



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE GEOGRAFÍA

**“IDENTIFICACIÓN DE SITIOS POTENCIALES PARA LA
GENERACIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE EL TRATAMIENTO DE
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS A PARTIR DE HERRAMIENTAS
GEOTECNOLÓGICAS EN EL VALLE DE TOLUCA”**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MAESTRA EN ANÁLISIS ESPACIAL Y GEOINFORMÁTICA**

PRESENTA:

LIC. en G.A. y R.H. CINDY MIREYA SAAVEDRA JAIMES

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ EMILIO BARÓ SUÁREZ

CODIRECTORES DE TESIS:

DR. FRANCISCO ZEPEDA MONDRAGÓN

DR. MARIO ESPARZA SOTO

TOLUCA, MÉXICO, SEPTIEMBRE DE 2024

Acrónimos

APPA	Asociación de Empresas de Energías Renovables
COESPO	Comisión Estatal de Población
CONABIO	Comisión Nacional de Biodiversidad
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GM	Green Momentum
IIE	Instituto de Investigaciones Eléctricas
LPGGIR	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
INEGI	Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática
RME	Residuos de Manejo Especial
RP	Residuos Peligrosos
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SDF	Sitios de Disposición Final
SEDUYM	Secretaría de Desarrollo Urbano y Metropolitano
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIG	Sistemas de Información Geográfica
UAEMex	Universidad Autónoma del Estado de México
ZMVT	Zona Metropolitana del Valle de Toluca
RS	Rellenos Sanitarios

Índice

Capítulo 1: Aspectos generales.....	8
1.1 Antecedentes	9
1.1.1 Las energías limpias en México.....	10
1.2 Antecedentes históricos del biogás.....	10
1.3 Generación de biogás en los rellenos sanitarios.....	12
1.3.1 El manejo de residuos sólidos en México	12
1.4 Experiencias internacionales sobre el aprovechamiento del biogás en relación con los RSU.....	14
1.4.1 Aprovechamiento de biogás en rellenos sanitarios en Francia	14
1.4.2 Empresa dedicada al aprovechamiento del biogás.....	15
1.4.3 Generación de electricidad por biogás mediante motores de combustión interna en Colombia	15
1.5.1 Investigaciones referentes al uso del biogás en rellenos sanitarios por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) de la UNAM	15
1.5.2 Proyecto Monterrey	16
1.5.3 Aplicación de biodigestores como medida para mitigar la contaminación fecal en Michoacán, México.....	17
1.6 Las geotecnologías como herramientas	18
1.6.1 Metodologías	19
1.7 Justificación	20
1.8 Hipótesis	21
1.9 Objetivos	21
Capítulo 2: Marco teórico - conceptual.....	22
2. 1 Conceptos básicos.....	23
2.1.1 Biogás	23
2.1.2 Bioenergía	24
2.1.3 Residuos Sólidos Urbanos (RSU)	25
2.1.4 Sitios de Disposición Final (SDF).....	27
2.1.5 Sitios potencialmente contaminados.....	28
2.1.6 Lixiviados	30
2.1.7 Producción de biogás en rellenos sanitarios.....	31
2.1.8 Oportunidades de biogás como fuente de energía	32
2.2 Biogás mediante residuos sólidos	33
2.2.1 Cálculo de emisiones de biogás en SDF	33

2.2.2 Modelo Mexicano de Biogás (MMB)	34
2.2.3 Zona Metropolitana del Valle de Toluca.....	34
2.2.4 Degradación biofísico-química de los RSU en los SDF	35
2.2.5 Sistema de Información Geográfica (SIG).....	37
2.2.6 Geotecnología.....	38
2.2.7 Proceso cartográfico.....	39
2.2.8 Proceso espacial.....	40
2.8.1 Evaluación multicriterio (EMC)	41
2.8.1.1 Método Saaty	41
2.8.1.2 Método Fuzzy AHP (Analytic Hierarchy Process).....	42
Capítulo 3: Marco legal y normativo.....	46
3.1 CONVENIOS INTERNACIONALES	47
3.2 LEGISLACIÓN FEDERAL.....	50
3.3 LEGISLACIÓN ESTATAL	50
3.4 LEGISLACIÓN MUNICIPAL	50
3.4.1 REGLAMENTOS	51
3.4.2 DECRETOS.....	51
3.5 NORMAS OFICIALES MEXICANAS (NOM)	52
3.5.1 NORMAS MEXICANAS (NMX)	53
Capítulo 4: Metodología	55
4.1 Caracterización geográfica.....	58
4.1.1 Delimitación de la zona de estudio.....	58
4.1.2 Búsqueda bibliográfica	60
4.1.3 Análisis experto	60
4.4 Representación espacial y asignación de pesos. Método Saaty	62
4.4.1 Construcción de base de datos cartográfica.....	62
4.4.2 Ponderación de criterios	62
4.4.3 Aplicación de las técnicas de evaluación multicriterio (EMC).....	63
4.5 Implementación de los Sistema de Información Geográfica	64
4.5.1 Cartografía de los factores de restricción	64
4.5.2 Integración de factores.....	65
4.6 Evaluación Multicriterio en los SIG	65
4.6.1 Integración de factores.....	66
Capítulo 5: Análisis de resultados.....	69

