se encuentran múltiples escurrimientos naturales, de los cuales el Río Almoloya es el más importante por la distancia que este recorre al cruzar la superficie municipal (11 km, aproximadamente), de esta forma sus afluentes más relevantes son: El Rosario, La Pila, San Agustín, Oyamel, Las Cebollas y Ojo de Agua.
- Los cuerpos de agua superficiales de corriente perenne e intermitente son alimentados principalmente por los ríos de Almoloya, Tejalpa, Ojo de Agua y Lerma, al mismo tiempo contribuyen a la recarga de los mantos acuíferos, desafortunadamente todos ellos se encuentran contaminados por diferentes desechos urbanos.
- Existen 45 pozos en el municipio, utilizados para extraer agua para el riego de las zonas agrícolas y el consumo humano.
- El municipio cuenta con 1 presa, 6 acueductos, 98 ollas de agua, 115 revestimientos de canales y 191 bordos que son utilizados básicamente para el riego de las zonas agrícolas. También existen nueve manantiales de los cuales se extrae agua para el consumo humano destacando el de Arroyo Zarco, Dilatada y Ojo de Agua.
- El cuerpo de agua con mayor capacidad de almacenamiento lo constituye la Presa Ignacio Ramírez ubicada en el ejido de Salitre de Mañones y Barrio del Carmen. Tiene una capacidad de 36.30 millones de m³, aunque en el año 2000 sólo registro aproximadamente 17.5 millones de m³. En la actualidad esta presa muestra contaminación principalmente de desechos urbanos, sin embargo, el agua es utilizada para regar las zonas agrícolas.

6.2 Determinación de los sitios de muestreo

Dentro de las subcuencas San Diego y Almoloya, se encuentran números sistemas hídricos, de los cuales sólo se evaluarán los más representativos por su extensión territorial, con acceso de entrada, su aporte de mayor volumen de agua y su cercanía con fuentes de contaminación.

6.3 Materiales

Material digital:

- Imágenes satelitales (Landsat-8 y Sentinel-2)
- DEM (resolución de 30 m)
- Mapas topográficos 1/50000

- Paquete TerrSet
- GPS

Material de laboratorio:

- Índice BMWP modificación de uso exclusivo para México (Pineda et al., 2014).
- Materiales para el monitoreo:
- Red tipo D. y botas de caucho
- Pinzas metálicas de punta fina
- Frascos plásticos pequeños (según la técnica que se use, pero normalmente uno para cada área donde recoja las muestras).
- Alcohol 96%
- Lápiz (no se debe usar esferográfico o pluma porque se borra con el alcohol)
- Papel para etiquetas
- Hojas de campo
- Lupa
- Estacas y cinta métrica
- Lámina de identificación de macroinvertebrados

6.4 Métodos

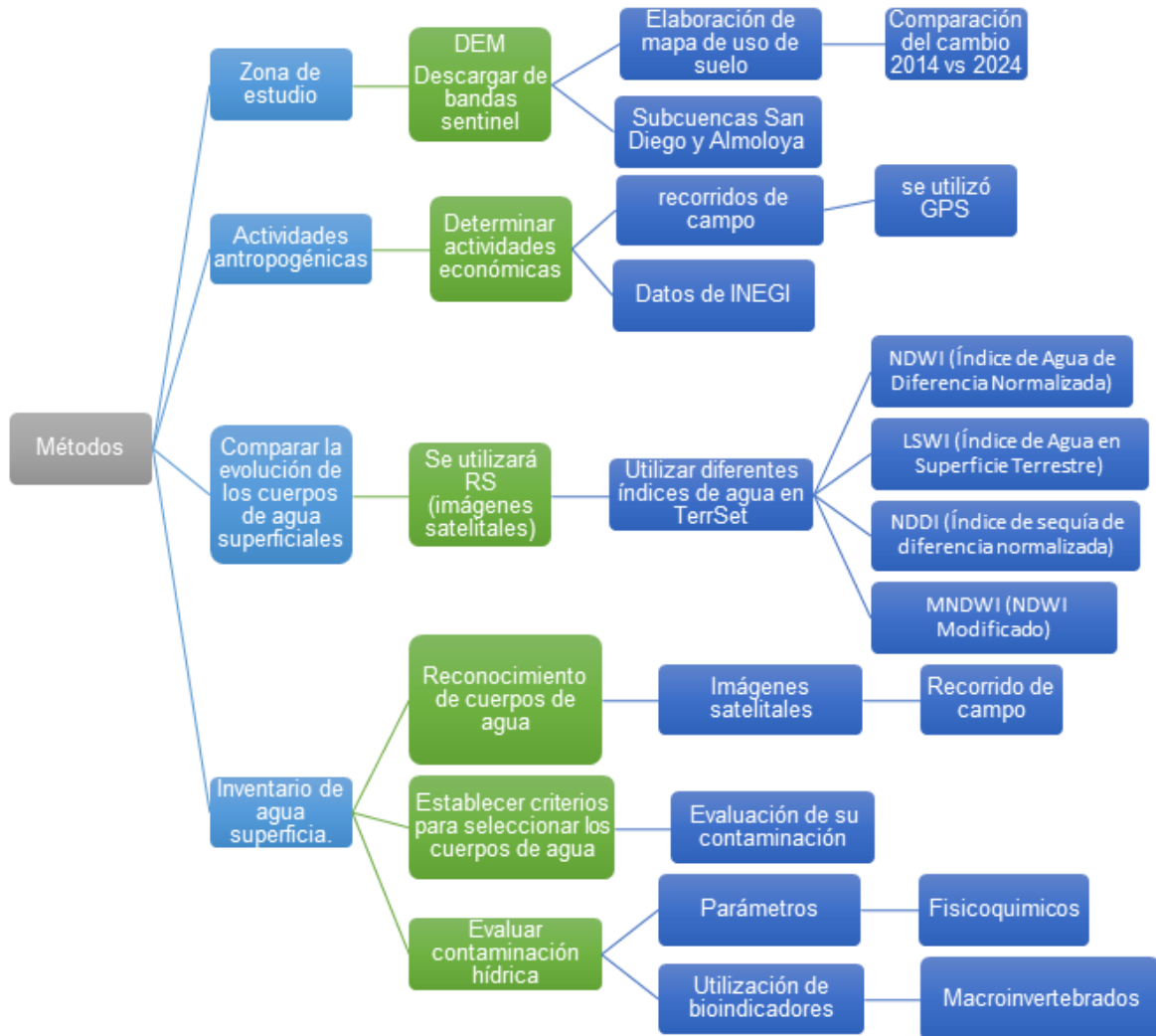


Figura 7. Métodos para desarrollar el proyecto investigación.

7. Metodología

7.1. Obtención y procesamiento de imágenes satelitales

Para este estudio se trabajó con imágenes satelitales de dos periodos diferentes, estableciendo como tiempo 1 el año 2014 y como tiempo 2 el año 2024, con una década de diferencia que permite observar transformaciones significativas en las subcuencas. Se seleccionaron imágenes correspondientes a la temporada de estiaje para ambos periodos, garantizando así una mínima cobertura de nubes y mejor calidad visual.

- Tiempo 1 (2014): Se descargaron imágenes de LandSat-8 con cobertura de nubes inferior al 10 % desde la plataforma EarthExplorer del USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>). La imagen seleccionada corresponde al 16 de febrero de 2014.
- Tiempo 2 (2024): Se obtuvieron imágenes Sentinel-2 con resolución espacial de 10m/píxel y cobertura de nubes inferior al 10 % desde la plataforma Copernicus (www.copernicus.eu). La imagen seleccionada corresponde al 21 de marzo de 2024.

El procesamiento se realizó mediante el software TerrSet, donde se crearon composiciones en falso color para mejorar la visualización de los cuerpos de agua y coberturas terrestres. Para LandSat-8 se utilizó la composición de bandas 3(verde), 5(NIR) y 6(SWIR), mientras que para Sentinel-2 se empleó la composición RGB 11, 8A y 3, siguiendo el protocolo establecido por Warner et al. (2021) para optimizar la discriminación de coberturas acuáticas.

7.1.1 Análisis de cambios de uso y cobertura de suelo

El análisis de cambios en la cobertura y uso del suelo para el año 2014 y 2024 se realizó mediante clasificación supervisada, siguiendo la metodología propuesta por Warner et al. (2021). El y proceso consistió en:

1. Digitalización de sitios de entrenamiento: Se identificaron áreas representativas de cada clase de cobertura del suelo en ambas imágenes, considerando el conocimiento previo del área y visitas de campo.
2. Identificación de firmas espectrales: Se utilizó el módulo IDRISI Image Processing/Signature Development/Makesig para generar las firmas espectrales de cada clase de cobertura del suelo.
3. Evaluación de firmas espectrales: Se aplicó el módulo Sigcomp para verificar la separabilidad entre las distintas firmas espectrales, asegurando una clasificación adecuada.

La validación de la clasificación del año 2024 se realizó con 45 registros tomados en campo, mediante el módulo ERRMAT, mostrando el coeficiente Kappa, el valor obtenido del índice Kappa se interpreta como el nivel de concordancia entre lo observado y el azar, es decir, mide la concordancia entre los datos de la clasificación y los datos de referencia. Sus valores van de 0 a 1 y se representan en porcentajes. Los valores significativamente distintos a 0 indican un proceso de clasificación mejor al resultante del azar; el valor de 1 significa que hay total acuerdo, por lo tanto, entre más se acerque el valor a 1, mayor será la concordancia (Cohen, 1960).

El índice Kappa muestra los errores de comisión y omisión. Se propone que valores menores a 0.4 simbolizan concordancia pobre; valores entre 0.4 y 0.8 una concordancia moderada y valores mayores a 0.8 una concordancia fuerte (Landis & Koch, 1977). El valor del índice Kappa fue tomado como referencia para medir la exactitud total del mapa generado (Nájera González et al., 2021). A mayor nivel de concordancia significa menor número de errores y, por lo tanto, mayor nivel de exactitud.

El cambio de uso de suelo obtenido de la clasificación supervisada en las subcuencas de San Diego y Almoloya fue comparado entre el periodo 2014 y el periodo 2024, utilizando el módulo land change modeler del software TerrSet, herramienta que permite realizar no sólo la comparación completa entre los dos tiempos, también se extrajeron datos que permitieron facilitar la identificación y visualización de las tendencias de cambios entre las coberturas del suelo, al realizar cruces de datos y extraer información cuantitativa de la pérdidas, ganancias, intercambios, así como el cambio total y el cambio neto en la cobertura del suelo (Bhuiyan et al., 2015).

En otro momento, el resultado de la clasificación supervisada en las subcuencas de San Diego y Almoloya fue transportado al software QGIS, el cual fue utilizado como una herramienta para el análisis cartográfico y permitió una visualización precisa de los resultados de las coberturas del suelo (QGIS Development Team, 2019).

7.2 Identificación de actividades antropogénicas

La identificación de actividades antropogénicas en las subcuencas de San Diego y Almoloya se realizó mediante un enfoque mixto de trabajo de gabinete y campo (Cruz-Mendoza, 2018):

1. Revisión bibliográfica: Se consultaron estudios previos, planes de ordenamiento territorial, censos económicos e informes de gestión ambiental para identificar las principales actividades económicas y asentamientos humanos en las subcuencas.
2. Recorridos de campo: Se realizaron visitas a puntos estratégicos de las subcuencas, registrando mediante GPS las coordenadas UTM de actividades antropogénicas relevantes como zonas agrícolas, ganaderas, industriales, asentamientos urbanos, y puntos de descarga de aguas residuales.
3. Documentación fotográfica: Se generó un registro fotográfico georreferenciado de cada punto de interés para su posterior análisis y clasificación.

La información recopilada fue integrada en una base de datos espacial en TerrSet mediante digitalización vectorial, clasificando las actividades según su tipo e intensidad de impacto potencial sobre los recursos hídricos.

7.3 Inventario y caracterización de agua superficial

La identificación y delimitación de cuerpos de agua se realizó aplicando índices espectrales mediante el módulo Water Index de TerrSet (Klemas & Pieterse, 2015).

1. Cálculo de índices espectrales:

- NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada): $(NIR - SWIR2) / (NIR + SWIR2)$
- LSWI (Índice de Agua en Superficie Terrestre): $(NIR - SWIR1) / (NIR + SWIR1)$
- NDDI (Índice de sequía de diferencia normalizada): $(NIR \times SWIR2 - NIR \times RED) / (NIR \times NIR - RED \times SWIR2)$
- MNDWI (NDWI Modificado): $(GREEN - SWIR1) / (GREEN + SWIR1)$

2. Selección de bandas específicas:

- Para LandSat-8: banda verde (B3), banda roja (B4), infrarroja cercana (B5), infrarrojo medio 1 (B6) e infrarrojo medio 2 (B7).
- Para Sentinel-2: banda verde (B3), banda roja (B4), infrarroja cercana (B8A), infrarrojo medio 1 (B11) e infrarrojo medio 2 (B12).

3. Umbralización: Se determinaron valores críticos para la clasificación de cuerpos de agua siguiendo la metodología de Warner et al. (2021), que permitió identificar masas de agua incluso de tamaño pequeño.

Los resultados obtenidos fueron verificados mediante la comparación con inventarios oficiales de cuerpos de agua de INEGI y CONABIO, así como con observaciones de campo.

7.4 Análisis hidrológico

El análisis hidrológico se realizó mediante un enfoque de modelado basado en SIG (Saaty & Vargas, 2018):

1. Modelo Digital de Elevación (DEM): Se obtuvo el DEM de la zona de estudio desde la plataforma CGIAR-CSI (<https://csidotinfo.wordpress.com/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1/>) con una resolución de 90 metros.
2. Cálculo de escurrimientos: Utilizando el módulo Runoff en TerrSet, se modeló el escurrimiento superficial en las subcuencas, a través de la pendiente obtenida en el DEM de las subcuencas, considerando factores como pendiente, tipo de suelo y cobertura vegetal.

3. Análisis de precipitación: Se descargaron y procesaron datos de precipitación del periodo 2014-2023 desde la plataforma Climatology Lab (<https://www.climatologylab.org/terraclimate.html>). Los datos en formato NetCDF fueron importados a TerrSet y analizados mediante Earth Trends Modeler para identificar patrones temporales y tendencias en la precipitación.

La integración de estos análisis permitió comprender la dinámica hidrológica de las subcuencas y evaluar la disponibilidad potencial de agua superficial a lo largo del tiempo.

7.4.1 Selección de cuerpos de agua para evaluación

La selección de cuerpos de agua para la evaluación de la calidad se realizó mediante un muestreo estratificado dirigido (Murrell et al., 2022):

1. Definición de criterios: Se establecieron criterios de selección basados en el tamaño (≥ 4 píxeles para garantizar su identificación consistente), accesibilidad (proximidad a caminos o vías de acceso) y ubicación respecto a actividades antropogénicas.
2. Estratificación del muestreo: Se seleccionaron cuerpos de agua representativos que incluyeran tanto sitios potencialmente impactados por actividades antropogénicas como aquellos relativamente aislados de dichas influencias, para establecer comparaciones.
3. Verificación en campo: Se realizaron visitas preliminares a los sitios seleccionados para confirmar su existencia, características y condiciones de acceso.

Tras aplicar estos criterios, se seleccionaron 4 cuerpos de agua estratégicos para la evaluación de la calidad del agua mediante parámetros biológicos y fisicoquímicos.

7.5 Evaluación mediante bioindicadores

La evaluación biológica se centró en el uso de macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores de calidad del agua, siguiendo la metodología propuesta por, Abril Torres et al. (2010):

1. Campañas de muestreo: Se realizaron dos campañas de muestreo en los meses de noviembre y junio.
2. Técnica de muestreo: Se empleó la técnica surber con red acuática tipo D (Figura 8), colocándola contra la corriente y removiendo el sustrato para capturar los organismos presentes; posterior, los macroinvertebrados fueron conservadas en alcohol al 96%, en recipientes debidamente etiquetados.
3. Identificación taxonómica: Los organismos recolectados fueron identificados a nivel de familia utilizando clave (Aramendez Gallego & Chinome Cifuentes, 2016).

4. Cálculo de índice biótico: implementación del Índice BMWP (Biological Monitoring Working Party), el cual asigna puntaje a cada familia según su tolerancia a la contaminación.
5. Elaboración de matrices: se realizó una matriz de datos para cada sitio de muestreo, usando el programa Excel 2020 Microsoft, contemplando, nombre del sitio muestreado, fecha de recolecta, familia de macroinvertebrados recolectada, valor del Índice BMWP.

Este índice es calculado mediante la metodología adaptada para ecosistemas latinoamericanos por Roldán-Pérez (2016).



Figura 8. Red tipo "D" para muestreo de macroinvertebrados acuáticos.

7.5.1 Análisis estadístico

Se agruparon los datos, relacionando la presencia de las familias de macroinvertebrados recolectados en los cuatro puntos de muestreo de las subcuencas San Diego y Almoloya, para ser evaluados mediante el test de Kruskal-Wallis, aceptado por la presencia de datos que no presentan una distribución normal, y es recomendable cuando la desviación estandar de los datos es muy grande.

Los valores del test de Kruskal-Wallis y el índice de similitud de Jaccard fueron obtenidos al emplear el software software es PAST (PAleontological STatistics).

Se aplicó el índice de similitud para identificar qué tan parecidos son los sitios de muestreo entre sí de acuerdo con la presencia de las familias de macroinvertebrados acuáticos recolectados. Se utilizó el índice de similitud de Jaccard. para comparar la similitud de los datos en dos conjuntos. El valor del índice de Jaccard siempre está entre 0 y 1, donde:

- 1 significa que los dos conjuntos son idénticos.
- 0 significa que los dos conjuntos no tienen ningún elemento en común.

7.6 Análisis de parámetros fisicoquímicos

La evaluación fisicoquímica de los cuerpos de agua seleccionados se realizó siguiendo la metodología de Global Water Watch.

1. Mediciones in situ: Se utilizó un multiparamétrico marca Hanna para registrar:
 - Temperatura (°C)
 - pH
 - Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
2. Análisis de laboratorio: Se recolectaron muestras de agua siguiendo protocolos estandarizados de preservación y transporte, para la determinación de:
 - Nitrógeno total (mg/L): mediante método espectrofotométrico UV según en la NMX-AA-079-SCFI-2001
 - Fósforo (mg/L): mediante método colorimétrico según la NMX-AAA-029-SCFI-2001
 - DQO: usando el método de tubo sellado propuesto en la NMX-AA-030/2-SCFI-2011

Los parámetros evaluados fueron seleccionados considerando su relevancia como indicadores de contaminación relacionada con actividades antropogénicas específicas, particularmente agrícolas y urbanas.

8. Resultados

8.1 Delimitar subcuencas

A continuación, en la Figura 9 se muestra el mapa de las subcuencas consideradas para este caso de estudio, ambas con exutorio en la presa Ignacio Ramírez.

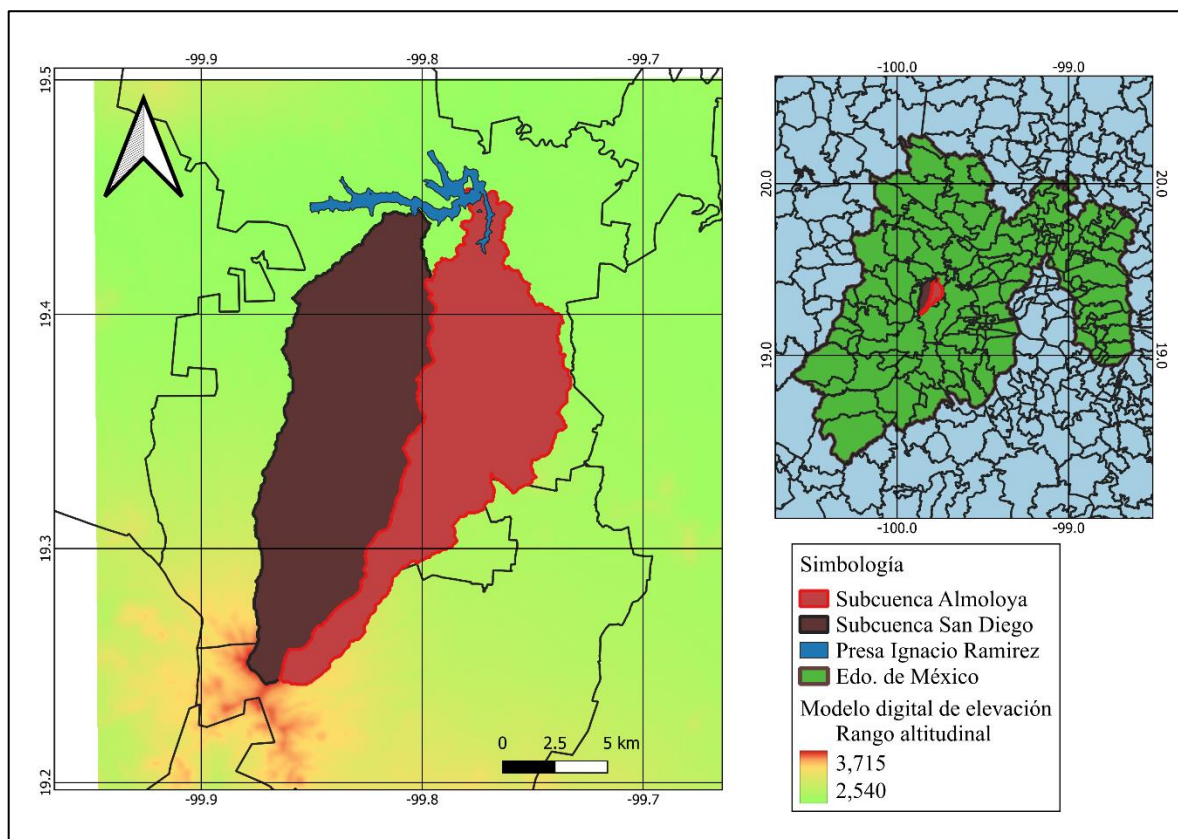


Figura 9. Mapa de la zona de estudio en el municipio de Almoloya de Juárez, Estado de México.

Ambas subcuencas, San Diego y Almoloya, se extienden principalmente en el municipio de Almoloya de Juárez, y en menor medida, sus partes altas se localizan en el municipio de Zinacantepec.

