

DESARROLLO DE UNA PLATAFORMA DIGITAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DE SITIOS POTENCIALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN LA CUENCA DEL ALTO LERMA, ESTADO DE MÉXICO

Elaborado por:

López Calderón Ariana
Martínez Peña María Isabel
Saavedra Gallardo Emilio

Asesores:

Asesora: Dra. Citlalli Aidee Becerril Tinoco
Asesoría Técnica: Mtro. Amilcar Morales Gamas

ÍNDICE

Introducción.....	5
Antecedentes.....	7
Planteamiento del problema.....	10
Justificación.....	12
Objetivo general.....	16
Objetivos específicos.....	16
Alcances.....	17
Modelo Conceptual.....	18
Modelo de Conocimiento.....	18
Aspectos Físicos.....	19
Edafología.....	19
Geología.....	21
Fallas y fracturas.....	23
Uso de suelo.....	23
Clima.....	24
Hidrología.....	24
Aspectos sociales.....	25
Composición Demográfica.....	25
Estructura Económica.....	27
Aspectos Políticos.....	28
Modelo Geográfico.....	29
Modelo de Computacional.....	30
Solución Colaborativa.....	31
Metodología.....	31
Pendiente.....	32
Uso de suelo.....	33
Geología.....	34
Fallas.....	34
Edafología.....	35
Cuerpos de agua y ríos.....	35
Pozos.....	36
Asentamientos.....	36
Vías de comunicación.....	37
Cuerpos de agua, ríos y ANP federales y estatales.....	37
Resultados.....	40
Colinealidad.....	40
Ponderación y jerarquización.....	42

Estandarización	47
Desarrollo de la Plataforma Digital	57
Inicio	57
Sitios potenciales	59
Acerca de	67
Metodología	69
Contacto	70
Conclusiones	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2020).....	19
Figura 2. Edafología de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2007 a, b, c, d). 21	
Figura 3. Geología de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia con base en SGM (1997, 1998, 1999 y 2002).	22
Figura 4. Uso de suelo de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2018)	24
Figura 5. Hidrografía de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2010).....	25
Figura 6. Densidad de población de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2020).	27
Figura 7. Modelo Geográfico. Fuente: Elaboración propia.	29
Figura 8. Modelo computacional. Fuente: Elaboración propia.	30
Figura 9. Diagrama de flujo de la metodología utilizada. Fuente: Elaboración propia.	40
Figura 10. Coeficientes de correlación, histogramas y diagramas de dispersión de cada par de criterios.	41
Figura 11. Jerarquía de criterios para el proceso de Análisis Multicriterio. Elaboración propia a partir de INEGI.	46
Figura 12. Esquema de criterios estandarizados: a) pendiente; b) uso de suelo; c) geología; d) fallas; e) edafología; f) red hidrológica y cuerpos de agua; g) pozos; h) asentamientos humanos; i) vías de comunicación. Fuente: Elaboración propia	53
Figura 13. Mapa de sitios potenciales para la colocación de PTARsD. Fuente: Elaboración propia.	55
Figura 14. Página principal de la plataforma digital. Fuente: Elaboración propia.	58
Figura 15. Sección de tarjetas en la página principal de la plataforma digital. Fuente: Elaboración propia.	58
Figura 16. Sección Sitios Potenciales de la Plataforma digital. Fuente: Elaboración propia.	60
Figura 17. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (1). Fuente: Elaboración propia.....	60
Figura 18. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (2). Fuente: Elaboración propia.....	61
Figura 19. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (3). Fuente: Elaboración propia.....	62
Figura 20. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (4). Fuente: Elaboración propia.....	62
Figura 21. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (5). Fuente: Elaboración propia.....	63
Figura 22. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (6). Fuente: Elaboración propia.....	63
Figura 23. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (7). Fuente: Elaboración propia.....	64
Figura 24. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (8). Fuente: Elaboración propia.....	64

Figura 25. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (9). Fuente: Elaboración propia.....	65
Figura 26. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (10). Fuente: Elaboración propia.....	65
Figura 27. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (11). Fuente: Elaboración propia.....	66
Figura 28. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (12). Fuente: Elaboración propia.....	66
Figura 29. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (13). Fuente: Elaboración propia.....	67
Figura 30. Sección Acerca de en la Plataforma digital. Fuente: Elaboración propia.....	69
Figura 31. Sección Metodología de la Plataforma digital. Fuente: Elaboración propia.....	69
Figura 32. Sección Contacto de la Plataforma digital. Fuente: Elaboración propia.....	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Porcentajes de tipo de suelo en el territorio de la cuenca. Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2007a, b, c y d).....	20
Tabla 2. Porcentajes de tipo de rocas en el territorio de la cuenca. Fuente: Elaboración propia a partir de SGM (1997, 1998, 1999 y 2002).....	22
Tabla 3. Porcentajes de tipo de uso de suelo en el territorio de la cuenca. Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2018).....	23
Tabla 4. Población de cada municipio que integra la zona de estudio. Elaboración propia con base en INEGI (2020).....	26
Tabla 5. Matriz pareada de criterios. Elaboración propia.....	43
Tabla 6. Ponderación e inconsistencia de la Matriz pareada de criterios. Elaboración propia.....	43
Tabla 7. Matriz pareada de pendientes. Fuente: Elaboración propia.....	47
Tabla 8. Inconsistencia y ponderación de los atributos del criterio Pendientes. Fuente: Elaboración propia.....	48
Tabla 9. Matriz pareada de usos de suelo. Fuente: Elaboración propia.....	48
Tabla 10. Inconsistencia y ponderación de los atributos del criterio Usos de Suelo. Fuente: Elaboración propia.....	49
Tabla 11. Matriz pareada de Geología. Fuente: Elaboración propia.....	49
Tabla 12. Inconsistencia y ponderación de los atributos del criterio Geología. Fuente: Elaboración propia.....	50
Tabla 13. Matriz pareada de rangos de distancia a fallas. Fuente: Elaboración propia.....	50
Tabla 14. Inconsistencia y ponderación de los atributos del criterio Fallas. Fuente: Elaboración propia.....	50
Tabla 15. Matriz pareada de Edafología de acuerdo con la textura del suelo. Fuente: Elaboración propia.....	50
Tabla 16. Inconsistencia y ponderación de los atributos del criterio Edafología. Fuente: Elaboración propia.....	51
Tabla 17. Matriz pareada de rangos de distancia a cuerpos de agua y ríos. Fuente: Elaboración propia.....	51
Tabla 18. Inconsistencia y ponderación de los atributos del criterio Cuerpos de agua y red hidrológica. Fuente: Elaboración propia.....	51
Tabla 19. Matriz pareada de rangos de distancia a pozos. Fuente: Elaboración propia.....	51
Tabla 20. Inconsistencia y ponderación de los atributos del criterio Rangos de distancia a pozos. Fuente: Elaboración propia.....	52
Tabla 21. Matriz pareada de rangos de distancia a asentamientos. Fuente: Elaboración propia.....	52
Tabla 22. Inconsistencia y ponderación de los atributos del criterio Rangos de distancia a asentamientos. Fuente: Elaboración propia.....	52

Tabla 23. Matriz pareada de rangos de distancia a vías de comunicación. Fuente: Elaboración propia. 52

Tabla 24. Inconsistencia y ponderación de los atributos del criterio Rangos de distancia a vías de comunicación. Fuente: Elaboración propia. 52

Tabla 25. Porcentajes de aptitud territorial en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia..... 56

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Valores de ponderación de los criterios. Elaboración propia..... 44

DESARROLLO DE UNA PLATAFORMA DIGITAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DE SITIOS POTENCIALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN LA CUENCA DEL ALTO LERMA, ESTADO DE MÉXICO

INTRODUCCIÓN

La gestión adecuada del agua es fundamental para el desarrollo sostenible de las sociedades, un derecho reconocido internacionalmente por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 2010 y posteriormente incorporado a la Constitución Mexicana en 2012 (ONU, 2010). A pesar de estos avances legislativos, México enfrenta desafíos considerables en la gestión y protección de este recurso.

La contaminación del agua, en particular, representa una amenaza significativa para la salud de los ecosistemas y la biodiversidad, así como para el acceso humano al agua potable. Este desafío se hace evidente en regiones clave como la cuenca del río Lerma, una de las más importantes del país, donde la rápida urbanización e industrialización ha exacerbado la problemática de las aguas residuales sin tratar.

La construcción de macroplantas de tratamiento de aguas residuales ha sido una respuesta a la crisis ambiental. Sin embargo, su eficacia y sostenibilidad han sido objeto de debate. Ejemplos como la planta Reciclagua (2006) ilustran tanto los esfuerzos por abordar la contaminación como las preocupaciones sobre su efectividad y transparencia operativa, según reportes del Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental A.C (2009).

En este contexto, diversas propuestas han surgido en la última década, incluidas la instalación de múltiples Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de menor escala a lo largo de una cuenca. Estas PTAR ayudan a reducir la carga contaminante en diferentes puntos estratégicos antes de que las aguas lleguen a cuerpos receptores o, en algunos casos, a macroplantas, proporcionando un tratamiento más eficiente y descentralizado (Anda Sánchez, 2017; Díaz-Cuenca et al., 2012).

Este enfoque descentralizado no solo busca mejorar la eficiencia del tratamiento, sino también reducir los impactos negativos sobre el medio ambiente y la salud pública local, como señalan expertos como de Anda Sánchez (2017).

Sin embargo, la implementación efectiva de estas soluciones requiere un enfoque integral que considere no solo la ubicación óptima de las plantas de tratamiento, sino también su

capacidad para satisfacer las demandas de la población local y proteger el recurso hídrico de manera sostenible. En este sentido, este proyecto se propone abordar esta compleja problemática mediante un análisis espacial del territorio y técnicas de evaluación multicriterio, con el objetivo de identificar las zonas más adecuadas para la instalación de PTAR que garanticen un manejo eficiente y sostenible de las aguas residuales domésticas en la región.

Para entender la importancia y los detalles específicos de este proyecto, es esencial revisar varios aspectos clave que se abordarán a lo largo de este documento, los cuales abarcan desde el contexto histórico y las bases teóricas hasta la justificación y los objetivos específicos del estudio. La sección de **Antecedentes** ofrece una visión general de los esfuerzos realizados a nivel internacional con relación al proceso de identificación de sitios potenciales para la colocación de PTARs. Posteriormente, en el **Planteamiento del problema** se define la situación específica que se aborda, seguida por la **Justificación** que destaca la relevancia del proyecto. Después, los **Objetivos** proporcionan una guía clara sobre las metas del estudio, divididos en **Objetivo general** y **Objetivos específicos**, mientras que los **Alcances** determinan los límites del proyecto. A continuación, se encuentra, la sección del **Modelo conceptual**, que incluye el **Modelo de conocimiento**, **Modelo geográfico** y **Modelo computacional**, que expone las herramientas y teorías aplicadas. Por otro lado, la **Metodología** detalla el enfoque práctico utilizado para alcanzar los objetivos, seguido de los **Resultados**, que presentan los hallazgos del análisis. Enseguida, la sección del **Desarrollo de plataforma digital** explica la creación de una herramienta de visualización para los resultados. Finalmente, se encuentran las **Conclusiones**, que resumen las implicaciones y sugerencias derivadas del estudio.

ANTECEDENTES

La identificación de sitios potenciales para la colocación de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas (PTARsD), es un proceso complejo que requiere de múltiples factores ambientales, sociales y económicos. En este contexto, el análisis multicriterio (AMC) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se presentan como herramientas complementarias que permiten integrar y evaluar diversas variables de manera simultánea.

El AMC facilita la toma de decisiones al ponderar criterios según su relevancia y compatibilidad, mientras que los SIG proporcionan una plataforma para la gestión y análisis espacial de datos geográficos. Juntas, estas metodologías permiten una aproximación integral y sistemática para identificar ubicaciones óptimas, garantizando que las plantas de tratamiento se sitúen en áreas que maximicen la eficiencia operativa y minimicen los impactos ambientales y sociales negativos (Awawdeh et al., 2023).

Existe una variedad de trabajos realizados alrededor del mundo que utilizan estos enfoques para la identificación de sitios óptimos para la colocación de diferentes tipos de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTARs). Tal es el caso de Gemitzi et.al., quienes utilizan los Sistemas de Información Geográfica para determinar sitios aptos para la colocación de Lagunas de Estabilización en la región de Tracia en Grecia; para ello utilizaron criterios como topografía, uso de suelo y la distancia a los ríos principales para determinar la viabilidad de un sitio para la colocación de PTARs (Gemitzi et al., 2007).

Zhao, et.al., (2009), publican un artículo donde utilizan los SIG como una tecnología capaz de optimizar el proceso de identificación de sitios para colocar PTARs mediante la integración de criterios económicos, sociales y ambientales para la evaluación de sitios potenciales en el distrito de Nansha, en la ciudad de Guangzhou, China; en este caso, se utilizaron diez criterios y quince índices que construyen una evaluación sostenible e integral de la zona de estudio para la identificación de sitios potenciales para la colocación de PTARs (Zhao et al., 2009).

En el año 2012, Deepa K. y Krishnaveni M., publican un artículo donde muestran el proceso seguido para la selección de sitios potenciales para la colocación de PTARs descentralizadas, haciendo uso del análisis multicriterio y los SIG como herramienta para lograr la identificación de sitios; en este caso hacen uso de seis mapas temáticos (densidad

de población, uso de suelo, pendientes, edafología, mapa de costos y tecnologías), correspondientes a la ciudad de Chennai y mediante la aplicación del Proceso de Análisis Jerárquico realizan una matriz de comparación pareada que serviría más adelante para obtener los pesos que utilizan para ponderar los puntajes de los mapas temáticos, y finalmente hacen uso de los SIGs para llevar a cabo los procesos que les permitieron identificar los sitios potenciales para la colocación de PTARs en la zona de estudio (Deepa & Krishnaveni, 2012).

Dadić T, y otros autores, publican en 2014 un artículo donde se describe la aplicación de los SIG en el manejo de aguas residuales, detallando sus características principales, así como el sistema de recolección de aguas residuales y las razones para su uso en el análisis y modelado de sistemas de drenaje, se mencionan dos programas basados en tecnología SIG para el análisis y monitoreo de sistemas de aguas residuales; destaca la capacidad de los SIG para la selección de ubicaciones de plantas de tratamiento de aguas residuales y riego con agua tratada, resaltando su utilidad en combinación con análisis multicriterio y su contribución al manejo de aguas residuales (Dadić et al., 2014).

Por otra parte, Rashed Hama y otros autores (2019) publican un estudio realizado en Sulaimania, Iraq, el cual se centró en identificar sitios para la colocación de PTARs descentralizadas, lo anterior, utilizando un modelo SIG y Analytic Hierarchy Process (AHP) por sus siglas en inglés, en el cual evaluaron criterios como el tamaño del área, distancia a áreas verdes, densidad de población y otros factores a considerar para la colocación de estas instalaciones. Aplicaron restricciones de distancia a edificios y alcantarillado principal, y mediante algoritmos de combinación ponderada, identificaron 30 ubicaciones óptimas para estas unidades de tratamiento (Rashed Hama et al., 2019).

En el mismo año, Agrawal R. y otros autores, publican un estudio basado en la aplicación de SIG y AHP para la identificación de sitios sustentables para la colocación de PTARs en el distrito de Sultanpur, India; para ello utilizan los siguientes criterios: uso de suelo, edafología, pendientes, redes de transporte, drenaje, inundaciones y geología de la zona de estudio, con la finalidad de aplicar un proceso de AHP y Análisis multicriterio que les permitió realizar ponderaciones de cada criterio para su procesamiento en un SIG, de manera que evaluaron la viabilidad de seis sitios candidatos para la colocación de PTARs, obteniendo el más apto para la construcción de la instalación (Agrawal et al., 2019).

En el año 2021, Peñacoba-Antona y otros autores publican un artículo donde describen el uso de la evaluación multicriterio para la identificación de sitios óptimos para la colocación de humedales artificiales (METland), en zonas oceánicas y del mediterráneo; para ello hacen uso de factores ambientales (aspectos meteorológicos) y socioeconómicos (uso de suelo, distancia a ríos, distancia a centros de población, pendientes) para llevar a cabo el análisis multicriterio y un Análisis de sensibilidad global para la identificación de sitios potenciales (Peñacoba-Antona et al., 2021).

Estos antecedentes reúnen algunos de los principales estudios actuales en materia de PTARs y las variables que consideraron, proporcionando una base sólida para la identificación de sitios óptimos. Con este contexto, se presenta a continuación el problema específico que hemos identificado y el correspondiente planteamiento.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Región Hidrológica 12, también conocida como la Cuenca del Lerma-Santiago, se localiza en el centro-oeste de México y abarca partes de los estados de México, Querétaro, Guanajuato, Michoacán y Jalisco. Debido a su importancia estratégica, fue designada y administrada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en 1995. Esta región es un área geográfica prioritaria para el país, debido a los servicios ecosistémicos que provee, así como por los asentamientos humanos y la capacidad productiva de la región (CAEM, 2023; CONAGUA, 2022).

Funciona como área de recarga del manto acuífero que abastece de agua al Valle de Toluca y la Ciudad de México; además, en la región se encuentran diferentes zonas agrícolas e industriales que se han convertido en un punto de referencia para el comercio, la distribución de materias primas y manufacturadas, debido al desarrollo de la región (principalmente el desarrollo urbano e industrial), se han detectado problemas ambientales como la contaminación del agua, que al ser uno de los elementos más importantes para el desarrollo de la dinámica territorial en la zona de estudio (Peña Manjarrez, et al., 2000).

En este contexto, López-Hernández, et.al., (2007), realizan un análisis multicriterio para evaluar la contaminación del agua en dos secciones de la cuenca, mencionan que la parte más alta de la cuenca, es decir, el área ubicada en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca se encuentra impactada por desechos industriales, urbanos y agrícolas, lo cual afecta las condiciones del agua de la cuenca.

Se sabe que la región enfrenta una crisis ambiental debido a la contaminación del agua superficial y subterránea, por lo cual, en el año 2018 la Comisión Nacional del Agua publicó un estudio donde analiza la calidad del agua para el periodo 2012-2018, y a partir de los 840 sitios muestreados concluyen que la mayoría de los sitios analizados no cumplen con los estándares de calidad del agua determinados en la NOM-001 (SEMARNAT, CONAGUA, 2018).

Por otra parte, Pérez-Díaz, et.al., realizaron un estudio para la identificación de algunas sustancias en el agua del Río Lerma, en este estudio mencionan que con base en el Índice de Calidad del Agua (ICA), el río Lerma presenta 3 condiciones de calidad: altamente contaminado, poco contaminado y aceptable, por lo que recomiendan el agua superficial

para su uso en la agricultura; sin embargo, también mencionan que debido a las descargas de aguas residuales, el agua del lugar representa un foco de infección para la salud humana y la toxicidad del ambiente (Pérez-Díaz, et al., 2019).

Estos antecedentes reúnen algunos de los principales estudios en materia de PTARs y las variables que consideraron, proporcionando una base sólida para la identificación de sitios óptimos. Con este contexto, la siguiente sección justifica la importancia de este estudio como una posibilidad para mejorar la calidad del agua de la región.

JUSTIFICACIÓN

En el año 2010, la ONU reconoce el acceso al agua potable y el saneamiento como un derecho esencial para el desarrollo de la vida mediante la Resolución 64/292 de la Asamblea General de las Naciones Unidas (ONU, 2010).

A nivel nacional, México reconoce el derecho humano al agua en el año 2012 en el artículo 4ª Constitucional, donde se establece que toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico, sin embargo, la nación enfrenta desafíos significativos en la gestión del agua, por lo cual las leyes y regulaciones federales como la Ley de Aguas Nacionales y la Ley General de Salud establecen directrices para la protección y uso sostenible del recurso hídrico. A nivel estatal y municipal, las regulaciones específicas complementan la legislación federal y abordan las necesidades locales (PROFEPA, 2016; Secretaría de la Salud, 2015).

Desde una perspectiva ambiental, la contaminación del agua representa un riesgo directo para la salud de los ecosistemas, debido a la presencia de aguas residuales sin tratamiento (UNAM y CNDH, 2018). En este contexto, representa una crisis ambiental, dado que este tipo de contaminación no solo compromete la disponibilidad de agua potable para consumo humano, sino que también tiene graves consecuencias para los ecosistemas acuáticos y la biodiversidad (SEMARNAT, 2015).

La cuenca Lerma-Chapala-Santiago cuenta con una extensión territorial de 58,725 km² y abarca un porcentaje del territorio del Estado de México, Michoacán, Querétaro, Guanajuato, Jalisco, Aguascalientes, Zacatecas, Durango y Nayarit, se considera una de las más importantes del país; del total de la superficie mencionada 5,354 km² se encuentran en el Estado de México, en la región denominada Curso Alto del Río Lerma, cubriendo 34 municipios del Estado, incluyendo al valle de Toluca (Gobierno del Estado de México , 2011).

Esta zona es caracterizada por un acelerado crecimiento urbano e industrial lo cual ha incrementado la cantidad de aguas residuales vertidas a los cauces de la cuenca, y hasta el año 2000 se contaba con 108 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de origen industrial, siendo algunas de ellas macroplantas como Reciclagua, Toluca-Norte y

Toluca oriente, con un gasto total de operación de 2470 L/s para dar tratamiento a las aguas residuales generadas por las zonas industriales y asentamientos urbanos.

La construcción de macroplantas de tratamiento de aguas residuales ha sido una medida adoptada por las autoridades gubernamentales y las entidades responsables del manejo de recursos hídricos durante las últimas décadas para dar respuesta al problema de la contaminación del agua en la región. Uno de los ejemplos más conocidos es la planta de Reciclagua, cuyo objetivo principal es dar servicio de tratamiento de aguas residuales al corredor Toluca-Lerma mediante técnicas de lodos activados y microorganismos aerobios en tres fases (Gobierno del Estado de México, 2023).