5.1 Caracterización geográfica.....	70
5.1.1 Delimitación de la zona de estudio.....	70
5.1.4 Densidad de población de la zona de estudio.....	74
5.2 Búsqueda bibliográfica.....	75
5.2.1 Análisis experto.....	75
5.2.2 Revisión para la elección de variables.....	78
5.2.3 Selección de variables.....	79
5.3 Ponderación de criterios.....	83
5.4 Procedimiento en los SIG.....	84
5.4.1 Cartografía de factores seleccionados.....	84
5.4.2 Cartografía de los factores de restricción.....	91
5.5 Evaluación Multicriterio en el SIG.....	95
5.5.1 Algebra de los mapas.....	97
5.6 Resultado.....	99
5.6.2 Resultado Principal: El Relleno Sanitario de Xonacatlán.....	100
5.7 Conclusión.....	102
7. Bibliografía.....	103

Capítulo 1: Aspectos generales

1.1 Antecedentes

La ciencia del cambio ambiental global y la sostenibilidad reconocen cada vez más la necesidad de abordar las consecuencias de los cambios climáticos (Corell, Kasperson, Matson, McCarthy y Turner, 2003). Los estudios académicos destacan que el uso de energías renovables para obtener energías limpias no produce residuos peligrosos, es fácil de dismantelar y promueve la autosuficiencia. Estas fuentes de energía son consideradas seguras y prácticamente inagotables, tanto en su utilización como en su explotación, como se ha demostrado en la Unión Europea y Latinoamérica desde el enfoque del Derecho Administrativo Ambiental (Lozano Cutanda, 2019, p. 23).

El 84,7% de la energía primaria consumida a nivel global proviene de combustibles fósiles, mientras que la energía nuclear contribuyó con un 4,4%, lo que indica una estabilización en su participación. En 2018, el consumo energético mundial aumentó un 2,9% (Asociación de Empresas de Energías Renovables [APPA], 2018). Según el mismo autor, las energías renovables en la Unión Europea representaron el 15,5% del consumo total de energía primaria.

Viscidi y Yépez (2018) señalan que América Latina es la región que genera la mayor proporción de energía renovable a nivel mundial. Más del 80% de esa energía proviene de represas hidroeléctricas, pero debido a los altos costos y el impacto ambiental asociado a su construcción, el interés por desarrollar nuevas represas ha disminuido. Además, los fenómenos climáticos hacen que la oferta hidroeléctrica sea impredecible. En contraste, las fuentes renovables como la energía eólica, solar y geotérmica son abundantes en la región y sus costos están disminuyendo rápidamente.

Los antecedentes de la generación de biogás se remontan a varias décadas atrás, y su desarrollo ha estado influenciado por la creciente conciencia ambiental y la necesidad de encontrar fuentes de energía renovable y sostenible. El biogás es un combustible producido mediante la descomposición anaeróbica de materia orgánica, como lo son los residuos agrícolas, al igual que el estiércol, lodos de depuradoras y residuos sólidos urbanos (RSU). A medida que la preocupación por el cambio climático y la gestión sostenible de los residuos ha aumentado, la generación de biogás se ha convertido en una alternativa atractiva.

Una de las tecnologías limpias más extendidas a nivel global es el uso de sistemas de digestión anaerobia, conocidos como biodigestores. Esta innovación tiene un largo recorrido histórico, con antecedentes que datan del 3000 a.C. El primer biodigestor moderno fue desarrollado en 1859 en Bombay, India, y desde entonces su uso se ha expandido por toda Asia y Sudáfrica.

La bioenergía es la única fuente de energía renovable que se puede almacenar con la misma facilidad que el petróleo y el gas, lo que representa una ventaja económica para equilibrar la oferta y demanda de energía. Según Sampeiro y Martínez (2010), la bioenergía y las tecnologías que permiten su uso tienen un gran potencial para cubrir las necesidades energéticas y sustituir las fuentes fósiles y nucleares. Es fundamental que su explotación se realice de manera sustentable, aprovechando su naturaleza renovable y generando energía con un balance neutro en emisiones que afecten al cambio climático.

La gestión final de los residuos sólidos es actualmente uno de los principales problemas ambientales que afecta a la región de América Latina (Colmenares, W. & Santos, K. 2007).

1.1.1 Las energías limpias en México

Según Forbes México, el sector de tecnologías limpias en el país ofrece grandes oportunidades en áreas como la eficiencia energética, generación de energía, gestión de residuos y tecnología del agua. Desde el inicio de operaciones en 2009 de GreenMomentum y su proyecto Cleantech Challenge México, se ha presenciado una evolución en estos sectores, especialmente en la innovación y complejidad de proyectos de generación de energía distribuida, utilizando fuentes como la solar y eólica. También se han desarrollado modelos predictivos para mejorar la eficiencia energética y sistemas de ahorro de agua (Aguirre, 2013).

1.2 Antecedentes históricos del biogás

Los antecedentes de la generación de biogás se remontan a varias décadas atrás, y su desarrollo ha estado influenciado por la creciente conciencia ambiental y la necesidad de encontrar fuentes de energía renovable y sostenible. A medida que la preocupación por el

cambio climático y la gestión sostenible de los residuos ha aumentado, la generación de biogás se ha convertido en una alternativa atractiva.

El biogás es una mezcla de gases producida de manera natural a través de la descomposición metabólica de materia orgánica en ausencia de oxígeno. Aunque la generación natural de biogás es una parte fundamental del ciclo biogeoquímico del carbono, para su obtención es necesario disponer de biomasa, que incluye toda materia orgánica acumulada a partir de procesos biológicos, como plantas, productos vegetales, animales que se alimentan de ellas y los residuos orgánicos generados por los seres vivos. Existen tres tipos principales de biomasa: vegetal, animal y residual, y cualquiera de ellos puede ser utilizado para producir biogás (Guzmán, 2008).