8.1 Análisis de cambios de uso y cobertura de suelo

Después de digitalizar sitios de entrenamiento donde se establece la identificación de:

- Suelo destinado para la agricultura.
- Cuerpos de agua.
- Especies de vegetación como bosque y pastizal.

- Suelo para asentamiento urbano.
- Zonas que sufrieron incendios.
- Suelo desnudo.

Los sitios de entrenamiento, anteriormente se utilizaron para identificar las firmas espectrales, para ambos periodos, como se aprecia a continuación en la Figura 10.

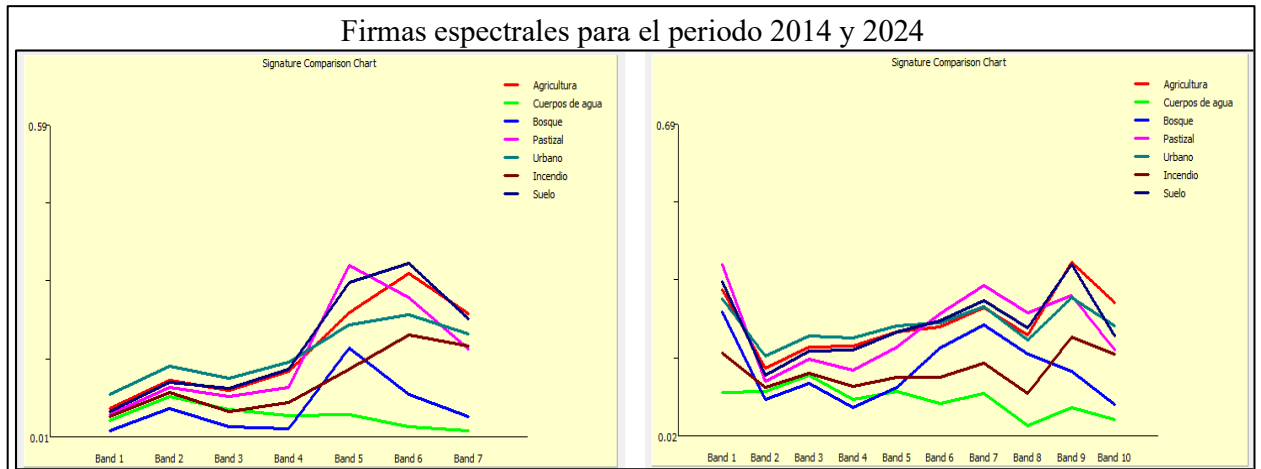


Figura 10. Firmas espectrales de cobertura de suelo en la zona de estudio para 2014 y 2024, respectivamente.

Las firmas espectrales, muestra diferentes valores, a simple vista se pueden diferenciar entre sí; lo que indica que el clasificador supo reconocer los sitios de entrenamiento adecuadamente. Cada material, como es agricultura, agua, suelo, entre otros, tiene un comportamiento único al interactuar con la radiación, absorbiendo y reflejando la energía en ciertas longitudes de onda

Los valores que componen una firma espectral dependen de varios factores y se miden típicamente en términos de reflectancia; por ejemplo, la vegetación sana tiene baja absorción en el verde (banda 3), muestra alta absorción en el Rojo (banda 4) debido a la clorofila, y máxima reflectancia en el Infrarrojo Cercano (NIR) (banda 5) debido a la estructura celular de la hoja.

Agua Limpia muestra alta absorción de energía en las longitudes de onda NIR y SWIR (banda 5 y 6) lo que resulta en una reflectancia muy baja en estas bandas. La máxima reflectancia puede darse en el azul/verde. Mientras que, el suelo se comporta con reflectancia generalmente plana y ascendente (aumenta ligeramente desde el Visible hacia el NIR y SWIR), los valores varían mucho según el contenido de humedad, color y textura del suelo.

El resultado de la clasificación supervisada muestra el uso de suelo en las subcuencas San Diego y Almoloya del año 2014 y 2024, en un mapa, que se observa en la Figura 11. Para el caso del uso y cobertura de suelo del año 2024 se aplicó la validación, utilizando el índice Kappa.

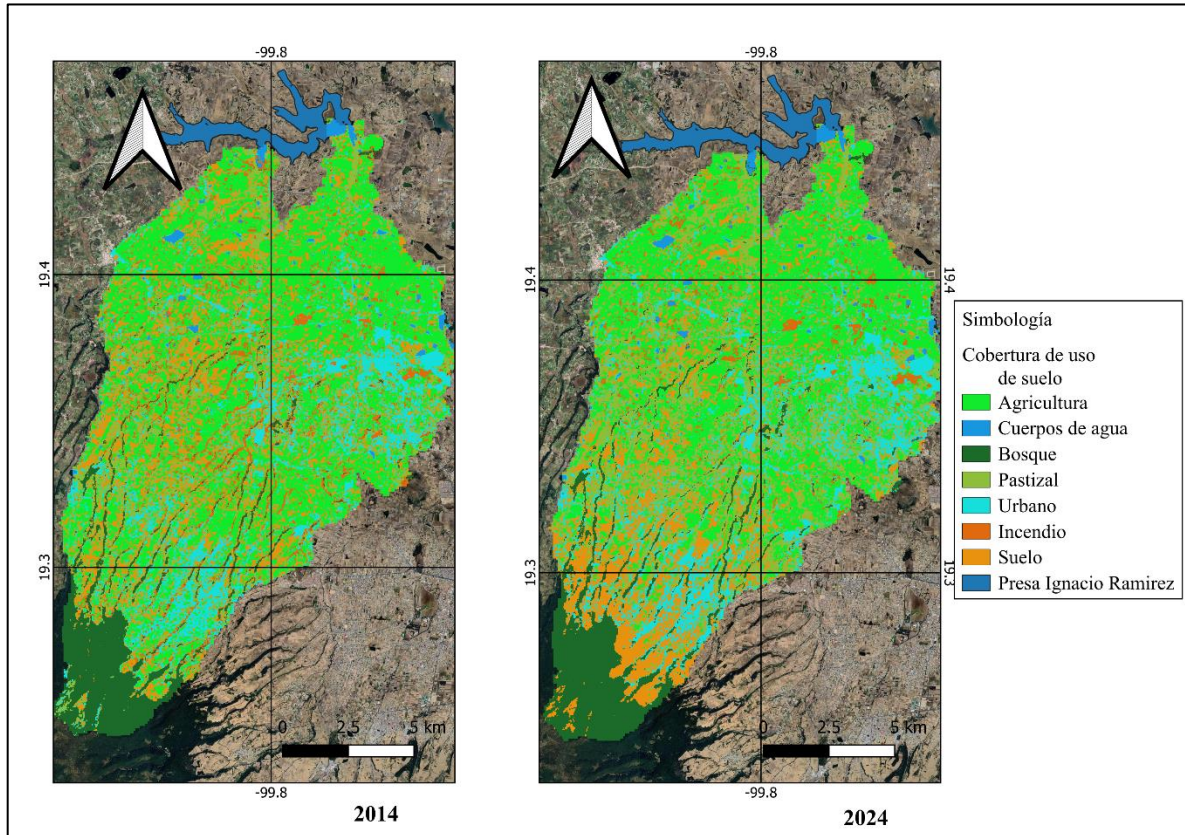


Figura 11. Uso de suelo en las subcuencas San Diego y Almoloya.

La evaluación de precisión en este caso de estudio, para el uso de suelo del periodo de 2024 se obtuvo el índice Overall Kappa = 0.68, como observa en la Tabla 6. La matriz de error proporciona la identificación de las categorías con mayor y menor presencia de errores de comisión y omisión.

El resultado de la matriz de errores indica que los mayores errores de comisión (ErrorC) son las categorías de Pastizal e Incendio, ambas con un valor de 0.5 (50 %), lo que significa que la mitad de los puntos destinados a las coberturas de "Pastizal" o "Incendio", en realidad no lo era. Mismo efecto sucede en suelo, que también presenta un error de comisión alto de 0.45 (45%). Por otro lado, las coberturas de agricultura y cuerpos de agua tienen un error de comisión de 0 (0 %), lo que indica que la predicción fue 100% correcta.

Tabla 6. Matriz de error 2024 del mapa de uso de suelo de las subcuencas San Diego y Almoloya.

	Datos de referencia								ErrorC
	Agricultura	Cuerpos de agua	Bosque	Pastizal	Urbano	Incendio	Suelo	Total	
Agricultura	5	0	0	0	0	0	0	5	0
Cuerpos de agua	0	6	0	0	0	0	0	6	0
Bosque	0	1	6	0	0	0	0	7	0.1423
Pastizal	1	0	0	1	0	0	0	2	0.5
Urbano	0	0	0	0	5	0	1	6	0.1667
Incendio	3	1	0	0	0	4	0	8	0.5
Suelo	0	0	0	3	2	0	6	11	0.4545
Total	9	8	6	4	7	4	7	45	
ErrorO	0.4444	0.25	0	0.75	0.2857	0	0.1429		0.2667
ErrorO = Errores de omisión									
ErrorC = Errores de comisión									

Los mayores errores de omisión (ErrorO) se evidencia en la cobertura de pastizal siendo el más alto con un error de omisión de 0.75 (75 %). Seguido de agricultura que presenta un error de omisión considerable de 0.44 (44 %). Este error se atribuye a que las coberturas agrícolas como los pastizales a menudo presentan respuestas espectrales muy parecidas, ambas coberturas son tipos de vegetación herbácea con altos valores de reflectancia en el infrarrojo cercano y baja reflectancia en el rojo (Suárez Albarracín, s. f.), lo que los hace parecer similares en las imágenes satelitales, esta similitud dificulta distinguirlos; es decir, el suelo en algunos puntos lo confunde con pastizal, y en el caso de los incendios llegan a identificarlo como agricultura, lo cual tiene sentido porque regularmente los cultivos suelen quemarse por los agricultores.

Los menores errores de omisión (ErrorO) se presentan en las coberturas de bosque e incendio al presentar error de omisión de 0 (0 %). Mientras cuerpos de agua de 0.25 (25 %) y suelo 0.14 (14 %) también tienen errores de omisión relativamente bajos.

El uso de suelo anterior fue calculado para los años 2014 y 2024 en kilómetros cuadrados (km²), teniendo como resultado que las subcuencas tienen una superficie de 208.07 km², y el uso de suelo mayor detectado es de uso agrícola, en ambos periodos, con 85.47 km² y 74.42 km², respectivamente.

La superficie terrestre ocupada para cada uso de suelo del año 2014 se aprecia en la Tabla 7.

Tabla 7. Uso de suelo calculado en kilómetros cuadrados (km²).

Categorías	Uso de suelo	km ² en 2014	km ² en 2024
1	Agricultura	85.47	74.42
2	Cuerpos de agua	2.06	2.20
3	Bosque	16.96	18.96
4	Pastizal	30.44	43.39
5	Urbano	26.77	28.12
6	Incendio	13.76	5.41
7	Suelo	32.58	35.54

El uso de suelo en la subcuenca San Diego en 2014, muestra cambios con respecto al año 2024, como se observa en la Figura 12.

Mientras que, el cambio de uso de suelo en la subcuenca Almoloya entre el 2014 y el 2024, se muestra la Figura 13.

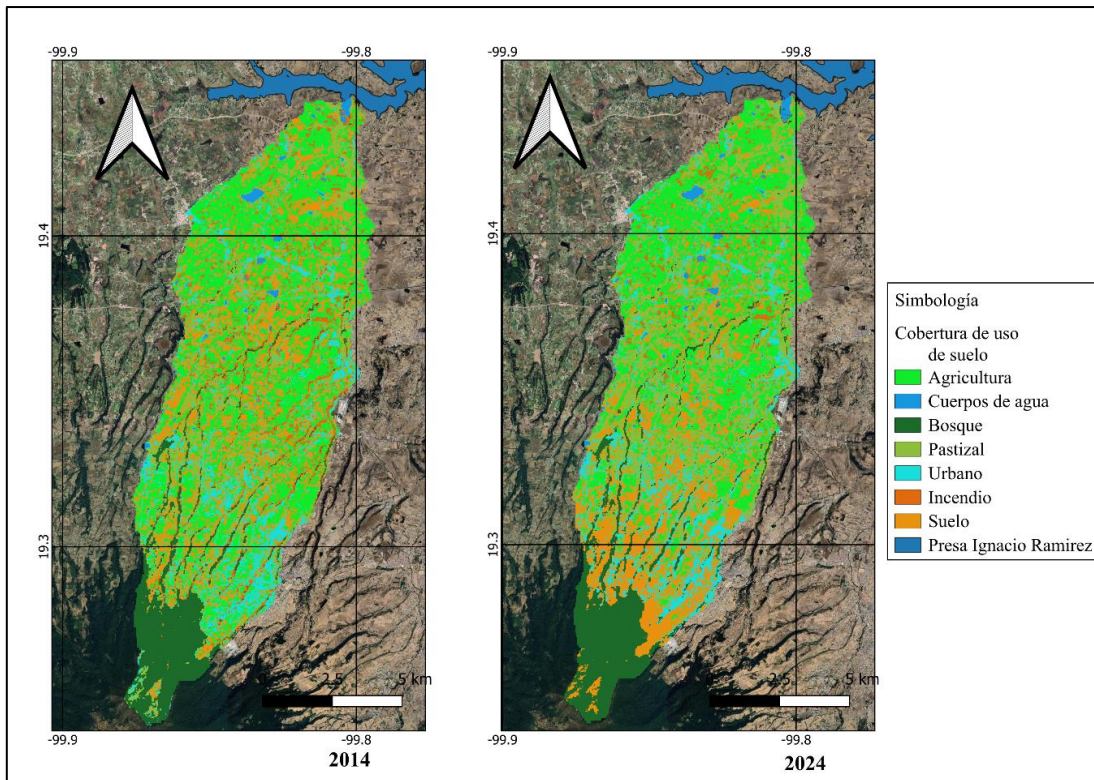


Figura 12. Uso de suelo en las subcuencas San Diego.

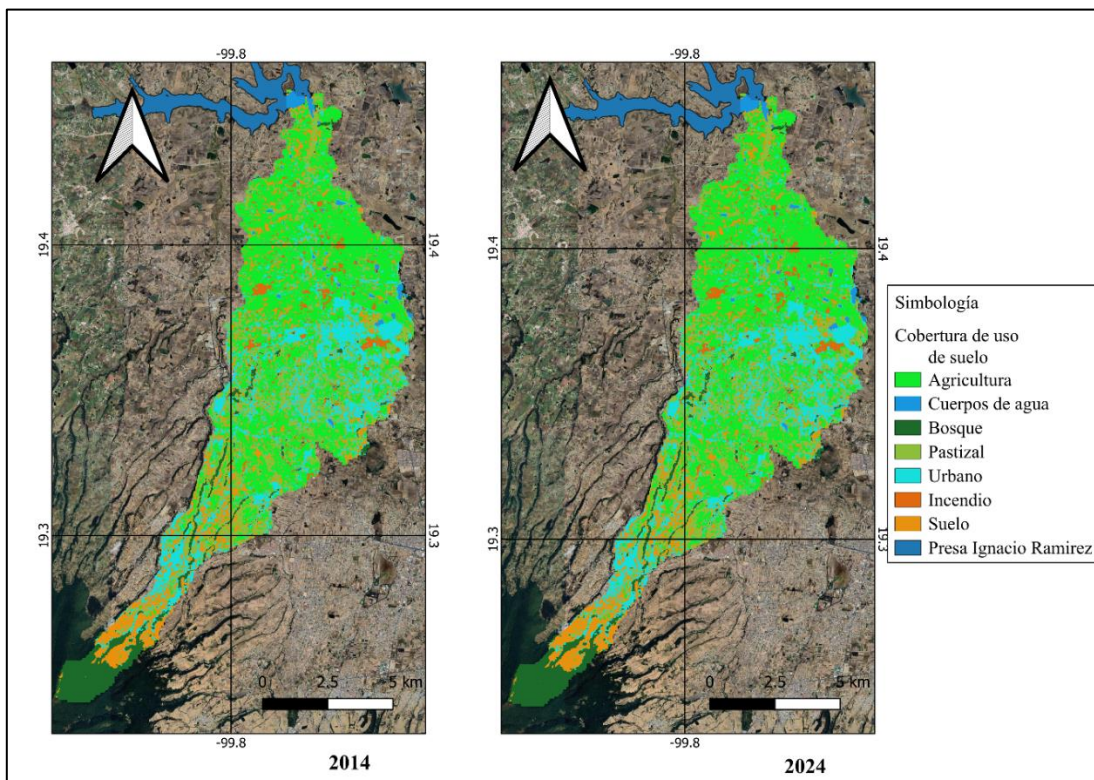


Figura 13. Uso de suelo en las subcuencas Almoloya.

A continuación, se muestra los cambios dinámicos en el uso y la cobertura del suelo en las subcuencas de San Diego y Almoloya de 2014 a 2024 en la Figura 14.

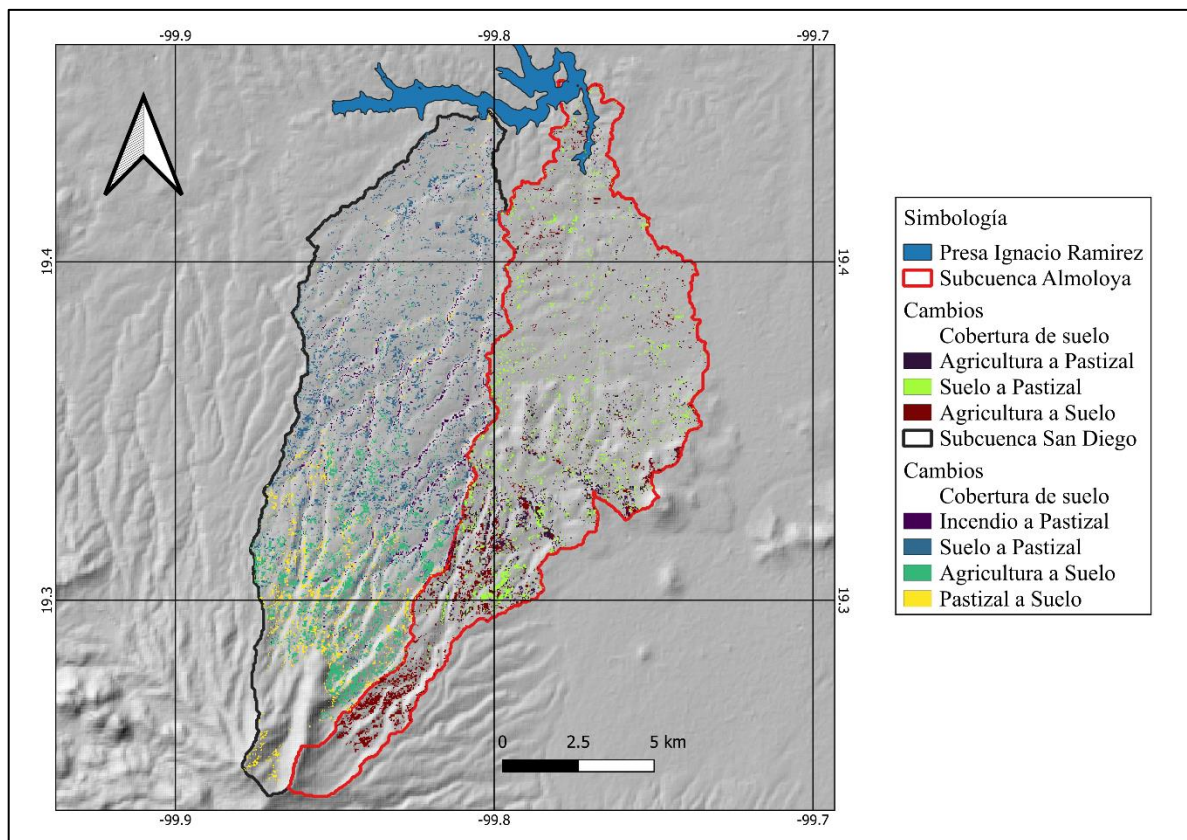


Figura 14. Cambios dinámicos en el uso y la cobertura del suelo en las subcuencas de San Diego y Almoloya entre 2014 y 2024.

El uso de suelo forestal, en el 2014 ocupaba 16.96 km² de superficie terrestre, pasando a 18.96 km² en el segundo periodo de estudio; mientras que pastizal presentaba 30.44 km² en el 2014, para el 2024 ocupa 43.39 km², atribuido por el manejo de los recursos naturales y su conservación implementado por los proyectos forestales en el Área de Protección de Flora y Fauna del Nevado de Toluca; en colaboración de municipios como Almoloya de Juárez, Amanalco de Becerra, Calimaya, Coatepec Harinas, Temascaltepec, Tenango del Valle, Toluca, Villa Guerrero, Villa Victoria y Zinacantepec, en el Estado de México. Presentando resultados destacados como el incremento de la superficie de bosque, al reducir acciones como la tala clandestina, detección y manejo oportuno de plagas, y control de incendios (Bernal & Sadhen, 2021).

Los incendios en las subcuencas San Diego y Almoloya, en el 2014, cubrieron una superficie terrestre de 13.76 km², mientras para el 2024 se redujo considerablemente a 5.41 km². Las temporadas con constantes precipitaciones y humedad alta (verano), la ocurrencia de incendios es nula, ya que la materia que sirve como combustible está mojada. En cambio en época de estiaje, la materia está deshidratada debido a los cambios en las estaciones climatológicas (otoño-invierno-primavera), lo cual coincide con el período de preparación de la tierra para la siembra, por lo que algunos agricultores utilizan el fuego para la remoción del zacate del año anterior mediante la quema, lo que aumenta las probabilidades de ocurrencia de un incendio (Gutiérrez Martínez et al., 2015).

El suelo urbano total creció tres veces en cuarenta años en México (Montejano-Escamilla et al., 2023), las subcuencas San Diego y Almoloya son parte del crecimiento urbano, pasando de ocupar una superficie terrestre de 26.77 km² a 28.12 km².

Muestra los principales cambios dinámicos en el uso y la cobertura del suelo en las subcuencas de San Diego y Almoloya entre 2014 y 2024; en ambas subcuencas se observa que el uso de suelo ocupado por la ganadería presenta cambios hacia pastizal y suelo, lo que puede atribuirse a la degradación del suelo convirtiéndose en suelos poco fértiles y menos productivos o cambios en la gestión de la tierra.