Sin embargo, en 2009, el Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental A.C., publicó un artículo donde se menciona que la Comisión Nacional del Agua detectó descargas de aguas contaminadas en afluentes y entre los que más contaminan se encuentra el agua proveniente de la planta Reciclagua.

En años más recientes, el periódico El Sol de Toluca publicó en 2021 un artículo donde se menciona que Reciclagua ha recibido críticas y denuncias por la presencia de metales pesados en el agua vertida, mencionando que a pesar del tiempo que lleva operando, la empresa no ha emitido información específica sobre su operación y los beneficios que ofrece, incrementando la crítica social dadas las condiciones de la zona a la que presta servicio.

En la última década, se ha producido un mayor número de propuestas por parte de gobiernos locales y entidades ambientales para el tratamiento de aguas residuales. Una de ellas consiste en la colocación de múltiples PTAR de menor tamaño a lo largo de una cuenca que permitan el tratamiento de las aguas residuales antes de que estas lleguen a una macroplanta, de manera que se pueda reducir la cantidad de contaminantes que se vierten al cauce principal (Addis, 2021; Agrawal, Srivastava, & Nigam, 2019).

Estas propuestas incluyen sistemas descentralizados de tratamiento que permiten una gestión más eficiente y sostenible de las aguas residuales en áreas rurales y semiurbanas. Por ejemplo, Addis (2021) propone el uso de análisis multicriterio en plataformas SIG para seleccionar sitios óptimos para plantas de tratamiento en Bahir Dar, Etiopía, mientras que

Agrawal et al. (2019) aplican el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) para identificar ubicaciones adecuadas en Sultanpur, India.

Estas iniciativas están generalmente enfocadas en el tratamiento de aguas residuales domésticas generadas por localidades rurales o apartadas del entorno urbano (dispersas), dado que las macroplantas suelen encontrarse en grandes zonas urbanizadas. Díaz-Cuenca et al. (2012) nombran al tratamiento de aguas residuales por medio de macroplantas una tecnología “convencional”, enfatizando que el uso de este tipo de plantas resulta en costos elevados de operación y energía.

Mencionan que existen técnicas alternativas que consisten en brindar tratamiento a las aguas residuales domésticas generadas por asentamientos humanos dispersos, mediante la colocación de un sistema pequeño que brinde el servicio de saneamiento a comunidades alejadas de las zonas urbanas (Díaz-Cuenca et al., 2012).

Por otra parte, de Anda Sánchez (2017), aborda el tema de la centralización del saneamiento de agua en México, mencionando que las grandes PTAR instaladas en las zonas urbanizadas del país han sido la solución al problema de la contaminación del agua para grandes ciudades; sin embargo, sus costos de operación aumentan y los daños que infringen a los asentamientos humanos cercanos en caso de una falla son catastróficos, mientras que los sistemas de tratamiento de aguas residuales descentralizados o redes comunitarias operan en una escala más pequeña, reduciendo los efectos sobre el medio ambiente y la salud pública local al tratarse de sistemas de tratamiento in situ para pequeñas comunidades, que no requieren un presupuesto elevado para sobrellevar sus costos de operación.

Los estudios con respecto a la ubicación de dichas plantas pequeñas suelen realizarse de forma puntual para un sitio determinado, por lo que es necesario contar con herramientas que permitan analizar cualquier punto del territorio para la toma de decisiones.

Debido a lo anterior, este proyecto busca abordar esta problemática mediante un enfoque integral que combine análisis espacial del territorio con técnicas de evaluación multicriterio, el cual es clave para integrar factores ambientales, técnicos, sociales y económicos, esenciales en la implementación de soluciones descentralizadas. Este método ha probado su eficacia en estudios anteriores, como los de Rashed et al. (2019) y Addis (2021),

facilitando la elección de ubicaciones que equilibran seguridad sanitaria y beneficios de reutilización del agua, mientras optimizan costos y recursos para garantizar la viabilidad y efectividad a largo plazo de las plantas propuestas.

La identificación de sitios potenciales para el tratamiento de aguas residuales se basará en una comprensión detallada de las condiciones físicas y demográficas de la región de estudio que, analizados desde la perspectiva de capacidad de carga, garantizará que los sitios de tratamiento sean dimensionados de manera adecuada para satisfacer las demandas de la población local y proteger el recurso hídrico; con base en registros existentes de PTARs y la configuración territorial de la zona de estudio.

Estas propuestas e investigaciones sobre la ubicación y funcionamiento de PTARs subrayan la necesidad de un enfoque integral y sistemático para abordar la problemática de la contaminación del agua. En este contexto, para el presente proyecto se fijaron los siguientes objetivos.

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una plataforma digital que funcione como una herramienta integral para identificar y seleccionar sitios estratégicos para la instalación de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas en el Curso Alto del Río Lerma, Estado de México. Esta plataforma se basará en un análisis multicriterio que integrará información física y demográfica, con el fin de agilizar y optimizar el proceso de selección de sitios, contribuyendo a la mitigación de la contaminación del agua en la zona de estudio.

Objetivos específicos

- Caracterizar las condiciones del curso alto del Río Lerma, Estado de México, que influyen en la contaminación del agua, mediante el análisis de datos espaciales obtenidos de INEGI y el Servicio Geológico Mexicano correspondientes a parámetros biofísicos y demográficos mediante el uso de ArcMap y QGIS.
- Desarrollar un análisis multicriterio utilizando los softwares SuperDecisions y ArcMap para asignar pesos a las variables técnicas, ambientales y socioeconómicas, con el fin de identificar y priorizar los sitios más apropiados para la ubicación de sitios para el tratamiento de aguas residuales domésticas en la Cuenca del Alto Lerma, Estado de México.
- Implementar una plataforma digital que integre los resultados del análisis multicriterio, permitiendo la visualización interactiva y la comparación de las ubicaciones potenciales para las plantas de tratamiento, esta plataforma será dirigida a usuarios como personal de gobierno, académicos y particulares interesados en la materia.

ALCANCES

Se utilizarán datos del último censo de población y vivienda realizado por INEGI (2020) para abordar las características demográficas de la región.

Si bien lo ideal sería contar con información generada en el periodo de análisis sobre la geología, edafología e hidrología de la región, se utilizará la información más reciente disponible en el Servicio Geológico Mexicano e INEGI dado que estas variables no se actualizan constantemente.

Productos finales:

- **Plataforma Digital:**

Una plataforma en línea desarrollada para visualizar y manipular datos geoespaciales y demográficos del Curso Alto del Río Lerma, facilitando la identificación de sitios potenciales para la colocación de plantas de tratamiento de aguas residuales. Este portal permitirá a los usuarios interactuar con los datos y obtener información detallada sobre cada ubicación potencial.

- **Mapas Temáticos:**

Conjunto de mapas generados a través de QGIS y R que mostrarán la distribución de variables biofísicas y demográficas clave dentro del área de estudio.

- **Manual de Usuario de la Plataforma Digital:**

Un documento digital que proporcionará instrucciones sobre cómo navegar y utilizar la Plataforma Digital.

- **Documento final:**

Un documento que hablará sobre el proceso para la identificación de sitios potenciales para la colocación de PTARs.

MODELO CONCEPTUAL

Modelo de Conocimiento

La Cuenca Alta del Río Lerma se sitúa en la región occidental del Estado de México, extendiéndose desde el nacimiento del río hasta los límites con el estado de Michoacán. Esta área es crucial tanto desde un punto de vista natural como administrativo, su rango de altitud se encuentra entre los 2300 a los 4600 msnm. A nivel geográfico, la cuenca se extiende a lo largo de 5,354 km², siguiendo una orientación predominante de noroeste a sureste (Secretaría de Educación del Gobierno del Estado de México, 2011).

Desde la perspectiva político-administrativa, la cuenca está compuesta por 45 municipios, de los cuales 12 (Amanalco, Chapa de Mota, Huixquilucan, Isidro Fabela, Jilotzingo, Naucalpan de Juárez, Nicolás Romero, Ocuilán, Temascaltepec, Timilpan, Villa del Carbón y Villa Victoria) forman parte de la cuenca con menos del 20% de su territorio.

A lo largo de esta sección se presentarán varios mapas de elaboración propia que muestran las características físicas y socioeconómicas de la zona de estudio. Estos mapas son fundamentales para entender la distribución espacial de diversos parámetros relevantes para el análisis de la cuenca del Alto Lerma.

La primera figura muestra la ubicación de la zona de estudio, destacando los límites de la cuenca, la red hidrográfica y los municipios que la conforman (ver Figura 1). En las figuras subsiguientes se detallarán aspectos específicos como la geología, el uso del suelo, la distribución de la población y otros elementos cruciales para el entendimiento integral de la cuenca.

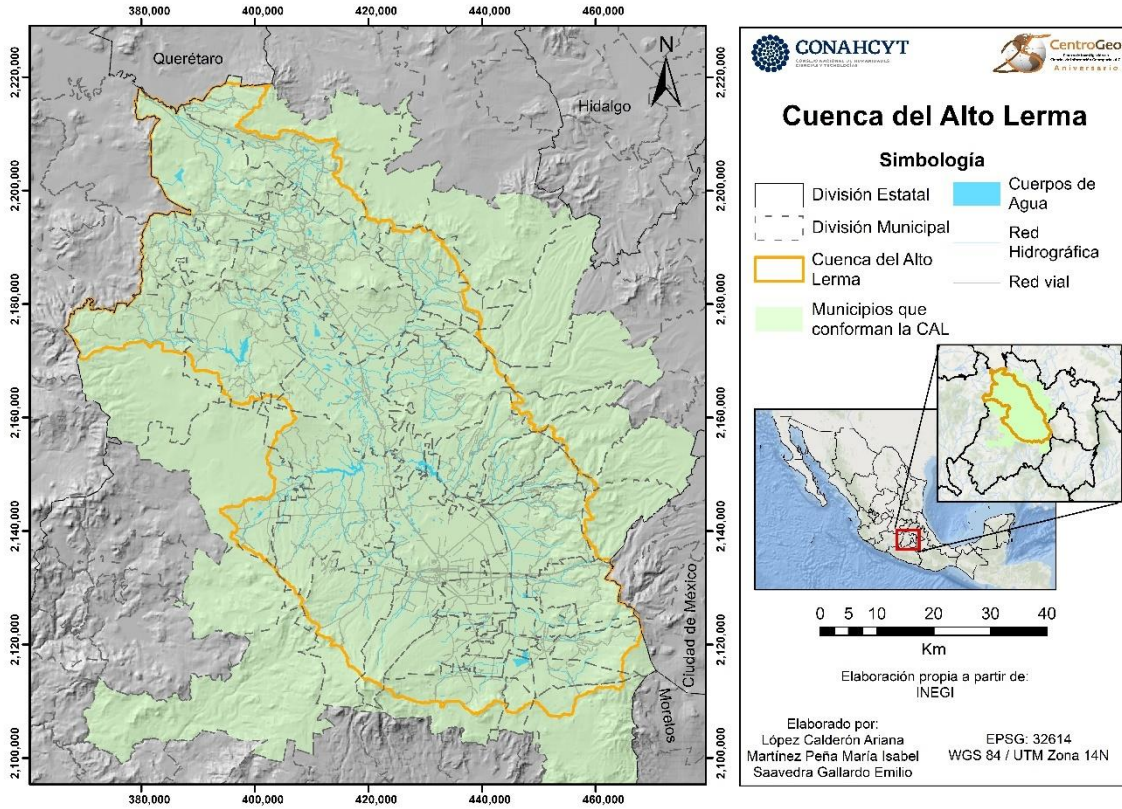


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2020).

Para entender mejor las dinámicas socioespaciales también es importante conocer los aspectos físicos del territorio. A continuación, se presentarán estas características, incluyendo edafología, geología, hidrología, entre otros, junto con el respectivo mapa para cada una. Estos elementos proporcionan un contexto necesario para comprender las condiciones naturales que afectan la cuenca y su gestión ambiental.

Aspectos Físicos

Edafología

Los tipos de suelo predominantes son los andosoles, que, a pesar de su bajo potencial para la producción agrícola, ocupan la mayor extensión. Le siguen los phaeozems y vertisoles, que son ricos en materia orgánica y nutrientes (Figura 2 y Tabla 1).

En las áreas lacustres y palustres, como las ciénegas del río Lerma, los suelos dominantes incluyen gleysoles húmicos y histosoles eútricos, que presentan hidromorfismo debido a la presencia superficial de aguas freáticas, así como vertisoles pélicos y phaeozems háplicos.

Aunque en menor medida, también se encuentran luvisoles, caracterizados por su alta concentración de arcillas, típicos de los depósitos aluviales.

Otros suelos presentes en la cuenca incluyen leptosoles, que son someros y pedregosos en áreas de lomeríos y zonas montañosas, junto con durisoles, cambisoles, regosoles, arenosoles, planosoles y fluvisoles, que completan la diversidad de suelos en esta importante región hidrológica (INEGI, 2007 a, b, c y d).

Tipo de suelo	% en la cuenca	Tipo de Suelo	% en la cuenca
Andosol	40.01%	Histosol	0.23%
Arenosol	0.26%	Leptosol	2.65%
Asentamientos Humanos	1.48%	Luvisol	8.26%
Cambisol	0.98%	Phaeozem	21.58%
Cuerpos de Agua	0.65%	Planosol	9.74%
Durisol	2.13%	Regosol	0.17%
Fluvisol	0.67%	Ubrisol	0.23%
Gleysol	0.32%	Vertisol	10.62%

Tabla 1. Porcentajes de tipo de suelo en el territorio de la cuenca. Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2007a, b, c y d).

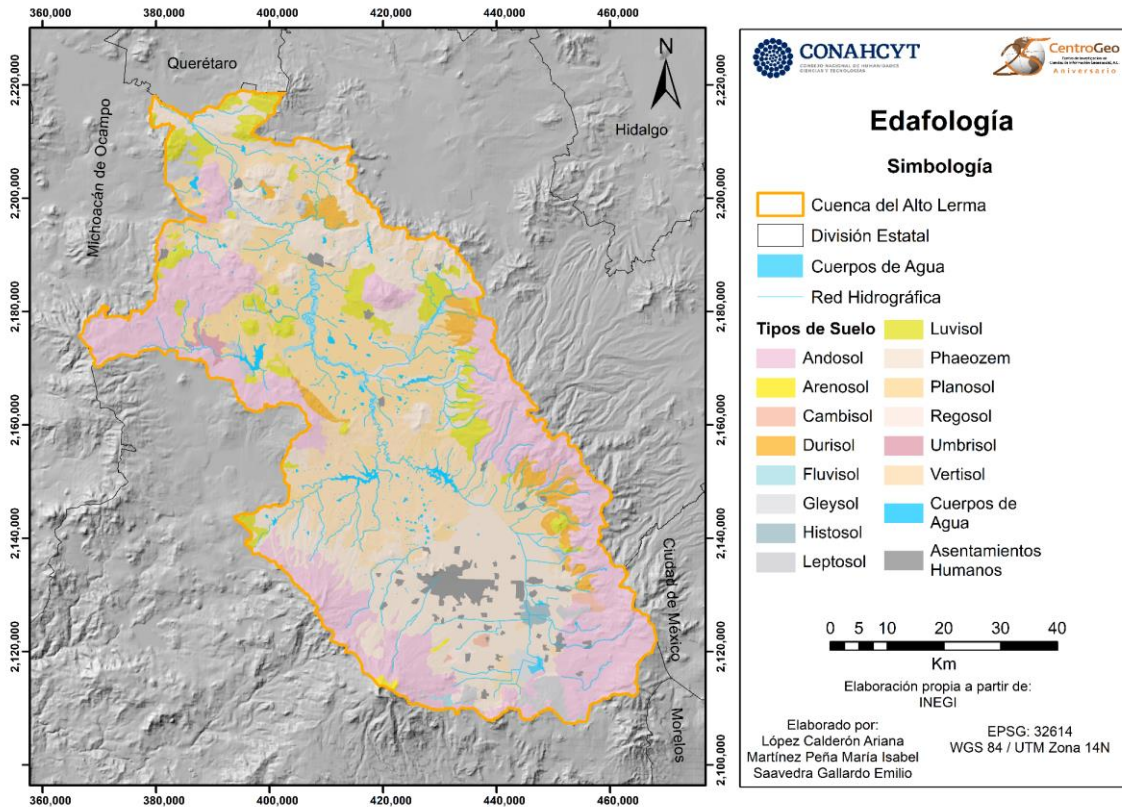


Figura 2. Edafología de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2007 a, b, c, d).

Geología

Las litologías predominantes dentro del área de estudio, de acuerdo con el SGM (1997, 1998, 1999 y 2002), corresponden a depósitos lacustres, lahar-toba andesítica y depósitos aluviales (Figura 3 y Tabla 2). Los depósitos lacustres y aluviales consisten principalmente en gravas, arenas, cenizas y arcillas con espesores variables, mientras que el lahar-toba andesítica pertenecen a las formaciones Tlayecac, Zinacantepec, Zempoala, al campo volcánico Sierra Chichinautzin y el Nevado de Toluca, dentro del Eje Neovolcánico, con edades comprendidas entre el Plioceno y Pleistoceno (SGM, 2002).

Otro tipo de rocas comunes son los basaltos, andesitas, ignimbritas y riolitas, que son rocas volcánicas resultantes de erupciones y flujos piroclásticos. Las edades de estas litologías varían desde el Mioceno hasta el Reciente y pertenecen a distintos campos volcánicos como Sierra de Chichinautzin, Nevado de Toluca, Sierra Las Cruces, Guadalupe-Sierra La Muerta, Humeros-Acoaculco, entre otros SGM (1997, 1998, 1999 y 2002).

En general, la mayor parte del área de estudio consiste en rocas ígneas volcánicas, con aproximadamente 65% del territorio y el 35% restante corresponde a depósitos aluviales y lacustres, además de rocas producto de alteración metamórfica.

Tipo de roca	% en la cuenca	Tipo de roca	% en la cuenca
Lacustre	18.82	Dacita-Andesita	2.15
Lahar-Toba andesítica	16.17	Toba dacítica-Riolita	1.85
Aluvial	15.49	Andesita-Toba andesítica	1.30
Andesita-Basalto	14.23	Toba andesítica-Andesita	1.14
Andesita-Dacita	11.27	No aplicable	0.95
Basalto-Andesita	3.89	Toba riolítica - Toba dacítica	0.38
Ignimbrita-Riolita	3.86	Dacita	0.33
Toba andesítica	3.25	Andesita	0.19
Lahar	2.46	Metavolcano-sedimentario	0.01
Basalto	2.26		

Tabla 2. Porcentajes de tipo de rocas en el territorio de la cuenca. Fuente: Elaboración propia a partir de SGM (1997, 1998, 1999 y 2002).

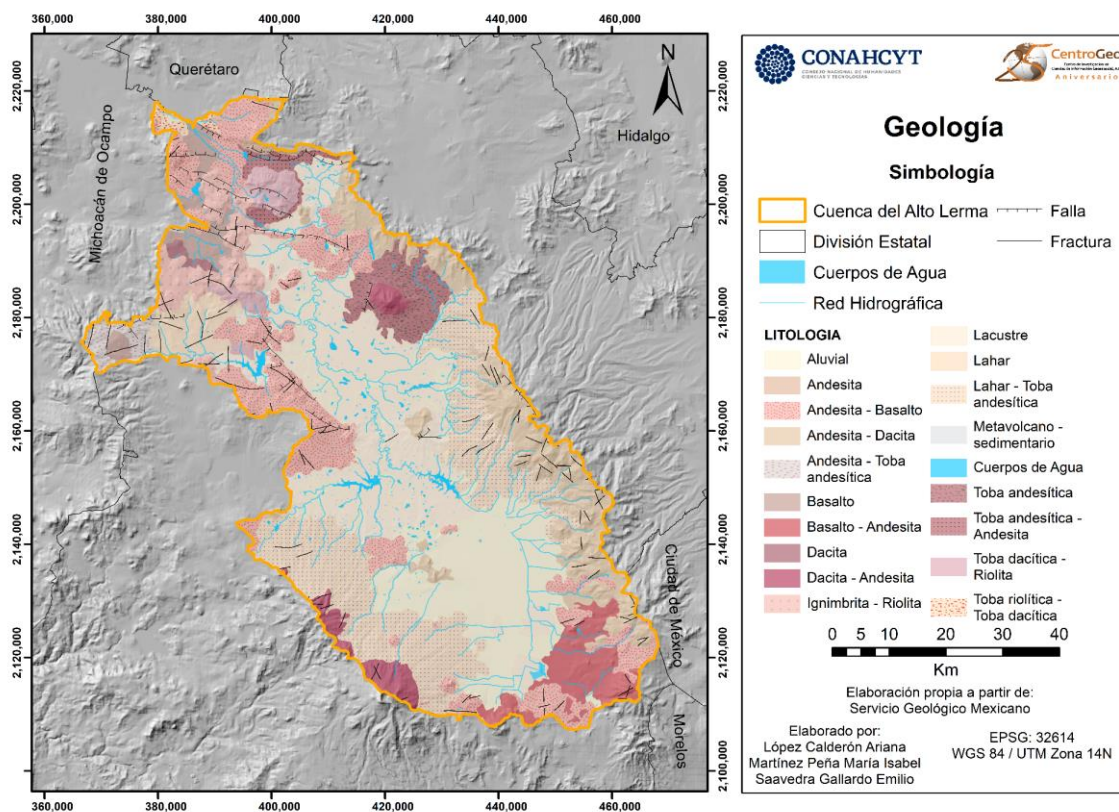


Figura 3. Geología de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia con base en SGM (1997, 1998, 1999 y 2002).

Fallas y fracturas

Dentro de la cuenca se pueden encontrar estructuras geológicas pertenecientes al régimen frágil. Estas estructuras corresponden a fallas normales y a fracturas relacionadas con las secuencias volcánicas del área, con direcciones aproximadas entre NE 40° a 80°, NW 50° a 80° y NE 60° a 90°. Dichas estructuras se relacionan con los sistemas de fallas Acambay, Perales de rumbo, Nevado, Chignahuapan, Taxcayo, entre otras, las cuales son indicadores de regímenes distensivos SGM (1997, 1998, 1999 y 2002).