El biogás fue mencionado por primera vez en el siglo XVII, cuando varios científicos identificaron el gas proveniente de la descomposición orgánica. En 1890, se construyó el primer biodigestor a escala en la India, y en 1896, las lámparas de alumbrado público en Exeter, Inglaterra, fueron alimentadas por gas recolectado de digestores que fermentaban lodos cloacales (Jiménez, 2002).

Durante la Segunda Guerra Mundial, los biodigestores comenzaron a difundirse en áreas rurales de Europa, China e India, que se convirtieron en líderes en esta tecnología. Sin embargo, la fácil disponibilidad de combustibles fósiles frenó su expansión, hasta que la crisis energética de los años 70 revitalizó la investigación y el uso de biodigestores en todo el mundo, incluyendo gran parte de los países latinoamericanos (Félix, 2008).

Hasta 2011, se habían instalado más de 44,4 millones de biodigestores en China e India (Martí, 2011). Este avance responde a las necesidades de la población en cuanto a saneamiento ambiental, acceso a energía renovable y producción de fertilizante orgánico. En este contexto, el éxito de los proyectos se debe a una estrategia social que apoya a los usuarios y promueve la sostenibilidad (Parra, 2016).

1.3 Generación de biogás en los rellenos sanitarios

Según Arvizu (2003), el almacenamiento de residuos en rellenos sanitarios puede provocar problemas ambientales como la contaminación del agua, malos olores, explosiones, asfixia, daños a áreas verdes y la emisión de gases de efecto invernadero. El biogás producido en estos rellenos es un subproducto de la descomposición orgánica de los desechos, generado por la acción de microorganismos que descomponen su parte orgánica.

Existen dos soluciones posibles para abordar el problema de las emisiones de biogás. La primera es la extracción y quema del biogás, un método comúnmente utilizado para disminuir la presión en el relleno y mitigar los olores. La segunda opción es reutilizar el biogás para otros fines, ya que su energía química es suficiente para operar una turbina de gas, lo que resalta su valor como fuente de energía, según el autor mencionado.

Las tecnologías de biogás pueden incrementar la rentabilidad y mejorar la calidad del aire al maximizar el uso de recursos comunitarios, lo que es fundamental para un desarrollo competitivo y sostenible en la actual industria de tratamiento de residuos. Además, la expansión de estas tecnologías generará empleos en áreas como diseño, operaciones y fabricación de sistemas de energía.

Según Colmenares y Santos (2007), cualquier lugar donde se acumulan grandes cantidades de residuos sólidos domiciliarios actúa, en principio, como un biorreactor que produce gases y líquidos precolados. Esta producción depende de diversas variables, como las características de los desechos, el sitio de disposición, el método utilizado y el clima, entre otros factores.

1.3.1 El manejo de residuos sólidos en México

En México, de acuerdo con el dato más reciente publicado en 2015, la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) llegó a 53.1 millones de toneladas, lo que representó un incremento del 61.2% en comparación con 2003, es decir, 10.24 millones de toneladas adicionales en ese

período. En términos per cápita, esto se tradujo en un promedio diario de 1.2 kilogramos por habitante en el mismo año (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2015). El Estado de México produce un volumen de RSU de 16.7 millones de t; 16.1% del total nacional, siendo este, la entidad federativa que genera mayor cantidad de RSU del país.

Aguilar (2017) en su tesis titulada “Diseño y automatización de un suministro de biogás residencial en el municipio de Chalco”, realizada en la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex), en colaboración con los autores Brinda, S. y Cabrera, J., tuvieron como objetivo disminuir costos, obtener un recurso renovable que requiera solo un trabajo sencillo en el hogar.

Al igual, Vermehren, M., & Erlwein, A. (2016), tuvo el propósito de dar nuevas fuentes limpias y seguras para la matriz de energía nacional, en su publicación titulada “Potencial estimado de biogás en XIV Región a base de residuos urbanos y agroindustriales”, donde se realizó una estimación preliminar del potencial de producción de biogás y su viabilidad económica a partir de los residuos urbanos biodegradables en la región de los ríos.

Para esto, se cuantificaron los residuos de industria láctea, lodos residuales líquidos y residuales domiciliarios, realizándose una recopilación y procesamiento de la información disponible. Luego, utilizándose factores encontrados en distintas bases de datos, se estimó la generación de biogás, metano, energía eléctrica, térmica y potencia instalada para las principales plantas de la región.

El Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) de la UNAM, inició investigaciones para la generación de electricidad con biogás en 1991, mediante un proyecto para analizar la viabilidad técnica y económica de generar electricidad a partir del biogás producido en los rellenos sanitarios. de la Ciudad de México, en ese tiempo llamada Distrito Federal.

Toluca de Lerdo es la capital del Estado de México y se localiza en la porción centro sureste de este mismo. Toluca está conurbado con los municipios de Metepec, Lerma, San Mateo Atenco, Zinacantepec, Ocoyoacac y Almoloya de Juárez, dicho conjunto territorial conforma parte de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) (Miranda, V., García, D. y Libien, P. 2018).