Al modelador el cambio de uso de suelo se obtuvo la información cuantitativa de la pérdidas y ganancias en la cobertura del suelo, para la subcuenca San Diego, como se aprecia a continuación en la Figura 15.

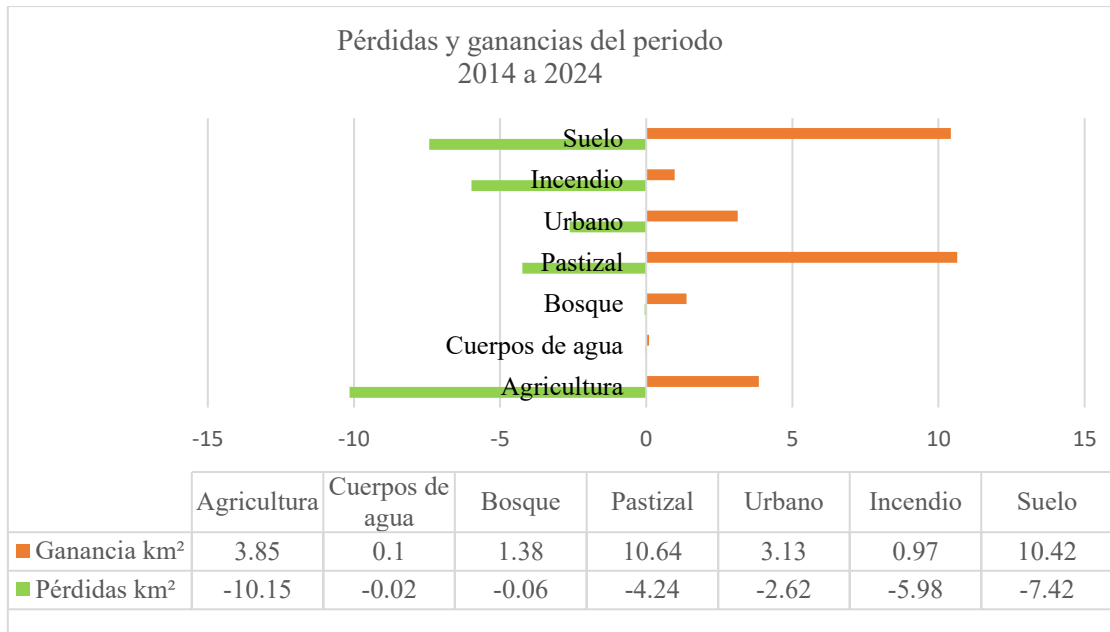


Figura 15. Pérdidas y ganancias de uso de suelo en la subcuenca San Diego.

Por otro lado, la pérdidas y ganancias en la cobertura del suelo, para la subcuenca Almoloya, se aprecia en la siguiente Figura 16.

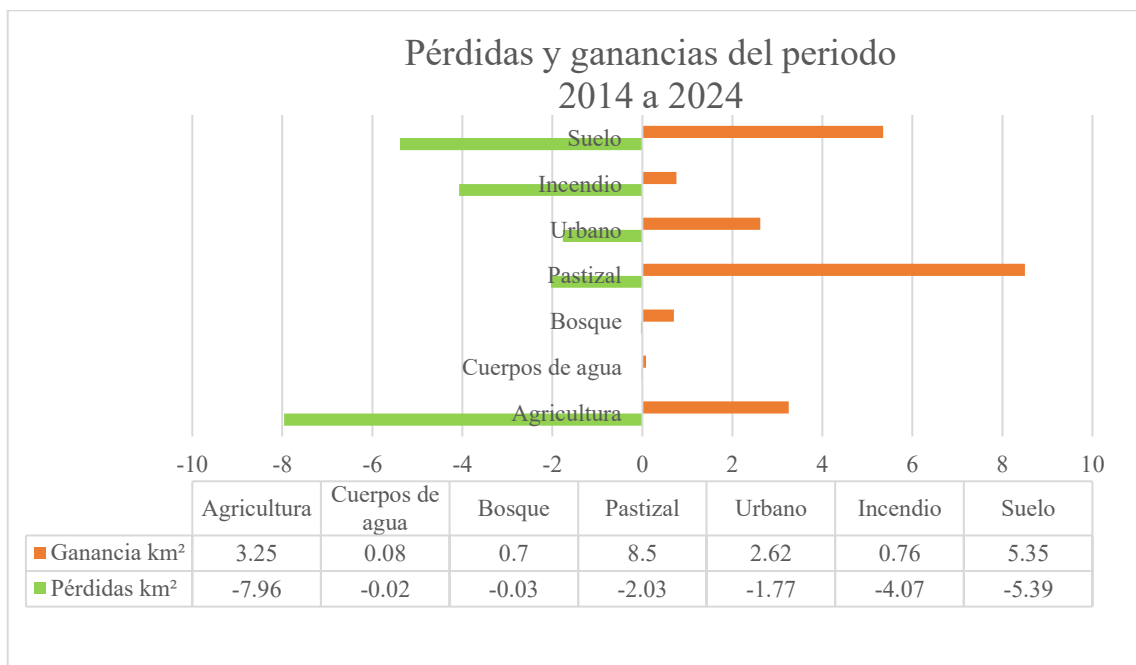


Figura 16. Pérdidas y ganancias de uso de suelo en la subcuenca Almoloya.

Existe una tendencia positiva hacia la reducción de tierras agrícolas y una disminución significativa de las áreas afectadas por incendios, la expansión de las zonas urbanas constituye un cambio notable y consistente con patrones nacionales. El ligero aumento de la cobertura forestal es alentador y podría reflejar procesos de recuperación ecológica.

Las ganancias en el uso del suelo ocupado por la urbanización sin planificación, contribuyen a los problemas de calidad del recurso hídrico previamente analizados, ya que y las prácticas industriales son importantes impulsores del impacto negativos ambiental en los cuerpos de agua, como lo demuestran diversos estudios recientes en México (CONAGUA, 2024)

8.1.1 Inventario de agua superficial

Los análisis de cambios más populares en teledetección es la transformación del paisaje y se refiere al proceso de comparar las diferencias en las características de un área o fenómeno particular durante dos o más épocas temporales (Hussain et al., 2013). Para este caso se compara el índice de Agua en imágenes de 2014 y 2024.

El Índice de Agua en Superficie Terrestre (ISWI) es una herramienta que se utiliza para medir la cantidad de agua que hay en la vegetación o el nivel de humedad del suelo, y obtener valores del estrés hídrico. El resultado de aplicar el ISWI con la imagen de 2014 y 2024 se precia en la Figura 17.

Los valores más altos indican la presencia agua, en el año 2014 se presentaron valores de hasta 0.94, mientras que el año 2024, el mismo índice sólo presentó valores de 0.51 en la vegetación o el nivel de humedad del suelo. Los valores obtenidos de estrés hídrico fueron -1.0 y -0.81, en el año 2014 y 2024, respectivamente; mostrando mayor estrés hídrico en el año 2024.

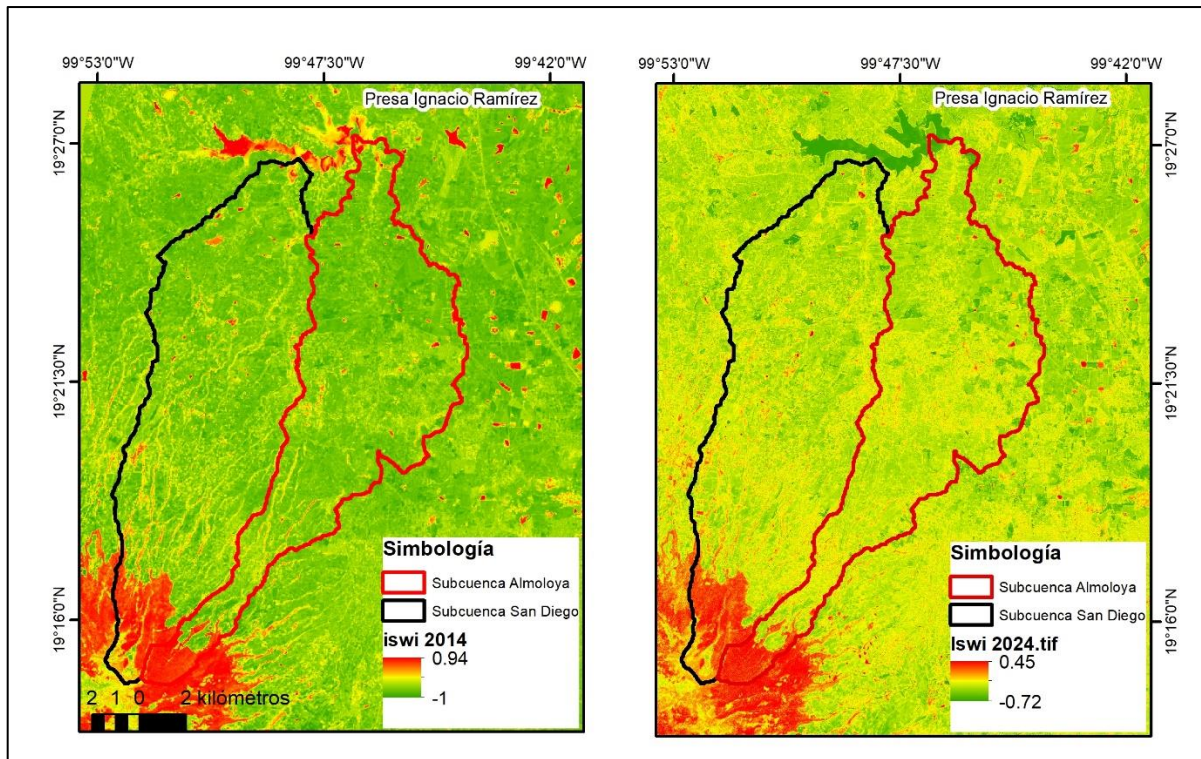


Figura 17. Índice de Agua en Superficie Terrestre en las subcuencas San Diego y Almoloja para el periodo 2014 y 2024, respectivamente.

El Índice de Sequía de Diferencia Normalizada (NDDI) es una herramienta que permite evaluar la sequía en una ubicación específica. El resultado de aplicar el NDDI con la imagen de 2014 y 2024, son valores cercanos a 0, representando información nula de sequía.

El Índice de Diferencia Normalizada del Agua (NDWI) se emplea para resaltar las zonas de agua en imágenes satelitales. Este índice disminuye de manera significativa la reflectancia proveniente del suelo y la vegetación, facilitando así la identificación clara de las masas de agua. El resultado de aplicar el NDWI con la imagen de 2014 y 2024, se precia en la Figura 18.

Mientras que el Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI) es una variante del índice NDWI, brinda mejor resultado porque reduce las características de las áreas edificadas. El resultado de aplicar el MNDWI con la imagen de 2014 y 2024, se observa en la Figura 19.

Se reconocieron de cuerpos de agua a través de reclasificar del Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI), por brindar mejor discriminación de los cuerpos de agua.

Dentro de la reclasificación se asignan valores positivos para cuerpos de agua, mientras que valores negativos representa ausencia de agua, el resultado de la clasificación fue la detección de 187 cuerpos de agua superficiales dentro de las subcuencas de San Diego y Almoloya.

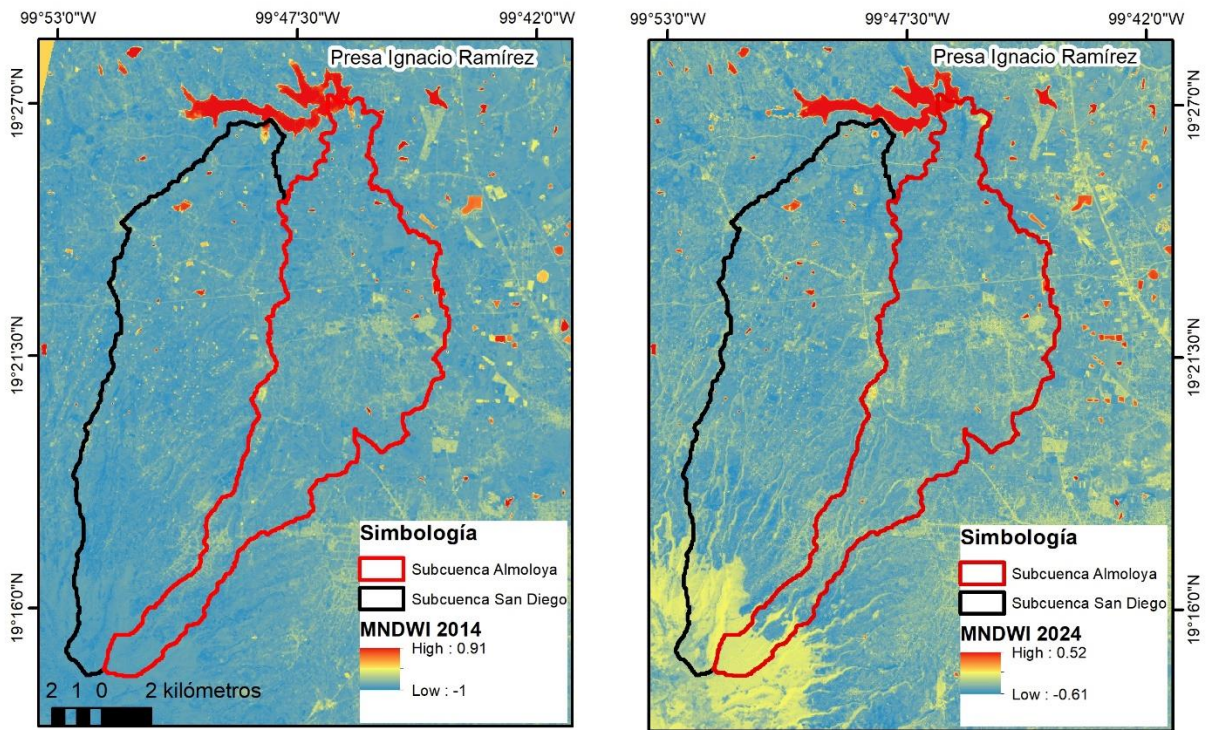


Figura 18. Índice de Sequía de Diferencia Normalizada en las subcuencas San Diego y Almoloya para el periodo 2014 y 2024, respectivamente.

También se consultó información en CONABIO reportando un menor número de cuerpos de agua (22 cuerpos de agua aproximados), mismos que coinciden con TerrSet, para las subcuencas San Diego y Almoloya.

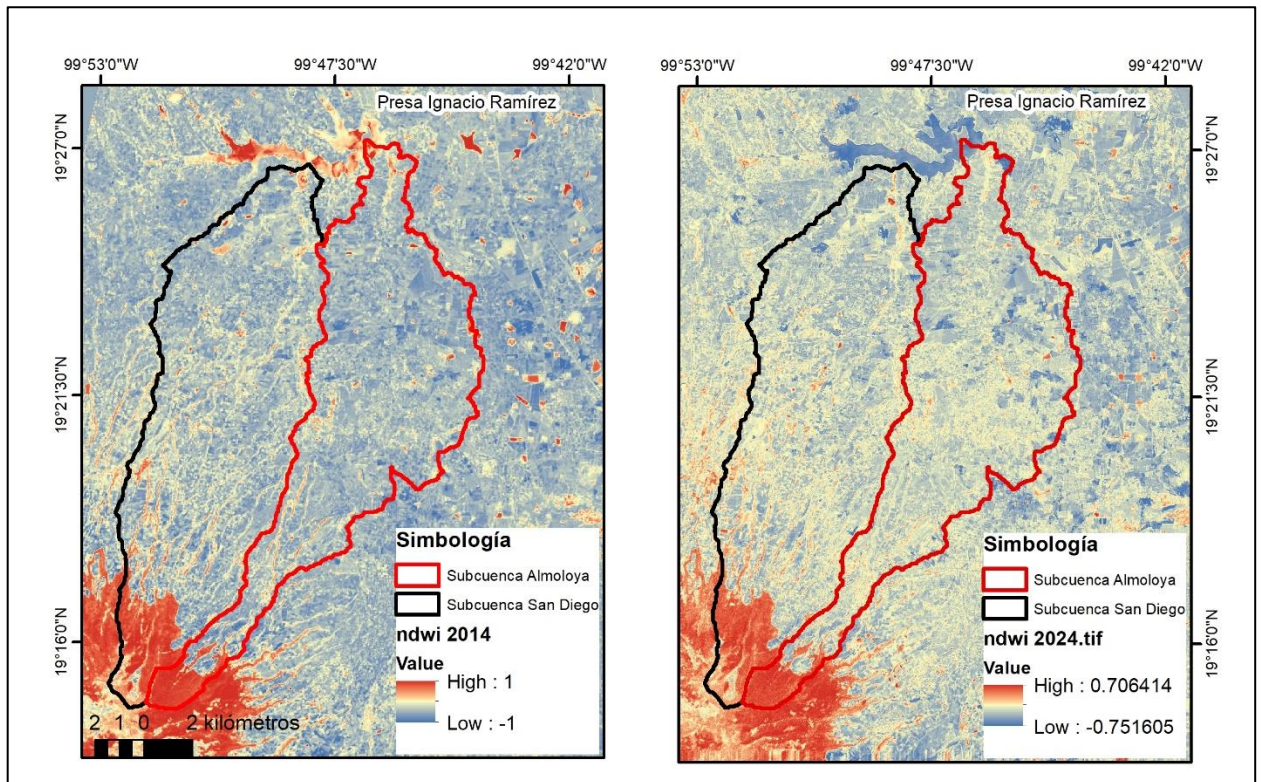


Figura 19. Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado en las subcuencas San Diego y Almoloya para el periodo 2014 y 2024, respectivamente.

Mientras que, la carta topográfica E14 A37, descargada de la plataforma de INEGI, tiene identificados 198 cuerpos de agua. Se atribuye a la diferencia de números de cuerpos de agua encontrados en las subcuencas estudiadas, porque TerrSet muestra objetivamente los cuerpos de agua sin importar características como tamaño, contenido de agua, su uso, entre otros, en contraste, CONABIO e INEGI solo muestra los cuerpos de agua de mayor utilidad al contener agua la mayor parte del año.

Si bien, las subcuencas de San Diego y Almoloya tienen un río principal llamado Almoloya, también existen 546 ríos más, de estos sólo 14 son ríos perennes el resto son ríos intermitentes.

A continuación, se muestra la ubicación de los ríos perennes; los cuerpos de agua superficial reportados por CONABIO, INEGI y los detectados con TerrSet, en la Figura 20.

Los cuerpos de agua superficiales que dan a conocer CONABIO e INEGI, son identificados con identificador (ID), nombre, responsable, coordenadas, entre otros; dicha información se muestra en los anexos 1 y 2, respectivamente.

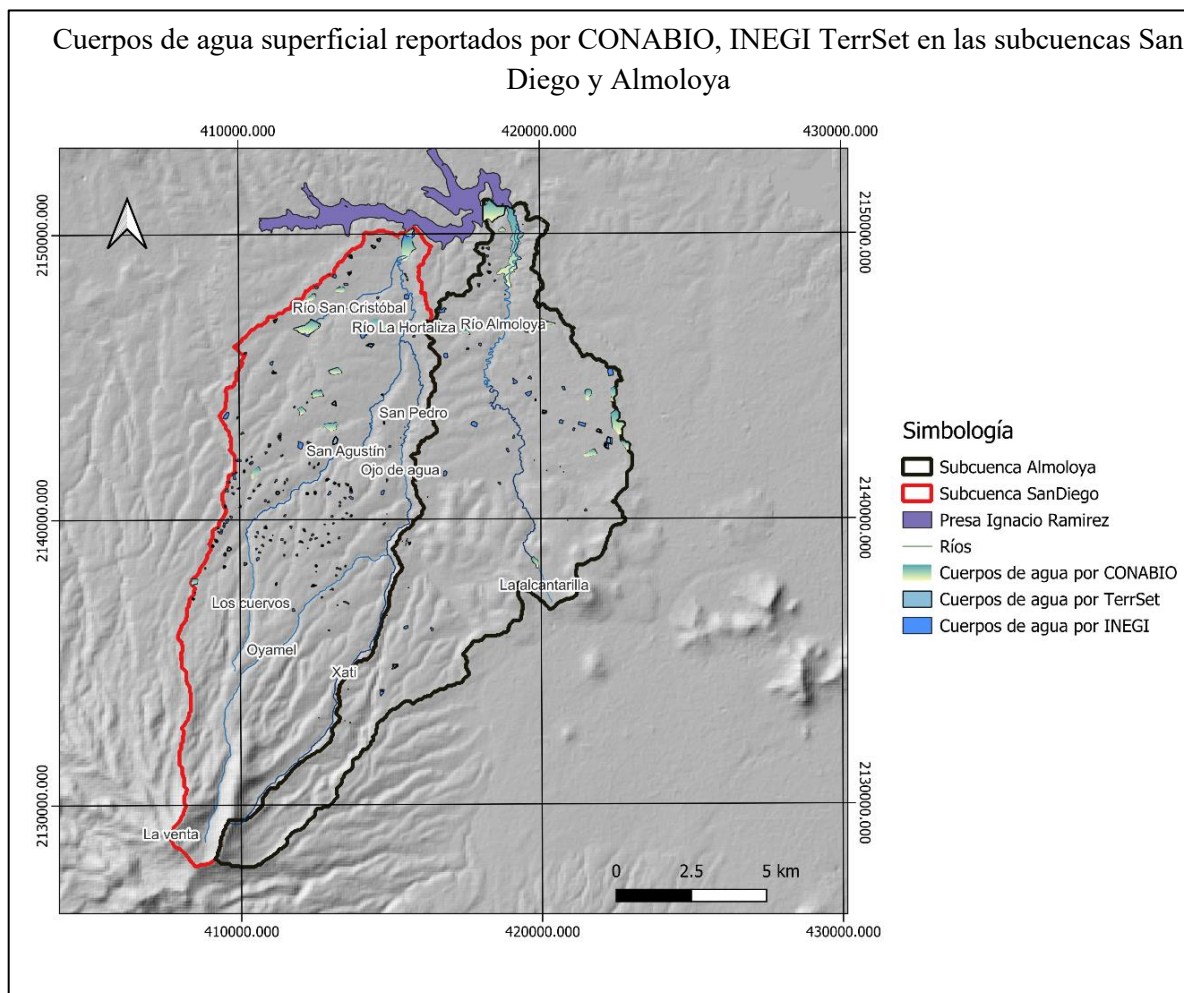


Figura 20. Ríos perenes y cuerpos de agua superficial reportados por CONABIO, INEGI y TerrSet en las subcuencas de San Diego y Almoloya.