Uso de suelo

La cuenca alta del río Lerma exhibe una diversidad de usos de suelo que reflejan la geografía local, la disponibilidad de recursos y las actividades humanas. De acuerdo con la Serie VII de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI (2018), en el área de la cuenca predomina el uso de suelo agrícola, que a su vez puede dividirse en diferentes tipos de prácticas agrícolas, tales como agricultura de humedad anual, de riego anual, de riego anual y semipermanente, de riego semipermanente, de temporal anual, de temporal anual y permanente (Figura 4 y Tabla 3).

El área forestal es un elemento importante de la cuenca dado el porcentaje de territorio que ocupa, en este caso, se pueden encontrar bosques de Encino-pino, Oyamel, Pino, Cedro, Encino y algunas parcelas de bosque cultivado.

Por su parte, los asentamientos humanos ocupan un porcentaje de aproximadamente 6% del territorio de la cuenca y la mayoría se concentran en la zona conurbada de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Uso de suelo	% en la cuenca
Agricultura	66.69%
Asentamientos Humanos	5.86%
Bosque	11.15%
Cuerpo de agua	0.99%
Desprovisto de vegetación	0.05%
Pastizal	8.56%
Tular	0.29%
Vegetación secundaria	6.41%

Tabla 3. Porcentajes de tipo de uso de suelo en el territorio de la cuenca. Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2018).

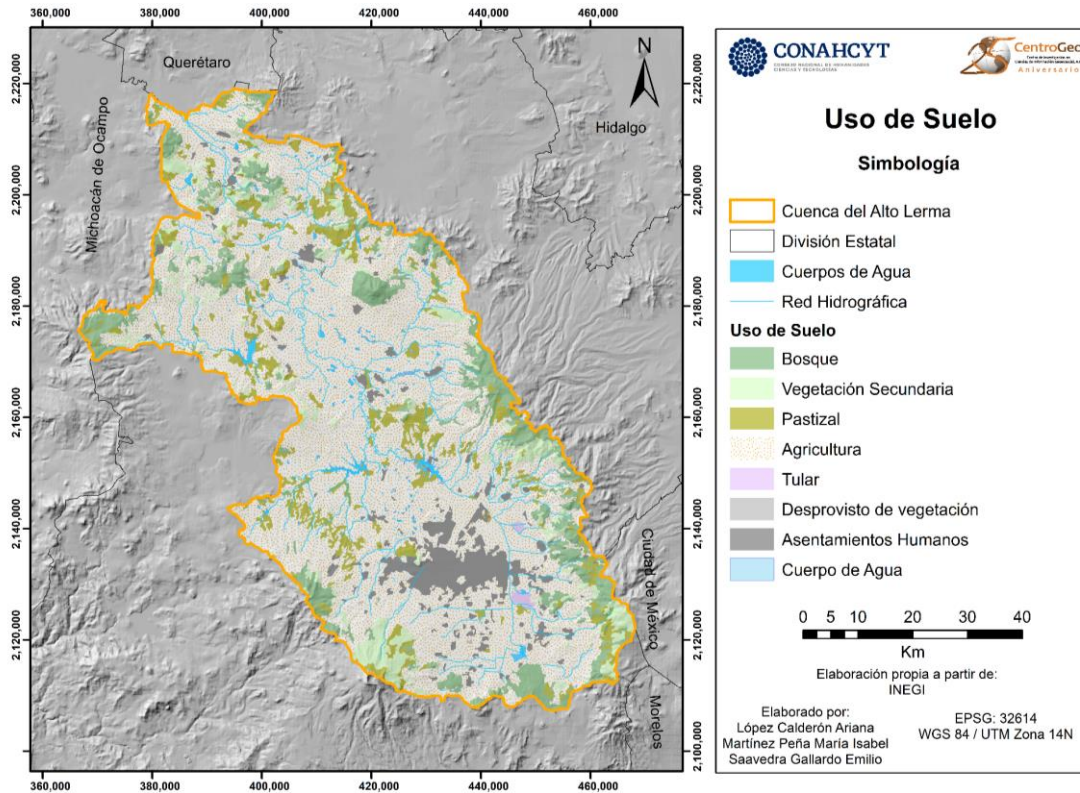


Figura 4. Uso de suelo de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2018)

Clima

Su clima de manera general se clasifica como semicálido. En las zonas central y sur de la cuenca, el ambiente prevalece semicálido subhúmedo, pero cambia a templado húmedo y semifrío subhúmedo, llegando incluso a muy frío en las áreas montañosas. Las precipitaciones son típicamente estacionales, concentrándose en los meses de verano y extendiéndose hasta parte del otoño. En cuanto a la temperatura, esta varía anualmente desde un mínimo de 2 °C hasta un máximo de 24 °C, reflejando la diversidad climática de la región (García, E.,2004).

Hidrología

La hidrología de la Cuenca Alta del Río Lerma es compleja, debido a que se ve influenciada por su diversidad geográfica y variaciones climáticas. El río Lerma nace en el Estado de México, es considerado el principal curso de agua y por lo tanto, esencial para la región, recorre varios estados hasta desembocar en el Lago de Chapala.

La cuenca alta comprende desde el origen del río hasta el inicio del curso medio cerca de los límites con Michoacán (Figura 5). En esta zona, el río recibe el aporte de numerosos

afluentes menores, muchos de ellos estacionales y alimentados por las lluvias de verano, que contribuyen tanto al caudal como a la recarga de los acuíferos. Además, se han construido varias presas y embalses, como la Presa Alzate y la Presa Tepuxtepec, fundamentales para la regulación del flujo del río, el control de inundaciones, y el suministro de agua para uso agrícola, industrial y doméstico (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2009).

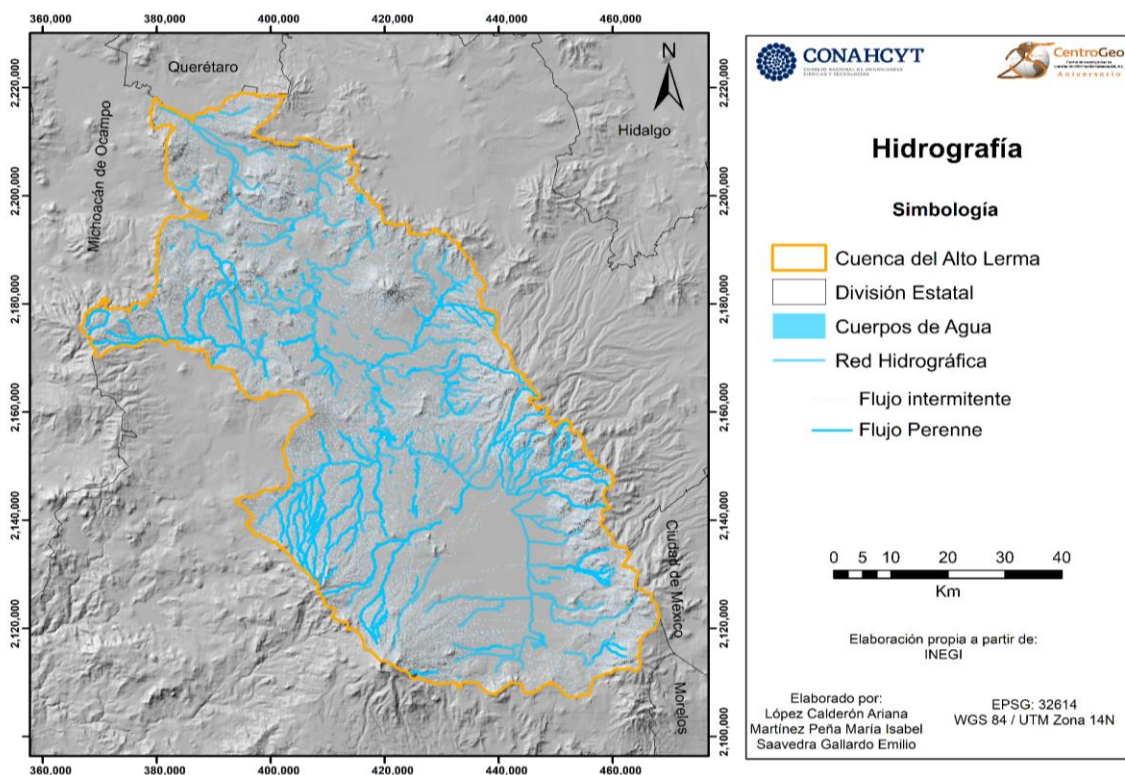


Figura 5. Hidrografía de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2010).

Aspectos sociales

Los aspectos sociales son una parte importante de la zona de estudio porque permite comprender las dinámicas en las ciudades y los efectos ambientales. A continuación, se presentan las características sociales que componen la CARL.

Composición Demográfica

En la subzona Alto Lerma reside el 34% del total de habitantes de la región Río Lerma-Chapala, sumando 3.6 millones de personas. Esta subzona presenta la densidad poblacional más alta de la región, con 271 habitantes por kilómetro cuadrado. La cuenca de Alzate alberga aproximadamente el 47% de la población de la subzona, una cifra que se

debe principalmente a la conurbación de Toluca-Metepec, donde se encuentra el 16% de la población total del Alto Lerma (Orozco & Sánchez, 2004).

De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda de INEGI (2020), los municipios que cuentan con una mayor población dentro del área de estudio corresponden a Toluca, Naucalpan de Juárez, Nicolás Romero, Huixquilucan y Metepec (Tabla 4). Por otro lado, Texcalyacac, Isidro Fabela, Almoloya del Río, Chapultepec y Atizapán son los municipios con menor número de habitantes.

A continuación, se incluye una tabla con la Población que integra cada municipio

Municipio	Población	Municipio	Población
Acambay de Ruíz Castañeda	67872	Mexicaltzingo	13807
Almoloya de Juárez	174587	Morelos	33164
Almoloya del Río	12694	Naucalpan de Juárez	834434
Amanalco	23675	Nicolás Romero	430601
Atizapán	12984	Ocoyoacac	72103
Atlacomulco	109384	Ocuilán	36223
Calimaya	68489	El Oro	36937
Capulhuac	36921	Otzolotepec	88783
Chapa de Mota	31737	Timilpan	16414
Chapultepec	12772	Toluca	910608
Huixquilucan	284965	Villa del Carbón	51498
Isidro Fabela	11929	Villa Victoria	108196
Ixtlahuaca	160139	Xonacatlán	54633
Xalatlaco	30687	Zinacantepec	203872
Jilotzingo	19877	San Mateo Atenco	97418
Jiquipilco	76826	San José del Rincón	100082
Jocotitlán	69264	Temascalcingo	66414
Joquicingo	15428	Temascaltepec	35014
Lerma	170327	Temoaya	105766
Rayón	15972	Tenango del Valle	90518
San Antonio la Isla	31962	Texcalyacac	5736
San Felipe del Progreso	144924	Tianguistenco	84259
Metepec	242307		

Tabla 4. Población de cada municipio que integra la zona de estudio. Elaboración propia con base en INEGI (2020).

En cuanto a la densidad de población por km², en la Figura 6 se puede observar que la Zona Metropolitana del Valle de Toluca contiene los valores más altos. Los municipios de esta zona con densidades altas son principalmente Naucalpan de Juárez, San Mateo Atenco y Metepec con alrededor de 3000 a 5000 habitantes por km², seguidos de Toluca, Huixquilucan y Nicolás Romero.

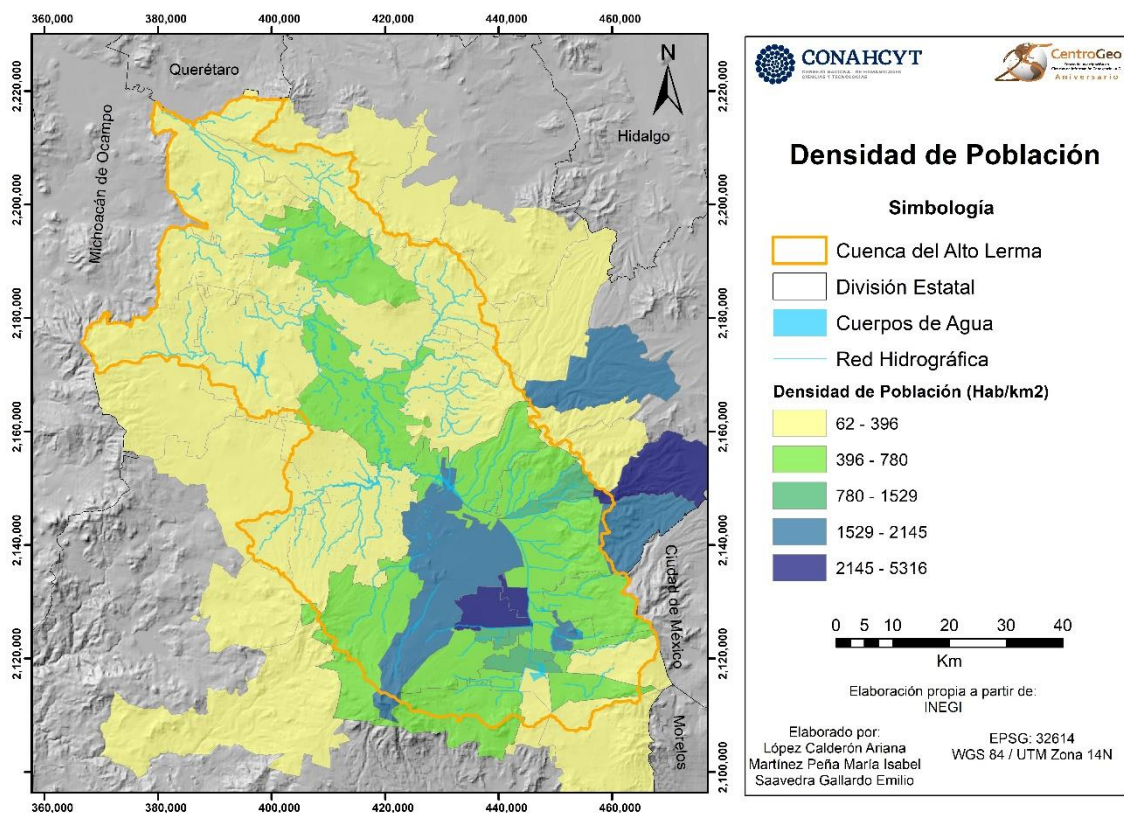


Figura 6. Densidad de población de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2020).

Estructura Económica

A nivel federal, el Estado de México contribuye en un 9.1% del total nacional del Producto Interno Bruto, esta contribución se realiza a partir del desarrollo de actividades económicas en el territorio estatal (INEGI, 2020). Para el caso de la zona de estudio, se cuenta con unidades económicas destinadas a la agricultura, cría y explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza, distribuidas en los municipios que integran la región.

Las actividades secundarias son predominantes en los municipios que integran la zona de estudio, se cuenta con unidades económicas destinadas a la minería, la construcción, la

generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, suministro de agua y de gas, así como industrias manufactureras (INEGI, 2020).

Para el caso de estudio, conocer la distribución geográfica de las unidades económicas es importante, ya que estas actividades pueden identificarse como fuentes fijas de contaminantes, los cuales influyen en la contaminación del agua.

Los aspectos sociales son una parte importante de la zona de estudio porque permiten comprender las dinámicas en las ciudades y los efectos ambientales. A continuación, se presentan las características sociales que componen la Cuenca Alta del Río Lerma (CARL). Estos elementos son fundamentales para entender cómo la población, la economía y la estructura urbana influyen en el manejo y la sostenibilidad del recurso hídrico en la región.

Aspectos Políticos

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) establece el uso doméstico como la utilización individual del agua por parte de los habitantes en sus hogares, lo cual engloba el suministro para el riego de sus jardines y árboles ornamentales, así como para abrevaderos de animales domésticos no destinados a actividades lucrativas, según lo establecido en el artículo 115 de la Constitución.

Además, la LAN aclara que el uso público urbano del agua se refiere al suministro a los centros de población y áreas urbanas mediante la infraestructura municipal. Ambos usos están directamente relacionados con la responsabilidad de los municipios de proporcionar servicios públicos. Se destaca que ni uno ni otro hacen mención del artículo 4 de la Constitución, que reconoce el derecho de toda persona al acceso, disponibilidad y saneamiento de agua para uso personal y doméstico, garantizado por el Estado y cuya regulación compete a la Federación.

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) son disposiciones técnicas de obligatorio cumplimiento que respaldan la calidad de productos, procesos o servicios cuando representan un riesgo potencial para la salud humana, animal, vegetal o el medio ambiente en general, según lo establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

Un ejemplo de ello es la NOM-001-ECOL-1996, que establece los límites máximos permitidos de contaminantes en las descargas de agua residual hacia cuerpos de agua y

recursos nacionales, según lo indicado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales en 2014.

Por otra parte, en cuestiones de agua, la NOM-002-ECOL-1996 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de agua residual a los sistemas de alcantarillado, mientras que la NOM-003-ECOL-1997 establece los límites máximos permisibles de contaminantes para el agua residual tratada que se reúse en servicios al público.

A continuación, se presentan el Modelo Geográfico (Figura 7), y el Modelo Computacional (Figura 8), en los cuales se muestran los procesos y relaciones espaciales entre los criterios establecidos para el desarrollo del presente proyecto.

Modelo Geográfico

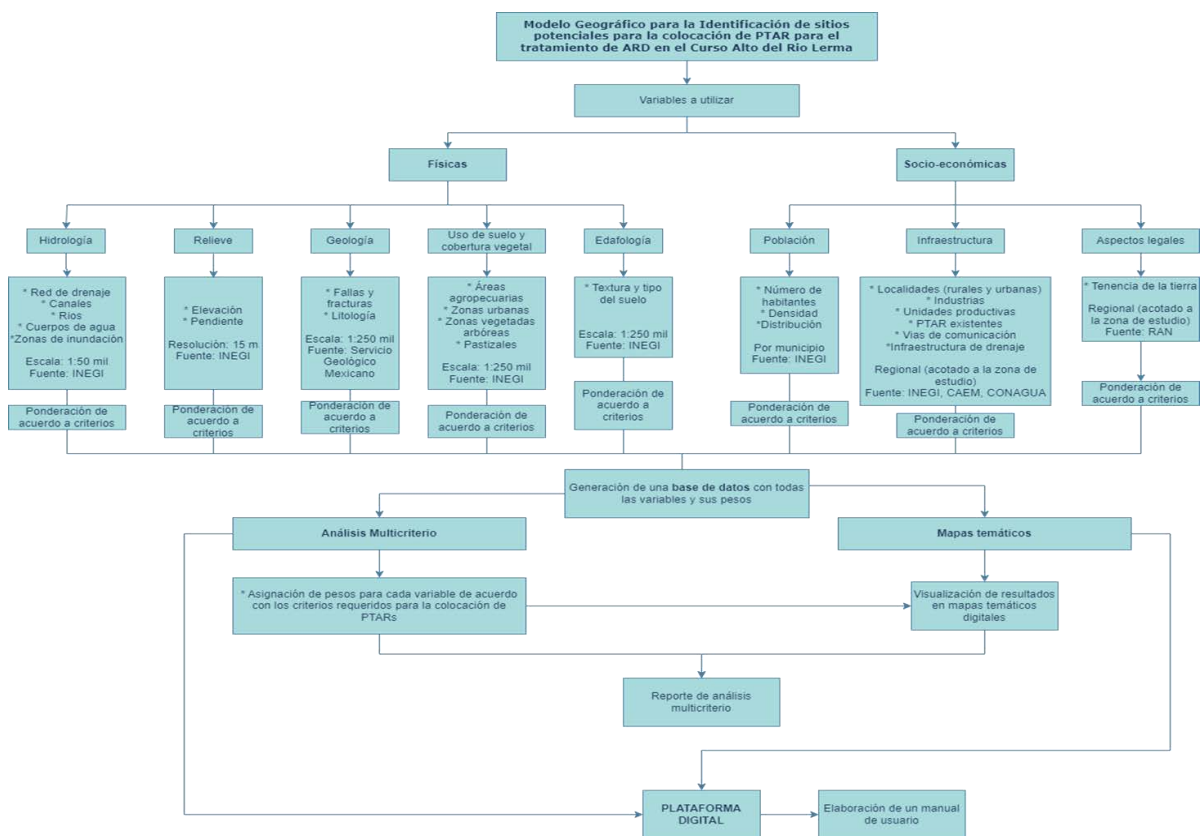


Figura 7. Modelo Geográfico. Fuente: Elaboración propia.