En el Valle de Toluca, se han presentado soluciones, (actividades de recolección y separación de los RSU de manera grupal), a la problemática de la gestión de los residuos sólidos, debido al gran incremento de los residuos provenientes de actividades que se desarrollan en casa habitación, sitios de servicios públicos y privados, establecimientos comerciales, etc. Sin embargo, no se ha tenido una respuesta positiva a esta problemática por parte de las autoridades y la población. Es por eso, que se busca encontrar una solución, logrando hacer del Valle de Toluca, una ciudad sustentable.

La cantidad y composición de los residuos en un relleno sanitario dependen de diversos factores regionales, como las actividades económicas, el clima, la cultura, las fuentes de energía y los lugares de generación. En los países en desarrollo, los residuos suelen estar compuestos mayoritariamente de material orgánico, mientras que en los países desarrollados la fracción inorgánica es predominante (Chang et al., 2011).

Autores como Rodríguez y Montesillo (2017), han dado propuestas para la gestión sustentable de los residuos sólidos urbanos en la zona conurbada de Toluca, misma que se trata de un manejo de los RSU para generar electricidad. Retomando parte de su investigación, se dará un acercamiento más enfocado a la generación de biogás.

1.4 Experiencias internacionales sobre el aprovechamiento del biogás en relación con los RSU.

1.4.1 Aprovechamiento de biogás en rellenos sanitarios en Francia

En Bouqueval/Plessis-Gassot, Francia, existe un Centro de Almacenamiento de residuos sólidos urbanos, siendo un ejemplo del aprovechamiento del biogás. Se gestionan alrededor de 800,000 toneladas de residuos al año, generados por 2 millones de personas. Esta cantidad permite una producción total de biogás de 13,000 m³/h, de los cuales se utilizan 10,000 m³ para generar 10 MW/hora de electricidad, suficiente para satisfacer el consumo promedio de una ciudad con 30,000 habitantes (Veolia Environnement, 2006).

1.4.2 Empresa dedicada al aprovechamiento del biogás

“Electrigaz” es una empresa que demuestra el empleo del biogás extrayendo energía de los residuos orgánicos. Esta empresa transforma estos desechos en energía limpia y les da una mejor gestión, no solo con los residuos orgánicos, sino con los agrícolas, municipales e industriales.

También, basa la extracción de la energía almacenada en la biomasa mediante el proceso biológico de la biodigestión, de esta forma se especializa en la recolección de biogás el cual simplemente describen como metano (CH₄).

1.4.3 Generación de electricidad por biogás mediante motores de combustión interna en Colombia

Una investigación realizada en la granja Pozo Verde, en Jamundí, Valle del Cauca, Colombia, tuvo como objetivo generar electricidad a partir del biogás utilizando dos motores diésel con sus respectivos generadores, adaptados para funcionar con una mezcla de biogás y ACPM (combustible diésel) (Werner et al., 1989, en Zapata, 2002).

El biogás puede emplearse como combustible en motores diésel y de gasolina, permitiendo la producción de energía eléctrica a través de un generador. En el caso de los motores diésel, el biogás puede sustituir hasta el 80% del ACPM, debido a que su baja capacidad de ignición impide un reemplazo completo. En cambio, en los motores de gasolina, el biogás puede reemplazar el combustible en su totalidad. Sin embargo, en los proyectos agropecuarios, se ha preferido el uso de motores diésel, ya que son más resistentes y se encuentran con mayor frecuencia en las áreas rurales.

1.5 Experiencias nacionales sobre el aprovechamiento del biogás

1.5.1 Investigaciones referentes al uso del biogás en rellenos sanitarios por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) de la UNAM

En este instituto se iniciaron las investigaciones para la generación de electricidad con biogás en 1991, con un proyecto para evaluar la factibilidad técnico-económica de generación de electricidad con el biogás producido en los rellenos sanitarios de la Ciudad de México, en ese tiempo llamada Distrito Federal.

Hubo un confinamiento anual en rellenos sanitarios de 16,279,000 toneladas debido a que se depositaron solo en 51 rellenos sanitarios ubicados en ciudades medias, zonas metropolitanas y solo en algunas localidades pequeñas.

Como desarrollo del proyecto, se instaló una planta piloto de 20 kW con capacidad de generación eléctrica, en colaboración con la CFE, Compañía de Luz y Fuerza y el Departamento del Distrito Federal. Los datos recabados, señalaron que podría tratarse de plantas de generación relativamente pequeñas de 20MW o menos, para el autoabastecimiento eléctrico municipal.

Para el año 2005, con el biogás que se producía con la basura confinada, se podía sostener una capacidad de generación eléctrica cercana a los 80 MW e incorporar 16 MW adicionales con los residuos que se acumulan anualmente en los rellenos sanitarios.

1.5.2 Proyecto Monterrey

Fue un proyecto promovido por la Secretaría de Desarrollo Social en el año 2003 (SEDESOL, ahora Secretaría del Bienestar), para la eliminación de las emisiones de metano del relleno sanitario de Salinas Victoria, N.L., donde llega la basura de la zona metropolitana de Monterrey. Fue uno de los primeros proyectos en Latinoamérica para generar la electricidad con biogás en un relleno sanitario, teniendo una capacidad nominal de 8MW y se inauguró en 2003.

Este trabajo se hizo acreedor a financiamientos gestionados por el Banco Mundial, ya que trata de un proyecto de autoabastecimiento eléctrico, alimentando a las empresas consumidoras de energía, entre ellas las empresas de agua y drenaje de Monterrey (Arvizu y Huacuz, 2003).