8.2 Precipitación

En la Figura 21, se muestran los valores de precipitación para la zona de estudio, valores de precipitación de 700 a 1243 mm.

Los valores de precipitación anual del periodo 2014 al 2024, arrojan que en ambas subcuencas se tuvo una reducción alrededor de 290 mm, valor que representa el 23%.

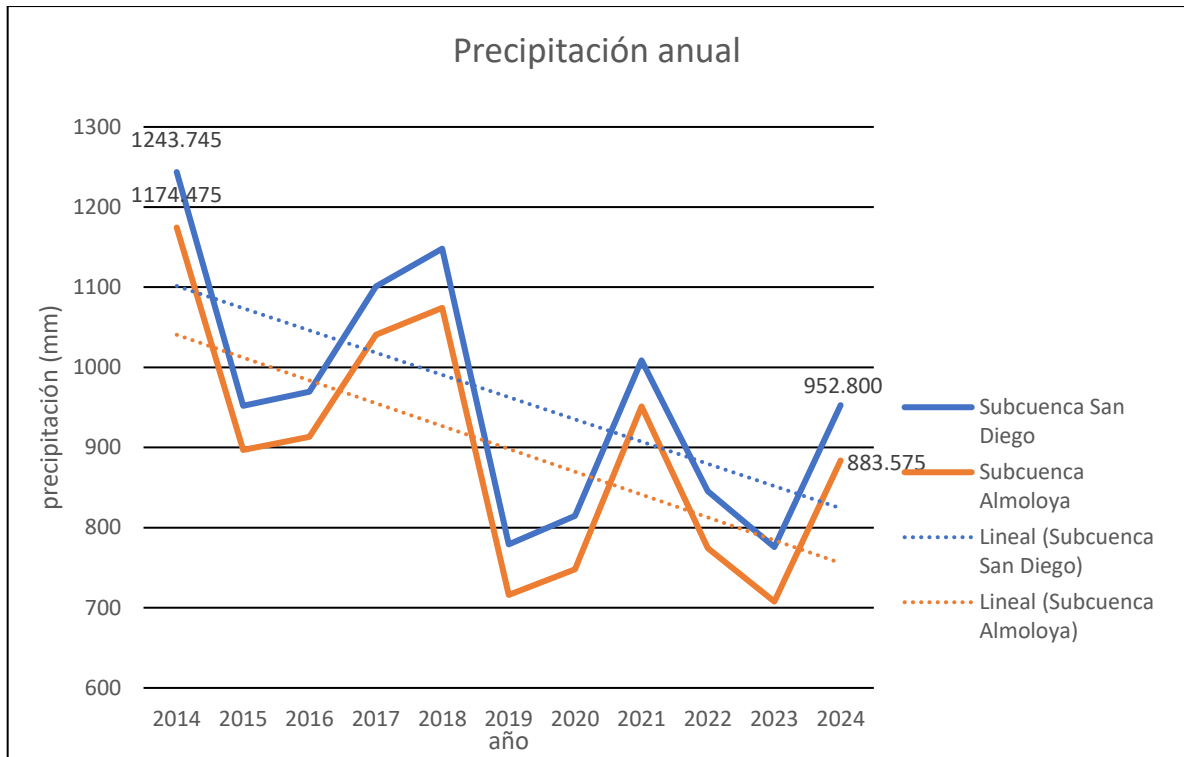


Figura 21. Valores de precipitación anual en las subcuencas San Diego y Almoloya.

La figura anterior, muestra los valores de precipitación para el año 2014 hasta el año 2024, ambas subcuencas tienen la misma tendencia a reducir sus valores. En el 2014 se registró una precipitación anual de 1243.7 mm y 1174.4 mm, en las subcuencas San Diego y Almoloya, respectivamente; mientras que en el 2024 se registró una precipitación anual de 952.8 mm y 883.5 mm, en las subcuencas San Diego y Almoloya, respectivamente. Resaltando que, dentro de la superficie terrestre de la subcuenca San Diego existe mayor presencia de precipitación que en la subcuenca Almoloya.

La reducción de precipitaciones en México se atribuye principalmente a las actividades antropogénicas, como la deforestación, que disminuye la capacidad de los ecosistemas para retener agua y regular el ciclo hidrológico (Carbajal-Domínguez et al., 2024).

La variabilidad en la precipitación en ambas subcuencas, probablemente causado por el cambio climático que impacta significativo en el ciclo del agua, se ve relegado en fenómenos meteorológicos extremos como sequías, inundaciones e incendios forestales (Oelbermann et al., 2022).

8.1.2 Esgurrimientos

En la Figura 22, se muestra los esgurrimientos presentes en las subcuencas de San Diego y Almoloya, considerados relevantes para establecer los puntos de muestreo en campo.

Los cuerpos de agua estudiados forman un grupo de 4 cuerpos de agua, son identificados con coordenadas, código registrado en CONAGUA, y por su nombre popular entre la población, como se registra en la

Tabla 8.

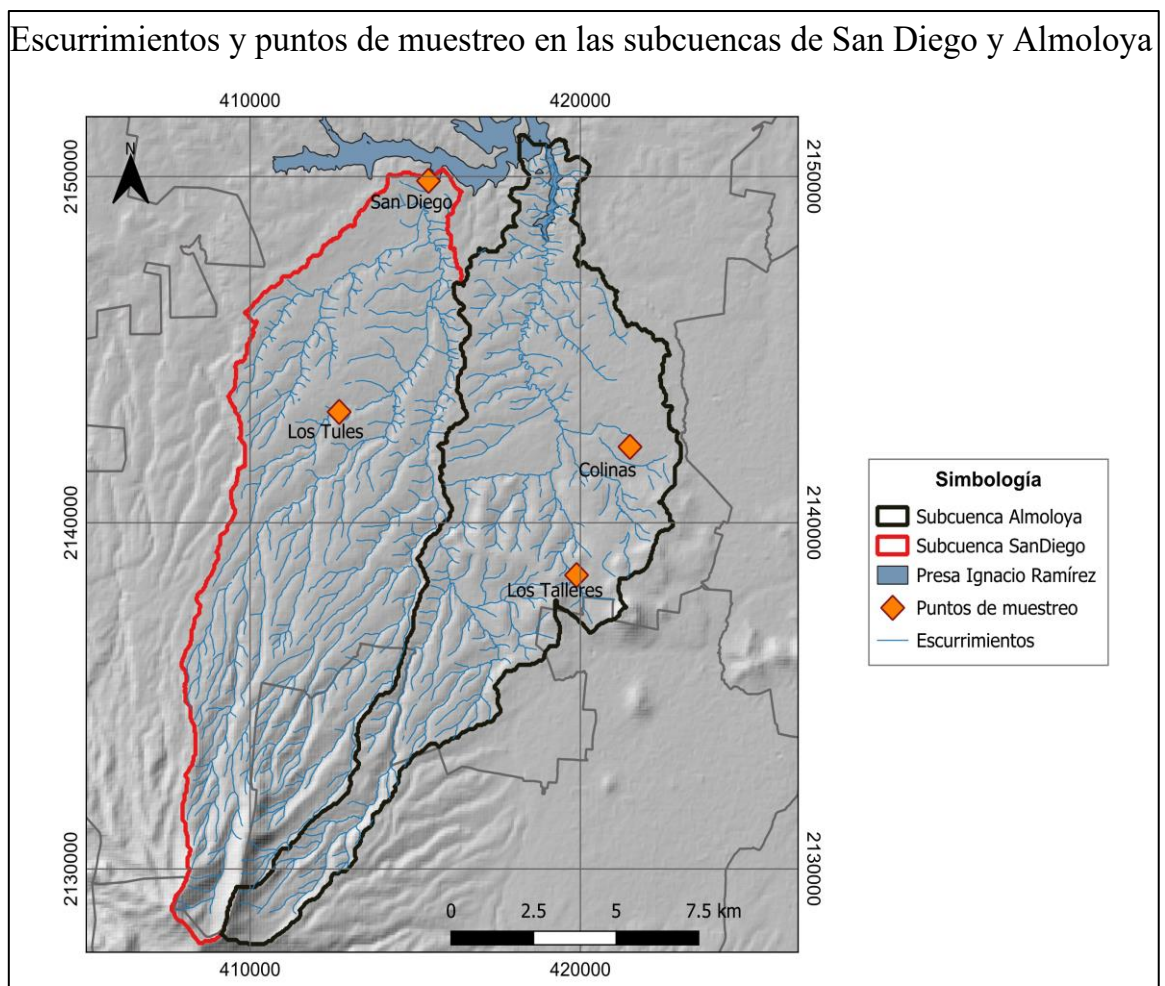


Figura 22. Esgurrimientos en las subcuencas de San Diego y Almoloya y puntos de muestreo.

Tabla 8. Cuerpos de agua identificados.

No. Cuerpo	km ²	nombre popular	Ubicación	Subcuenca	Origen de agua residual
1	0.0362	Bordo Los talleres	San Mateo	Almoloya	Urbano
2	0.2887	Bordo Colinas	Colinas del Sol	Almoloya	Urbano
3	0.1040	Los tules	Paredón Ejido	San Diego	Ganadería, agricultura, producción láctica
4	0.2029	San Diego	Ejido San Diego	San Diego	Ganadería y agricultura

8.2 Identificación de actividades antropogénicas

Las actividades antropogénicas, derivadas de las acciones humanas, se relacionan con la producción, intercambio y consumo de bienes o servicios destinados a satisfacer las necesidades del mercado. Se observa en la figura 18, las actividades antropogénicas desarrolladas en las subcuencas San Diego y Almoloya.

8.2.1 Actividades Económicas Primarias

En las subcuencas San Diego y Almoloya, los principales cultivos en la región destacan la producción de maíz grano, avena forrajera, pasto, praderas y tomate de cascara, a cielo abierto; mientras que en invernaderos se cultiva el jitomate y pepino (INEGI, 2023).

El INEGI (2023) reporta que el principal cultivo en el Estado de México es el maíz de grano blanco, aunque existen entidades que resalta por mayor producción que otros, como se observa en la Figura 23, la zona de estudio en este proyecto la mayor parte pertenece a las regiones de producción alto del maíz de grano blanco.

De las **actividades pecuarias** se encuentran la producción de leche, carne ovina y bovina, y en menor cantidad la producción de carne de aves principalmente de gallina.

El Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (Secretaría de Agricultura, 2014) reporta 23,493 hectáreas sembradas y 203,288.48 toneladas de cosecha en el municipio de Almoloya de

Juárez, Estado de México, mientras que el valor y producción pecuario y acuícola se representa en la Tabla 9.

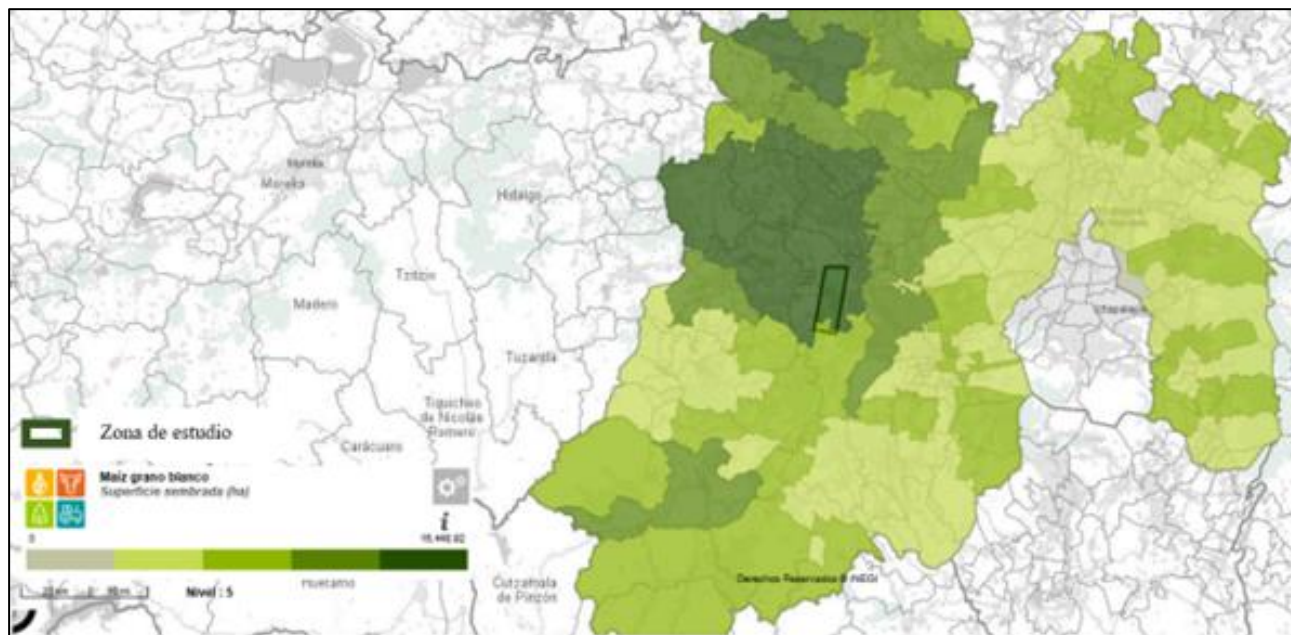


Figura 23. Cultivo de maíz blanco en el Estado de México, INEGI 2023.

Tabla 9. Valor y producción pecuario y acuícola en Almoloya de Juárez, Estado de México.

Valor y producción pecuario y acuícola		
Especie	Volumen	Valor
Bovino	546.45 ton.	47,489.23 (Miles de Pesos)
Ave	421.22 ton.	17,269.38 (Miles de Pesos)
Ovino	262.44 ton.	24,614.76 (Miles de Pesos)
Ave (Huevo)	107.53 ton.	2,773.12 (Miles de Pesos)
Bovino (Leche)	4,955.59 (Miles de Litros)	48,216.47 (Miles de Pesos)
Carpa	483,000 (Kg.)	33,810,000 (Pesos)

La subcuenca San Diego es formada por la comunidad de Paredón, donde sus habitantes realizan actividad de **rastró de tras patio**, también conocido como matadero o rastro, es un establecimiento no fijo y sin supervisión, donde se sacrifican animales para consumo humano. El proceso general para llevar a cabo el rastro de tras patio se muestra en la Figura 24.

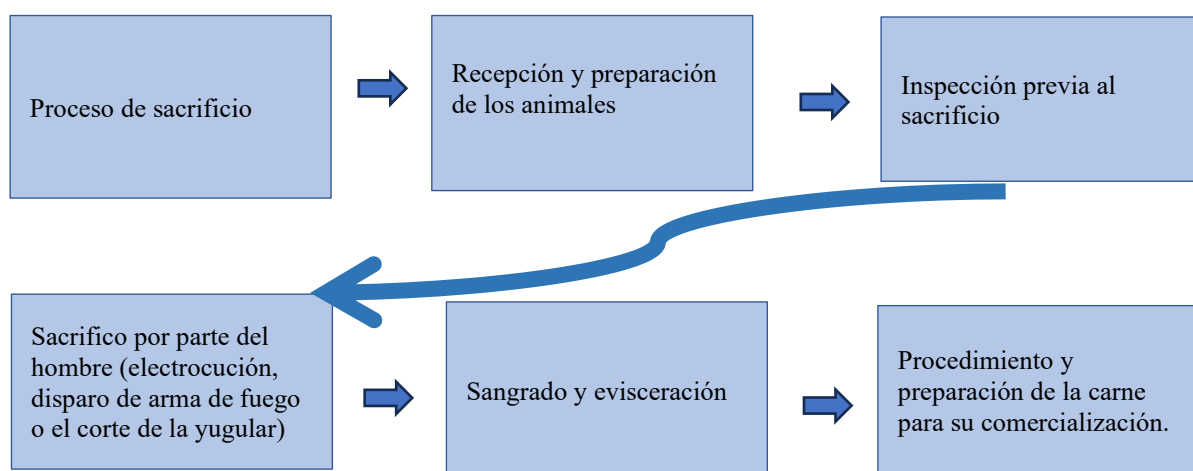


Figura 24. Proceso general para llevar a cabo el rastro de tras patio.

La actividad de rastro tras patio contribuye a la contaminación del recurso hídrico, al verter las heces, orina, sangre, piel, residuos de la carne y grasas, alimentos no digeridos ubicados en los intestinos, menudencia de los animales sacrificados (Muñoz, 2005). En el caso de los bovinos y equinos, el aporte de sangre a los efluentes es de 12 litros, para ovinos y porcinos de 1 y 3 litros respectivamente y para aves de 0.05 litros (Signorini, 2007).

8.2.2 Actividades Económicas Secundarias

Las actividades económicas secundarias son actividades donde transforman las materias primas en productos elaborados; llamado también sector industrial, donde participan desde pequeños talleres hasta grandes fábricas (Morales, 2012).

En las subcuencas San Diego y Almoloya actualmente no cuenta con una base industrial a gran escala, sin embargo, presentan actividades en pequeña escala de manufacturas de papel (celulosa y sus productos), molienda de nixtamal para fabricación de tortillas; elaboración de productos lácteos, elaboración de fuegos artificiales, entre otros.

Productos lácteos: Dentro de la subcuenta San Diego, la comunidad de Paredón Ejido resalta por ser productora de productos lácteos, principalmente de queso fresco; se considera queso al alimento elaborado a partir de la leche cuajada de vaca, cabra, oveja u otros mamíferos.

El residuo de la elaboración del queso fresco es el suero láctico, de cada 10 litros de leche se obtiene 1 kilogramo aproximadamente de queso y 9 litros de suero láctico, si este último, es vertido al suelo o a cuerpos de agua como ríos, lagos, entre otros, provocan daños ambientales como eutrofización, los nutrientes en el agua que detonan poblaciones de bacterias y algas, que consumen gran cantidad de oxígeno disuelto en el agua, dejando al resto de seres vivos sin oxígeno disponible (Guzmán Flores, 2018).

Elaboración de fuegos artificiales: En la subcuenca de Almoloya se encuentra la comunidad llamada “San Mateo Tlachichilpan”, lugar famoso por la elaboración de fuegos artificiales, los cuales se fabrican a partir de pólvora negra, a la que se añaden diferentes minerales y compuestos químicos para crear efectos especiales de colores (IMEPI, 2022)

Esta actividad es altamente contaminante, especialmente, contamina los cuerpos de agua y suelos cercanos a sitios de quema o de producción de fuegos artificiales, Robles Gonzalez et al. (2017) detectaron que se genera un incremento de perclorato (ClO_4^-), que es un importante componente en la formulación de pirotecnia, y este es mal desechado a cuerpos de agua para consumo humano y está asociado a problemas de salud en tiroides.

La actividad industrial en el municipio Almoloya de Juárez está liderada considerando el tamaño por la empresa “**La Papelera el Nevado**” ubicada en la carretera Toluca-Zitácuaro en la Zona del Yukón, km 16, Almoloya de Juárez, C.P. 50900, la subcuenca Almoloya; la empresa genera más de 500 empleos, la mayoría es empleo local. La empresa se dedica a la fabricación de papel para empaques y embalajes a partir de la fibra secundaria (Programa de Ordenamiento Ecológico y Territorial Almoloya de Juárez (POEL, 2010)).

Con relación a la **minería**, el INEGI no reporta actividades en este rubro; sin embargo, la disponibilidad de recursos no renovables en la subcuenca San Diego se enfoca en una medida menor en algunos yacimientos de grava, arena y arcilla en la localidad de Paredón Ejido, dentro de esta comunidad se encuentran dos establecimientos, que explotan los yacimientos para la elaboración de blocos de cemento (POEL, 2010).

8.2.3 Actividades Económicas Terciarias

En las subcuencas San Diego y Almoloya, estas actividades representan un valor mínimo en el desarrollo de la economía.

La actividad que resalta es la recoleta de residuos sólidos en el privado **relleno sanitario** Zinacantepec, el cuál recibe camiones provenientes de municipios como Toluca, Metepec, Xonacatlán, Villa Victoria y Almoloya (Programa de protección civil para basureros, 2021).

Comunidades como Poteje y Santa María, pertenecientes a la subcuenca San Diego, su economía es base de remesas, atribuido al fenómeno de **migración** de varones a Estados Unidos, cuestionan a población del Estado de México con miembros de su familia en Estados Unidos, el 89 % de las personas entrevistadas concluyen que la falta de empleo es el principal factor que motiva la migración.

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020) reporta un alza en valores de migrantes, como se aprecia en la Tabla 10, se indica la población total emigrante en el Estado de México, censado en los años de 2000, 2010 y 2020.

Tabla 10. Población total emigrante en el Estado de México de 2010 al 2020.

Población emigrante en el Estado de México			
Población	2000	2010	2020
México	97,483,412	112,336,538	126,014,024
Edo. México	654,711	939,141	1,344,291
Emigrante (%)	0.007	0.008	0.011

Las actividades que predominan por mayor número de familias que realizan y se caracterizan por generar contaminación puntual es la elaboración de productos lácteos, así mismo la elaboración de pirotecnia y la fábrica papelera. Mientras que las actividades como agricultura, ganadería, entre otros, son consideradas contaminación difusa, Se observa en la Figura 25, las actividades antropogénicas desarrolladas en las subcuencas San Diego y Almoloya.