Modelo de Computacional

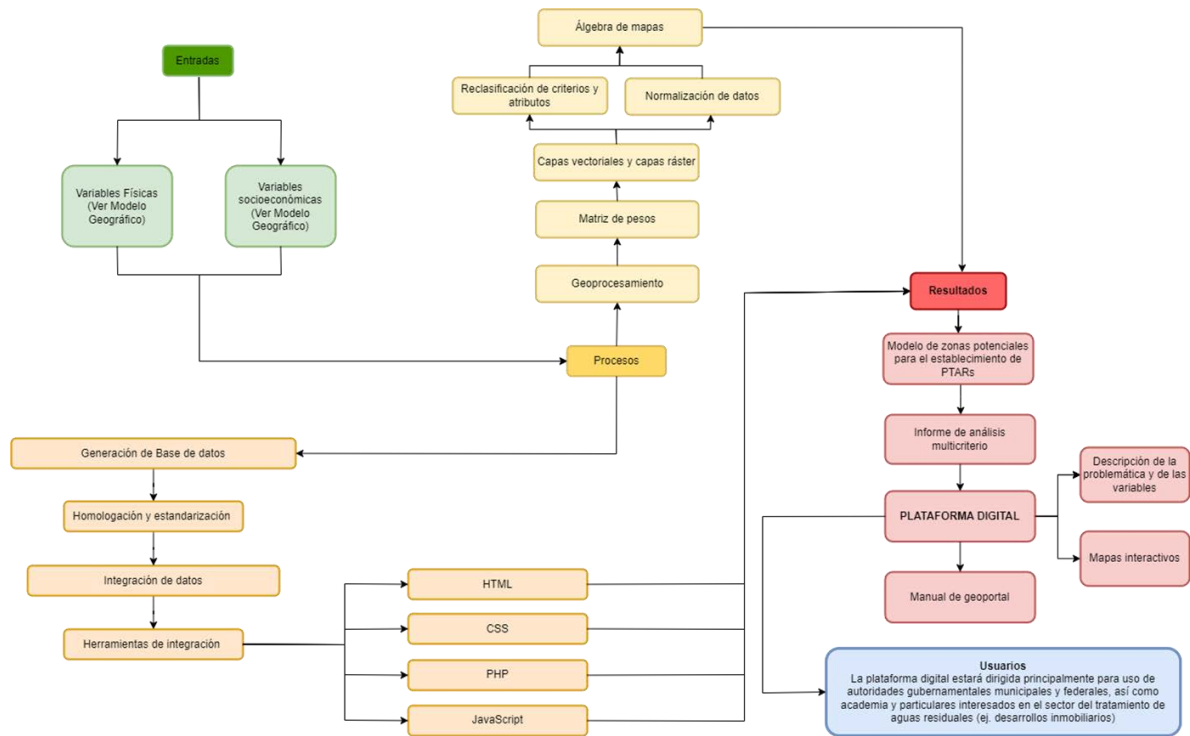


Figura 8. Modelo computacional. Fuente: Elaboración propia.

SOLUCIÓN COLABORATIVA

Metodología

La toma de decisiones en proyectos ambientales resulta compleja debido a la implicación de factores sociopolíticos, ambientales, ecológicos y económicos, lo cual puede conllevar a inconformidades por parte de los diversos sectores o actores que estén implícitos en dichas decisiones. Debido a esto, se ha vuelto necesario considerar criterios que tienen un impacto preponderante en cada una de estas variables, además de sus respectivas alternativas, con la finalidad de que la toma de decisiones resulte más incluyente y coherente de acuerdo con la naturaleza del problema (Kiker et al., 2005).

En este sentido, el análisis multicriterio es una de las metodologías más utilizadas para analizar fenómenos que presentan un número variado de factores de diversa índole, tales como sociales, económicas, ambientales, políticas, entre otros, ya que permite emplear variables cualitativas y cuantitativas (Kiker et al., 2005).

Existen distintos tipos de análisis multicriterio, en función del tipo de los juicios de valor, los atributos, variables u objetivos que se aplican y el tipo de datos disponible. Así de este modo, es necesario definir el concepto de criterio, los cuales se pueden entender como estándares de juicio o reglas usadas para clasificar decisiones alternativas según su deseabilidad, e incluyen los conceptos de atributo y objetivo (Malczewski, 1999).

Los atributos se refieren a las propiedades de elementos de un sistema geográfico real. Un atributo puede ser una cantidad o calidad medible de una entidad geográfica o una relación entre entidades geográficas que, en el contexto de la toma de decisiones, son llamados objetos de decisiones (Malczewski, 1999). El concepto de atributo es sinónimo del concepto frecuentemente usado de medición del rendimiento o elemento de un sistema. Se utilizan para medir el rendimiento en relación con un objetivo, sirviendo como medio o fuente de información para que el tomador de decisiones formule y alcance sus objetivos (Malczewski, 1999; Kiker et al., 2005)

Por otro lado, un objetivo es una declaración sobre el estado deseado del sistema en consideración, indicando direcciones para la mejora de uno o más atributos. Los objetivos están funcionalmente relacionados con, o derivados de, un conjunto de atributos (Malczewski, 1999). Para cualquier objetivo dado, pueden ser necesarios varios atributos

diferentes para proporcionar una evaluación completa del grado en que el objetivo podría ser alcanzado (Malczewski, 1999; Kiker et al., 2005).

Esta categoría de enfoques multicriterio implica el diseño de alternativas y la búsqueda de las "mejores" decisiones entre un conjunto infinito o muy grande de alternativas factibles (Malczewski, 1999). Conforme a esto, hay una gran rama de métodos para evaluar dichas alternativas y decisiones. Uno de ellos corresponde al método jerárquico multicriterio, el cual utiliza a su vez el Proceso Analítico Jerárquico, desarrollado por Saaty (1990).

Este método se caracteriza por la facilidad para dividir una decisión compleja en un conjunto de decisiones simples, facilitando la comprensión y solución del problema propuesto, debido a que analiza los factores que intervienen en el proceso de decisiones sin requerir que estos se encuentren en una escala común (Sendra y García, 2000; Celemin, 2014).

Desde un enfoque geográfico, para lograr un objetivo específico es necesario considerar información que pueda ser representada de manera espacial, por lo cual esta metodología implica la superposición de múltiples capas, las cuales representan a los criterios, con la finalidad de crear un mapa a partir de la ponderación y sobreposición de todos los criterios. Debido a esto, esta técnica se distingue por su habilidad para facilitar la toma de decisiones respecto a un objetivo concreto, mediante la consideración de diversos productos cartográficos para producir un mapa final (Celemin, 2014).

Por lo tanto, esta herramienta resulta fundamental en el estudio de fenómenos espaciales, ya que permite gestionar e integrar una amplia cantidad de datos de manera eficiente, además de que los resultados pueden ser replicables y verificados en cada paso de este proceso. Por ese motivo, se retomó este método para estudiar un proceso espacial que tiene que ver con la identificación de sitios potenciales para la instalación de PTARs.

En este sentido, el primer paso para realizar el análisis multicriterio consistió en la selección de criterios a partir de la búsqueda bibliográfica relacionada con PTARs. En función de dicha búsqueda, se consideraron los siguientes criterios para el análisis:

Pendiente

La pendiente es crucial en la selección de sitios para plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) debido a varios factores técnicos y económicos. Las tuberías de

transmisión de las plantas no deben pasar por terrenos con pendientes pronunciadas, ya que esto incrementa la altura de elevación y los costos asociados a la excavación en terrenos empinados. Se ha establecido que pendientes entre 0 y 10% son las más adecuadas, ya que facilitan el flujo natural del agua y minimizan los costos de excavación y terraplenado (Taghilou et al., 2019; Awawdeh et al., 2023).

Las pendientes de 0-3 grados se consideran óptimas, ya que ofrecen el mejor balance entre flujo natural y costos de construcción. Pendientes entre 3-5 y 5-10 grados también son aceptables, aunque con un incremento moderado en los costos (Awawdeh et al., 2019). Sin embargo, pendientes superiores a 10 grados son menos deseables debido a los altos costos de excavación y riesgos estructurales, además de incrementar la posibilidad de contaminación de aguas subterráneas y superficiales (Kafil & Albaj, 2017).

El insumo que se utilizó para obtener y trabajar esta información fue el CEM obtenido de INEGI (2013), con una resolución de 15 m.

Uso de suelo

La reclasificación del uso de suelo considera varios factores ambientales y económicos para seleccionar los sitios más adecuados para plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

Áreas sin vegetación aparente y pastizales/agricultura se consideran óptimas, dado que tienen menor valor ecológico y productivo, facilitando así la construcción y operación de las PTAR (Taghilou et al., 2019). Zonas urbanas y vegetación secundaria son menos preferidas debido a su importancia para la biodiversidad y su uso alternativo significativo, lo que podría generar conflictos de interés y mayores costos operativos (Awawdeh et al., 2023).

Los bosques y tulares se consideran los menos adecuados debido a su alto valor ecológico y la protección ambiental que requieren, lo que los hace inapropiados para instalaciones que puedan alterar estos ecosistemas delicados (Addis, 2021).

La capa que se utilizó para obtener y trabajar esta información fue obtenida de INEGI (2018), escala 1: 250 000, Serie VII.

Geología

Los tipos de roca seleccionados en este estudio se basan en su permeabilidad y capacidad para soportar la infraestructura de PTAR, ordenados desde muy altos a muy bajos según su adecuación.

Rocas como el basalto y de tipo metavolcano sedimentario, que presentan muy baja permeabilidad, son óptimas para reducir riesgos de contaminación de aguas subterráneas (Taghilou et al., 2019). A continuación, se encuentran las rocas de alta permeabilidad relativa, como andesita, andesita-basáltica, basalto-andesita, dacita y dacita-andesita que, aunque algo más permeables, todavía son adecuadas para estas infraestructuras. Rocas de permeabilidad media, como andesita-dacita, ignimbrita-riolita, toba andesítica y toba andesítica-andesita, son menos preferidas debido a su mayor probabilidad de infiltración (Awawdeh et al., 2023).

Rocas de baja permeabilidad, como andesita-toba andesítica, toba dacítica-riolítica y toba riolítica-toba dacítica, presentan mayores desafíos para la construcción de PTAR debido a su capacidad de permitir infiltraciones (Krásný & Sharp, 2007).

Finalmente, formaciones de muy baja adecuación como aluvial, lacustre, lahar y lahar-toba andesítica, son las menos adecuadas debido a su alta permeabilidad y riesgo significativo de infiltración de contaminantes (Addis, 2021; Cabrera & Custodio, 2013).

La capa que se utilizó para obtener y trabajar esta información fue obtenida del SGM (1997, 1998, 1999, 2002).

Fallas

La proximidad a fallas geológicas es un factor crítico debido a los riesgos asociados a la estabilidad estructural y la posible contaminación. Las distancias a fallas geológicas se establecen para garantizar la estabilidad estructural y minimizar estos riesgos. Se recomienda una distancia mínima de 1000 metros para reducir significativamente los riesgos estructurales y de contaminación (Taghilou et al., 2019).

En este estudio, se han clasificado las distancias a fallas geológicas en diferentes rangos para evaluar su adecuación: distancias mayores a 2000 metros se consideran muy adecuadas (muy alto), distancias entre 1500 y 2000 metros son consideradas adecuadas (alto), entre 1000 y 1500 metros son moderadamente adecuadas (medio), entre 500 y 1000

metros son menos adecuadas (bajo), y distancias menores a 500 metros son las menos adecuadas (muy bajo) debido al incremento significativo de riesgos de fallas estructurales y costos de construcción y mantenimiento de las PTAR (Shahmoradi & Isalou, 2013).

La capa que se utilizó para obtener y trabajar esta información fue obtenida de INEGI (1983a, b, c y 1988), escala 1: 250 000.

Edafología

La edafología, o características del suelo, es fundamental para la viabilidad de las PTAR. La selección de texturas de suelo se basa en su permeabilidad, que es crucial para minimizar la infiltración de contaminantes y proteger las aguas subterráneas. Suelos con alta fracción de arcilla y baja permeabilidad son preferidos porque minimizan la infiltración de lixiviados (Kafil & Albaj, 2017).

Suelos de textura superficial de intermedia a pesada y baja salinidad también son beneficiosos para la construcción y operación de estas plantas (Addis, 2021). Suelos de textura fina son ideales debido a su baja permeabilidad, lo que minimiza la infiltración de contaminantes. Suelos de textura media son aceptables, aunque con menor preferencia, mientras que suelos de textura gruesa son menos adecuados debido a su alta permeabilidad y el mayor riesgo de contaminación de aguas subterráneas (Addis, 2021).

La capa que se utilizó para obtener y trabajar esta información fue obtenida de INEGI (2007 a, b, c, d), escala 1: 250 000.

Cuerpos de agua y ríos

La distancia a cuerpos de agua y ríos es crucial para prevenir la contaminación de estos recursos y facilitar el manejo de efluentes. Se recomienda una distancia mínima de 500 metros para proteger los lechos de ríos y minimizar el riesgo de inundaciones (Shahmoradi & Isalou, 2013). Distancias mayores a 2000 metros son óptimas para proteger recursos hídricos, mientras que distancias menores incrementan los riesgos de contaminación (Shahmoradi & Isalou, 2013). La proximidad a cuerpos de agua debe balancear la protección ambiental con la necesidad de descarga de efluentes (Awawdeh et al., 2023).

En este proyecto, solo se han considerado ríos de orden 4 al 6, ya que estos representan los cursos de agua más grandes y permanentes en la región de estudio. Esta selección se justifica porque estos ríos tienen mayor capacidad para diluir y transportar los efluentes

tratados, minimizando el impacto ambiental (Shahmoradi & Isalou, 2013). Además, enfocarse en ríos de órdenes superiores permite una planificación más eficiente y efectiva de las infraestructuras de tratamiento de aguas residuales (Awawdeh et al., 2023).

La capa que se utilizó para obtener y trabajar esta información fue obtenida de INEGI (2010), escala 1: 50 000, Edición 2.0.

Pozos

Para proteger los recursos hídricos subterráneos, las PTAR deben estar alejadas de pozos y manantiales. Las distancias a pozos se establecen para prevenir la contaminación de estos recursos vitales. Se sugiere una distancia mínima de 500 metros para prevenir la contaminación de estos recursos (Shahmoradi & Isalou, 2013). Distancias mayores a 2000 metros son óptimas para garantizar una protección adecuada, mientras que distancias menores presentan un mayor riesgo de infiltración de contaminantes (Shahmoradi & Isalou, 2013).

La proximidad a pozos aumenta el riesgo de infiltraciones contaminantes, lo cual justifica la necesidad de establecer zonas de amortiguamiento adecuadas (Addis, 2021). Establecer estas distancias de seguridad es crucial para evitar la contaminación de las aguas subterráneas y asegurar la sostenibilidad de los recursos hídricos en la región.

La capa que se utilizó para obtener y trabajar esta información fue obtenida de INEGI (2016).

Asentamientos

La distancia a asentamientos humanos es crucial para minimizar los impactos negativos en la salud pública y el bienestar de las comunidades locales. Se recomienda una distancia de al menos 1500 metros para evitar la transmisión de olores y contaminantes (Shahmoradi & Isalou, 2013). Distancias mayores a 2000 metros son óptimas para reducir riesgos de transmisión de olores y contaminación, proporcionando una mayor protección a las comunidades locales (Shahmoradi & Isalou, 2013).

Es importante considerar que una distancia excesiva puede incrementar los costos de infraestructura y complicar la accesibilidad (Awawdeh et al., 2023). Por lo tanto, es esencial encontrar un equilibrio que minimice los impactos negativos y los costos operativos.

La capa que se utilizó para obtener y trabajar esta información fue obtenida de SINCE (2020).

Vías de comunicación

La proximidad a vías de comunicación es esencial para facilitar el acceso y reducir los costos de transporte y mantenimiento de las PTAR. Se recomienda una distancia de 300 a 1000 metros de las carreteras principales para equilibrar la accesibilidad y minimizar los impactos negativos en el paisaje y la salud pública (Shahmoradi & Isalou, 2013; Kafil & Albaj, 2017). Plantas ubicadas lejos de las carreteras principales pueden incurrir en costos adicionales significativos (Addis, 2021).

Las distancias a vías de comunicación se establecen para equilibrar la accesibilidad y los costos de construcción. Distancias entre 300 y 500 metros son óptimas para facilitar el acceso y reducir costos de transporte y mantenimiento (Shahmoradi & Isalou, 2013). Distancias menores a 300 metros pueden afectar negativamente el paisaje y la salud pública, mientras que distancias mayores a 700 metros incrementan los costos de infraestructura (Awawdeh et al., 2023).

Para este proyecto, solo se han considerado vías de comunicación principales tales como: Avenida, Boulevard, Calzada, Carretera, Circuito, Circunvalación, Eje vial, Periférico y Viaducto. La inclusión de estos tipos viales se justifica porque proporcionan una infraestructura robusta y accesible que facilita el transporte de materiales y el mantenimiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Además, estos tipos de vías aseguran una conectividad eficiente y reducen los costos operativos en comparación con vías secundarias o menos transitadas (Addis, 2021; Kafil & Albaj, 2017).

La capa que se utilizó para obtener y trabajar esta información fue obtenida de INEGI (2011), escala 1: 50 000, Edición 1.0.

Además de los criterios a evaluar, este análisis utilizó restricciones, las cuales son limitaciones que no permiten cierto tipo de actividades, en este caso la colocación de PTARs (Malczewski, 1999). Las restricciones elegidas fueron las siguientes:

Cuerpos de agua, ríos y ANP federales y estatales

La inclusión de cuerpos de agua, ríos y Áreas Naturales Protegidas (ANP) federales y estatales como restricciones en este proyecto se fundamenta en la necesidad de proteger estos recursos y preservar la biodiversidad.

Según la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), las ANP están sujetas a regulaciones estrictas que prohíben actividades que puedan dañar su integridad ecológica (LGEEPA, 2024). Esta legislación establece que en las ANP no se permite la instalación de infraestructura que pueda alterar los ecosistemas locales, como las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Adicionalmente, la Ley de Aguas Nacionales (LAN) y sus reglamentos estipulan que los cuerpos de agua y ríos deben estar protegidos de fuentes potenciales de contaminación, estableciendo zonas de amortiguamiento para prevenir descargas de contaminantes y garantizar la calidad del agua (LAN, 2023).

Estas restricciones aseguran que las actividades humanas no comprometan la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos, esenciales tanto para el consumo humano como para el mantenimiento de los ecosistemas acuáticos. Por lo tanto, la consideración de estas restricciones es crucial para cumplir con la normativa ambiental vigente y proteger los recursos naturales de la región.

La capa que se utilizó para obtener y trabajar la información de ANPs fue obtenida de CEPANAF (2022) y la red hidrográfica y cuerpos de agua se obtuvieron de INEGI (2010), escala 1: 50 000, edición 2.0.

Una vez seleccionados los criterios se procedió a realizar un análisis de colinealidad, con el fin de verificar que los criterios elegidos no sean redundantes (Malczewski y Rinner, 2015). Esto se obtuvo con el coeficiente de correlación de Spearman, el nivel de significancia y los histogramas de cada par de criterios.

Posteriormente se procedió a la elaboración de las matrices pareadas, en las cuales se consideran los criterios que serán evaluados para la toma de decisiones, conforme al Proceso Analítico Jerárquico. A cada elemento de estas matrices se les asigna un número de acuerdo con la escala de Saaty, la cual se construye de acuerdo con el nivel de importancia de cada criterio, siendo 9 el mayor nivel de importancia y 1 el menor, con el fin de obtener las ponderaciones que serán evaluadas por cada criterio (Celemin, 2014).

Después se evalúa qué tan consistente o inconsistente son los juicios utilizados en la asignación de valores mediante un índice de inconsistencia, en el cual valores menores a 0.10 indican que las asignaciones de valor son adecuadas o consistentes. Si este índice es

mayor, es necesario reevaluar las asignaciones con la finalidad de que no haya errores de juicio en el proceso (Sendra y García, 2000, Celemin, 2014).

El análisis multicriterio requiere transformar los valores de cada criterio a unidades comparables, a través de métodos de estandarización o escalas de valor (Malczewski y Rinner, 2015). Existen diversos métodos para estandarizar los datos originales de cada criterio, los cuales varían en función de la homogeneidad o preferencia de los datos a evaluar (p. ej. función de valor o utilidad, rango de puntuación, escala de transformación lineal, etc.). En este sentido, la presente investigación utiliza la función de valor, la cual se aproximó con el Proceso Analítico Jerárquico (Pereira y Duckstein, 1993; Malczewski, 1999; Malczewski y Rinner, 2015).

Derivado de estos procesos se obtienen las ponderaciones de cada criterio y sus atributos, por lo cual se puede proceder a la combinación de las variables para obtener los sitios potenciales de colocación de PTARs. La metodología utilizada para este paso fue la Combinación Lineal Ponderada, que consiste simplemente en la suma de cada criterio multiplicado por su peso, conforme a su ubicación (Malczewski y Rinner, 2015).

Por último, la capa resultante del anterior proceso se multiplica con las restricciones, para obtener el resultado final de sitios potenciales.

RESULTADOS

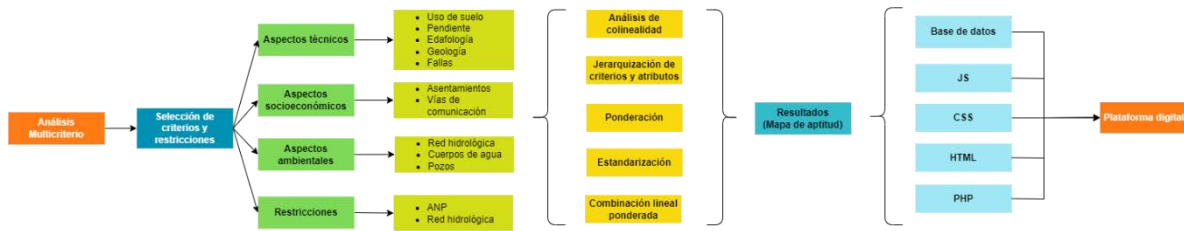


Figura 9. Diagrama de flujo de la metodología utilizada. Fuente: Elaboración propia.

En esta sección se presentan los resultados derivados del análisis multicriterio realizado para identificar los sitios potenciales para la colocación de PTARsD (Figura 9). Utilizando una combinación de criterios técnicos, ambientales y socioeconómicos, se evaluaron diversas áreas dentro de la región de estudio.

Se emplearon herramientas geoespaciales avanzadas y métodos de ponderación para integrar y analizar datos relevantes, asegurando una selección de sitios que maximicen la eficiencia operativa y minimicen el impacto ambiental. Los resultados obtenidos reflejan las áreas prioritarias identificadas y ofrecen una base para la toma de decisiones en la planificación e implementación de PTARsD.

Colinealidad

Cuando una variable es explicada por una o más variables, se dice que existe una relación entre ellas, lo cual se puede cuantificar a través de un coeficiente de correlación. En este sentido, cuando el coeficiente de correlación entre las variables es alto se dice que el conjunto de datos presenta colinealidad o multicolinealidad (García, 2006)

El análisis de colinealidad se realizó con el fin de determinar que los criterios no sean redundantes, es decir, que no exista una asociación y que por lo tanto un criterio no explique al otro (Malczewski y Rinner, 2015). Para esto se elaboró una malla con celdas de 250,000 m², en las cuales se obtuvo el promedio de los valores reales de las variables continuas (pendiente, distancia a fallas, red hidrológica y cuerpos de agua, pozos, asentamientos humanos y vías de comunicación) y los valores estandarizados de las categóricas (uso de suelo, geología y edafología).