1.5.3 Aplicación de biodigestores como medida para mitigar la contaminación fecal en Michoacán, México

Debido a la presencia de 7000 explotaciones lecheras de pequeña escala surgió la falta en el control para la disposición de las excretas del ganado, produjo un grave problema de contaminación de agua y suelo. En estas explotaciones, se estima que hay 7,000 productores que poseen un inventario de 90,000 cabezas de ganado, lo que resulta en un promedio de 12.8 vacas por establo. Algunas estimaciones sugieren que se generan aproximadamente 490 kg de estiércol diariamente, lo que da como resultado una producción total de 3,430 toneladas al día en el valle (Esquivel, L., 2002).

Para abordar este problema, se adaptaron tres biodigestores económicos entre 1999 y 2000, con el objetivo de evaluar los afluentes del biodigestor y comprobar su eficacia en la reducción de indicadores de contaminación, según lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-001ECOL-1996. Entre las características más destacadas de estos biodigestores, se encuentran su construcción con plásticos de bajo costo, su diseño horizontal semi-continuo y su bolsa de fermentación, que mide 9.4 m de longitud por 1.27 m de diámetro, con una capacidad total de 11.8 m³. De esta capacidad, se estima que 9.1 m³ (77%) son para líquidos y 2.65 m³ (23%) para gases, con salidas para efluentes líquidos y biogás. La bolsa de fermentación se instaló dentro de una fosa de 9.4 m de largo por 1.6 m de ancho, con una profundidad promedio de un metro y pendiente. Para el reservorio del biogás, se utilizó material plástico con una capacidad de 3 m³.

Los resultados indicaron que se necesitaban casi dos meses para lograr un funcionamiento satisfactorio de los biodigestores, aunque este tiempo podría reducirse a dos semanas si se añade contenido de otro biodigestor a la carga inicial. En general, se logró una producción de 1.5 m³ de biogás al día. Por cada kilogramo de estiércol, era necesario agregar 2.7 kg de agua, lo que también resultó en una disminución de bacterias mesófilas aerobias. Uno de los biodigestores mostró un rendimiento excepcional, logrando reducir la carga de coliformes fecales en un 99.4% (Gamillo, D., 2005).

1.5.4 Cálculo de emisiones de biogás en SDF

Las emisiones de biogás de los rellenos sanitarios rara vez se miden directamente. El cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) es una herramienta utilizada para medir el impacto que tiene una actividad específica sobre el cambio climático, en este caso, la operación de los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos (SDF de RSU) (IPCC, 2006).

Diversas entidades han desarrollado metodologías para calcular las emisiones de GEI derivadas de actividades concretas (Bogner & Scot, 1995; Aguilar-Virgen et al., 2011). Estas metodologías se fundamentan en la recopilación de datos relacionados con la generación, composición y gestión de residuos.

1.6 Las geotecnologías como herramientas

Las geotecnologías han desempeñado un papel crucial en este contexto al proporcionar herramientas y métodos para optimizar la identificación de sitios propicios para la producción de biogás a partir de diferentes fuentes de materia orgánica. Algunas formas en que las geotecnologías han influido en la generación de biogás son:

-Identificación de fuentes de materia prima: Los sistemas de información geográfica (SIG) y la teledetección permiten identificar y mapear áreas con grandes cantidades de materia orgánica, como desechos agrícolas, residuos de alimentos y RSU. Esto facilita la planificación de instalaciones de generación de biogás en lugares estratégicos.

-Análisis de la viabilidad logística: Las geotecnologías ayudan a evaluar la logística involucrada en la recolección de materia prima, transporte y distribución del biogás. Esto es crucial para determinar la factibilidad económica y la eficiencia operativa de un proyecto de generación de biogás.

-Evaluación del impacto ambiental: Los SIG permiten analizar el impacto ambiental potencial de las instalaciones de generación de biogás, considerando factores como la

proximidad a áreas pobladas, recursos hídricos y ecosistemas sensibles. Esto es fundamental para garantizar la sostenibilidad ambiental de los proyectos.

-Planificación de la infraestructura: Las geotecnologías facilitan la planificación de la infraestructura necesaria para la generación de biogás, incluyendo la ubicación de plantas de tratamiento, la red de tuberías para la distribución de biogás y la integración con la red eléctrica.

En conclusión, las geotecnologías han sido esenciales para impulsar el desarrollo de proyectos de generación de biogás al proporcionar información espacial precisa y herramientas de análisis que contribuyen a la toma de decisiones informadas y a la implementación eficiente de instalaciones sostenibles.

1.6.1 Metodologías

Hay una amplia variedad de métodos y técnicas que permiten llevar a cabo estudios prospectivos en casi todos los ámbitos del conocimiento (Fernández, 2002). Este autor clasifica los métodos de previsión en dos enfoques: cuantitativos y cualitativos. Este mismo menciona que la elección de un método de previsión de futuro depende de factores como objetivo, contexto a desarrollar, variables, recursos accesibles, entre otros.

Estos métodos fueron utilizados por primera vez de forma sistemática en los años cincuenta, con fines de estrategias militares, según Medina (2013). Posteriormente, se fue utilizando para la toma de decisiones en los años setenta, siendo un método que, hasta la fecha, se utiliza de mayor frecuencia en el ámbito empresarial, pero siendo en la última década, utilizado en América Latina para ejercicios de perspectiva territorial (Forigua, L. 2018).