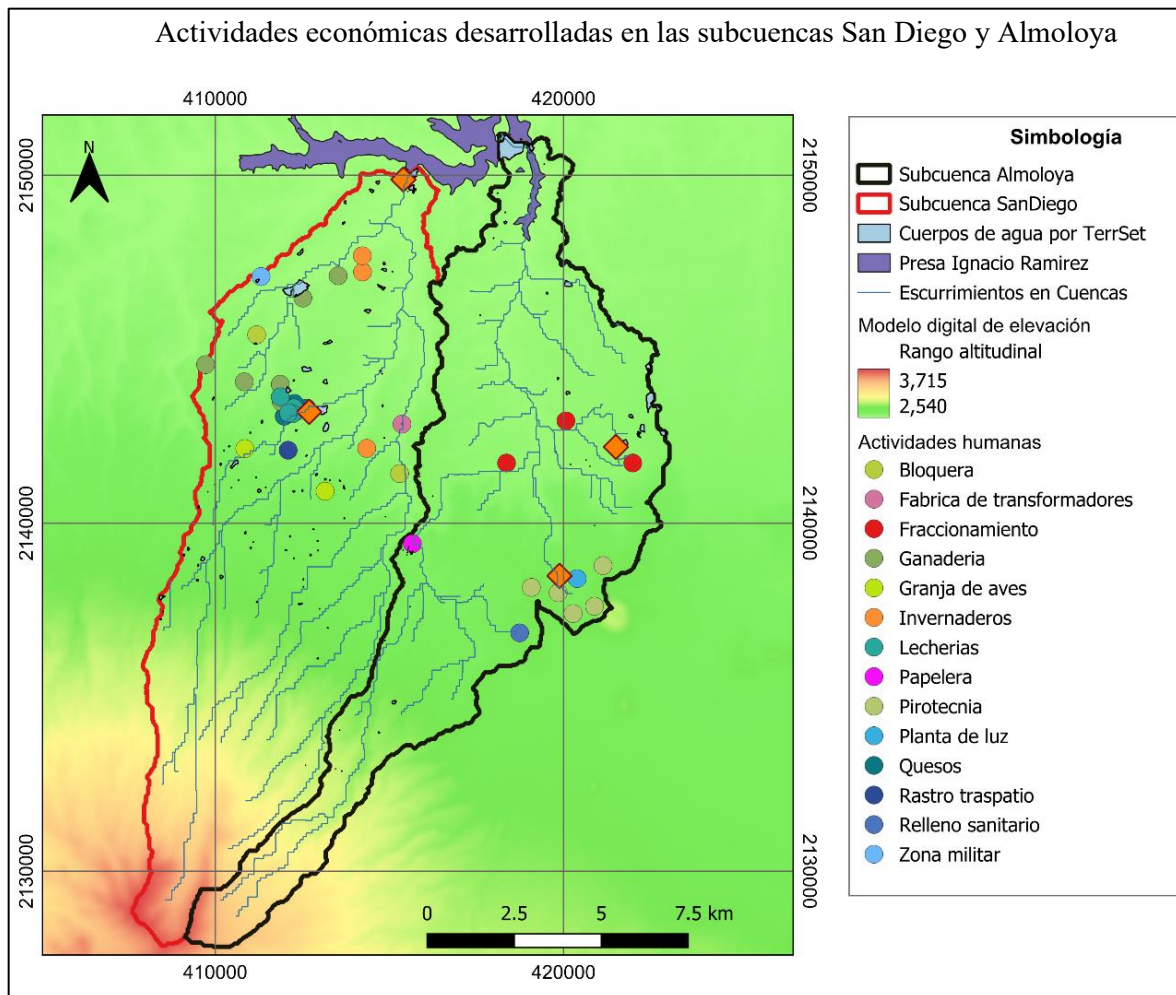


Figura 25. Ubicación de actividades antropogénicas de diferentes sectores económico.

8.3 Evaluar contaminación hídrica.

Los cuerpos de agua evaluados son considerados por su extensión territorial, con acceso de entrada, su aporte de mayor volumen de agua y su cercanía con fuentes de contaminación, cercanos a ríos o alimentados con escorrentías pluviales, a continuación, se muestran los puntos de muestreo dentro de las subcuencas San Diego y Almoloya.

8.3.1 Recolecta e identificación de macroinvertebrados acuáticos

El resultado de la recolección de los macroinvertebrados acuáticos en el mes de noviembre de 2024 fue de un total de 26 familias, mientras que en el mes de junio de 2025 se recolectaron un total de 39 familias, como se describe a continuación.

El cuerpo de agua identificado “San Diego”, Figura 26, ubicado en la parte baja de la subcuenca que recibe el mismo nombre presentó el mayor número de familias comparado con el resto de los sitios.



Figura 26. Cuerpo de agua “San Diego”.

En “San Diego” se recolectaron 13 familias, la suma del índice BMWP da un total de 63, lo que significa que la calidad de agua se encuentra con contaminación moderada en el mes de noviembre de 2024, mientras que en el mes de junio de 2025 el número de familias de macroinvertebrados aumentaron, en la segunda recolecta muestra aumento en las familias de macroinvertebrados donde se recolectaron 16 familias, la suma del índice BMWP da un total de 81. Las familias que habitan este cuerpo de agua se enlistan en la siguiente Tabla 11.

El aumento de número de familias de macroinvertebrados, sugieren que en la temporada de lluvias hay mejores índices de diversidad, relacionado estrechamente con los registros de la calidad del agua mejorada durante la temporada de lluvias, atribuido al efecto de la dilución de contaminantes durante esta temporada (Auquilla et al., 2006).

Mismo efecto de mejora en la calidad de agua y aumento de número de familias de macroinvertebrados se presentó en el resto de los cuerpos de agua estudiados para este caso de estudio, con excepción de “Colinas”.

Tabla 11. Macroinvertebrados recolectados en el cuerpo de agua "San Diego".

Cuerpo acuático	San Diego
Localidad	Ejido San Diego
Cuenca	San Diego
Familia	Puntuación
Aeshnidae	8
Ecnomidae	8
Hydrobiosidae	8
Gomphidae	7
Gammaridae	7
Corydalidae	6
Libellulidae	6
Elmidae	5
Belostomatidae	4
Calopterygidae	4
Notonectidae	4
Hydracarina	4
Hirubidae	3
Physidae	3
Planorbidae	3
Oligochaeta	1
No total de familia	16
Puntuación	81
BMWP/Méx.	CONTAMINACIÓN
Calidad de agua	MODERADA

El cuerpo de agua identificado “Los tules”, se ubica en la parte media de la subcuenca San Diego, se aprecia en la Figura 27.



Figura 27. Cuerpo de agua “Los tules”.

En “Los tules” se recolectaron 8 familias de macroinvertebrados, dando una puntuación BMWP de 34 en la primera recolección realizada en el mes de noviembre de 2024, este valor refleja agua de calidad de agua contaminada; en la segunda recolección de macroinvertebrados llevada a cabo en el mes de junio de 2025, los macroinvertebrados recolectados se identificaron 13 familias diferentes, la suma del índice BMWP da un total de 61 puntos. Los macroinvertebrados recolectados son tolerantes a contaminantes teniendo valores bajos, así como sensibles, como se muestra en la siguiente Tabla 12.

En los cuerpos de agua estudiados dentro de la subcuenca San Diego coinciden la familia Hirubidae, Volutidae, Aeshnidae y Ecnomidae, las dos primeras con alta tolerancia a contaminantes, mientras la tercer y cuarta reducen su tolerancia a contaminantes.

Tabla 12. Macroinvertebrados recolectados en el cuerpo de agua "Los tules".

Cuerpo acuático	Los tules
Localidad	Paredón Ejido
Cuenca	San Diego
Familia	Puntuación
Aeshnidae	8
Ecnomidae	8
Gammaridae	7
Libellulidae	6
Turbellaria	5
Polymitarcydae	5
Belostomatidae	4
Notonectidae	4
Tipulidae	4
Hirubidae	3
Hydrobiosidae	3
Physidae	3
Asellidae	3
Chironomidae	2
No. total de familia	14
Puntuación	65
BMWP/Méx.	CONTAMINACIÓN
Calidad de agua	MODERADA

Tabla 13. Macroinvertebrados recolectados en la presa "Los talleres".

Cuerpo acuático	Los talleres
Localidad	San Mateo Tlachichilpán
Cuenca	Almoloya
Familia	Puntuación
Gammaridae	7
Libellulidae	6
Turbellaria	5
Gammaridae	7
Corixidae	4
Notonectidae	4
Hydracarina	4
Hirubidae	3
Chironomidae	2
Oligochaeta	1
No. total de familia	10
Puntuación	43
BMWP/Méx.	CONTAMINACIÓN
Calidad de agua	MODERADA

En la subcuenca Almoloya, se encuentra la localidad de San Mateo Tlachichilpan, en la cual se ubica en la parte media de la subcuenca, el cuerpo de agua identificado "Talleres", como se visualiza en la Figura 28.

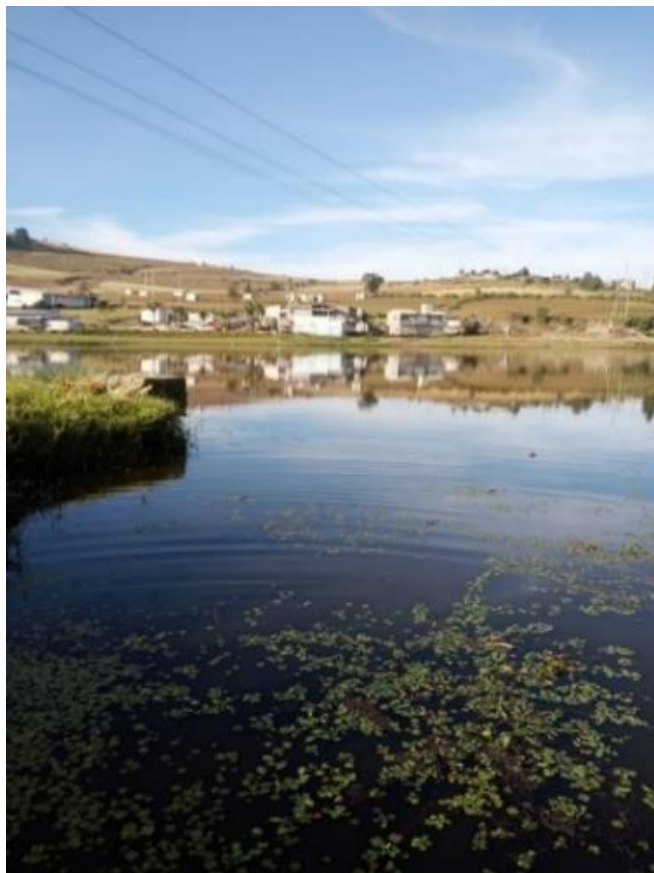


Figura 28. Cuerpo de agua “Talleres”.

En los “Talleres” se recolectaron 4 familias de tolerancia alta a contaminantes en, la suma del índice BMWP da un total de 11 en el mes de noviembre de 2024, reflejando que el agua se encuentra extremadamente alta, el resultado es diferente al recolectar en el mes de junio de 2025, donde se recolectaron 9 familias con 36 puntos del índice BMWP/Méx.

Después de realizar el análisis histórico de la presencia de macroinvertebrados en el cuerpo hídrico superficial, se registraron 10 familias obteniendo una ponderación de 43 del índice BMWP/Méx, como se observan en la Tabla 13.

En la subcuenca Almoloya, se encuentra el fraccionamiento Colinas del Sol, y a las orillas de este se ubica el cuerpo de agua identificado “Colinas”, situado en la parte baja de la subcuenca, con agua turbias, como se visualiza en la Figura 29.



Figura 29. Cuerpo de agua “Colinas”.

En “Colinas” se recolectó únicamente una familia, con una puntuación de 1 del índice BMWP/Méx, mismo resultado se obtuvo en la primera recolección realizada en el mes de noviembre de 2024 y en la segunda recolección llevaba a cabo en el mes de junio de 2025, lo que significa que la calidad de agua se encuentra extremadamente contaminada, la anterior información se observa en la siguiente Tabla 14.

La escasa investigación que existe sobre los macroinvertebrados limita la comparación de resultados con otras investigaciones (Auquilla et al., 2006), pero considerando el índice BMWP/Méx bajo se asocia a la concentración alta de contaminantes (Ruiz-Picos et al., 2017).

Tabla 14. Macroinvertebrados recolectados en la presa “Colinas”.

Cuerpo acuático	Colinas
Localidad	Colinas
Cuenca	Almoloya
Familia	Puntuación
Oligochaeta	1
No total de familia	1
Puntuación	1
BMWP/Méx. Calidad de agua	EXTREMADAMENTE CONTAMINADA

8.3.1.1 Descripción de las familias de macroinvertebrados acuáticos en las subcuencas San Diego y Almoloya

La situación de contaminación actual de los cuerpos de agua en las subcuencas San Diego y Almoloya es identificada con ayuda de macroinvertebrados acuáticos después de aplicar el índice BMWP/Méx como aguas de calidad buenas, no contaminada o no alteradas de manera sensible; al presentar 22 familias y sumar 104 puntos del índice BMWP/Méx ambas subcuencas; a continuación, se mencionan las características más representativas de las familias, ilustración y valor del índice BMWP/Méx.



La familia Aeshnidae tiene especies comúnmente conocidas como “Darners” en Estados Unidos de América y Canadá, mientras que en México no tienen un nombre común. Presentan la base de las alas posteriores más anchas que el par de alas anteriores y abdomen grueso; la mayoría de las especies son de color pardo u oscuro, con bandas pálidas y manchadas con azul, verde o amarillo; los ojos son grandes y están en contacto en la parte superior de la cabeza.

(Dunkle, 2000; Schorr & Paulson, 2012)

8



La familia Hydrobiosidae tienen tibia, tarso y uña de las patas anteriores modificados y fuertemente articulados al fémur, éste con una quela; noveno segmento abdominal con un esclerito dorsal de color oscuro.

(Álvarez-Arango et al., 2005)

7



La familia Gomphidae se caracterizan por tener un prementón y lóbulos palmares del labio aplanados o casi planos. La lígula no tiene hendidura media. Sus antenas están compuestas por cuatro segmentos, y tanto el tarso anterior como el medio tienen dos segmentos.

(Álvarez-Arango et al., 2005)

7



La familia Gammaridae posee en la cabeza dos pares de antenas y ojos. Cuenta con siete pares de patas caminadoras, con los cuatro primeros pares orientados hacia adelante. En su cola, presenta tres pares de apéndices cortos denominados urópodos, los cuales utiliza para impulsarse rápidamente y escapar de amenazas. Sus dos primeros pares de apéndices bucales están adaptados para manipular el alimento.

(Ramos et al., 2023)

7



La familia Corydalidae presentan ocho pares de apéndices abdominales laterales, que pueden ser no segmentados o estarlo de forma incompleta, y además, cuentan con un par de propatas anales.

(Álvarez-Arango et al., 2005)

6



La familia Libellulidae tienen un cuerpo robusto y abdomen ancho. Su labio (máscara) es cuchara, cubriendo gran parte de la cara. Poseen branquias rectales internas. Los adultos presentan un vuelo ágil y sus alas traseras son más anchas en la base que las delanteras. Son de tamaño mediano a grande y a menudo tienen coloraciones brillantes o patrones en las alas.

(Escoto-Moreno et al., 2014)

6



La familia Elmidae de cuerpos de silueta ovalada o alargada. Sus antenas, que varían de filiformes a ligeramente ensanchadas en el extremo, se componen de 7 a 11 segmentos, o bien poseen un segmento final más grueso formado por 5 o 6 partes, y se distinguen por tener uñas tarsales alargadas. Sus coxas delanteras son de forma redondeada, y su tamaño oscila entre 1 y 9 milímetros.

(Álvarez-Arango et al., 2005)

5



La familia Belostomatidae de cabeza independiente o parcialmente unida al protórax. Sus antenas son más cortas que la cabeza y se encuentran escondidas debajo de ella. Presenta un rostro cilíndrico y de poca longitud. En el extremo del abdomen, posee dos apéndices respiratorios cortos, aplanados y capaces de retraerse.



(Álvarez-Arango et al., 2005)

4



La familia Calopterygidae son alargadas y delgadas, con branquias caudales laminadas, largas y trilobuladas o con forma de hoja, que no son retráctiles. Su labio es plano y no en forma de cuchara. Los adultos poseen alas grandes, anchas y a menudo con coloraciones metálicas o bandas oscuras. Suelen volar lentamente cerca de cuerpos de agua.

(Escoto-Moreno et al., 2014)

4



La familia Notonectidae son de rostro triangular, muy corto, con un solo segmento, a menudo con estrías transversas. Tarsos delanteros con un solo segmento similar a una pala con setas rígidas formando una estructura similar a un rastrillo.

(Álvarez-Arango et al., 2006)

4



La familia Hydracarina son ácaros acuáticos caracterizados por su cuerpo globoso o piriforme y blando, a menudo de colores brillantes (rojo, naranja, verde, azul). Poseen cuatro pares de patas con sedas natatorias y su boca está modificada en un estilete perforador para la alimentación.

(Briceño Avellaneda, 2021)

4



La familia Hirubidae conocidos comúnmente como sanguijuelas.

(Álvarez-Arango et al., 2006)

3



La familia Physidae son conchas ovaladas con espiral muy aguda.

(Álvarez-Arango et al., 2006)

3



La familia Planorbidae son concha discoidal; carecen de opérculo, con número de vueltas variables según el género

(Álvarez-Arango et al., 2006)

3



La familia Chironomidae de larvas de cuerpo cilíndrico, a menudo rojas y alargadas, tienen 11 segmentos abdominales.

(Álvarez-Arango et al., 2006)

2



La familia Oligochaeta de cuerpo cilíndrico, sin antenas ni grandes expansiones o quetas como tienen los poliquetos (anélidos marinos).

(Álvarez-Arango et al., 2006)

1

8.3.1.2 Análisis estadístico

Seguido de obtener los valores de calidad del agua mediante la aplicación del índice BMWP/Méx, se determinó la relación entre la abundancia y las familias de macroinvertebrados encontradas en los sitios muestreados, a través de la prueba Kruskal-Wallis, los resultados se aprecian en la Tabla 15.

Tabla 15. Resultado de la prueba Kruskal-Wallis.

Prueba de Kruskal-Wallis para medianas iguales	
H (ch ²)	16.87
Hc (empate corregido)	22.49
P (mismo)	0.3715
No hay diferencia significativa entre las medianas de las muestras	

La prueba Kruskal-Wallis arrojó un valor H=16.87 con una probabilidad P=0.3715, lo que indica que entre los sitios de muestreo no hay diferencias significativas entre las familias de macroinvertebrados acuáticos encontrados por sitio.

El índice Jaccard, que demuestra la similitud de las familias de macroinvertebrados recolectados entre los sitios de muestreo de las subcuencas San Diego y Almoloya, se observa en la Tabla 16. Los resultados de la tabla anterior se pueden visualizar mejor en el siguiente dendograma, Figura 30, donde se muestran 3 grupos, el primer grupo formado únicamente por el sitio Colinas del sol (sitio 4), que es el que menos se parece a los demás con menos de 12 por ciento; posteriormente el segundo grupo formado por el sitio de Los talleres (sitio 3) y subcuenca Almoloya (sitio CA) que se parecen un 100 % de acuerdo con la tabla, y finalmente el tercer grupo más grande, que es el formado por los sitios San Diego, subcuenca San Diego y Los tules (sitios 2, csd y 1).

Tabla 16. Índices Jaccard de similitud y distancia.

Índices de similitud y distancia						
Sitio	1	2	3	4	CSD	CA
1	1	0.23076923	0.33333333	0	0.69230769	0.33333333
2	0.23076923	1	0.27272727	0.14285714	0.53846154	0.27272727
3	0.33333333	0.27272727	1	0.14285714	0.33333333	1
4	0	0.14285714	0.14285714	1	0.07692307	0.14285714
CSD	0.69230769	0.53846154	0.33333333	0.07692307	1	0.33333333
CA	0.33333333	0.27272727	1	0.14285714	0.33333333	1

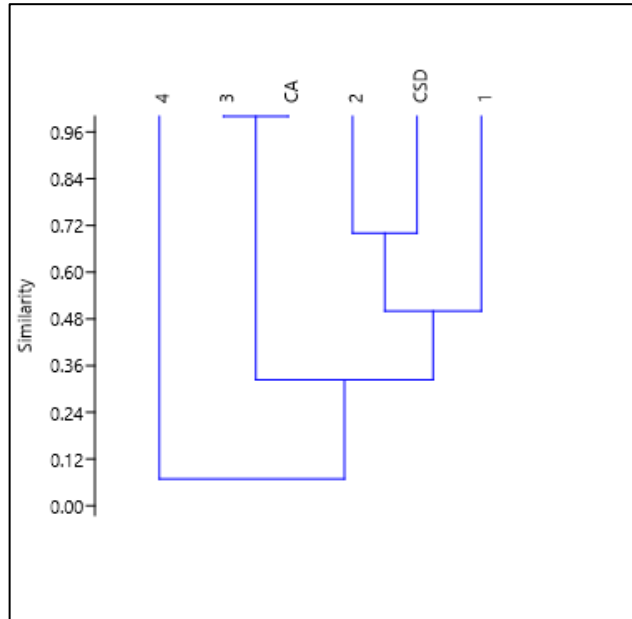


Figura 30. Agrupamiento jerárquico de la similitud de las familias de macroinvertebrados recolectados.

8.3.1.4 Parámetros fisicoquímicos

1. Potencial de hidrógeno (pH)

El pH es una forma de medir lo ácido o alcalino que es el agua, se basa en la concentración de iones de hidrógeno (H^+) presentes, para calcular el pH es el logaritmo negativo en base 10 de la concentración de iones de hidrógeno en la solución, matemáticamente, esto se expresa como $pH = -\log[aH^+]$ (Bejarano Suescun & Poveda Gomez, 2023).

El pH balanceado es importante para la vida acuática sana, en México, el pH del agua potable regulado por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, establece los límites permisibles de calidad del agua para uso y consumo humano en México; los valores de pH obtenidos en los cuerpos de agua evaluados se encuentran dentro del rango del agua potable, como se aprecia en la siguiente Tabla 17.

El resultado del pH del agua del cuerpo de agua llamado “Los tules” es el valor que ligeramente es mayor alcalino; la alcalinidad es una propiedad contraria a la acidez, y se debe a la presencia de sales disueltas, como carbonatos y bicarbonatos (Villacís Galarza, 2024).

Tabla 17. Valores de pH obtenidos en los cuerpos de agua evaluados.

Muestra/ Parámetro	Los tules	San Diego	Los talleres	Colinas	NOM-001- SEMARNAT- 2021	NOM-127- SSA1-2021
pH	7.53	6.91	6.86	7.2	6.9	6.5 - 8.5

2. Conductividad eléctrica y temperatura

La conductividad eléctrica (CE) mide la capacidad del agua para transportar electricidad y se expresa en siemens por metro (S/m) o microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$). La CE indica la concentración de sustancias disueltas en el agua, como sales, minerales, ácidos y bases (Méndez Londoño et al., 2024).