Posteriormente, se realizaron los diagramas de dispersión, histogramas y coeficientes de correlación de Spearman mediante el software RStudio (Figura 10). El nivel de significancia para cada par de variables fue <0.05 .

Los resultados muestran que la mayoría de los pares de criterios tienen una correlación débil (Martínez et al., 2009), siendo solamente 4 pares los que muestran un coeficiente mayor de 0.5; estos son pendiente y pozos (-0.67), pendientes y fallas (-0.6), pendientes y geología (0.51) y pozos y asentamientos (0.51).

Conforme a estos resultados, se puede concluir que no existe colinealidad, ya que ningún par de criterios supera el valor de ± 0.8 (Mason y Perreault 1991; García et al., 2006), y que por lo tanto los criterios elegidos no son redundantes y pueden ser utilizados para el análisis multicriterio.

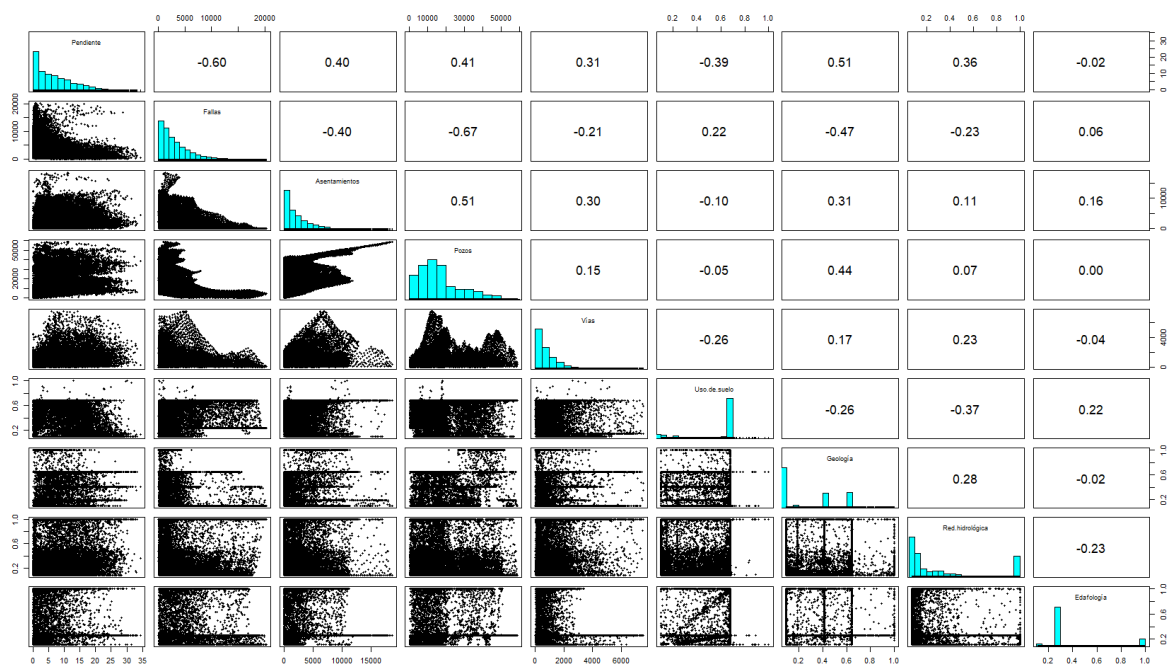


Figura 10. Coeficientes de correlación, histogramas y diagramas de dispersión de cada par de criterios.

Después de realizar el análisis de colinealidad, se evaluó la importancia de cada criterio mediante el Proceso Analítico Jerárquico, en el que se determinó el orden de importancia de cada criterio para el análisis multicriterio en el software SuperDecisions.

Ponderación y jerarquización

La matriz pareada de criterios (Tabla 5) presenta los valores de prioridad asignados a cada criterio mediante un análisis de comparación por pares. Este método permite comparar los criterios entre sí para determinar su importancia relativa.

Conforme a la información recabada (ver Metodología), la pendiente es considerado el criterio más importante, por lo cual se le asignan los valores más altos en comparación con los demás criterios. Por otro lado, el uso de suelo es el segundo criterio más relevante, siendo más importante que las vías de comunicación.

Adicionalmente, geología, fallas, y edafología tienen la misma importancia relativa, lo cual se refleja en los valores de 1 en sus respectivas comparaciones. En cuanto a cuerpos de agua y red hidrológica es menos importante que los criterios mencionados anteriormente, pero más relevante que pozos, asentamientos, y vías de comunicación. Estos últimos son considerados los criterios menos importantes (vías de comunicación), siendo el criterio con menor prioridad relativa en todas las comparaciones.

	Pendiente	Uso de suelo	Geología	Fallas	Edafología	Cuerpos de agua y red hidrológica	Pozos	Asentamientos	Vías de comunicación
Pendiente	1	2	3	3	3	4	5	6	7
Uso de suelo	1/2	1	2	2	2	3	4	5	6
Geología	1/3	1/2	1	1	1	2	3	4	5
Fallas	1/3	1/2	1	1	1	2	3	4	5
Edafología	1/3	1/2	1	1	1	2	3	4	5
Cuerpos de agua y red hidrológica	1/4	1/3	1/2	1/2	1/2	1	2	3	4
Pozos	1/5	1/4	1/3	1/3	1/3	1/2	1	2	3
Asentamientos	1/6	1/5	1/4	1/4	1/4	1/3	1/2	1	2

Vías de comunicación	1/7	1/6	1/5	1/5	1/5	1/4	1/3	1/2	1
-----------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---

Tabla 5. Matriz pareada de criterios. Elaboración propia.

En la Tabla 6 se observa que la pendiente tiene la mayor ponderación (0.28287), confirmando su importancia destacada en la matriz de comparación. Por su parte, el uso de suelo sigue en importancia con una ponderación de 0.18964.

Asimismo, geología, fallas, y edafología tienen igual importancia (0.11694 cada uno), lo que coincide con su igualdad en la matriz de comparación. Además, cuerpos de agua y red hidrológica tiene una ponderación intermedia de 0.07271.

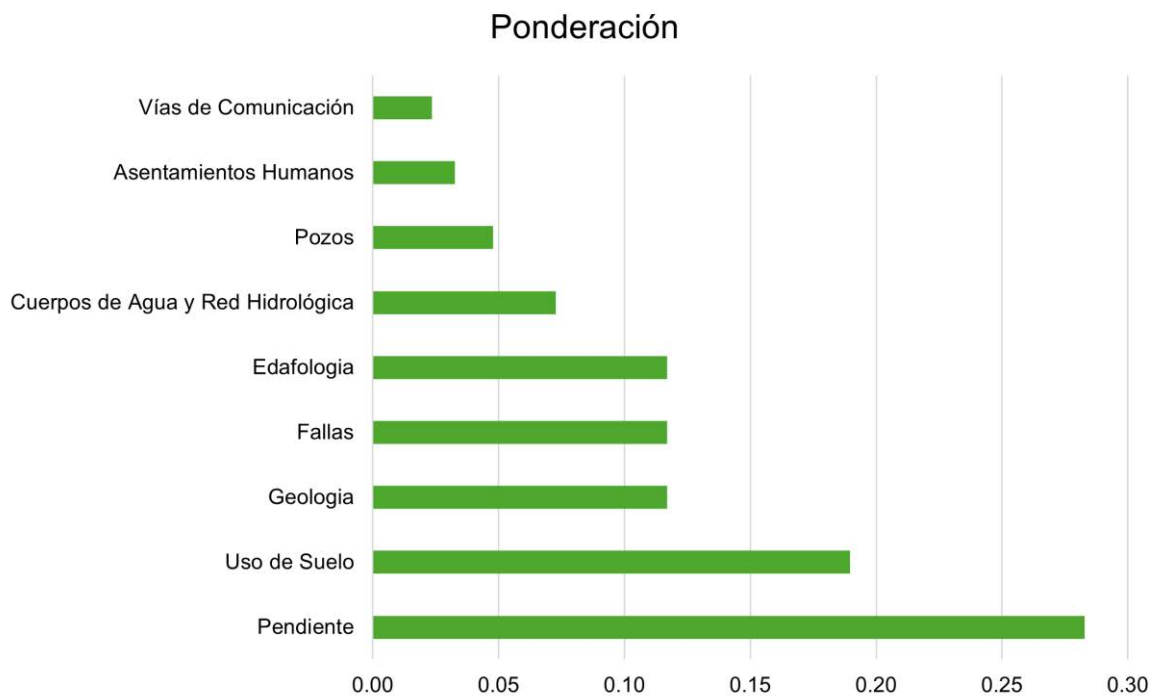
Por último, pozos, asentamientos, y vías de comunicación son los criterios con menor ponderación, siendo 0.04787, 0.03263 y 0.02347 respectivamente.

El índice de inconsistencia (Tabla 6), de 0.01798 es menor a 0.1, indicando que el análisis es consistente y fiable. Esto sugiere que las ponderaciones asignadas son coherentes y que el proceso de análisis multicriterio puede continuar sin necesidad de ajustes adicionales.

Inconsistencia	0.01798
Criterio	Ponderación
Pendiente	0.28287
Uso de suelo	0.18964
Geología	0.11694
Fallas	0.11694
Edafología	0.11694
Cuerpos de agua y red hidrológica	0.07271
Pozos	0.04787
Asentamientos	0.03263
Vías de comunicación	0.02347

Tabla 6. Ponderación e inconsistencia de la Matriz pareada de criterios. Elaboración propia

La gráfica presentada a continuación (Gráfica 1) muestra las ponderaciones de los diferentes criterios utilizados en un análisis multicriterio para la selección de sitios para la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales.



Gráfica 1. Valores de ponderación de los criterios. Elaboración propia

A partir de lo anterior, se obtuvo como resultado la siguiente jerarquía:

1. Criterios técnicos:

- a. Pendiente
- b. Uso de Suelo
- c. Edafología
- d. Geología
- e. Fallas

2. Criterios Socioeconómicos:

- a. Asentamientos
- b. Vías de comunicación

3. Criterios Ambientales

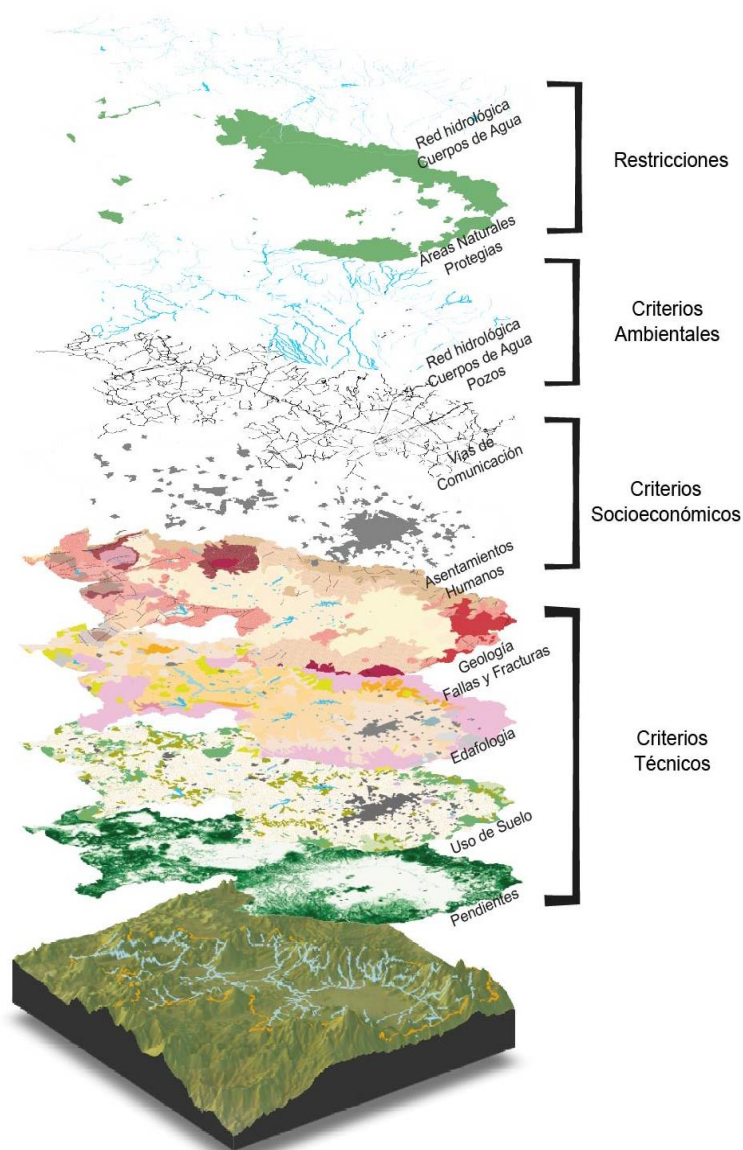
- a. Red hidrológica
- b. Cuerpos de agua
- c. Pozos

Además, se consideran dos restricciones: la red hidrológica y la ubicación de cuerpos de agua, así como la delimitación de Áreas Naturales Protegidas que se encuentran en la zona de estudio. En el caso de la red hidrológica se consideró un buffer de 50 metros por lado y

el área total de los cuerpos de agua, con la finalidad de evitar que estas áreas tuvieran un rango de aptitud de medio a muy alto.

Por otra parte, las Áreas Naturales Protegidas fueron calificadas por su categoría de manejo, tomando como más importantes aquellas que tienen un acuerdo internacional (Área de Protección de Flora y Fauna Ciénegas del Lerma - AICA y Humedal-) y por las restricciones que impone su categoría (Reserva de la Biósfera y Parque Nacional).

La organización de la información puede ser apreciada de manera gráfica en la Figura 11.



Cuenca del Alto Lerma

Figura 11. Jerarquía de criterios para el proceso de Análisis Multicriterio. Elaboración propia a partir de INEGI.

Una vez que se ponderaron los criterios se procedió a estandarizar cada uno de ellos de acuerdo con funciones de valor, las cuáles fueron obtenidas también mediante el Proceso Analítico Jerárquico (Pereira y Duckstein, 1993; Malczewski, 1999; Malczewski y Rinner, 2015).

Estandarización

El proceso consistió en evaluar el orden de preferencia de los atributos de cada criterio mediante la elaboración de matrices pareadas, conforme a rangos establecidos a partir de la revisión bibliográfica. Mediante la elaboración de las matrices, se obtuvieron los valores correspondientes a los pesos por atributo, los cuáles fueron normalizados conforme al máximo valor por cada criterio (Malczewski y Rinner, 2015).

Los resultados se pueden observar en las Tablas 7 a 24, donde los valores más cercanos a 1 corresponden a los más aptos, mientras que los más cercanos a 0 son los menos aptos. Se observa que las clases con preferencia en las estandarizaciones corresponden a zonas con bajas pendientes (0 a 3°), con un uso de suelo desprovisto de vegetación o sin vegetación aparente, rocas de tipo basalto o metavolcano sedimentarias, suelos con textura fina, distancias a fallas, ríos, cuerpos de agua, pozos y asentamientos mayores a 2000 m y distancias a vías de comunicación entre 300 y 500 m.

Pendiente					
	+15°	0 – 3°	3 – 5°	5 – 10°	10 – 15°
+15°	1	1/7	1/6	1/4	1/3
0 – 3°	7	1	2	4	5
3 – 5°	6	1/2	1	3	4
5 – 10°	4	1/4	1/3	1	2
10 – 15°	3	1/5	1/4	1/2	1

Tabla 7. Matriz pareada de pendientes. Fuente: Elaboración propia.

Inconsistencia	0.03114	
Rango	Ponderación	Estandarización
+15	0.04213	0.09463
0 - 3	0.44526	1
3 - 5	0.29401	0.6603
5 - 10	0.13275	0.29815
10 - 15	0.08584	0.19278

Tabla 8. Inconsistencia y ponderación de los atributos del criterio Pendientes. Fuente: Elaboración propia.

Uso de suelo					
	Desprovisto de vegetación y sin vegetación aparente	Pastizales y agricultura	Zonas urbanas	Vegetación secundaria	Bosques, tulares y cuerpos de agua
Desprovisto de vegetación y sin vegetación aparente	1	2	5	6	7
Pastizales y agricultura	1/2	1	4	5	6
Zonas urbanas	1/5	1/4	1	2	3
Vegetación secundaria	1/6	1/5	1/2	1	2
Bosques, tulares y cuerpos de agua	1/7	1/6	1/3	1/2	1

Tabla 9. Matriz pareada de usos de suelo. Fuente: Elaboración propia.

Inconsistencia	0.02655	
Rango	Ponderación	Estandarización
Desprovisto de vegetación y sin vegetación aparente	0.4631	1
Pastizales y agricultura	0.3129	0.64199
Zonas urbanas	0.1087	0.41138
Vegetación secundaria	0.0694	0.18967
Bosques, tulares y cuerpos de agua	0.0459	0.0956

Tabla 10. Inconsistencia y ponderación de los atributos del criterio Usos de Suelo. Fuente: Elaboración propia.

Geología					
	Basalto Metavolcano sedimentario	Andesita, Andesita - Basalto, Basalto - Andesita, Dacita, y Dacita - Andesita.	Andesita - Dacita Ignimbrita - Riolita Toba andesítica Toba andesítica andesita	Andesita-Toba andesítica Toba dacítica riolítica Toba riolítica- toba dacítica	Aluvial Lacustre Lahar Lahar - toba andesítica
Basalto Metavolcano sedimentario	1	2	3	5	7
Andesita, Andesita - Basalto, Basalto - Andesita, Dacita, y Dacita - Andesita.	1/2	1	2	4	6
Andesita - Dacita Ignimbrita - Riolita Toba andesítica Toba andesítica andesita	1/3	1/2	1	3	5
Andesita-Toba andesítica Toba dacítica riolítica Toba riolítica-toba dacítica	1/5	1/4	1/3	1	3
Aluvial Lacustre Lahar Lahar - toba andesítica	1/7	1/6	1/5	1/3	1

Tabla 11. Matriz pareada de Geología. Fuente: Elaboración propia.

Inconsistencia	0.03028	
Rango	Ponderación	Estandarización
Basalto y metavolcano sedimentario	0.4276	1
Andesita, andesita - basalto, basalto - andesita, dacita, y dacita - andesita.	0.27451	0.64199
Andesita - dacita, ignimbrita - riolita, toba andesítica y toba andesítica andesita.	0.17591	0.41138
Andesita - toba andesítica, toba dacítica riolítica y toba riolítica-toba dacítica.	0.0811	0.18967
Aluvial, lacustre, lahar y lahar - toba andesítica.	0.04088	0.0956

Tabla 12. Inconsistencia y ponderación de los atributos del criterio Geología. Fuente: Elaboración propia.

Fallas					
	>2000	1500 - 2000	1000 - 1500	500 - 1000	<500
>2000	1	3	4	6	8
1500 - 2000	1/3	1	2	4	6
1000 - 1500	1/4	1/2	1	3	5
500 - 1000	1/6	1/4	1/3	1	0
<500	1/8	1/6	1/5	0	1

Tabla 13. Matriz pareada de rangos de distancia a fallas. Fuente: Elaboración propia.

Inconsistencia	0.04108	
Rango	Ponderación	Estandarización
>2000	0.4960	1
1500 - 2000	0.2377	0.47933
1000 - 1500	0.1555	0.31345
500 - 1000	0.0733	0.14774
<500	0.0376	0.07572

Tabla 14. Inconsistencia y ponderación de los atributos del criterio Fallas. Fuente: Elaboración propia.

Edafología			
	Fina	Media	Gruesa
Fina	1	5	7
Media	1/5	1	3
Gruesa	1/7	1/3	1

Tabla 15. Matriz pareada de Edafología de acuerdo con la textura del suelo. Fuente: Elaboración propia.

Inconsistencia	0.06239	
Rango	Ponderación	Estandarización
Fina	0.73064	1
Media	0.18839	0.25785
Gruesa	0.08096	0.11081

Tabla 16. Inconsistencia y ponderación de los atributos del criterio Edafología. Fuente: Elaboración propia.

Cuerpos de agua y red hidrológica					
	>2000	1500 - 2000	1000 - 1500	500 - 1000	<500
>2000	1	3	4	6	8
1500 - 2000	1/3	1	2	4	6
1000 - 1500	1/4	1/2	1	3	5
500 - 1000	1/6	1/4	1/3	1	0
<500	1/8	1/6	1/5	0	1

Tabla 17. Matriz pareada de rangos de distancia a cuerpos de agua y ríos. Fuente: Elaboración propia.

Inconsistencia	0.04108	
Rango	Ponderación	Estandarización
>2000	0.4960	1
1500 - 2000	0.2377	0.47933
1000 - 1500	0.1555	0.31345
500 - 1000	0.0733	0.14774
<500	0.0379	0.07572

Tabla 18. Inconsistencia y ponderación de los atributos del criterio Cuerpos de agua y red hidrológica. Fuente: Elaboración propia.

Pozos					
	>2000	1500 - 2000	1000 - 1500	500 - 1000	<500
>2000	1	3	4	6	8
1500 - 2000	1/3	1	2	4	6
1000 - 1500	1/4	1/2	1	3	5
500 - 1000	1/6	1/4	1/3	1	0
<500	1/8	1/6	1/5	0	1

Tabla 19. Matriz pareada de rangos de distancia a pozos. Fuente: Elaboración propia.

Inconsistencia	0.04108	
Rango	Ponderación	Estandarización
>2000	0.496	1
1500 - 2000	0.238	0.4793
1000 - 1500	0.155	0.3135
500 - 1000	0.073	0.1477
<500	0.038	0.0757

Tabla 20. Inconsistencia y ponderación de los atributos del criterio Rangos de distancia a pozos. Fuente: Elaboración propia.