La expectativa plantea, que no es necesario padecer el futuro, sin que se pueda construir y también muestra que si se analiza se adquiere ventajas comparativas, ya que es un adelanto a la toma de decisiones (Mojica, 2010).

1.7 Justificación

La combustión de combustibles fósiles se considera la principal causa del cambio climático, ya que representa el 73% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Molina, Sarukhán y Carabias, 2017, p. 124). Esto contribuye al aumento del calentamiento global y a la alteración del clima en todo el planeta.

Es por eso, que, en los últimos años, se ha intentado implementar nuevas fuentes de energía, bajando el uso de GEI. Entre ellas, se encontró la degradación bioquímica de residuos orgánicos. El resultado de esta reacción es el biogás, que tiene el potencial de usarse como combustible para generar energía (Spellman 2014). Este biogás puede utilizarse para generar electricidad o calor, logrando reemplazar al gas natural, reduciendo el uso de estos combustibles.

La captura de biogás contribuye a los objetivos de mitigación y adaptación al cambio climático, representando una alternativa efectiva para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a los rellenos sanitarios. Además, facilita la transición hacia energías renovables. La digestión anaerobia se considera la tecnología más adecuada para el tratamiento de residuos orgánicos debido a su capacidad para recuperar materia y energía (Hadi et al., 2019).

Sin embargo, esta alternativa se utiliza únicamente en un 2%, según un informe de la Asociación Mundial de Biogás presentado en la Cumbre Mundial de Biogás en 2019. Según Espinoza (2021), la digestión anaerobia de residuos orgánicos es una opción viable para la generación de energía a partir de biomasa, ya que, al utilizar residuos como fuente, no se generan conflictos relacionados con la alimentación, como ocurre con los cultivos energéticos.

1.8 Hipótesis

El uso de las geotecnologías servirá para determinar sitios potenciales para la generación de biogás mediante residuos sólidos urbanos en el Valle de Toluca, tomando en cuenta la escasa información de datos sobre la operación y el manejo de los sitios de disposición final.

1.9 Objetivos

- **Objetivo general**

Identificar las zonas que sean factibles para la generación de biogás, considerando variables socioeconómicas y del medio físico con el empleo de los SIG para contribuir a la gestión de los residuos sólidos en el Valle de Toluca.

- **Objetivos Particulares**

1. Establecer un modelo teórico conceptual que reúna la información y requerimientos necesarios para generar establecer los sitios óptimos para el biogás.
2. Determinar la contextualización del entorno de acuerdo con el análisis experto, que permita la identificación de las variables involucradas para la generación de un modelo prospectivo.
3. Priorizar las variables la finalidad de conocer aquellas de mayor importancia y poder considerar sitios óptimos de acuerdo con su ponderación.
4. Establecer un modelo cartográfico que me permita identificar los sitios espaciales para a generación de biogás.

Capítulo 2: Marco teórico - conceptual

2. 1 Conceptos básicos

2.1.1 Biogás

El biogás es el metano generado durante el proceso de fermentación anaerobia en un digester, el cual ocurre en presencia de bacterias anaeróbicas (sin oxígeno). La energía presente en la materia orgánica proviene originalmente de la luz solar, que se transforma en energía bioquímica a través de la fotosíntesis. La materia orgánica utilizada para la producción de biogás puede ser de origen vegetal, animal, residuos orgánicos, aguas residuales industriales y otros. Este biogás se compone principalmente de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), junto con otros gases en cantidades menores, constituyendo un biocombustible energético.

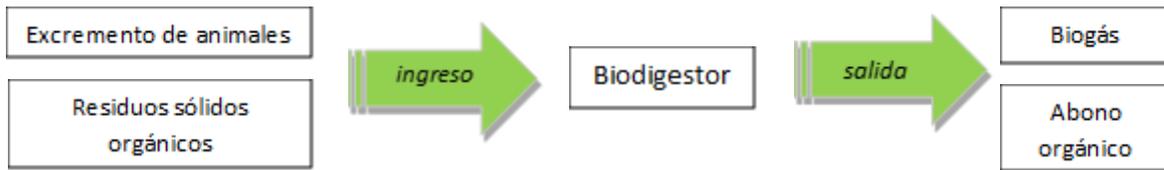
Tabla 1. Composición química de biogás

Composición	Formulación química	Porcentaje (%)
Metano	CH ₄	60-70
Dióxido de Carbono	CO ₂	27-40
Nitrógeno	N ₂	0.5
Hidrógeno	H ₂	1.0
Monóxido de Carbono	CO	0.1
Oxígeno	O ₂	0.1
Ácido sulfhídrico	H ₂ S	0.1

Fuente: Álvarez et al (2004).

La producción de biogás mediante la descomposición anaeróbica es vista como una alternativa eficiente para el tratamiento de residuos biodegradables, ya que no solo genera un combustible útil, sino que también produce un efluente que puede servir como acondicionador del suelo o fertilizante general. Este gas puede ser utilizado para generar energía eléctrica a través de turbinas o plantas de generación a gas, y también puede proporcionar calor en hornos, estufas, secadoras, calderas u otros sistemas de combustión a gas que estén adecuadamente adaptados para este uso.

Figura 1. Producción de biogás.



Fuente: elaboración propia, 2023.

El biogás posee una temperatura de inflamación de alrededor de los 700°C. Como cualquier otro gas, sus características dependen de la presión y la temperatura. Así mismo, este gas es explosivo e inflamable, lo cual puede causar incendios o explosiones (Colmenares-Mayanga & Santos Bonilla, 2007).