La conductividad eléctrica del agua aumenta con la temperatura porque las moléculas se mueven más rápido y facilita el movimiento de los iones disueltos, por cada grado que sube la temperatura, la conductividad puede incrementarse hasta un 2-3 %. Existen otros factores que afectan la conductividad del agua como la salinidad y la presencia de contaminantes, como compuestos químicos y desechos industriales (Jumbo et al., 2024).

La temperatura del agua puede variar por diversos factores, principalmente los procesos industriales. Cuando la temperatura aumenta, disminuye la concentración de oxígeno disuelto. Si las aguas son deficientes en oxígeno, esto puede ocasionar la muerte de especies acuáticas (Espinoza Morales & Jimenez Melo, 2024).

Los valores de conductividad eléctrica y temperatura obtenidos en los cuerpos de agua evaluados, se presentan a continuación en la Tabla 18.

Tabla 18. Valores de conductividad eléctrica y temperatura obtenidos en los cuerpos de agua evaluados.

Muestra/ Parámetro	Los tules	San Diego	Los talleres	Colinas	El Real Decreto 3/2023	NOM- 127- SSA1- 1994	NOM-001- SEMARNAT- 2021
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	241.5	241.6	176.6	576.1	2500	Máx. 1000	Máx. 2500
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	13.3	15.9	15.3	16.1	20	25	No Normado

El Real Decreto 3/2023 establece los criterios de calidad del agua de consumo en España (Ministerio de Sanidad, 2023). La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (DEBE & SU, 1994) establece límites permisibles para la calidad del agua potable en México, incluyendo la conductividad y la temperatura. Mientras la NOM-001-SEMARNAT-2021 (SEMARNAT, 2022) establece los límites permisibles de calidad del agua para riego, esta norma especifica los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos que se utilizan para riego agrícola.

Los resultados de la conductividad eléctrica de los cuatro sitios de muestreo presentan valores de conductividad eléctrica significativamente inferiores al límite máximo establecido comparadas con España.

De los cuatro cuerpos de agua estudiados, es el identificado como “Colinas” es donde el agua presenta mayor temperatura, resultado de ser exutorio de agua residuales industriales; las cuales son disolventes de sólidos suspendidos que provocan turbidez y aumentan la temperatura del agua, porque las partículas en suspensión absorben más calor (Meza Castro, 2023).

3. Nitrógeno y fósforo

Los nitratos y nitritos son iones que se encuentran de forma natural en el agua y constituyen el nitrógeno total, pero su concentración puede aumentar por el uso de fertilizantes. La presencia de nitrógeno en el agua es un indicador de su calidad, logran provocar la eutrofización de las aguas superficiales, lo que altera el equilibrio del ecosistema (Bolaños-Alfaro et al., 2017).

Los valores de nitrógeno y fósforo obtenidos en los cuerpos de agua evaluados se presentan a continuación en la Tabla 19.

Tabla 19. Los valores de nitratos y fosfatos obtenidos en los cuerpos de agua evaluados.

Muestra/ Parámetro	Los tules	San Diego	Los talleres	Colinas	OMS	Penn State	NOM-002- SEMARNAT- 1996
Nitrógeno total (mg/L)	6.06	1.9	3.14	29.1	Max.1	Max 75	35
Fósforo como PO ₄ ³⁻ (mg/L)	8.7934	36.1889	6.5434	140.4827	Max. 0.5	Max 5	21

La Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) establecen un límite máximo en el agua potable. Este límite se establece para proteger la salud pública (Kombo Mpindou, 2015). Sin embargo, en actividades agrícolas es de uso común, el nitrógeno es un nutriente crítico para las plantas, por lo que en la mayoría de veces es que aplicado en el agua de riego para fertilizar (García et al., 2014).

Otro elemento popular para fertilizar suelo agrícola es el fósforo. Los niveles altos de este, suelen indicar contaminación por escorrentía de fertilizantes o estiércol (Swistock, 2021).

Penn State Extension es una organización educativa moderna dedicada a brindar información basada en la ciencia, la cual reporta valores máximos permisibles para el agua de riego agrícola.

Todas las muestras ("Los tules": 6.06 mg/L, "San Diego": 1.9 mg/L, "Los talleres": 3.14 mg/L, "Colinas": 29.1 mg/L) superan significativamente el límite máximo establecido por la OMS (1 mg/L). Esto sugiere una posible contaminación por nitrógeno en todos los sitios, por lo que no se recomienda para ingesta humana. Sin embargo, todos los valores se encuentran por debajo del límite máximo de Penn State (75 mg/L), por lo que es apta como agua de riego de suelo agrícola.

Los probables contaminantes de los cuerpos hídricos son los abonos inorgánicos, que son constituidos por diversas clases de fosfatos solubles, debido a su elevada solubilidad, estos aniones son arrastrados fácilmente por las aguas superficiales hacia ríos, acuíferos, etc. (Vera Medina, 2022).

Las aguas naturales contienen normalmente cantidades de fosfatos por debajo de 1 mg/l, cantidades superiores de estos nutrientes favorecen el crecimiento de algas que consumen el oxígeno del medio acuático y provocan la desaparición de especies vegetales y animales (Vera Medina, 2022).

Otra fuente de fosfatos la constituyen los vertidos urbanos que contienen detergentes: para aumentar su eficacia, algunos detergentes utilizan fosfatos inorgánicos en su composición como agentes alcalinizadores (Bejarano Suescun & Poveda Gómez, 2023).

4. Demanda Química de Oxígeno

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) cuantifica la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar completamente la materia orgánica y otras sustancias oxidables presentes en una muestra de agua, tanto biodegradable como no biodegradable. Es un indicador clave para evaluar la calidad del

agua, especialmente en aguas residuales, y se utiliza para determinar la carga orgánica total de un cuerpo de agua. La DQO se mide mediante métodos químicos, como el método colorimétrico de dicromato, y se expresa en mg/l de oxígeno de acuerdo con la NMX-AA-030/2-SCFI-2012 (DOF, 2012). Los valores de DQO es los cuerpos de agua determinados para su análisis, re muestran en la Tabla 20.

Tabla 20. Los valores de DQO obtenidos en los cuerpos de agua evaluados.

Muestra/ Parámetro	Los tules	San Diego	Los talleres	Colinas	NOM-001- SEMARNAT- 2021
DQO (mg/L)	27	40	79	130	210

Los valores de la DQO en aguas residuales son diferentes según el tipo de agua y si recibieron algún tipo de tratamiento (Zuñiga Molina, 2024), como aprecia en la tabla 22.

Al comparar los valores de DQO obtenidos en los cuerpos de agua evaluados con respecto a los valores reportados por Zuñiga Molina (2024), observado en la Tabla 21, en las evaluaciones de la contaminación del recurso hídrico, se identifica que ningún cuerpo de agua se considera de excelente ni buena calidad, al rebasar $DQO \leq 20$, dentro de la clasificación como Aceptable, con inicio de contaminación únicamente se ubican dos cuerpos hídricos identificados como San Diego y Los tules, ambos en la subcuenca de San Diego; los cuerpos de agua en la subcuenca de Almoloya están clasificados como Agua Contaminada, al presentar valores de DQO entre 40 y 200 (mg/L).

Sin embargo, la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación; indica un valor de 200 mg/L en DQO, valor que no es rebasado por ningún cuerpo de agua, considerados en esta investigación.

Tabla 21. Clasificación de agua según sus valores de DQO.

Criterio (mg/L)	Clasificación	Valores de DQO
$DQO \leq 10$	Excelente, no contaminada	Azul
$10 < DQO \leq 20$	Buena calidad, agua superficial con bajo contenido de materia orgánica	Verde
$20 < DQO \leq 40$	Aceptable, con inicio de contaminación	Amarillo
$40 < DQO \leq 200$	Contaminada, agua residuales brutas, no tratadas y parcialmente tratadas	Naranja
$DQO > 200$	Fuertemente contaminadas, Efluentes industriales	Rojo

En la subcuenca Almoloya, se atribuye el valor alto de DQO, por la presencia de aguas residuales domésticas, las cuales suelen tener valores alrededor de DQO de 300 mg/l (Cordova Robles & Peña Palma, 2023). Así como, las aguas residuales de la fabricación de papel genera contaminación a los cuerpos hídricos por el uso intensivo de agua en el proceso, que se contamina con productos químicos como el cloro utilizado para blanquear; materia orgánica como la lignina, pulpa que se extrae para mejorar la calidad del producto; sólidos suspendidos que incluye partículas de fibras; y metales pesados como zinc y cobre; la suma de estos factores, las aguas residuales tienen valores muy altos de DQO de 1200 mg/l (Chinchay Huarcaya, 2021).

9 Conclusiones

La evaluación biológica realizado en las subcuencas San Diego y Almoloya mediante el muestreo de macroinvertebrados acuáticos confirma y complementa estos hallazgos químicos. Donde se identificaron un total de 26 familias de macroinvertebrados en los diferentes cuerpos de agua estudiados, cuya presencia y diversidad sirven como indicadores directos de la calidad del agua.

La calidad del agua de los cuerpos hídricos de la subcuenca San Diego es mala, específicamente el agua de "Los Tules" es clasificada como muy contaminada al presentar un puntaje de 34 del índice de BMWP/Méx y "San Diego" como contaminada con un puntaje de 58 en el índice de BMWP/Méx., ambos valores reflejan la problemática hídrica. El panorama de la calidad del agua superficial en México es preocupante, se determinó la calidad de agua superficial de 450 cuerpos hídricos, que incluyen ríos, arroyos, corrientes, embalses y presas, el 50.9 % de los sitios monitoreados son considerados de mala calidad y un 21.8 % son de calidad intermedia (SEDATU, 2024).

Los casos de "Talleres" presentaron un valor en el índice BMWP/Méx. de 11 y "Colinas" con un puntaje de 1 en el índice BMWP Méx., que muestran una calidad de agua extremadamente deteriorada y una alta presencia de contaminantes con una drástica reducción en la diversidad de macroinvertebrados teniendo presente únicamente cuatro y una familia, respectivamente; son particularmente alarmantes. Estos hallazgos son consistentes con estudios recientes que demuestran el impacto directo de la urbanización y las actividades agrícolas en la biodiversidad acuática (Rodríguez-Contreras et al., 2024).

La eficacia del índice BMWP Méx. en este estudio para clasificar los diferentes grados de calidad del agua, desde moderadamente contaminada hasta extremadamente contaminada en las subcuencas San Diego y Almoloya, refuerza su validez como herramienta de biomonitoreo en el contexto mexicano. La literatura reciente de 2024 en adelante, aunque escasa en publicaciones del índice BMWP modificado para México, visibiliza el impacto humano y resalta la necesidad de identificar para estrategias de conservación para los recursos hídricos (Bermudez Naranjo, 2024).

El análisis realizado sobre el uso de suelo en las subcuencas San Diego y Almoloya entre 2014 y 2024 revela transformaciones significativas en la dinámica territorial de la región. Aunque la agricultura continúa siendo el uso predominante, se observa una reducción notable en la superficie destinada a

esta actividad, pasando de 85.47 km² a 74.43 km², lo que indica un cambio en las prácticas productivas o en las condiciones socioeconómicas que influyen en el manejo del suelo.

Por otro lado, las áreas cubiertas por cuerpos de agua, bosque y pastizal presentan una tendencia creciente durante el mismo periodo. La superficie de cuerpos de agua aumentó en 0.14 km², mientras que el área de bosque creció cerca de 2 km² y los pastizales incrementaron de manera aún más considerable, superando los 13 km² de expansión, lo que puede estar relacionado con procesos de restauración natural o cambios en el uso del suelo hacia actividades menos intensivas. México es el país que ocupa el tercer con la mayor superficie de bosque en América Latina y el Caribe (Statista Research Department, 2024); específicamente la zona de estudio de esta investigación presenta uso de suelo forestal, en el 2014 ocupaba 16.9659 km² de superficie terrestre, pasando a 18.963 km² en el segundo periodo de estudio; mientras que pastizal presentaba 30.447 km² en el 2014, para el 2024 ocupa 43.3908 km². El aumento en la cobertura vegetal se tribuye a la implementación de programas de manejo forestal que contribuyen a la mejora de la conservación de las áreas naturales cumpliendo el propósito de aumentar las coberturas de bosque (Cuevas et al., 2024).

En cuanto a las condiciones climáticas, ambas subcuencas experimentaron una disminución en la precipitación anual, lo que representa un factor relevante para la gestión hídrica y la conservación ambiental de la región. La subcuenca San Diego recibió en promedio 775.7 mm en 2024, una reducción de aproximadamente 468 mm respecto a 2014, mientras que la subcuenca Almoloya registró 707.7 mm, reflejando un decremento similar. Esta disminución puede tener implicaciones importantes para la recarga de acuíferos, la productividad agrícola y el mantenimiento de los ecosistemas locales, demandando estrategias adaptativas para mitigar el impacto del cambio climático.

Por otro lado, los resultados indican un avance positivo en la reducción de áreas afectadas por incendios, ya que estas disminuyeron de 13.76 km² a 5.42 km², lo cual puede atribuirse a la implementación de proyectos forestales y acciones de manejo sustentable en la región. Este logro es significativo, pues los incendios representan una de las principales amenazas para la biodiversidad y la calidad del suelo.

Finalmente, es importante reconocer que las actividades antropogénicas, relacionadas con la producción, intercambio y consumo de bienes y servicios, continúan siendo un factor determinante en la transformación del paisaje y los recursos naturales de las subcuencas. Este fenómeno subraya la

necesidad de promover políticas integrales que equilibren el desarrollo económico con la conservación ambiental, buscando la sostenibilidad de los ecosistemas y el bienestar de las comunidades locales.

Los resultados obtenidos en el análisis de calidad del agua de los cuerpos hídricos estudiados reflejan una situación preocupante en términos de contaminación y deterioro ambiental. El cuerpo de agua denominado “Los Tules” mostró un pH ligeramente alcalino, característica que se atribuye a la presencia de sales disueltas como carbonatos y bicarbonatos, responsables de la alcalinidad que contrarresta la acidez del agua (Buitrón Moreira, 2024). La importancia del pH radica en su influencia directamente en la salud de los ecosistemas acuáticos y en la capacidad de los cuerpos de agua para sostener vida acuática diversa.

Sin embargo, al comparar los valores de Demanda Química de Oxígeno (DQO) obtenidos con los estándares reportados (Zuñiga Molina, 2024), demuestra que ninguno de los cuerpos de agua evaluados alcanza niveles de calidad excelente o buena. Solo dos cuerpos de agua, “San Diego” y “Los Tules”, ubicados en la subcuenca de San Diego, se encuentran en la categoría de calidad aceptable, con inicio de contaminación ($DQO \leq 20$ mg/L). En contraste, los cuerpos de agua en la subcuenca de Almoloya se clasifican como contaminados, presentando valores de DQO entre 40 y 200 mg/L, lo que indica una contaminación considerable y altamente dañina para la vida acuática y el uso humano.

Estos resultados destacan la urgente necesidad de implementar medidas de mitigación y recuperación ambiental en ambas subcuencas, especialmente en la subcuenca de Almoloya, donde los niveles de contaminación son más críticos. El deterioro en la calidad del agua no solo afecta a los organismos acuáticos, sino que también representa un riesgo para la salud pública y limita el uso sostenible de estos recursos naturales. Es indispensable fomentar políticas de manejo integral del agua que consideren tanto el monitoreo químico como biológico, para asegurar la conservación y restauración de los ecosistemas acuáticos y garantizar la provisión de agua limpia para las comunidades que dependen de estos cuerpos hídricos.

El estudio pone de manifiesto que la contaminación del agua representa un desafío importante en las subcuencas San Diego y Almoloya, afectando no solo la calidad del recurso hídrico sino también la biodiversidad asociada por actividades antropogénicas. La evaluación conjunta de parámetros

fisicoquímicos y biológicos ha demostrado ser esencial para obtener un diagnóstico integral y preciso, lo cual es fundamental para diseñar estrategias eficaces de conservación y manejo ambiental.

Paralelamente, los cambios registrados en el uso del suelo, la reducción en los niveles de precipitación y la variación en la incidencia de incendios reflejan una dinámica ambiental compleja y en constante transformación. Estas condiciones requieren una atención prioritaria y una gestión coordinada que permita proteger y restaurar los recursos naturales de la región, garantizando un equilibrio entre las actividades humanas y la conservación del ecosistema.

En conjunto, estos hallazgos subrayan la necesidad de implementar políticas integrales y multidisciplinarias que promuevan la sustentabilidad de los recursos hídricos y terrestres, contribuyendo así a un desarrollo sostenible en las subcuencas San Diego y Almoloya, y asegurando el bienestar de las generaciones presentes y futuras.



10 Recomendaciones







El aumento de la producción de quesos está directamente relacionado con el aumento de suero lácteo, actualmente existen industrias queseras que buscan estrategias para revalorizar el lactosuero y evitar el desperdicio de sus nutrientes y la contaminación que generan al ser vertido al ambiente sin tratamiento adecuado.


Durante la actividad de rastro tras patio, se debe considerar de relevante importancia la separación y recuperación de la sangre, como un procedimiento rutinario ya que es el residuo más contaminante del agua.

Se sugiere implementar plantas con la capacidad de tolerar altas concentraciones de contaminación, debido a que a nivel celular las raíces poseen vacuolas y enzimas que acumulan y metabolizan los contaminantes, estas plantas ayudan a la reducción, mineralización, degradación, volatilización y estabilización de estos contaminantes (Guzmán-Castro et al., 2022).

Existe una gran cantidad de estudios relacionados con la capacidad de acumulación de contaminantes de diversas plantas acuáticas, algunos ejemplos se presentan a continuación.

Nombre de la planta común	Nombre de la planta científico	Contaminantes que asimilan	Ilustración
Junco de laguna	Scirpus lacustris	Cd (cadmio), Cu (cobre), Pb (plomo), Mg (magnesio), Fe (hierro), Se (selenio), Cr (cromo).	
Lenteja de agua	Lemna gibba	Pb (plomo), As (arsénico), Cu (cobre), Cd (cadmio), Ni (níquel), Cr (cromo), Al (aluminio), Fe (hierro), Zn (zinc), Mn (maganesio).	

Nombre de la planta común	Nombre de la planta científico	Contaminantes que asimilan	Ilustración
Helecho de agua	Azolla caroliniana	Hg (mercurio), Cr (cromo), Cu (cobre), Cd (cadmio), Zn (zinc), Ni (níquel), Pb (plomo).	
Tapete del agua	Elatine Manda	As (arsénico).	
Hojuela de agua	Wolffia papulifera	Cd (cadmio).	
La chilillo	Polygonum punctatum	Cu (cobre), Cd (cadmio), Pb (plomo), As (arsénico), Hg (mercurio), Cr (cromo), Mn (manganeso).	
La cola de zorro acuática	Myriophyllum aquaticum	Cu (cobre), Zn (zinc), Mn (manganeso), Fe (hierro), Ni (níquel).	
Verdolaga del agua	Ludwigina palustris	Cu (cobre), Zn (zinc), Mn (manganeso), Fe (hierro), Ni (níquel).	

Nombre de la planta común	Nombre de la planta científico	Contaminantes que asimilan	Ilustración
Menta acuática	Mentha aquatic	Cu (cobre), Zn (zinc), Mn (manganeso), Fe (hierro), Ni (níquel).	

11 Referencias bibliográficas

- Abril Torres, A., Álvarez Correa, C. E., Amado Holguín, A., Bonilla Escobar, C. A., Bueno Castellanos, J. C., García Villalba, J. E., Gutiérrez Guataquira, M. I., Guzmán Arias, A. P., Martínez Vergara, A. M., & Mayorga Bermúdez, Á. T. (2010). Estudio de ecosistemas terrestres y acuáticos ubicados en el parque nacional natural cueva de los guácharos (acevedo, huila) (Vol. 1). Universidad Nacional de Colombia.
- Akhtar, N., Ishak, M. I. S., Ahmad, M. I., Umar, K., Md Yusuff, M. S., Anees, M. T., Qadir, A., & Ali Almanasir, Y. K. (2021). Modification of the water quality index (WQI) process for simple calculation using the multi-criteria decision-making (MCDM) method: A review. *Water*, 13(7), 905.
- Alonso, J. (2018). Índice multimétrico basado en macroinvertebrados acuáticos para evaluar la calidad de las aguas en arroyos del sur del departamento de Itapúa. Encarnación, Paraguay [Multimetric index based on aquatic macroinvertebrates to evaluate water quality in arroyos del sur of the department of Itapúa. Encarnacion, Paraguay] (Universidad Nacional de Itapúa (UNI).). Encarnación, Itapúa.
- Álvarez, S., & Pérez, L. (2007). Evaluación de la calidad de agua mediante la utilización de macroinvertebrados acuáticos en la subcuenca del Yeguaré, Honduras (Diciembre de 2007). Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.
- Álvarez-Arango, L. F., Arango-Jaramillo, M. C., & Roldán-Pérez, G. (2005). Diversidad de los macroinvertebrados dulce acuícolas en Colombia (FERNANDO GAST HARDERS). Universidad Nacional de Colombia.
- Andrade, F. H. (2016). Los desafíos de la agricultura (9874627700). International Plant Nutrition Institute.
- Aparicio, P. A. (s. f.). Supercomputación, imágenes satelitales y resiliencia: Al servicio de la sociedad. Buenas prácticas y casos de éxito en gestión de Información Geoespacial, 89.
- Aramendez Gallego, L. F., & Chinome Cifuentes, J. P. (2016). Guía ilustrada de campo para el estudio de insectos acuáticos: Una colecta que permite ver la vida. Universidad Pedagógica Nacional (UPN).
- Ariza, C. (2016). Determinación de la Calidad de Agua a través de la identificación de Macroinvertebrados Acuáticos en la microcuenca arroyo La Quebrada. *Scientific International Journal*, 13(2), 5-16.
- Armenteras, D., & Rodríguez Eraso, N. (2014). Forest deforestation dynamics and drivers in Latin America: A review since 1990. *Colombia Forestal*, 17(2), 233-246.
- Assessment, M. E. (2001). Millennium ecosystem assessment (Vol. 2). Millennium Ecosystem Assessment.
- Atencia, J. J. G., & Polo, M. M. L. (s. f.). CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LOS SUELOS AGRÍCOLAS DEL DISTRITO DE RIEGO DEL MUNICIPIO DE REPELÓN, ATLÁNTICO.
- Auquilla, R. C., Astorga, Y., & Jiménez Otárola, F. (2006). Influencia del uso del suelo en la calidad del agua en la subcuenca del río Jabonal, Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente Número 48* (2006 Agosto), páginas 81-92.
- Ávila, R., & Yurydia, C. (2024). La cultura ambiental como un derecho humano para la preservación de un desarrollo sustentable en México.
- Ávila-García, D., Morató, J., Pérez-Maussán, A. I., Santillán-Carvantes, P., Alvarado, J., & Comín, F. A. (2020). Impacts of alternative land-use policies on water ecosystem services in the Río Grande de Comitán-Lagos de Montebello watershed, Mexico. *Ecosystem Services*, 45, 101179.
- Azizullah, A., Khattak, M. N. K., Richter, P., & Häder, D.-P. (2011). Water pollution in Pakistan and its impact on public health—A review. *Environment international*, 37(2), 479-497.
- Aznar-Sánchez, J. A., Velasco-Muñoz, J. F., Belmonte-Ureña, L. J., & Manzano-Agugliaro, F. (2019). The worldwide research trends on water ecosystem services. *Ecological indicators*, 99, 310-323.
- Barba-Álvarez, R., De la Lanza-Espino, G., Contreras-Ramos, A., & González-Mora, I. (2013). Insectos acuáticos indicadores de calidad del agua en México: Casos de estudio, ríos Copalita, Zimatán y Coyula, Oaxaca. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 84(1), 381-383.
- Basan, K. L., Paniagua, K. C., Valero, R. M., & Duran, J. P. J. Q. (2017). Estudio de la teledetección y caracterización fisicoquímica del humedal “El Cascajo”, Santa Rosa, Chancay-Lima, Perú. *Infinitum...*, 7(1).