Asentamientos					
	>2000	1500 - 2000	1000 - 1500	500 - 1000	<500
>2000	1	3	4	6	8
1500 - 2000	1/3	1	2	4	6
1000 - 1500	1/4	1/2	1	3	5
500 - 1000	1/6	1/4	1/3	1	0
<500	1/8	1/6	1/5	0	1

Tabla 21. Matriz pareada de rangos de distancia a asentamientos. Fuente: Elaboración propia.

Inconsistencia	0.04108	
Rango	Ponderación	Estandarización
>2000	0.495971	1
1500 - 2000	0.237734	0.47933
1000 - 1500	0.155464	0.31345
500 - 1000	0.073275	0.14774
<500	0.037556	0.07572

Tabla 22. Inconsistencia y ponderación de los atributos del criterio Rangos de distancia a asentamientos. Fuente: Elaboración propia.

Vías de comunicación			
	300 - 500	500 - 700	<300 y >700
300 - 500	1	3	6
500 - 700	1/3	1	4
<300 y >700	1/6	1/4	1

Tabla 23. Matriz pareada de rangos de distancia a vías de comunicación. Fuente: Elaboración propia.

Inconsistencia	0.05156	
Rango	Ponderación	Estandarización
300 - 500	0.64422	1
500 - 700	0.27056	0.41997
<300 y >700	0.08522	0.13228

Tabla 24. Inconsistencia y ponderación de los atributos del criterio Rangos de distancia a vías de comunicación. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 12 se pueden observar los valores de las Tablas 7 a 24 representados de manera gráfica.

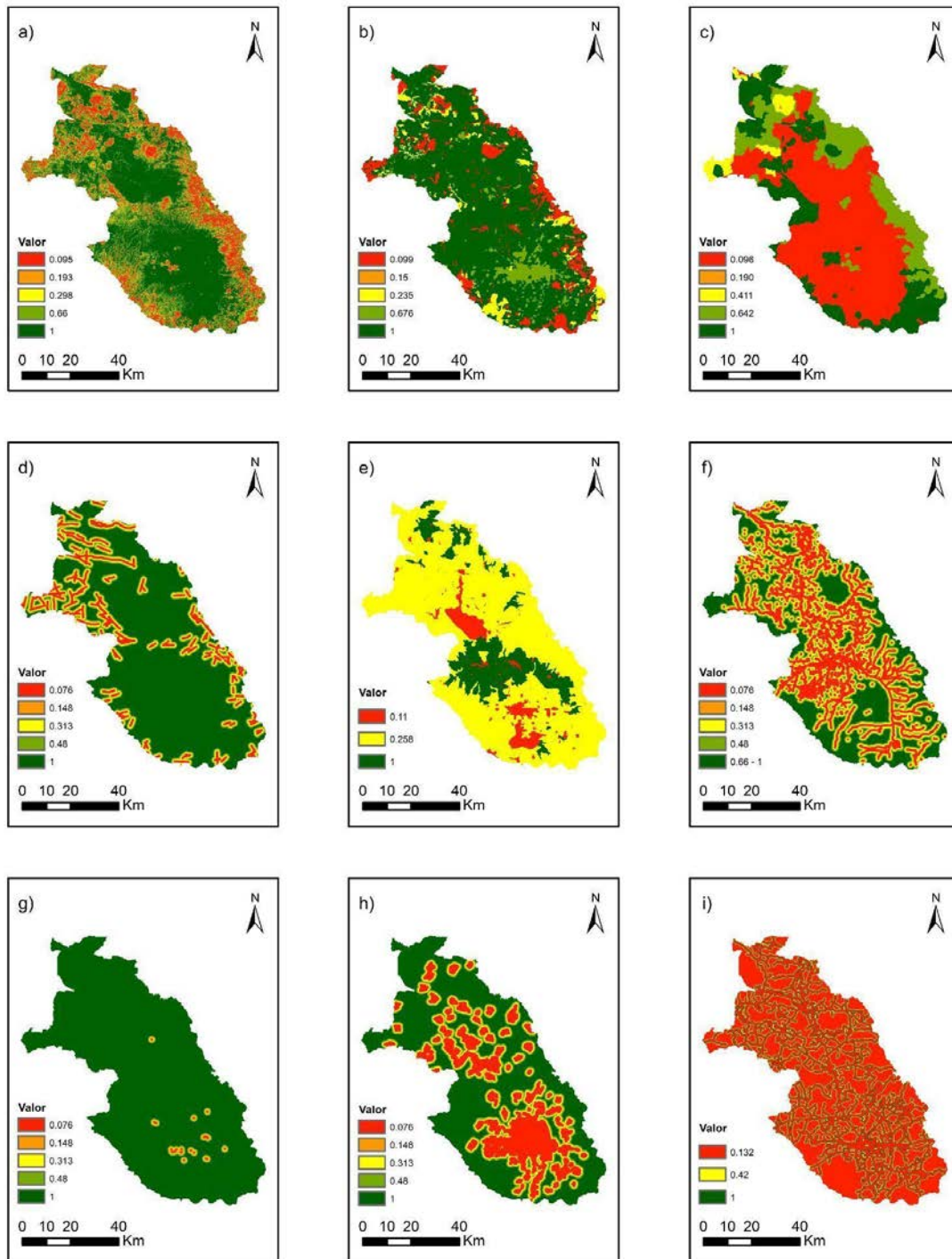


Figura 12. Esquema de criterios estandarizados: a) pendiente; b) uso de suelo; c) geología; d) fallas; e) edafología; f) red hidrológica y cuerpos de agua; g) pozos; h) asentamientos humanos; i) vías de comunicación. Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se realizó el proceso de combinación lineal ponderada para obtener un mapa de aptitud territorial que permitiera identificar los sitios potenciales para la colocación de PTARsD, esto se llevó a cabo mediante la aplicación de la siguiente operación aritmética:

$$\begin{aligned} & [(Pendientes * 0.282) + (Uso de Suelo * 0.189) + (Edafología * 0.116) + \\ & (Geología * 0.116) + (Fallas * 0.116) + (Asentamientos Humanos * 0.032) \\ & + (Vias de Comunicación * 0.023) + (Red Hidrológica y Cuerpos de Agua * 0.072) \\ & + (Pozos * 0.047)] * Red Hidrológica y Cuerpos de Agua * ANP \end{aligned}$$

En la Figura 13 se presenta el mapa resultado de la combinación lineal ponderada anteriormente descrita, en el cual los diferentes colores representan la viabilidad del territorio para la colocación de PTARsD:

- **Rojo - Muy bajo:** Áreas donde las condiciones del terreno no son favorables para la instalación de PTARsD.
- **Naranja - Bajo:** Áreas con condiciones desfavorables y que requerirían de un proceso de preparación del terreno costoso y drástico para poder colocar una PTARsD.
- **Amarillo - Medio:** Áreas con condiciones moderadamente aceptables, donde el proceso de preparación del terreno requeriría de una inversión moderada y modificaciones menos drásticas al lugar seleccionado.
- **Verde Claro - Alto:** Áreas con condiciones adecuadas para la colocación de PTARsD, en estas áreas el proceso de preparación del terreno requeriría de menos recursos tanto humanos como financieros y la modificación al paisaje no es tan abrupta.
- **Verde Oscuro - Muy Alto:** Áreas con las condiciones más favorables para la instalación de PTARsD.

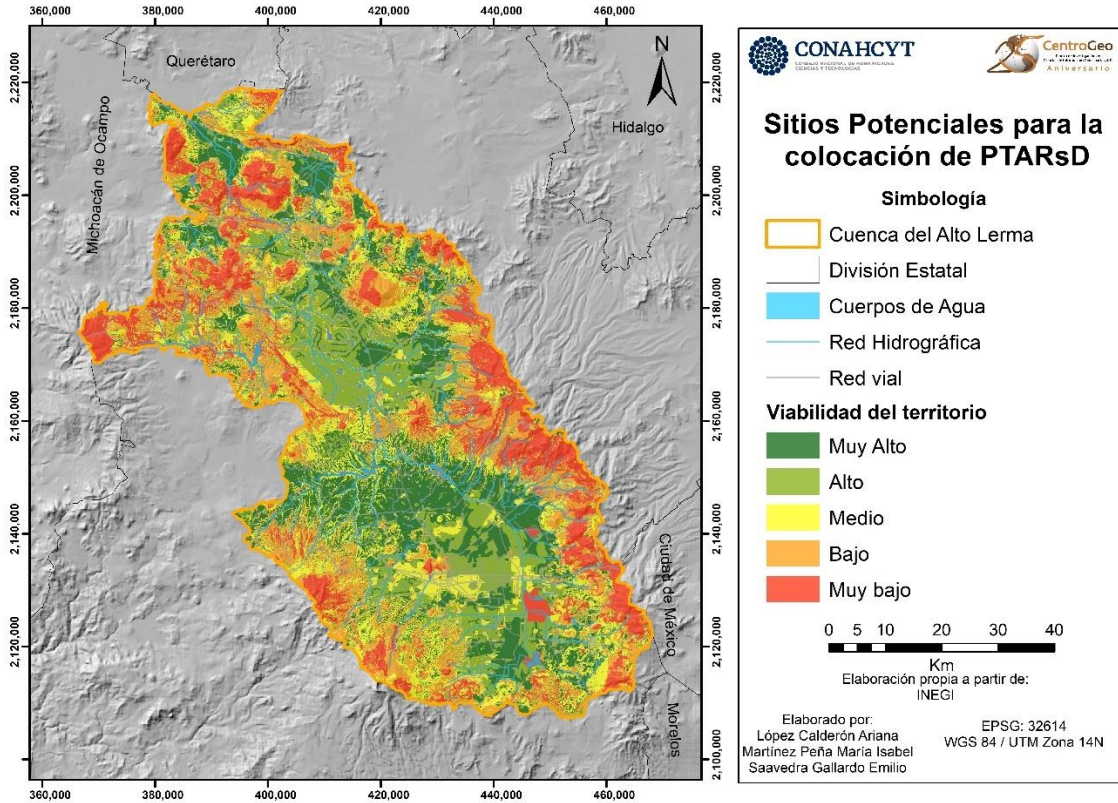


Figura 13. Mapa de sitios potenciales para la colocación de PTARsD. Fuente: Elaboración propia.

En el mapa se observa que las zonas más aptas para la colocación de PTARsD se encuentran principalmente al norte del municipio de Toluca y algunas zonas al sur, donde la pendiente es menos pronunciada o casi plana, por lo cual los recursos para la construcción, tanto humanos como económicos serán menores en comparación con los requeridos para la preparación del terreno y posterior construcción en otras áreas menos aptas.

Estas áreas con un potencial muy alto para la colocación de PTARsD también se encuentran en la zona norte de la Cuenca, en los límites con los estados de Querétaro y Michoacán, así como algunas zonas en el sur del área de estudio, estas áreas son las más recomendadas para la colocación de plantas de tratamiento de aguas residuales debido a su baja permeabilidad geológica, adecuada pendiente, distancia segura de cuerpos de agua, fallas y pozos, así como su proximidad equilibrada a vías de comunicación.

La distribución geográfica de las zonas con alto y muy alto potencial permite planificar una red descentralizada de PTARsD. Esto no solo puede mejorar la eficiencia del tratamiento

de aguas residuales, sino también reducir la carga en las plantas centrales, distribuyendo mejor la capacidad de tratamiento a lo largo del territorio.

En la tabla siguiente se muestra por medio de porcentajes el potencial del territorio de la Cuenca para la colocación de PTARsD.

Potencial	% en la cuenca
Muy bajo	21.24%
Bajo	20.25%
Medio	18.78%
Alto	19.24%
Muy Alto	20.49%

Tabla 25. Porcentajes de aptitud territorial en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

La tabla de porcentajes (Tabla 25) muestra que el 40.73% de la cuenca tiene un potencial alto o muy alto para la colocación de PTARsD, mientras que el 41.49% tiene un potencial bajo o muy bajo. Esta distribución indica una variabilidad significativa en la aptitud del terreno, lo que es crucial para una planificación adecuada. Las zonas de potencial medio (18.78%) también deben considerarse para complementar la red de PTARsD, especialmente en áreas donde las necesidades de tratamiento de aguas son altas pero las condiciones no son óptimas.

Por otra parte, la ubicación de PTARsD en zonas con alto y muy alto potencial en los límites con Querétaro y Michoacán, así como en el sur del área de estudio, puede fomentar la colaboración intermunicipal e interestatal. Esto podría llevar a acuerdos y proyectos conjuntos para mejorar el tratamiento de aguas residuales a nivel regional.

Los resultados del análisis espacial revelaron que aproximadamente el 39.73% de la cuenca tiene un potencial alto o muy alto para la colocación de PTARsD, mientras que el 41.49% tiene un potencial bajo o muy bajo. Las zonas con mayor potencial para la colocación de PTARsD se localizan principalmente en municipios como: San Antonio la Isla, Rayón, Metepec, la zona Norte de Toluca, Ixtlahuaca, Jiquipilco y Temascalcingo. De manera particular, algunas localidades donde se presenta un potencial alto y muy alto son: Santa María la Asunción, San Salvador Tizatlalli, San Lorenzo Coacalco (Metepec), San

Francisco Totoltepec, San Mateo Otzacatipan, La Magdalena Otzacatipan (Toluca) y Guadalupe Cachi (Ixtlahuaca).

Desarrollo de la Plataforma Digital

La plataforma es una herramienta diseñada para ayudar a profesionales, investigadores, y tomadores de decisiones en la identificación y evaluación de ubicaciones estratégicas para la instalación de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas (PTARsD).

Nuestro objetivo es asegurar que los usuarios puedan utilizar esta herramienta de manera efectiva y eficiente, contribuyendo así a la planificación y desarrollo sostenible de infraestructuras esenciales para la gestión de recursos hídricos en la región de la Cuenca del Alto Lerma.

La plataforma se realizó utilizando tecnologías web estándar como HTML, CSS y JavaScript. HTML estructuró el contenido, CSS definió el diseño visual y JavaScript añadió interactividad. Esta combinación de elementos asegura una experiencia de usuario atractiva, informativa y fácil de navegar, proporcionando una base sólida para que los visitantes comprendan la importancia y el alcance del proyecto.

En las diferentes secciones de la página se puede encontrar un menú de navegación que permite acceder rápidamente a otras secciones del sitio web, como "Inicio", "Sitios Potenciales", "Metodología", "Acerca de", y "Contacto".

Inicio

La sección "Inicio" (Figura 14) ofrece un punto de entrada claro y directo a la información clave del proyecto, en ella se encuentra un carrusel de imágenes dinámico que presenta diferentes aspectos del proyecto con descripciones breves y botones de "Explorar" que dirigen a secciones detalladas como la metodología de análisis multicriterio, la zona de estudio y los resultados esperados.



Figura 14. Página principal de la plataforma digital. Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, contiene tarjetas visuales (Figura 15) proporcionan resúmenes concisos sobre temas cruciales del proyecto. Cada tarjeta incluye un botón que permite a los usuarios profundizar en la información presentada.

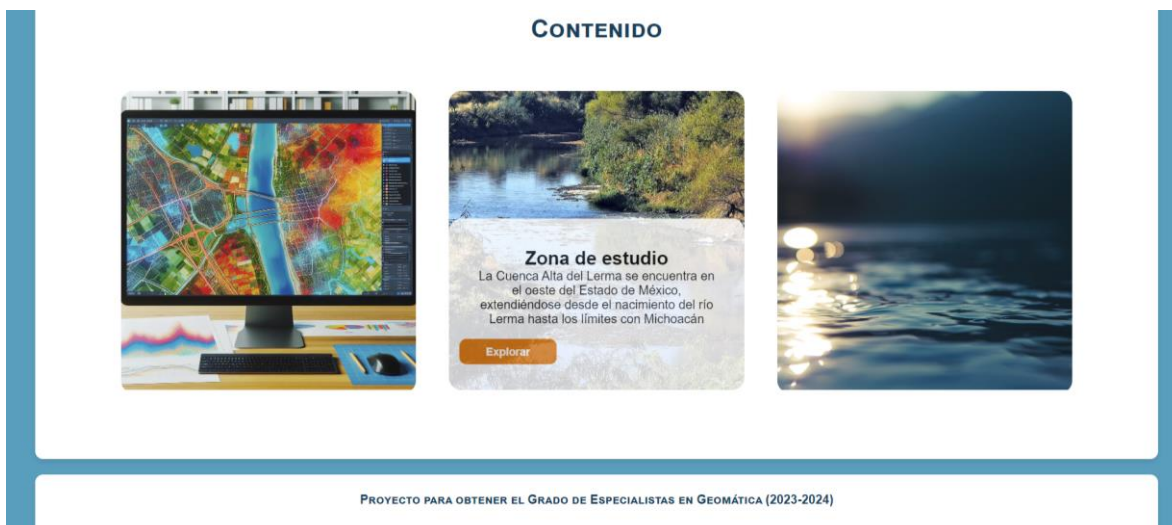


Figura 15. Sección de tarjetas en la página principal de la plataforma digital. Fuente: Elaboración propia.

Sitios potenciales

Esta sección es el componente más importante de la plataforma, ya que proporciona una interfaz interactiva y visual para explorar los datos geoespaciales. Además, es fundamental para la identificación y análisis de sitios potenciales para la instalación de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas (PTARsD).

“Sitios Potenciales” (Figura 16), ofrece una herramienta fácil de usar para visualizar, analizar y manipular datos geográficos relacionados con los aspectos ambientales, técnicos y socioeconómicos de la región de estudio que fueron incluidos en el análisis multicriterio.

Capas de Información

- Aspectos Ambientales: Incluye capas como la red hidrológica, cuerpos de agua, pozos y áreas naturales protegidas. Estas capas permiten evaluar el entorno ambiental y su impacto en la selección de sitios.
- Aspectos Técnicos: Contiene información sobre la pendiente, edafología, geología y fallas geológicas, esenciales para entender las características físicas del terreno.
- Aspectos Socioeconómicos: Proporciona datos sobre asentamientos humanos y vías de comunicación, cruciales para evaluar la accesibilidad y el impacto social.
- Sitios Potenciales: Muestra la viabilidad de diferentes sitios para la instalación de PTARs, basada en un análisis multicriterio.

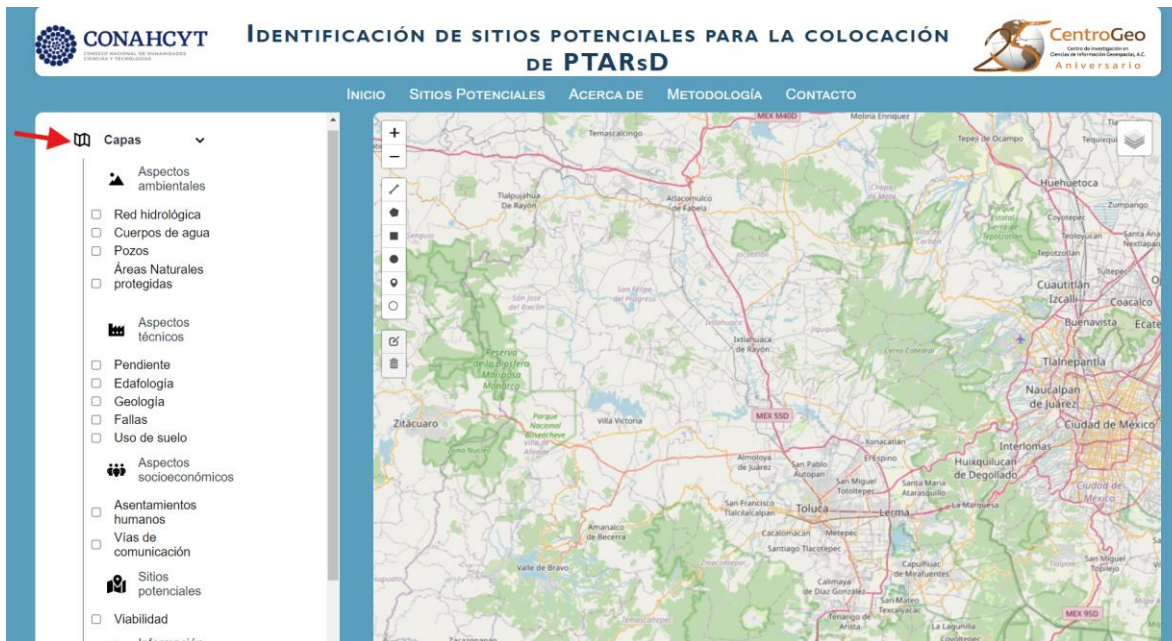


Figura 16. Sección Sitios Potenciales de la Plataforma digital. Fuente: Elaboración propia.

Para cada una de las capas, al activar su check box y dar clic sobre ellas en el mapa, arroja características de la zona seleccionada.