2.1.2 Bioenergía

La bioenergía es una fuente de energía renovable que se obtiene del aprovechamiento de materia orgánica e industrial generada a través de procesos biológicos o mecánicos, normalmente provenientes de los seres vivos o de sus restos y desechos. Las formas más comunes de bioenergía incluyen biocombustibles como el biodiésel, el bioetanol y el biogás o biomasa (RBA, 2017).

Esta fuente de energía puede desempeñar un papel crucial en la sustitución de los combustibles fósiles y la energía nuclear, sin incrementar las emisiones que contribuyen al cambio climático. Además, facilita la eliminación significativa de residuos orgánicos tanto en áreas rurales como urbanas, y es la única alternativa energética que puede reemplazar al petróleo en el sector del transporte.

La bioenergía se genera cuando los combustibles de origen biológico se utilizan con fines energéticos. Los subproductos en estado sólido, líquido y gaseoso son a menudo empleados como portadores de energía y luego utilizados para producir calor, bioelectricidad o

biocombustibles. Los biocombustibles, en particular, se refieren a aquellos obtenidos de la biomasa, y se utilizan principalmente en los sectores de generación eléctrica, transporte y vivienda. En términos de características generales, la bioenergía presenta ventajas en cuanto a su densidad energética, su capacidad de ser transportada y su función como almacenamiento de energía.

La biomasa es la materia orgánica contenida en productos de origen vegetal y animal: incluyendo los desechos orgánicos; que puede ser capturada y usada como una fuente de energía química almacenada (Sampeiro y Martínez, 2010).

La bioenergía es la única fuente de energía renovable que se puede almacenar con la misma facilidad que el petróleo y el gas, lo que representa una ventaja económica para lograr un equilibrio entre la oferta y la demanda energética. Según Sampeiro y Martínez (2010), la bioenergía y las tecnologías que facilitan su aprovechamiento tienen un gran potencial para satisfacer las necesidades energéticas de la humanidad y ayudar a reemplazar las fuentes de energía fósil y nuclear. Es fundamental que su explotación se realice de manera sostenible, aprovechando su naturaleza renovable y generando energía con un balance neutro en las emisiones que contribuyen al cambio climático.

2.1.3 Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) define los residuos como materiales o productos que su dueño o poseedor decide desechar, ya sea en forma sólida, semisólida, líquida o gaseosa, y que están almacenados en contenedores o depósitos (DOF, 2003). Según sus características y origen, se clasifican en tres categorías principales: residuos sólidos urbanos (RSU), residuos de manejo especial (RME) y residuos peligrosos (RP). Los RSU provienen de los hogares y son los desechos generados por las actividades domésticas, los productos consumidos, así como los envases y empaques utilizados. También incluyen los residuos producidos por otras actividades que generen desechos similares a los domiciliarios en la vía pública o en establecimientos, además de los residuos resultantes de la limpieza de calles y espacios públicos (SEMARNAT, 2013).

Los residuos sólidos urbanos (RSU) incluyen principalmente los residuos domésticos, que son los que se generan diariamente en los hogares, como restos de alimentos, envoltorios, papeles, botellas de plástico, cenizas, hojas, entre otros. Aunque muchos de estos materiales son reciclables, suelen terminar en basureros o rellenos sanitarios.

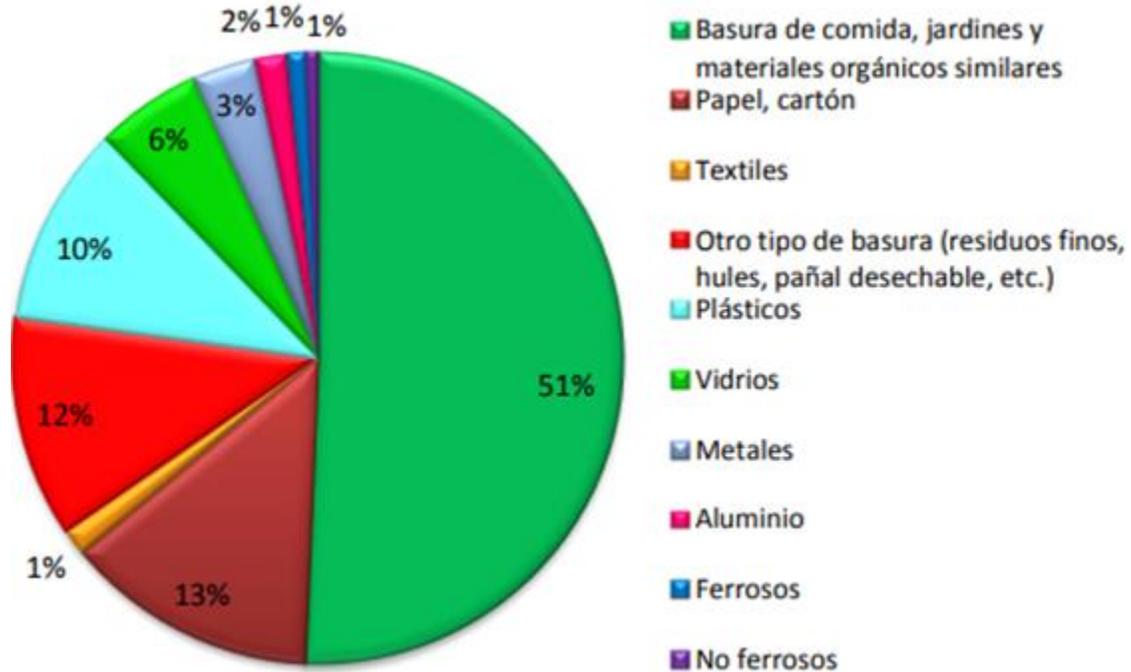
También se consideran residuos urbanos los siguientes:

- Los desechos provenientes de la limpieza de calles, parques, áreas recreativas y playas.
- Animales domésticos fallecidos, además de muebles, enseres y vehículos abandonados.
- Escombros y residuos generados por pequeñas obras de construcción o reparaciones en el hogar.