- Bejarano Suescun, J. C., & Poveda Gomez, J. D. (2023). Evaluación de la PTAP en la Inspección de Policía de Cambao del municipio de San Juan de Rioseco, Cundinamarca, Colombia.
- Bermudez Naranjo, V. (2024). Macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores de calidad de agua para la cuenca media alta del río Teusaca: Aproximaciones de ciencia participativa del uso del índice BMWP/COL.
- Bernal, A., & Sadhen, A. (2021). Fortalecimiento de capacidades técnico-administrativas en proyectos de manejo forestal en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (Modalidad a Distancia).
- Bhuiyan, M. A. H., Dampare, S. B., Islam, M., & Suzuki, S. (2015). Source apportionment and pollution evaluation of heavy metals in water and sediments of Buriganga River, Bangladesh, using multivariate analysis and pollution evaluation indices. *Environmental monitoring and assessment*, 187, 1-21.
- Bolaños-Alfaro, J. D., Cordero-Castro, G., & Segura-Araya, G. (2017). Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica). *Revista Tecnología en Marcha*, 30(4), 15-27.
- Briceño Avellaneda, N. (2021). Revisión sistemática de la familia de ácaros acuáticos Rhynchohydracaridae (Lundblad, 1936),(Hydrachnidia, Prostigmata).
- Buitrón Moreira, S. M. (2024). Evaluación del sistema para captación, conducción, almacenamiento y calidad de agua proveniente de un manantial de fondo en el barrio Praderas del Ilaló perteneciente a la parroquia La Merced, cantón Quito: Calidad del agua.
- Cajacuri, M. P., Rincón, N., Araujo, I., Behling, E., Colina, G., & Marín, J. C. (2013). Microbiological diversity of the anaerobic sludge during treatment of Venezuelan oilfield produced waters. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 14(3), 325-334.
- Cap-Net, Global Water Partnership (GWP) & European Union Water. (2008). Aspectos económicos en la gestión del agua. https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/sobregirh/manual-cap-net-marzo-2008esp.pdf.
- Carbajal-Domínguez, A., Manzo-Delgado, L. de L., Monzón-Alvarado, C. M., & Neger, C. (2024). Análisis multitemporal de las áreas quemadas en ecosistemas tropicales de Campeche, México: Causas meteorológicas y antrópicas. *Investigaciones geográficas*, 115.
- Carrasco Vela, D. L. (2019). Teledetección y calidad de agua: Una revisión de la literatura científica.
- Carrera Reyes, C., & Fierro Peralbo, K. (2001). Manual de monitoreo los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua (1.ª ed.). *EcoCiencia*.
- Chinchay Huarcaya, C. K. (2021). Evaluación de los niveles de contaminación del agua residual de la industria textil de la provincia de Chincha por efecto de los colorantes empleados en el proceso de teñido.
- Chuvieco, E. (1991). Fundamentos de teledetección espacial. *Estudios Geográficos*, 52(203), 371.
- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and psychological measurement*, 20(1), 37-46.
- Comité editorial del Gobierno del Estado de México. (2011). Atlas urbano de la cuenca hidrográfica del río Lerma. Gobierno del Estado de México: Vol. VII.
- CONAGUA. (2024). Situación de la Calidad del Agua en México. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Cordova Robles, J. J., & Peña Palma, K. A. (2023). Evaluación de parámetros fisicoquímicos y biológicos de las Aguas Residuales domésticas de los vertimientos al río Huallaga en la zona urbana de Huariaca de la Provincia y Región Pasco-2023.
- Correa de León, G. (2024). Presencia y cuantificación de disruptores endocrinos en el río Santa Catarina en la zona metropolitana de Monterrey: Estudio del transporte de contaminantes en la zona de conexión hidráulica de las aguas superficiales y subterráneas.
- Cotler, H. compilador/a. (2004). El manejo integral de cuencas en México estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. México Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología.

- Cruz-Mendoza, E. (2018). El trabajo de campo y la identificación de paisajes con potencial para el turismo en el volcán Nevado de Toluca, Estado de México. *Investigaciones geográficas*, 95, 0-0.
- Cuevas, L. M. G., Yamallel, J. I. Y., Rodríguez, L. G. C., Rodríguez, E. A., & Garza, E. J. T. (2024). Cambio de uso de suelo asociado al manejo forestal sustentable en áreas de conservación: Caso Nevado de Toluca. *Investigación y Ciencia: de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 92, 3.
- Daouda, K., Tidiani, K., Moussa, K. S., & Oury, D. M. (2024). Influence of Anthropogenic Activities on Surface Water Resources—Case of the Sub-Prefecture of Kamsar-Boké. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 12(8), 168-179.
- de Competitividad Urbana, Í. (2020). *Ciudades Resilientes*. México. Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO) AC.
- de La Federación, D. O. (1988). *Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente*. México, Distrito Federal, 28.
- DEBE, C. Y. T. A. Q., & SU, S. E. A. P. (1994). NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994," SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO-LÍMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION". INTRODUCCIÓN.
- Deknock, A., De Troyer, N., Houbraeken, M., Dominguez-Granda, L., Nolivos, I., Van Echelpoel, W., Forio, M. A. E., Spanoghe, P., & Goethals, P. (2019). Distribution of agricultural pesticides in the freshwater environment of the Guayas river basin (Ecuador). *Science of the Total Environment*, 646, 996-1008.
- Demir, B., Bovolo, F., & Bruzzone, L. (2012). Updating land-cover maps by classification of image time series: A novel change-detection-driven transfer learning approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(1), 300-312.
- Di Luzio, M., Srinivasan, R., & Arnold, J. G. (2004). A GIS-coupled hydrological model system for the watershed assessment of agricultural nonpoint and point sources of pollution. *Transactions in GIS*, 8(1), 113-136.
- DIARIO OFICIAL. (2022, marzo 11). SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES. Org.mx. https://paot.org.mx/centro/normas_a/2022/2022_03_11_MAT_semarnat.pdf
- Díaz-Pulido, A. P., Chingaté-Hernández, N., Muñoz-Moreno, D. P., Olaya-González, W. R., Perilla-Castro, C., Sánchez-Ojeda, F., & Sánchez-González, K. (2009). Desarrollo sostenible y el agua como derecho en Colombia. *Estudios socio-jurídicos*, 11(1), 84-116.
- Dirección de Ecología. (2009). H. Ayuntamiento Constitucional 2009-2012. http://www.almoloyadejuarez.gob.mx/html/Transparencia/Documentos_transparencia/Capitulo_15/Fraccion_IECOLOGIA_RIOLERMA.pdf
- Domínguez, E., & Fernández, H. R. (2009). *Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos*. Sistemática y biología (1.ª ed.). Fundación Miguel Lillo.
- Dunkle, S. W. (2000). *Dragonflies through binoculars: A field guide to dragonflies of North America*. Oxford University Press.
- Eguía-Lis, A., & Perla, E. (2007). Simposio Internacional Entomología Acuática Mexicana: Estado actual de conocimiento y aplicación.
- en España, L. B. del A. (2000). *Secretaría de Estado de Aguas y Costas junto a la Dirección General de Obras Hidráulicas y calidad de las Aguas del MMA*. Ministerio de Medio Ambiente.
- Escaname, J. C. R., Ortiz, M. A. H., & Ramírez, M. C. (s. f.). Integración de etnoturismo en las barrancas de Urique y Batopilas. Consejo Ecorregional Sierra Tarahumara AC. Esta obra se logró con el apoyo del Programa Integral de Fortalecimiento Institucional (PIFI), 67.
- Escoto-Moreno, J. A., González-Soriano, E., Escoto-Rocha, J., & Márquez, J. (2014). Riqueza y distribución de la familia Aeshnidae (Odonata: Anisoptera) en el estado de Aguascalientes, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 85(1), 209-217.

- Espinoza Morales, G. K., & Jimenez Melo, J. C. (2024). Validación experimental de dos modelos matemáticos para determinar la solubilidad de oxígeno en biorreactores a las condiciones atmosféricas de Huancayo.
- Espinoza, S. S., Escobar-Flores, J. G., & Ortiz, E. S. (2020). Inventario de cuerpos de agua de la Sierra Madre Occidental (México) usando SIG y percepción remota. *Investigaciones Geográficas*, 102, Article 102. <https://doi.org/10.14350/rig.59975>
- Fall, C. (2015). *Avances en ciencia del agua*. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Flores-Garnica, J. G., Flores-Rodríguez, A. G., Rivera-Leyva, R. R., Arellano-Martin, F., Ursúa-Guerrero, F. E., Ortiz-Moreno, F. Á. O., Guzmán-Escalante, O., & Gutierrez-Carbonell, D. (2022). Evaluación remota de la recuperación de la vegetación afectada por incendios forestales: Remote evaluation of the recovery of vegetation affected by forest fires. *e-CUCBA*, 19, 213-222.
- Gamboa, M., Reyes, R., & Arrivillaga, J. (2008). Macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores de salud ambiental. *Boletín de malariología y salud ambiental*, 48(2), 109-120.
- Garcés, M. V., Medina, J. A. C., & Revelo, Z. L. C. (2021). Determinación de bioindicadores y protocolos de la calidad de agua en el embalse de la Central Hidroeléctrica Baba. *Dominio de las Ciencias*, 3(3), 628-646.
- García, M., Miranda, R., & Fajardo, H. (2014). Manual de manejo de la fertilidad de suelo bajo riego deficitario para el cultivo de la quinua en el altiplano boliviano. Available at Web site http://www.cazalac.org/mwar_lac/fileadmin/documents/CaribbeanDroughtAtlas/quinua.pdf (verified 5 January 2016).
- García-Berthou, E., Almeida, D., Benejam, L., Magellan, K., Bae, M.-J., Casals, F., & Merciai, R. (2015). Impacto ecológico de los peces continentales introducidos en la península ibérica. *Ecosistemas*, 24(1), 36-42.
- García-Gutiérrez, C., & Rodríguez-Meza, G. D. (2012). Problemática y riesgo ambiental por el uso de plaguicidas en Sinaloa. *Ra Ximhai*, 8(3), 1-10.
- Gayo Febrero, M., de la Riva Fernández, J., & Andrés Visús, V. (s. f.). Caracterización de la vegetación en el geo-parque Montañas de Courel mediante LiDAR e imágenes Sentinel-2.
- Giraldo, R. (2016). Estudio de firmas espectrales de palmas de aceite afectadas con la Marchitez letal, usando análisis estadísticos de datos funcionales. *Palmas*, 37, 131-139.
- Gonzales-Zuarth, C., Vallerino, A., Pérez, J., & Low, A. (2014). Bioindicadores: Guardianes de nuestro futuro ambiente. Recuperado de <https://agua.org.mx/biblioteca/bioindicadoresguardianes-nuestro-ambiental>.
- GPS. (s. f.). What is GPS? link unavailable
- Guamán Guaño, S. T. (2021). Estudio multitemporal de la cobertura boscosa del cantón Chambo de la provincia de Chimborazo a través de imágenes satelitales "Landsat 8".
- Guataquira Rincón, J. L. (2023). Consideraciones para el cálculo del Índice de Riesgo de Calidad del Agua según las tendencias actuales sanitarias y epidemiológicas.
- Gutiérrez Martínez, G., Orozco Hernández, M. E., Ordóñez Díaz, J. A. B., & Camacho Sanabria, J. M. (2015). Régimen y distribución de los incendios forestales en el Estado de México (2000 a 2011). *Revista mexicana de ciencias forestales*, 6(29), 92-107.
- Guzmán Flores, L. F. (2018). Evaluación ambiental y socioeconómica del uso de digestores anaerobios en la comunidad de Miahuatlán, Ver.
- Guzmán-Castro, V., Razo-Zárate, R., Vázquez-Cuevas, G. M., & Hernández-Juárez, M. (2022). Factores que condicionan la empleabilidad de las plantas en fitorremediación. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(19), 42-49.
- Hernández Ramos, E. M. (2023). Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN): Nexo energía-agua-alimentación.
- Hernández-Cavazos, M. C., Sandoval-García, R., Molina-Guerra, V. M., & Alanís-Rodríguez, E. (2023). Multi-temporal analysis of land use change in the municipality of linares, Nuevo León. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 10(2).

- Hesping, M. (2020). Remote sensing-based land cover classification and change detection using Sentinel-2 data and Random Forest: A case study of Rusinga Island, Kenya.
- Holt, E., & Miller, S. (2010). Bioindicators: Using organisms to measure environmental impacts. *Nature Education Knowledge* 3 (10): 8.
- Hou, D., O'Connor, D., Igalavithana, A. D., Alessi, D. S., Luo, J., Tsang, D. C., Sparks, D. L., Yamauchi, Y., Rinklebe, J., & Ok, Y. S. (2020). Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(7), 366-381.
- Huang, C., Goward, S. N., Schleeeweis, K., Thomas, N., Masek, J. G., & Zhu, Z. (2009). Dynamics of national forests assessed using the Landsat record: Case studies in eastern United States. *Remote sensing of Environment*, 113(7), 1430-1442.
- Hussain, M., Chen, D., Cheng, A., Wei, H., & Stanley, D. (2013). Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 80, 91-106.
- INEGI. (2016). Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa 2016 (2016.^a ed.). ISBN.
- INEGI. (2020). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/interactivos/?pxq=Migracion_Migracion_01_426da5e7-766a-42a9-baef-5768cde4fca9&idrt=130&opc=t
- INEGI. (2023). Información Geográfica, Medio Ambiente, Ordenamiento Territorial y Urbano. <https://www.inegi.org.mx/programas/usyv/>
- Instituto Mexiquense de la Pirotecnia (IMEPI). (2022). Descripción de cohetes pirotécnicos. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/269973/4_MATERIAS_PRIMAS_RAM_N.pdf
- Intelsat. (s. f.). What We Do. link unavailable
- IPBES. (2019). Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Service. Debating Nature's Value. <https://www.biodiversidad.gob.mx/planeta/internacional/ipbes.html>
- Jaramillo Coronel, L. J., Mancheno Herrera, A. C., Guzmán Guaraca, A. C., & Mollocana Lara, J. G. (2025). Análisis y predicción del cambio de uso y cobertura de suelo en el Corredor de Conectividad Llanganates-Sangay para 2030. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 41(1), 11-32.
- Jin, S., Bluemling, B., & Mol, A. P. (2015). Information, trust and pesticide overuse: Interactions between retailers and cotton farmers in China. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences*, 72(1), 23-32.
- Jumbo, L. D. J., Ramírez, B. J. A., Pastuna, M. A. A., & Cordova, Á. L. J. R. (2024). Relación empírica entre sólidos disueltos totales y conductividad eléctrica en las piscinas de cultivo piscícola del Centro Experimental de Investigación y Producción Amazónica de la Universidad Estatal Amazónica. *Technology Rain Journal*, 3(1).
- Klemas, V., & Pieterse, A. (2015). Using remote sensing to map and monitor water resources in arid and semiarid regions. *Advances in watershed science and assessment*, 33-60.
- Koetse, M. J., Renes, G., Ruijs, A., & de Zeeuw, A. J. (2018). Relative price increase for nature and ecosystem services in cost-benefit analysis. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague, Netherlands.
- Kombo Mpindou, G. O. M. (2015). Estudio experimental de la eliminación de nitratos mediante nanofiltración: Aplicación a la determinación de modelos de transporte.
- Labrador, M., Évora, J., & Arbelo, M. (2012). Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio. La Laguna, Spain.
- Landeros-Sánchez, C., Moreno-Seceña, J. C., Gavrillov, L. N., Egorova, O. B., & Angón, C. (2011). Impacto de la agricultura sobre la biodiversidad. *La biodiversidad en Veracruz: estudio de Estado* (Cruz Angón, A., ed.). Comisión Nacional para el Conocimiento de la Biodiversidad, Gobierno del Estado de Veracruz, Universidad Veracruzana, Instituto de Ecología, AC Ciudad de México, México, 477-491.
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *biometrics*, 159-174.

- Leaño Sanabria, J. J., & Pérez Barriga, D. (2020). Determinación de la Calidad del Agua mediante el índice BMWP/BOL (bioindicadores ecológicos) del Río Trancas, Municipio de Entre Ríos-Tarija. *Acta Nova*, 9(4), 567-591.
- Ledesma, C., Bonansea, M., Rodríguez, C., & Delgado, Á. R. S. (2013). Calidad del agua en el embalse Río Tercero (Argentina) utilizando sistemas de información geográfica y modelos lineales de regresión. *Revista Ambiente & Água*, 8, 67-76.
- Li, L., Zheng, B., & Liu, L. (2010). Biomonitoring and bioindicators used for river ecosystems: Definitions, approaches and trends. *Procedia environmental sciences*, 2, 1510-1524.
- Llamas-Covarrubias, B. (2019). La Agenda 2030 para el desarrollo sostenible, sus avances y retos en México. *Comisión Estatal de Derechos Humanos Jalisco*, 11, 108-123.
- Maes, J., Teller, A., Erhard, M., Liqueste, C., Braat, L., Berry, P., Egoh, B., Puydarrieux, P., Fiorina, C., & Santos, F. (2013). Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services. An analytical framework for ecosystem assessments under action, 5, 1-58.
- Magallán, D. (2010, abril 21). Presa de Almoloya en riesgo de desastre ecológico. *Agua.org.mx*. <https://agua.org.mx/presa-de-almoloya-en-riesgo-de-desastre-ecologico/>
- Mahmoud, E. K., & Ghoneim, A. M. (2016). Effect of polluted water on soil and plant contamination by heavy metals in El-Mahla El-Kobra, Egypt. *Solid Earth*, 7(2), 703-711.
- Martínez, L. I. M., Rodríguez, E. R., & Reyes, R. R. (2025). Uso de macroinvertebrados acuáticos para evaluar el grado de contaminación de una laguna tabasqueña. 271-286.
- Martínez-Retureta, R., Aguayo, M., Stehr, A., Sauvage, S., Echeverría, C., & Sánchez-Pérez, J.-M. (2020). Effect of land use/cover change on the hydrological response of a southern center basin of Chile. *Water*, 12(1), 302.
- Master Planning, S.A. de C.V. (2016). Atlas de Riesgos del Municipio de Almoloya de Juárez. https://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/2016/AR_ALMOLOYA_DE_JUAREZ_MEX_2016.pdf
- Maya Monar, K. R. (2018). Análisis de la cáscara de cacao como filtro en el tratamiento de aguas residuales provenientes de las industrias de lácteos Salinerito de la ciudad de Guaranda.
- Méndez Londoño, J. C., Cárdenas Molina, J. S., & Martínez Castro, E. S. (2024). Sistema de monitoreo y control para la calidad del agua para la aplicación en cultivos de invernadero (turbidez, temperatura, conductividad eléctrica y nivel de agua).
- Meza Castro, T. S. (2023). Comportamiento de la calidad de agua del efluente y afluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Santa Ana de Tusi, en la reutilización con fines de riego.
- Ministerio de Sanidad. (2023, enero 11). Real Decreto 3/2023. BOE núm. 9.
- Montejano-Escamilla, J. A., Caudillo-Cos, C. A., Ávila-Jiménez, F. G., Tapia-McClung, R., & Barrera-Alarcón, I. G. (2023). Expansión y crecimiento urbanos en México, 1975-2020. *Región y sociedad*, 35.
- Morales, H. S. (2012). Geografía económica. México: Red tercer milenio.
- Morales, N. B. (2017). Teledetección espacial Landsat, Sentinel2, Aster L1T y MODIS. Universidad Nacional Agraria de la Selva, Facultad de Recursos Naturales Renovables, Escuela Profesional de Ingeniería Forestal.
- Moriarty, K., Kim, K., & Bender, J. (2006). Estrogen receptor-mediated rapid signaling. *Endocrinology*, 147(12), 5557-5563.
- Müller-Esterl, W. (2019). Bioquímica. Fundamentos para medicina y ciencias de la vida. Reverte.
- Muñoz, D. M. (2005). Sistema de tratamiento de aguas residuales de matadero: Para una población menor 2000 habitantes. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial: BSAA*, 3(1), 87-98.
- Murrell, J. A. L., Alvarez, B. R., Moya, D. L. M. L., & Badía, M. M. R. (2022). Diseño e implementación de un monitoreo de calidad de las aguas: Revisión de la literatura y el Río Almendares como caso de estudio. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, 53(2), 148-159.