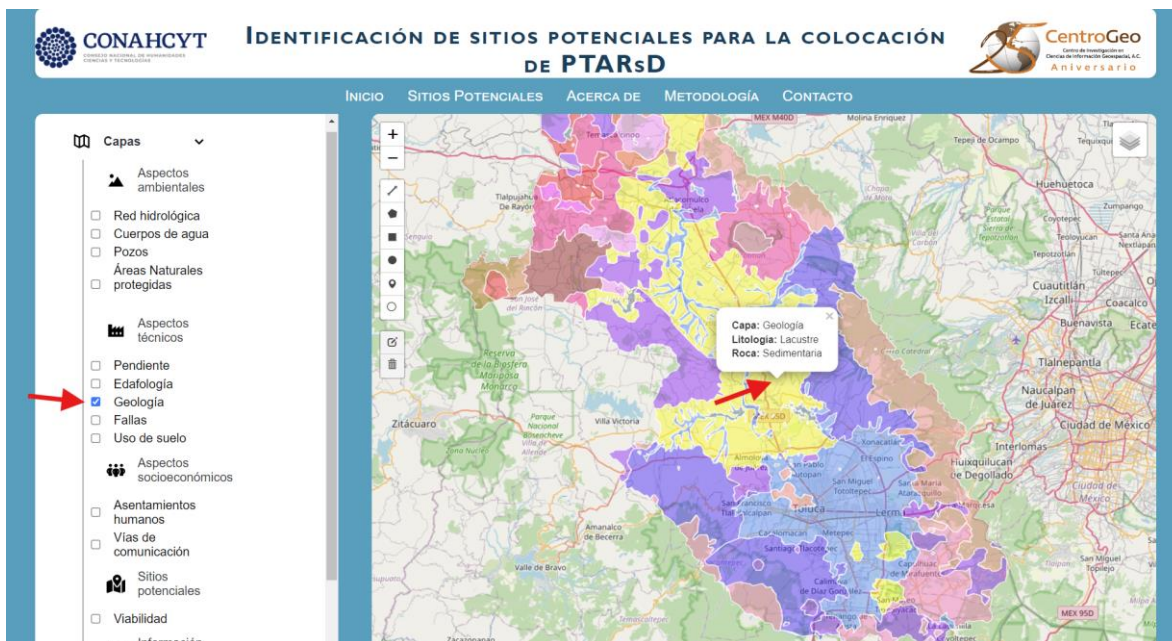


Figura 17. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (1). Fuente: Elaboración propia.

Entre las capas que se pueden observar está la generada a partir de los diferentes procesos descritos en la metodología. Se encuentra en el menú de capas y su nombre es “Viabilidad”.

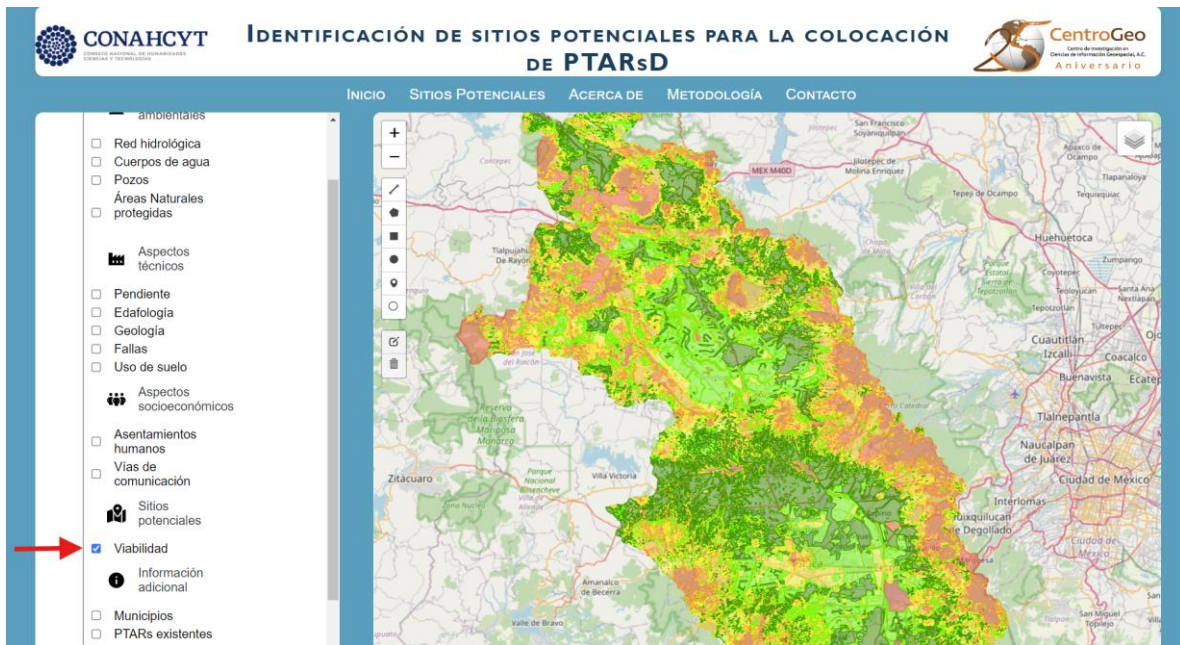


Figura 18. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (2). Fuente: Elaboración propia.

Herramientas

- **Obtener Coordenadas:** Permite a los usuarios hacer clic en el mapa para obtener las coordenadas exactas de cualquier punto. Para activar esta función sólo hay que desplegar el menú de “Herramientas” y seleccionar “Obtener coordenada”, posteriormente sólo es necesario dar clic sobre el punto del cual se desea conocer las coordenadas. Se muestra un ejemplo a continuación.

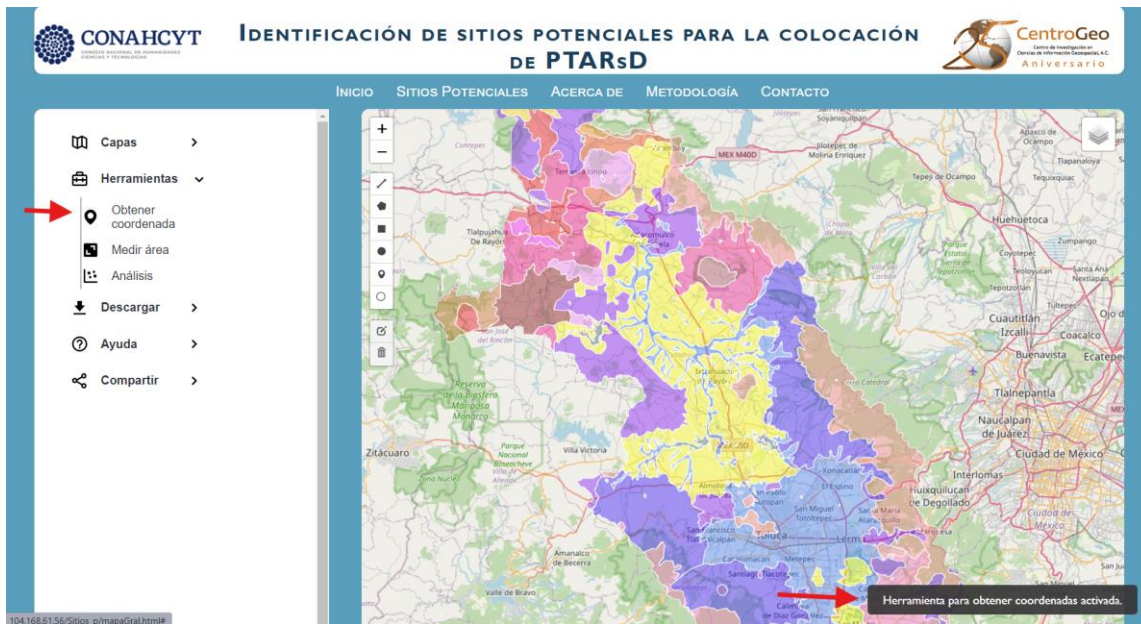


Figura 19. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (3). Fuente: Elaboración propia.

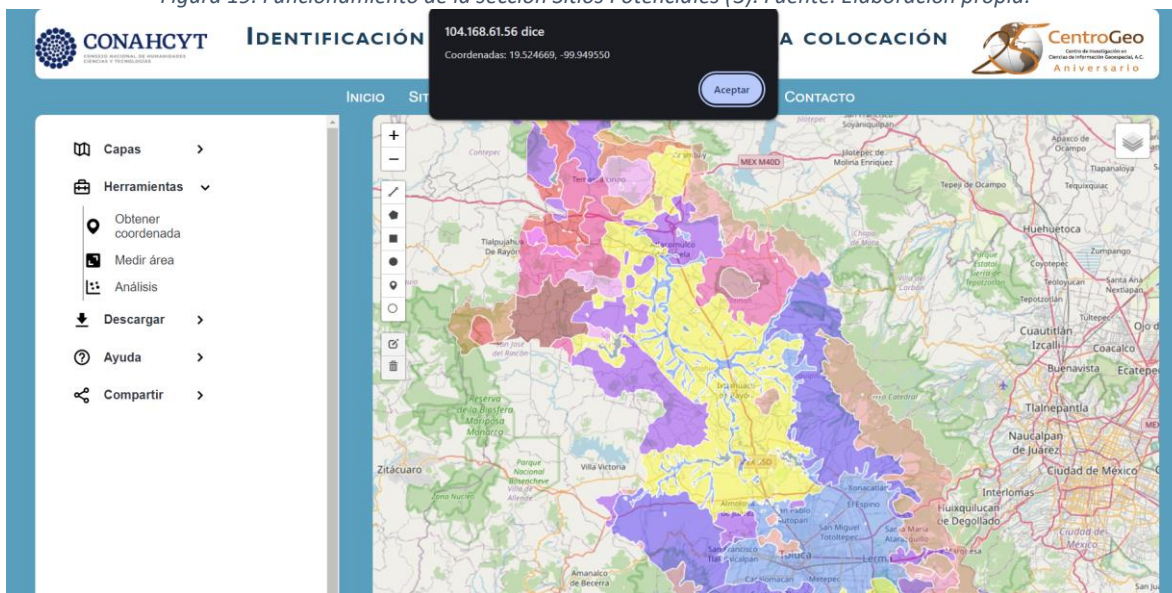


Figura 20. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (4). Fuente: Elaboración propia.

- **Medir área:** Ofrece herramientas para medir áreas directamente en el mapa, facilitando el análisis espacial. Para activar esta función sólo es necesario dar clic sobre “Medir área” y posteriormente dibujar un polígono con las herramientas para ello que se encuentran dentro del mapa.



Figura 21. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (5). Fuente: Elaboración propia.

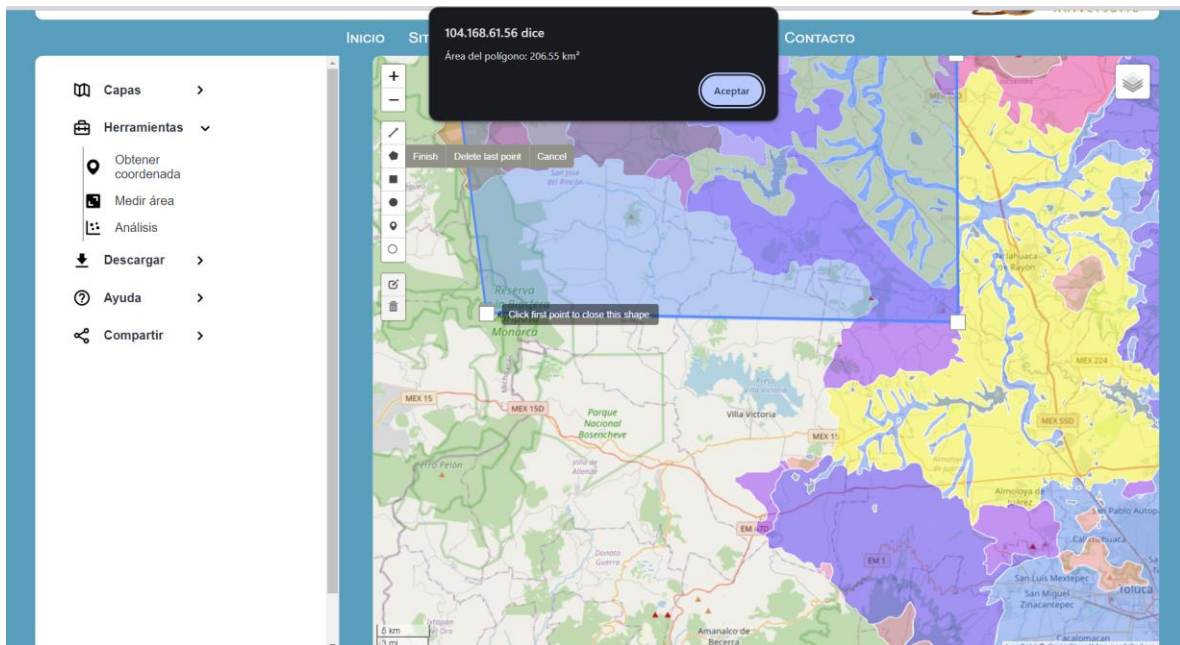


Figura 22. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (6). Fuente: Elaboración propia.

- **Análisis:** Permite a los usuarios dibujar polígonos en el mapa y analizar las intersecciones con las capas activas, proporcionando un análisis detallado de las áreas seleccionadas.

Para utilizar esta herramienta primero es necesario activar una o más capas, posteriormente dibujar un polígono con ayuda de la herramienta que se encuentra

en el mapa para este propósito y por último dar clic “Análisis”, con lo cual se abrirá una ventana con los datos de las capas que estén activas y de los datos que contiene el área seleccionada.



Figura 23. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (7). Fuente: Elaboración propia.

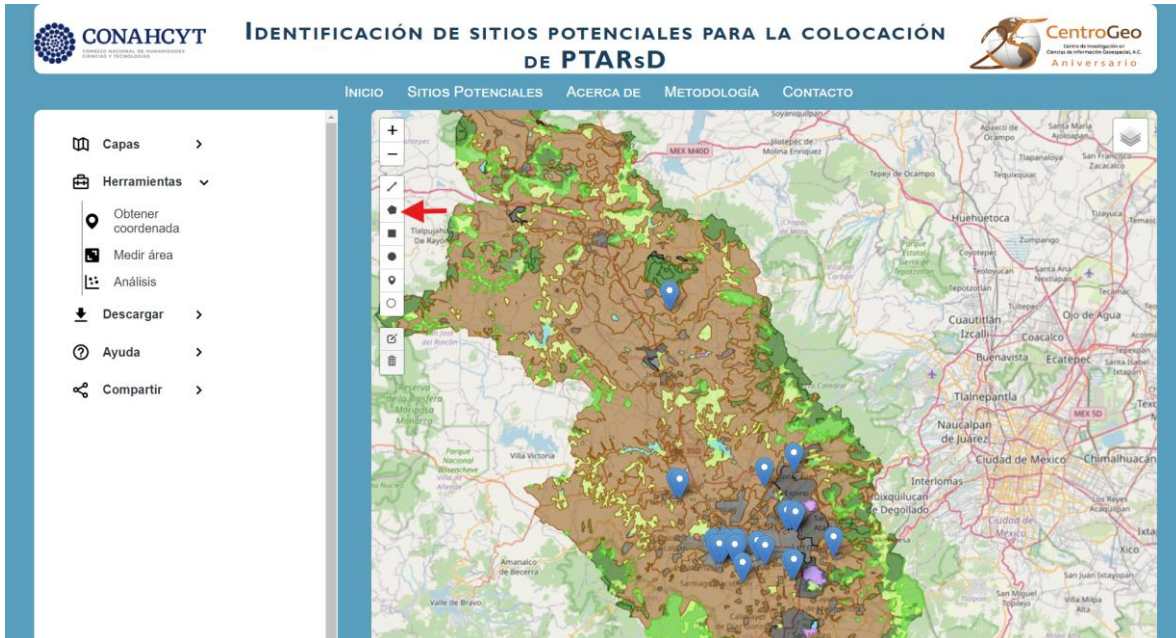


Figura 24. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (8). Fuente: Elaboración propia.

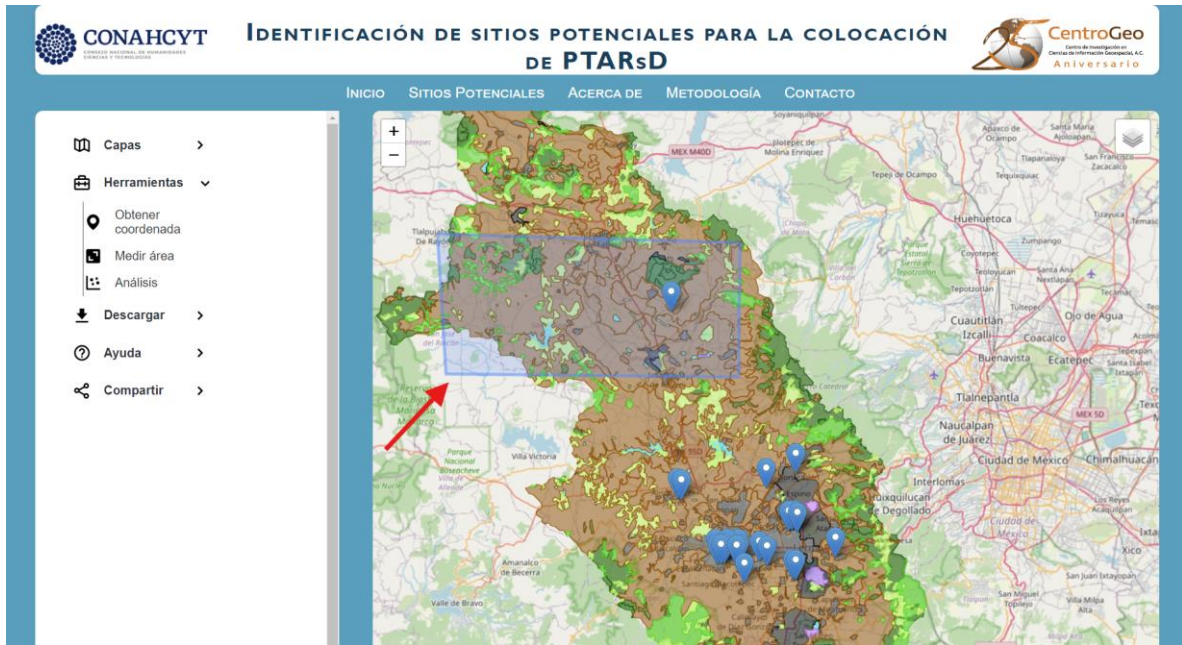


Figura 25. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (9). Fuente: Elaboración propia.

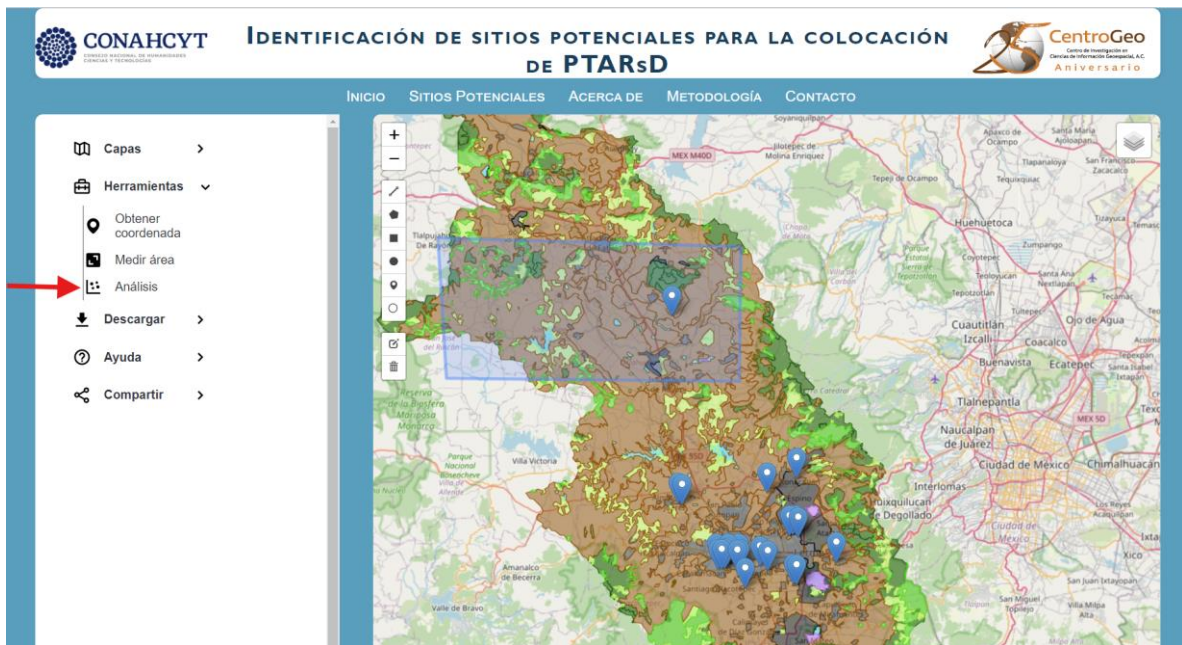


Figura 26. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (10). Fuente: Elaboración propia.



Figura 27. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (11). Fuente: Elaboración propia.

Funciones de Descarga

- Descarga de GeoJSON y KML: Los usuarios pueden descargar las capas seleccionadas en formatos GeoJSON y KML, facilitando la integración con otras herramientas y aplicaciones GIS.

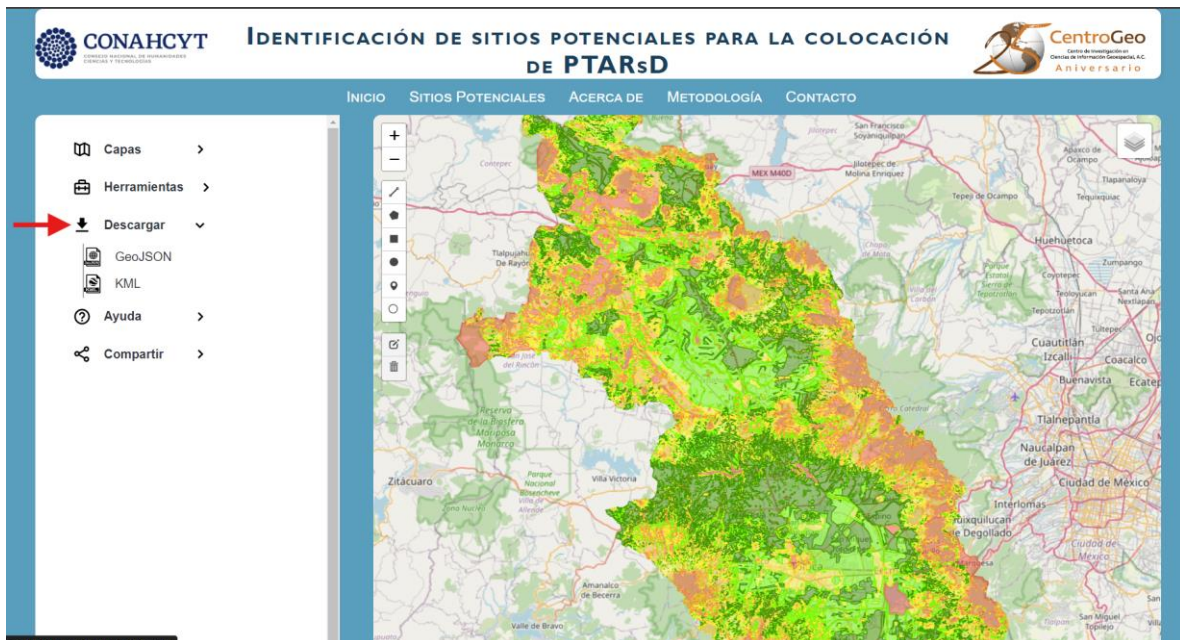


Figura 28. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (12). Fuente: Elaboración propia.

Compartir y Guardar Mapas

- Compartir URL: Permite copiar la URL actual del mapa para compartirla fácilmente con otros usuarios.
- Captura de Imagen del Mapa: Ofrece la opción de capturar y descargar una imagen del mapa actual.

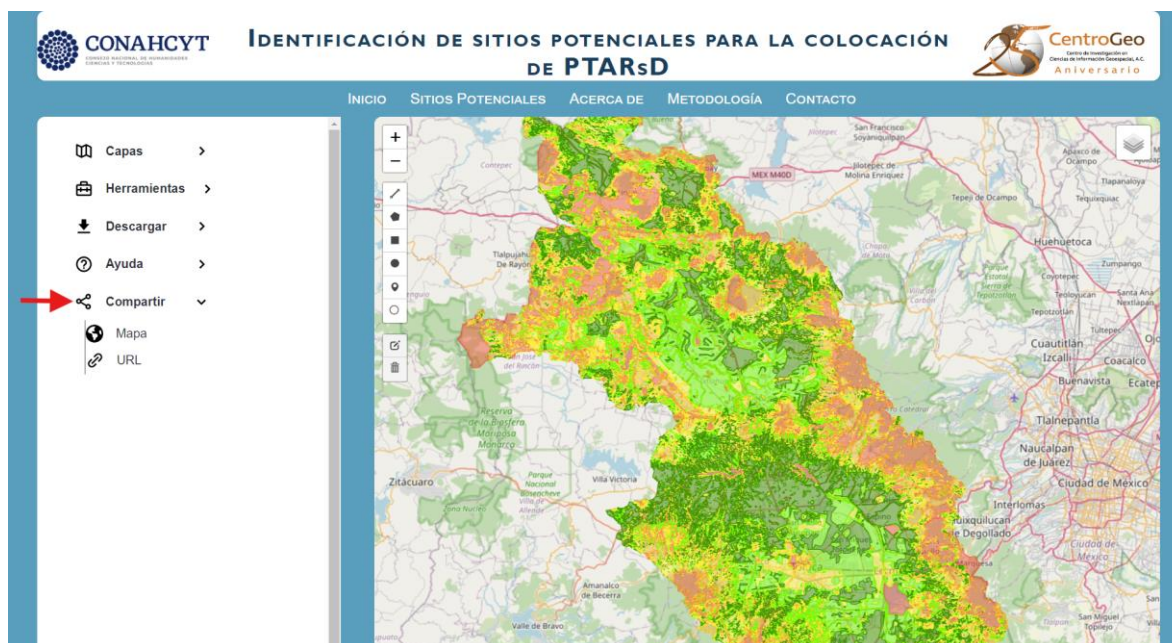


Figura 29. Funcionamiento de la sección Sitios Potenciales (13). Fuente: Elaboración propia.

Acerca de

El propósito de esta sección es ofrecer una visión integral y bien estructurada del proyecto, permitiendo a los visitantes entender el contexto, los objetivos y la importancia del trabajo realizado. Esta sección es crucial para establecer el trasfondo necesario para apreciar las metodologías y resultados presentados en otras partes del sitio.

Contenido:

1. Acerca de la Página

Esta subsección describe el objetivo de la plataforma, destacando su enfoque en la identificación de sitios propicios para la instalación de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas (PTARsD) mediante análisis multicriterio y Sistemas de Información Geográfica.

2. Área de Estudio

Descripción Física: Presenta información detallada sobre la ubicación, extensión, edafología, geología, uso del suelo e hidrología de la Cuenca del Alto Río Lerma, proporcionando un contexto geográfico y ambiental esencial.

Descripción Socio-Económica: Analiza la composición demográfica de la región, incluyendo datos sobre la densidad poblacional y los principales municipios, ofreciendo una perspectiva sobre la estructura social y económica del área de estudio.

3. Problemática

Planteamiento del Problema: Explica los desafíos ambientales, especialmente la contaminación del agua en la Región Hidrológica 12, y la necesidad de un manejo ambiental adecuado para mitigar estos impactos.

Justificación: Detalla la importancia de abordar la contaminación del agua, destacando los marcos legales y la necesidad de soluciones descentralizadas para el tratamiento de aguas residuales.

4. Manual de Usuario

Proporciona instrucciones y guías sobre cómo utilizar la plataforma, facilitando la navegación y aprovechamiento de las herramientas disponibles.



Figura 30. Sección Acerca de en la Plataforma digital. Fuente: Elaboración propia.

Metodología

La sección de "Metodología" de la página web describe el proceso utilizado para identificar sitios potenciales para la instalación de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas (PTARsD) en la Cuenca del Alto Lerma. Esta sección describe de manera general los métodos empleados.



Figura 31. Sección Metodología de la Plataforma digital. Fuente: Elaboración propia.

Contacto

La sección "Contacto" es fundamental proporciona un canal directo para enviar preguntas, sugerencias o comentarios sobre el proyecto.

El objetivo principal de la sección "Contacto" es permitir que los usuarios se pongan en contacto de manera sencilla y efectiva. Esto ayuda a mantener una comunicación abierta y a resolver cualquier duda o problema que los usuarios puedan tener sobre el proyecto.

El formulario incluye campos para el nombre, apellidos, correo electrónico y mensaje. Estos campos son obligatorios para asegurar que se obtenga toda la información necesaria para responder adecuadamente. Una vez que los campos sean llenados sólo hay que presionar el botón de "Enviar" para mandar un correo con el mensaje y los datos proporcionados.

De lado izquierdo se puede observar en un Mapa de Google Maps la ubicación de CentroGeo en la Ciudad de México.

Finalmente, se proporciona los correos electrónicos de los desarrolladores del proyecto con enlaces directos para enviar correos electrónicos.

CONAHCYT IDENTIFICACIÓN DE SITIOS POTENCIALES PARA LA COLOCACIÓN DE PTARs **CentroGeo** Aniversario

INICIO SITIOS POTENCIALES ACERCA DE METODOLOGÍA CONTACTO

¿TIENES DUDAS O SUGERENCIAS? ¡CONTÁCTANOS!

Nombre
Nombre

Apellidos
Apellido

Correo electrónico
-@-

Escribe tu mensaje
Mensaje

Enviar

UBICACIÓN CENTROGEO, CDMX

C. Contoy 137
C. Contoy 137, Territorio Torres,
Lomas de Padierna, Tlalpan, 14200
Ciudad de México, CDMX

Ampliar el mapa

Starbucks Picacho
El Periban Ajusco Picacho
Little Caesars Pizza Ajusco
Sumo Picacho
Elektra
9 3/4 Coffee Shop
Cafeteria Harry Potter
TAS AHOGADAS HIFLADERO GDL
Mariscos de Puerto
Combinaciones de teclas
Datos del mapa ©2024 INEGI
Condiciones

Figura 32. Sección Contacto de la Plataforma digital. Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

A partir de la metodología establecida, se puede concluir que se logró cumplir con los objetivos planteados en el presente documento, ya que la utilización del análisis multicriterio en combinación con Sistemas de Información Geográfica demostró ser una herramienta eficaz para la identificación de sitios potenciales para la instalación de PTARsD. Esta metodología permitió integrar múltiples variables técnicas (Pendiente, Uso de suelo, Edafología, Geología, Fallas), socioeconómicas (Asentamientos, Vías de comunicación) y ambientales (Red Hidrológica, Cuerpos de Agua, Pozos), proporcionando una evaluación integral y sistemática que podría favorecer la toma de decisiones de diferentes actores sociales, tales como los gobiernos municipales de la región.

Los criterios junto con las restricciones evaluadas fueron esenciales para determinar la aptitud territorial. La ponderación y estandarización de estos criterios aseguraron una evaluación precisa y coherente de las áreas más adecuadas para la instalación de PTARsD, a partir de la asignación de niveles de importancia y de índices de inconsistencia, con los cuales fue posible evaluar la coherencia de la toma de decisiones tomadas en cada paso.

Las zonas con un potencial bajo o muy bajo son las que se caracterizan por tener pendientes elevadas, grandes masas forestales, tipos de suelo con texturas medias a gruesas y tipos de roca permeables. Esta distribución indica una variabilidad significativa en la aptitud del terreno, lo cual es crucial para una planificación adecuada y efectiva.

Por otra parte, la gestión adecuada del agua es fundamental para el desarrollo sostenible. En este sentido, la implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales descentralizadas (PTARsD) en la Cuenca Alta del Río Lerma se plantea como una solución viable para enfrentar la problemática de la contaminación del agua. Este enfoque puede mejorar la eficiencia del tratamiento, reducir la carga en las macroplantas y disminuir los impactos negativos sobre el medio ambiente y la salud pública local.

La implementación efectiva de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales descentralizadas requiere un enfoque integral que cubra tanto las demandas de la población local como la protección sostenible de los recursos hídricos. Por lo tanto, es fundamental que las políticas públicas promuevan la gestión descentralizada y sostenible

del agua, facilitando la colaboración entre diferentes niveles de gobierno y sectores sociales.

REFERENCIAS

Addis, A. (2021). Selection of Wastewater Treatment Plant Site for Bahir Dar Town, Ethiopia Using Multi-Criteria Analysis on GIS platform. *Civil and Environmental Research*, 13(3). ISSN 2224-5790 (Paper) ISSN 2225-0514 (Online). <https://www.iiste.org>

Agrawal, R., Srivastava, A. K., & Nigam, A. K. (2019). GIS and AHP based site suitability for sewage treatment plant in Sultanpur district, India. *International Journal of Innovative*

Technology and Exploring Engineering, 8(6 Special Issue 4), 961–964.
<https://doi.org/10.35940/ijitee.F1196.0486S419>

Awawdeh, M., Al-Rousan, Z., & Alkaraki, K. (2023). *Wastewater treatment plant site selection using GIS and multicriteria decision analysis*. *Arabian Gulf Journal of Scientific Research*, 41(2), 123-137. DOI: 10.1108/AGJSR-09-2023-0412.

Awawdeh, M., Khalid, R., Al-Ayasrah, M., & Al-Mashaqbeh, O. (2019). Evaluation of groundwater vulnerability to pollution using GIS and DRASTIC models: A case study of the Azraq basin, Jordan. *Journal of Environmental Management*, 242, 496-505.

Cabrera Santana, M. del C., & Custodio Gimena, E. (2013). Hidrogeología y terrenos volcánicos. Métodos, técnicas y experiencias en las Islas Canarias. En J. C. Santamarta Cerezal et al. (Eds.), *Hidrología y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos: Métodos, técnicas y experiencias en las Islas Canarias* (pp. 65-92). Colegio Oficial de Ingenieros de Montes.

CAEM. (2023). *Atlas de las Cuencas Hidrológicas del Estado de México*. Estado de México: Estado de México, CAEM.

Celemin, J. P. (2014). El proceso analítico jerárquico en el marco de la evaluación multicriterio: Un análisis comparativo.

CEPANAF (2002). *Áreas Naturales Protegidas del Estado de México*.

Congreso de la Unión. (2009). *Ley Federal sobre Metrología y Normalización*. México.

Congreso de la Unión. (2023). *Ley de Aguas Nacionales*. México.

Congreso de la Unión. (2024). *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. México.

Congreso de la Unión. (2024). *Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente*. México.

Dadić, T., Jurišić, M., & Tadić, L. (2014). Application of GIS in the wastewater management. *Technical Gazette*, 21(5), 1159–1163.

- De Anda Sánchez, J. (2017). Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México. *Sociedad y Ambiente*, 119-143.
- Deepa, K., & Krishnaveni, M. (2012). Suitable Site Selection of Decentralised Treatment Plants Using Multicriteria Approach in GIS. *Journal of Geographic Information System*, 04(03), 254–260. <https://doi.org/10.4236/jgis.2012.43030>
- Díaz-Cuenca, E., Alvarado-Granados, A. R., & Camacho-Calzada, K. E. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. *Quivera*, 78-97.
- Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental A.C. (2009, Diciembre 02). *Reciclagua es quien más contamina al Río Lerma*. Retrieved from Agua.org.mx: <https://agua.org.mx/reciclagua-es-quien-mas-contamina-al-rio-lerma/>
- García, E., 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Quinta ed. México: UNAM.
- García, J. L., Chagolla, F., & Noriega, S. A. (2006). Efectos de la colinealidad en el modelado de regresión y su solución. *Revista CULCyT*, 3(16), 88-96.
- Gemitzi, A., Tsihrintzis, V. A., Christou, O., & Petalas, C. (2007). Use of GIS in siting stabilization pond facilities for domestic wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 82(2), 155–166. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.12.022>
- Gobierno del Estado de México. (2011). *Atlas de la Cuenca del Río Lerma en el Estado de México*. Toluca de Lerdo: Gobierno del Estado de México.
- Gobierno del Estado de México. (2023). *Reciclagua Ambiental*. Retrieved from Secretaría de Desarrollo Urbano e Infraestructura: <https://reciclagua.edomex.gob.mx>
- Hama, A. R., Al-Suhili, R. H., & Ghafour, Z. J. (2019). A multi-criteria GIS model for suitability analysis of locations of decentralized wastewater treatment units: case study in Sulaimania, Iraq. *Heliyon*, 5(2019), e01355. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01355>

- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2009). Estrategia general para el rescate ambiental y sustentabilidad de la cuenca Lerma-Chapala. Informe final. Grupo Técnico de Trabajo de la cuenca Lerma-Chapala.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (1983a). Conjunto de datos vectoriales Geológicos serie I. Morelia.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (1983b). Conjunto de datos vectoriales Geológicos serie I. Ciudad de México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (1983c). Conjunto de datos vectoriales Geológicos serie I. Pachuca.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (1988). Conjunto de datos vectoriales Geológicos serie I. Querétaro.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2007a). Conjunto de Datos Vectorial Edafológico. Escala 1:250 000 Serie II Continuo Nacional Morelia E14-1.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2007b). Conjunto de Datos Vectorial Edafológico. Escala 1:250 000, Serie II, Continuo Nacional, Ciudad de México E14-2.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2007c). Conjunto de Datos Vectorial Edafológico. Escala 1:250 000 Serie II Continuo Nacional Pachuca F14-11.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2007d). Conjunto de Datos Vectorial Edafológico. Escala 1:250 000 Serie II Continuo Nacional Querétaro F14-10.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). Red hidrográfica edición 2.0. Región H. Lerma - Santiago. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/hidrografia/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2011). Red Nacional de Caminos. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/viascomunicacion/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2013). Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionemex/>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2016). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2018). Uso de suelo y vegetación. Serie VII. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2019). Cuenca hidrológica Río Lerma 1: humedales: informe técnico. México: INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). Censo de Población y Vivienda 2020.
- Kafil, M., & Albaji, M. (2017). *Selecting wastewater sites using analytical hierarchy and geographic information system*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Municipal Engineer, 170(1), 23-34. DOI: 10.1680/jmuen.16.00001.
- Kiker, G. A., Bridges, T. S., Varghese, A., Seager, T. P., & Linkov, I. (2005). Application of Multicriteria Decision Analysis in Environmental Decision Making. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 1(2), 95-108.
- Krásný, J., & Sharp, J. M. (Eds.). (2007). Groundwater in Fractured Rocks: Selected Papers from the Groundwater in Fractured Rocks International Conference, Prague, 2003. Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis. ISBN: 978-0-415-41442-5.
- López-Hernández, M., Ramos-Espinoza, M. G., & Carranza-Fraser, J. (2007). Análisis multimétrico para evaluar contaminación en el río Lerma y Lago de Chapala, México. *Hidrobiológica*, 17-30.
- Malczewski, J. (1999). GIS and multicriterial decision analysis. John Wiley & Sons.
- Malczewski, J., Rinner, C. (2015). Introduction to GIS-mcda. Multicriteria decision analysis in geographic information science, 23-54.
- Martínez Ortega, R. M., Tuya Pendás, L. C., Martínez Ortega, M., Pérez Abreu, A., & Cánovas, A. M. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman caracterización. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8(2), 0-0.

- Mason, C. H., & Perreault Jr, W. D. (1991). Collinearity, power, and interpretation of multiple regression analysis. *Journal of marketing research*, 28(3), 268-280.
- ONU. (2010). *Naciones Unidas*. Retrieved from Organización de las Naciones Unidas: https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/human_right_to_water.shtml#:~:text=El%2028%20de%20julio%20de,de%20todos%20los%20derechos%20humanos.
- Orozco, E., & Sánchez, M. T. (2004). Organización socioeconómica y territorial en la región del Alto Lerma, Estado de México. *Investigaciones Geográficas*, (53). Recuperado de http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/inv_geo_articulos/53/53.pdf
- Peña Manjarrez, V., Orozco Hernández, M. E., Franco Plata, R., Castaños Montes, C., Infante Serna, J. L., Gutiérrez Cedillo, J. G., & Olivera Martínez, C. (2000). *Atlas Ecológico de la Cuenca Hidrográfica del Río Lerma*. Estado de México: Gobierno del Estado de México.
- Peñacoba-Antona, L., Gómez-Delgado, M., & Esteve-Núñez, A. (2021). Multi-criteria evaluation and sensitivity analysis for the optimal location of constructed wetlands (METland) at oceanic and mediterranean areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(10). <https://doi.org/10.3390/ijerph18105415>
- Pereira, J. M., & Duckstein, L. (1993). A multiple criteria decision-making approach to GIS-based land suitability evaluation. *International journal of geographical Information science*, 7(5), 407-424.
- Pérez-Díaz, J. P., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-Ayala, C., Flores-Magdaleno, H., Sánchez-Bernal, E. I., Can-Chulim, A., & Mancilla-Villa, O. R. (2019). Concentración de nitrato, fosfato, boro y cloruro en el agua del río Lerma. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 175-185.
- Priego, Á. G., Morales, H., & Enríquez, C. (2004). Paisajes físico-geográficos de la cuenca Lerma-Chapala. *Gaceta Ecológica*, (71), 11-22. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

PROFEPA. (5 de Septiembre de 2016). *PROFEPA*. Obtenido de Ley de Aguas Nacionales: <https://www.gob.mx/profepa/documentos/ley-de-aguas-nacionales-62956>

Rashed Hama, A., Hashim Al-Suhili, R., & Jamal Ghafour, Z. (2019). A multi-criteria GIS model for suitability analysis of locations of decentralized wastewater treatment units: case study in Sulaimania, Iraq A multi-criteria GIS model for suitability analysis of locations of decentralized wastewater treatment units: case study in Sulaimania. *Iraq. Heliyon*, 5, 1355. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019>.

Saaty, T. L. (1990). An exposition of the AHP in reply to the paper “remarks on the analytic hierarchy process”. *Management science*, 36(3), 259-268.

Secretaría de Educación del Gobierno del Estado de México. (2011). Atlas de la cuenca del Río Lerma en el Estado de México. Compendio (1a ed.). Toluca de Lerdo: Gobierno del Estado de México, Secretaría del Agua y Obra Pública, Comisión Coordinadora para la Recuperación Ecológica de la Cuenca del Río Lerma. ISBN 978-607-495-153-0.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, & Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2018). Área de Protección de Flora y Fauna Ciénegas del Lerma. Primera edición. Ciudad de México: Autor.

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. (1996). NOM-001-ECOL-1996: Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. México.

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. (1997). NOM-003-ECOL-1997: Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. México.

SEMARNAT, CONAGUA. (2018). *Diagnóstico de calidad del agua de la Región Hidrológica Lerma Santiago Pacífico*. México: SEMARNAT, CONAGUA.

SEMARNAT. (2015). *Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión*. México.

- Sendra, J. B., & García, R. C. (2000). El uso de los sistemas de información geográfica en la planificación territorial. In *Anales de Geografía de la Universidad complutense* (Vol. 20, p. 49).
- Servicio Geológico Mexicano (SGM) (1997). Carta Geológica-Minera Pachuca F14-11, Hgo., Qro., Edo. Mex., Ver. y Pue., Escala 1:250,000.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM) (1998). Carta Geológica-Minera Morelia E14-1, Mich., Edo. Mex. y Gto., Escala 1:250,000.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM) (1999). Carta Geológica-Minera Querétaro F14-10, Qro., Gto., Mich., Jal. y Edo. Mex., Escala 1:250,000.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM) (2002). Carta Geológica-Minera Ciudad de México E14-2, Edo. de Mex., Tlax., D.F., Pue., Hgo. y Mor., Escala 1:250,000.
- Shahmoradi, B., & Isalou, A.-A. (2013). *Site selection for wastewater treatment plant using integrated fuzzy logic and multicriteria decision model: A case study in Kahak, Iran*. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 1(1), 51-61. DOI: 10.22102/jaehr.2013.40125.
- Taghilou, S., Peyda, M., Khosravi, Y., & Mehrasbi, M. R. (2019). Site Selection for Wastewater Treatment Plants in Rural Areas Using the Analytical Hierarchy Process and Geographical Information System. *Journal of Human, Environment, and Health Promotion*, 5(3), 137-144.
- Zhao, Y. W., Qin, Y., Chen, B., Zhao, X., Li, Y., Yin, X. A., & Chen, G. Q. (2009). GIS-based optimization for the locations of sewage treatment plants and sewage outfalls - A case study of Nansha District in Guangzhou City, China. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 14(4), 1746–1757. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2007.12.016>