- Nájera González, A., Carrillo González, F. M., Morales Hernández, J. C., & Nájera González, O. (2021). Cambio de cobertura y uso de suelo en la llanura costera asociados a procesos antropogénicos: Caso San Blas, Nayarit. *Madera y bosques*, 27(1).
- NASA. (s. f.). Satellites. link unavailable
- NEGI. (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010. Almoloya de Juárez, México.
- Neri Guzmán, J. C., & Medina Ortega, M. A. (2019). Cultivos alternativos como un mecanismo para el desarrollo de zonas áridas. El caso de la jojoba en el Altiplano potosino. *Realidad, datos y espacio. Revista internacional de estadística y geografía*, 10(1), 44-63.
- NMX-AA-030/1-SCFI-2012. (s. f.). NORMA MEXICANA.
- NOAA. (s. f.). Satellites. link unavailable
- Oelbermann, M., Morgan, S., & Echarte, L. (2022). Elevated carbon dioxide and temperature effects on soil properties from sole crops and intercrops. *Soil Use and Management*, 38(1), 435-447.
- Onyango, D. O., & Opiyo, S. B. (s. f.). *Watershed Ecology and the Environment*.
- Osorio Montor, T. G. (s. f.). Evaluación de la calidad del agua de la subcuenca del Río Temascaltepec, mediante el uso de indicadores biológicos.
- Pérez Hernández, J. C. (2024). Ecología de macroinvertebrados acuáticos en la cuenca alta del Río Actopan, Veracruz: Influencia de los parámetros fisicoquímicos del agua y uso del suelo.
- Pérez Ortega, M. (2011). Aplicaciones de la teledetección y SIG en la caracterización de humedales en la reserva de la biosfera de la mancha húmeda.
- Pérez Zarate, A., & Pichardo Rasso, D. A. (s. f.). Propuesta de un Método para la Evaluación de la Calidad Ambiental en Cuerpos de Agua Lenticos, Caso Toluca, Estado de México.
- Pineda, R., Mathuriau, C., Pérez, R., Villalobos, J. L., Barba, R., Bernal, T., Barba, E., & Salinas, S. (2014). Protocolo de muestreo de macroinvertebrados en aguas continentales para la aplicación de la Norma de Caudal Ecológico (NMX-AA-159 SCFI-2012).
- Plaza Agredo, S., & Romero Jaramillo, D. P. (2021). Estrategia participativa para la evaluación de los servicios ecosistémicos, la gestión y rehabilitación de ecosistemas riparios: Una experiencia en el magdalena medio santandereano.
- POEL. (2010). Programa de Ordenamiento Ecológico y Territorial Almoloya de Juárez. ALMOLOYA DE JUAREZ.pdf
- Programa de protección civil para basureros. (2021). Basureros. <https://cgproteccioncivil.edomex.gob.mx/sites/cgproteccioncivil.edomex.gob.mx/files/files/programa%20de%20Prevencion/Programas%20pdf/programas%202018/BASUREROS.pdf>
- QGIS Development Team, A. (2019). QGIS geographic information system. Open source geospatial foundation project, 504-507.
- Ramírez, S. A., González, W. A. R., Rivera, D. S. C., Londoño, Á. M. J., & Fernández, D. J. M. (2019). Determinación de la calidad del agua del río Frío (Cundinamarca, Colombia) a partir de macroinvertebrados bentónicos. *Avances Investigación en Ingeniería*, 16(1), 49-65.
- Ramos, N. R., Angulo, P. J., Flores, P. C. R., & París, M. G. (2023). Problemas nomenclaturales causados por la designación de las especies tipo en Gammaridae (Amphipoda). *Animal Biodiversity and Conservation*, 46(2), 173-176.
- Robles Gonzalez, I., Reyna Velarde, R., Guerrero Barajas, C., Robles González, V., & Ordaz, A. (2017). La quema masiva de pirotecnia: Un espectáculo que contamina. *Revista bio ciencias (Nayarit, Méx.)*, 4(5), 1-18.
- Rodríguez-Contreras, F. E., Martínez Rivera, L. M., & Flores-Silva, A. (2024). Procesos participativos para el biomonitorio ambiental comunitario en las cuencas Cuitzmala y Purificación, México. *Entreciencias: diálogos en la sociedad del conocimiento*, 12(26).

- Rodríguez-Téllez, E., Domínguez-Calleros, P. A., Pompa-García, M., Quirozarratía, J. A., & Pérez López, M. E. (2012). Quality of the riparian forest of El Tunal River, Durango, Mexico; through the application of the QBR index.
- Rogan, J., & Chen, D. (2004). Remote sensing technology for mapping and monitoring land-cover and land-use change. *Progress in planning*, 61(4), 301-325.
- Roldán Pérez, G., & Ramírez Restrepo, J. J. (2022). *Fundamentos de limnología neotropical* (3.ª ed.). Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN).
- Roldán-Pérez, G. (2016). Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: Cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(155), 254-274.
- Rosendo Chávez, A., Herrera Tapia, F., Vizcarra Bordi, I., & Baca Tavira, N. (2019). Desarrollo territorial rural: Agricultura y migración en el sur del Estado de México. *Economía, sociedad y territorio*, 19(59), 1243-1274.
- Ruiz-Picos, R., Kohlmann, B., Sedeño-Díaz, J., & López-López, E. (2017). Assessing ecological impairments in Neotropical rivers of Mexico: Calibration and validation of the Biomonitoring Working Party Index. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14, 1835-1852.
- Salmon, B. P., Kleynhans, W., Van den Bergh, F., Olivier, J. C., Grobler, T. L., & Wessels, K. J. (2013). Land cover change detection using the internal covariance matrix of the extended Kalman filter over multiple spectral bands. *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 6(3), 1079-1085.
- Sánchez Heras, P. (2025). Análisis e interpretación de la firma espectral de diversas variedades de cítricos cultivadas en España.
- Sandoval-García, R., Jiménez-Pérez, J., Yerena-Yamallel, J. I., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., & Gómez-Meza, M. V. (2021). Multitemporal analysis of land use and vegetation in the Cumbres de Monterrey National Park. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 12(66), 70-95.
- Santillán-Fernández, A., Salinas-Moreno, Y., Valdez-Lazalde, J. R., Carmona-Arellano, M. A., Vera-López, J. E., & Pereira-Lorenzo, S. (2021). Relationship between maize seed productivity in Mexico between 1983 and 2018 with the adoption of genetically modified maize and the resilience of local races. *Agriculture*, 11(8), 737.
- Schorr, M., & Paulson, D. (2012). *World Odonata List*. University of Puget Sound.
- Secretaría de Agricultura, G., Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2014). *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Tecnificación. Uso de tecnología y servicios en el campo*. Archivo de matrices tabulares con la estadística de uso tecnología y de servicios en el campo.
- SEDATU. (2024). *Versión Extensa del Programa de Ordenamiento Territorial de la Región Sur-Sureste*. https://www.dof.gob.mx/2024/SEDATU/_version_extensa_del_Programa_de_Ordenamiento_Territorial_de_la_Region_Sur_Sureste.pdf
- SEGOB. (2013). *Secretaría de Gobernación. Diario Oficial de la Federación*. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=688874yfecha=15/10/2003.
- SEMARNAP. (1998a, septiembre 21). *Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca* (1998).
- SEMARNAP, D. O. de la F. (1998b). *NOM-002-SEMARNAT-1996. NOM-002-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal*.
- SEMARNAT. (2022, marzo 11). *Límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación*. *Diario Oficial de la Federación*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022
- SEMARNAT-CONAGUA. (2018). *Atlas del Agua en México*. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/AAM2018.pdf>
- Signorini, M. (2007). Evaluación de riesgos de los rastros y mataderos municipales. *Nacameh*, 1(1), 118-141.

- SIGSA. (2022). SIGSA. <https://www.sigsa.info/es-mx/what-is-gis/overview>
- Springer, M. (2010). Capítulo 3: Biomonitorio acuático. *Revista de biología tropical*, 58, 53-59.
- Statista Research Department. (2024). México: Superficie de territorio forestal 1990-2021. <https://es.statista.com/estadisticas/1212130/superficie-territorio-forestal-mexico/>
- Su, S., Li, D., Zhang, Q., Xiao, R., Huang, F., & Wu, J. (2011). Temporal trend and source apportionment of water pollution in different functional zones of Qiantang River, China. *Water research*, 45(4), 1781-1795.
- Suárez Albarracín, N. L. (s. f.). Estimación de áreas afectadas por incendios en la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental De Bogotá. Usando imágenes satelitales Sentinel-2, basado en objetos geográficos (GEOBIA).
- Swistock, B. (2021). Interpretación de los análisis del agua de riego. PennState Extension.
- TEEB. (2010). Research and academia (2010). The Economics of Ecosystems and Biodiversity. <https://teebweb.org/publications/teeb-for/research-and-academia/>
- Temis-García, L. (2021). Propuesta de evaluación hidromorfológica en manantiales de la subcuenca del río Magdalena, Ciudad de México: Una aproximación basada en datos ecológicos, usos y aprovechamientos locales.
- Theau, J. (2006). Detection of changes using remote sensing: An Overview of principles and applications. Geo-Spatial and Range Sciences Conference, Idaho State University, Pocatello, ID, USA.
- Tripathi, M., & Singal, S. K. (2019). Use of principal component analysis for parameter selection for development of a novel water quality index: A case study of river Ganga India. *Ecological indicators*, 96, 430-436.
- USGS. (2008). Landsat. link unavailable
- Vázquez, G., Castro, G., González, I., Pérez, R., & Castro, T. (2006). Bioindicadores como herramientas para determinar la calidad del agua. *ContactoS*, 60(4), 41-48.
- VAZQUEZ GONZALEZ, A. (2025). SISTEMA DE CAPTACION DE AGUA PLUVIAL Y APROVECHAMIENTO.
- Vázquez-Gómez, A. G., & Mercado, I. E. (s. f.). V. Evaluación del estado poblacional de *Kinosternon oaxacae* en la Costa de Oaxaca. en un sistema lagunar en la Reserva de la Biosfera Selva el Ocote, Chiapas, México, 71.
- Velázquez-Chávez, L. de J., Ortiz-Sánchez, I. A., Chávez-Simental, J. A., Pámanes-Carrasco, G. A., Carrillo-Parra, A., & Pereda-Solís, M. E. (2022). Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola nacional e internacional. *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 25.
- Velázquez-Velázquez, E., & Vega Cendejas, M. (2004). Los peces como indicadores del estado de salud de los ecosistemas acuáticos. *CONABIO. Biodiversitas*, 57, 12-15.
- Vera, F., Toro, F., & Mashini, D. (s. f.). Lo Metropolitano.
- Vera Medina, J. A. (2022). Evaluación de la eficacia de la planta de tratamiento de agua potable Cariongo de la ciudad de Pamplona por medio de una comparación entre parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de los afluentes que la abastecen y el agua tratada.
- Villacís Galarza, E. I. (2024). Calidad del agua y su influencia en la eficacia de productos pesticidas.
- Warner, T. A., Campagna, D. J., & Sangermano, F. (2021). Remote Sensing with TerrSet 2020/IDRISI (A Beginner's Guide).
- White, C. M. (2019). A review of human studies assessing cannabidiol's (CBD) therapeutic actions and potential. *The Journal of Clinical Pharmacology*, 59(7), 923-934.
- Willis, K. S. (2015). Remote sensing change detection for ecological monitoring in United States protected areas. *Biological Conservation*, 182, 233-242.
- Wong, F., Alegria, H. A., & Bidleman, T. F. (2024). Organochlorine pesticides in soils of Mexico and the potential for soil-air exchange. *Environmental Pollution*, 158(3), 749-755.

Zhuang, Q., Li, G., & Liu, Z. (2018). Distribution, source and pollution level of heavy metals in river sediments from South China. *Catena*, 170, 386-396.

Zuñiga Molina, M. M. (2024). Reducción de la demanda química de oxígeno (DQO) aplicando el proceso fenton en las aguas residuales del Camal Municipal de Calca-Cusco.

12 Anexos

Tabla 22. Identificación del cuerpo de agua.

Nombre del cuerpo de agua		
Coordenadas y Ubicación		
Tipo de propiedad (comunal, ejidal o pequeña comunidad)		
Vida acuática y sus características		
Medidas de conservación		
Croquis (señalando las fuentes y rutas posibles de contaminación del agua superficial, así como los principales contaminantes)		
Parámetros fisicoquímicos	pH	
	Temperatura	
	Conductividad eléctrica	
	Oxígeno disuelto	
	Sólidos disueltos totales	
	Nitratos	
	Fosfatos	
	DQO	

Tabla 23. Determinar el índice BMWP/Méx

Hoja de cálculo para determinar el índice BMWP/Méx

Localidad: _____
 Cuenca: _____
 Río: _____
 Sitio: _____
 Responsable: _____

Familia	Puntuación	Familia	Puntuación

Índice BMWP/Méx (puntuación): _____

Nivel de calidad	BMWP	Color
Aguas de calidad excelente	> 120	Azul
Aguas de calidad buena, no contaminadas o no alteradas de manera sensible	101 - 120	Azul
Aguas de calidad regular, eutrofia	61 - 100	Verde
Aguas de calidad mala, contaminada	36 - 60	Amarillo
Aguas de calidad mala, muy contaminada	16 - 35	Naranja
Aguas de calidad muy mala, extremadamente contaminada	< 15	Rojo

Observaciones: _____

Tabla 24. Cuerpos de agua superficial reportados por CONABIO.

Id_Ct	Km ²	Municipio	Estado	Nombre_Rh	Resp	LATITUD	LONGITUD
815005002	7.468	Almoloya De Juárez	México	Lerma Santiago	Conagua	19.44932723	-99.80025516
815005008	0.203	Almoloya De Juárez	México	Lerma Santiago	No Registradas	19.4128512	-99.8351694
815005009	0.044	Almoloya De Juárez	México	Lerma Santiago	Conagua	19.41434647	-99.76016263
815005014	0.224	Almoloya De Juárez	México	Lerma Santiago	No Registradas	19.43793744	-99.80399726
815005022	0.058	Almoloya De Juárez	México	Lerma Santiago	No Registradas	19.36696993	-99.8520523
815005023	0.042	Almoloya De Juárez	México	Lerma Santiago	No Registradas	19.3864803	-99.83730913
815005024	0.104	Almoloya De Juárez	México	Lerma Santiago	No Registradas	19.38151994	-99.82861339
815005025	0.061	Almoloya De Juárez	México	Lerma Santiago	No Registradas	19.39191927	-99.83238733
815005026	0.059	Almoloya De Juárez	México	Lerma Santiago	No Registradas	19.39905759	-99.82661125
815005027	0.040	Almoloya De Juárez	México	Lerma Santiago	No Registradas	19.42234231	-99.83415074
815005029	0.042	Almoloya De Juárez	México	Lerma Santiago	No Registradas	19.42486313	-99.82506525
815005033	0.036	Almoloya De Juárez	México	Lerma Santiago	Conagua	19.33876194	-99.763391
815005034	0.035	Almoloya De Juárez	México	Lerma Santiago	No Registradas	19.41148561	-99.78583444
815005035	0.133	Almoloya De Juárez	México	Lerma Santiago	No Registradas	19.41389703	-99.81418115
815005037	0.057	Almoloya De Juárez	México	Lerma Santiago	Conagua	19.44742833	-99.75932455
815005043	0.074	Almoloya De Juárez	México	Lerma Santiago	Conagua	19.39199194	-99.73862793

Id_Ct	Km ²	Municipio	Estado	Nombre_Rh	Resp	LATITUD	LONGITUD
815005044	0.289	Almolya De Juárez	México	Lerma Santiago	Conagua	19.38264016	-99.73700545
815005045	0.065	Almolya De Juárez	México	Lerma Santiago	Conagua	19.37607245	-99.73478325
815005046	0.065	Almolya De Juárez	México	Lerma Santiago	No Registradas	19.3730642	-99.74591428
815005047	0.056	Almolya De Juárez	México	Lerma Rh:Santiago	No Registradas	19.39177366	-99.74679091
815005012	0.054	Almolya De Juárez	México	Lerma Santiago	No Registradas	19.33231477	-99.87178142

Tabla 25. Cuerpos de agua superficial reportados por INEGI.

Geográfico	Nombre	Condición	Código	Cali_repr	Carta	Identifica	Objectid
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398045261	258122
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398045281	258123
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398045301	258124
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398045321	258125
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398045341	258126
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398045401	258129
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398045621	258140
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398045861	258152
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398045881	258153
Cuerpo De Agua	Sánchez	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398045921	258155
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398045941	258156
Cuerpo De Agua	El Ancón	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398045961	258157
Cuerpo De Agua	San Cristobal	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398045981	258158
Cuerpo De Agua	San Ramón	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398046001	258159
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398046021	258160
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398046041	258161
Cuerpo De Agua	San Pedro	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398046401	258179
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398046421	258180
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398046441	258181
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398046461	258182

Geográfico	Nombre	Condición	Código	Cali_repr	Carta	Identifica	Objectid
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398046481	258183
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398046501	258184
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398046521	258185
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398046541	258186
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398046561	258187
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398046581	258188
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398046601	258189
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398046621	258190
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398046641	258191
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398046661	258192
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398046701	258194
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398046721	258195
Cuerpo De Agua	Bellavista	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047021	258210
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047081	258213
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047101	258214
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047121	258215
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047141	258216
Cuerpo De Agua	Rancho	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047221	258220
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047241	258221
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047301	258224

Geográfico	Nombre	Condición	Código	Cali_repr	Carta	Identifica	Objectid
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047321	258225
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047341	258226
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047361	258227
Cuerpo De Agua	La Cruz	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047381	258228
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047401	258229
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047421	258230
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047441	258231
Cuerpo De Agua	Santa Bárbara	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047521	258235
Cuerpo De Agua	El Durazno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047541	258236
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047561	258237
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047581	258238
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047601	258239
Cuerpo De Agua	San Cristóbal	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047681	258243
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047701	258244
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047941	258256
Cuerpo De Agua	La Estrella	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047961	258257
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047981	258258
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398048001	258259
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398048021	258260
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398048041	258261

Geográfico	Nombre	Condición	Código	Cali_repr	Carta	Identifica	Objectid
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398048101	258264
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398048121	258265
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398048141	258266
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398048161	258267
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398048181	258268
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398049341	258326
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398049361	258327
Cuerpo De Agua	La Vaquita	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398049481	258333
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398049501	258334
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398049521	258335
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398049541	258336
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398049681	258343
Cuerpo De Agua	San Luis	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398049701	258344
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398049721	258345
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398049741	258346
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398049761	258347
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398049781	258348
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398049801	258349
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398049821	258350
Cuerpo De Agua	La Tinaja	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398049841	258351

Geográfico	Nombre	Condición	Código	Cali_repr	Carta	Identifica	Objectid
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398049861	258352
Cuerpo De Agua	Cieneguillas	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398049881	258353
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050121	258365
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050141	258366
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050161	258367
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050181	258368
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050201	258369
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050221	258370
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050241	258371
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050261	258372
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050281	258373
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050321	258375
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050341	258376
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050361	258377
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050381	258378
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050401	258379
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050421	258380
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050441	258381
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050461	258382
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050481	258383

Geográfico	Nombre	Condición	Código	Cali_repr	Carta	Identifica	Objectid
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050501	258384
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050521	258385
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050541	258386
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050561	258387
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050581	258388
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050601	258389
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050621	258390
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050641	258391
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050801	258399
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398050821	258400
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051201	258419
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051221	258420
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051241	258421
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051261	258422
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051281	258423
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051301	258424
Cuerpo De Agua	La Manzana	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051321	258425
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051341	258426
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051361	258427
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051381	258428

Geográfico	Nombre	Condición	Código	Cali_repr	Carta	Identifica	Objectid
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051401	258429
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051421	258430
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051441	258431
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051461	258432
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051481	258433
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051501	258434
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051521	258435
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051541	258436
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051561	258437
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051601	258439
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051621	258440
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051641	258441
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051661	258442
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051681	258443
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051701	258444
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051721	258445
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051741	258446
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051761	258447
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051801	258449
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051981	258458

Geográfico	Nombre	Condición	Código	Cali_repr	Carta	Identifica	Objectid
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398052021	258460
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398052461	258482
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398052481	258483
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398052501	258484
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398052521	258485
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398052541	258486
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398052561	258487
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398052581	258488
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398052601	258489
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398052741	258496
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398052901	258504
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398053341	258526
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398053461	258532
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398053641	258541
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398053661	258542
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398053741	258546
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398053761	258547
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398053781	258548
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398053801	258549
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398053821	258550

Geográfico	Nombre	Condición	Código	Cali_repr	Carta	Identifica	Objectid
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398053841	258551
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398053861	258552
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398053881	258553
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398053901	258554
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398053921	258555
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398053941	258556
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398054001	258559
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398054021	258560
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398054041	258561
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398054061	258562
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398054081	258563
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398054101	258564
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398054121	258565
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398054141	258566
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398054161	258567
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398054181	258568
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398054201	258569
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398054221	258570
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398054581	258588
Cuerpo De Agua	El Regatón	Perenne	6292	Definida	E14A37	398054941	258606

Geográfico	Nombre	Condición	Código	Cali_repr	Carta	Identifica	Objectid
Cuerpo De Agua	San Luis	Perenne	6292	Definida	E14A37	398055001	258609
Cuerpo De Agua	Benito Juárez	Perenne	6292	Definida	E14A37	398055201	258619
Cuerpo De Agua	Progreso	Perenne	6292	Definida	E14A37	398055221	258620
Cuerpo De Agua	Los Tules	Perenne	6292	Definida	E14A37	398055421	258630
Cuerpo De Agua	San Ignacio	Perenne	6292	Definida	E14A37	398055441	258631
Cuerpo De Agua	San Antonio	Perenne	6292	Definida	E14A37	398055461	258632
Cuerpo De Agua	San Isidro	Perenne	6292	Definida	E14A37	398055641	258641
Cuerpo De Agua	San Antonio	Perenne	6292	Definida	E14A37	398056041	258661
Cuerpo De Agua	Ninguno	Perenne	6292	Definida	E14A37	398056141	258666
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398056281	258673
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398056421	258680
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398056481	258683
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398056581	258688
Cuerpo De Agua	Ninguno	Perenne	6292	Definida	E14A37	398056601	258689
Cuerpo De Agua	Ignacio Ramírez	Perenne	6292	Definida	E14A37	398056621	258690
Cuerpo De Agua	San Nicolás	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398047161	258217
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051781	258448
Cuerpo De Agua	Ninguno	Intermitente	6291	Definida	E14A37	398051881	258453