Desde una perspectiva ambiental y de salud pública, un manejo adecuado de los residuos tras su generación ayuda a disminuir los efectos negativos sobre el medio ambiente y la salud, además de aliviar la presión sobre los recursos naturales.

La composición de los RSU varía según el lugar donde se generan, el estilo de vida (condiciones económicas y costumbres sociales), y la forma y frecuencia de su recolección (Gómez et al., 2009). En un mismo lugar, esta composición puede cambiar a lo largo del año, especialmente en lo que respecta a la fracción biodegradable, que está representada principalmente por residuos de alimentos (Robles-Martínez et al., 2011).

Figura 2. Composición de los RSU en México en el año 2011.



Fuente: Cárdenas-Moreno, 2014.

2.1.4 Sitios de Disposición Final (SDF)

Un SDF es un sitio donde se depositan los residuos sólidos urbanos y de manejo especial de forma permanente, de acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT-2003. Ya que, en México, la disposición final de residuos sólidos urbanos se rige por esta norma.

Estos SDF se rigen por diferentes categorías de acuerdo con su manejo, ya sean o no aprovechados o tratados, disponiéndose en SDF con apego a la NOM antes mencionada.

La clasificación del sitio de disposición final se determina según la cantidad de toneladas de residuos sólidos urbanos y de manejo especial que entran diariamente a la instalación (ver Tabla No. 2) (NOM-083-SEMARNAT, 2003).

Tabla 2. Categorías de los Sitios de Disposición Final

Tipo	Tonelaje Recibido ton/día
A	500 o más
B	100 y menor de 500
C	50 y menor de 100
D	Menor a 50

Fuente: NOM-083-SEMARNAT, 2003.

Según esta Norma, existen tres tipos de sitios de disposición final (SDF), cada uno con diferentes propósitos, métodos y requisitos de permisos. Estos tipos son los siguientes:

- **Relleno Sanitario (RS):** es una obra de infraestructura que utiliza métodos y técnicas de ingeniería para la disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Su objetivo es minimizar los impactos ambientales mediante la compactación y cobertura diaria de los residuos.
- **Relleno de Tierra Controlado:** aunque no cuenta con la infraestructura completa de un relleno sanitario, se asegura una compactación y cobertura diaria mínima de los residuos. Además, tiene inspección, vigilancia y algunas medidas para cumplir con las regulaciones, aunque de manera parcial (Robles-Martínez et al., 2011).
- **Sitio no controlado:** se refiere a un sitio de disposición final o tiradero a cielo abierto que no cumple con los requisitos establecidos por esta Norma.

2.1.5 Sitios potencialmente contaminados

Un sitio se considera contaminado cuando en un terreno se acumulan sustancias tóxicas persistentes o residuos que las contienen, debido al uso, depósito, enterramiento, infiltración o vertido, ya sea de manera planificada o accidental. Esto provoca un aumento en la concentración de dichas sustancias en el suelo o en el agua subterránea, superando los niveles de seguridad recomendados para un uso específico.

Las principales causas de la contaminación de sitios suelen estar vinculadas a la gestión inadecuada y la disposición final incorrecta de sustancias químicas o residuos que las contienen. Esto puede ser consecuencia de actividades industriales, comerciales, agropecuarias o residenciales, tanto pasadas como actuales.

En los sitios contaminados, el riesgo está relacionado con posibles daños ecológicos y de salud, debido a la exposición a contaminantes en el suelo, agua subterránea y otros compartimentos ambientales, así como en los residuos y materiales presentes en el lugar. Además, desde una perspectiva más amplia, pueden incluirse los posibles daños a bienes económicos, debido a la dispersión de contaminantes desde el punto de origen. La evaluación de riesgos es una herramienta clave para la gestión de estos sitios, ya que permite determinar la naturaleza y magnitud de los riesgos. Este proceso es necesario para establecer si los riesgos son aceptables y, de no serlo, implementar acciones de prevención, minimización o mitigación.

Un ejemplo de sitio contaminado son los vertederos de residuos sólidos urbanos, que representan áreas comprometidas debido a la acumulación de residuos con sustancias tóxicas persistentes, la generación de gases, olores y lixiviados, entre otros factores, lo que implica un riesgo tanto para la salud como para el medio ambiente.

Tabla 3. Lista de actividades potencialmente contaminantes.

RAMO	TIPO	PROCESOS ESPECÍFICOS
RESIDUOS	Incinerador	Incineradores hospitalarios, crematorios y similares para la destrucción de residuos. Disposición final, cenizas y materiales no combustibles, tratamiento de aguas de lavado de gases.
	Quemas	Quema a cielo abierto de conductores eléctricos y otro tipo de cables. Entre otros Pb (aislación), Cd (aislación plástica), D&F (no intencional).
	Saneamiento	Sistemas de tratamiento de efluentes domésticos que integran efluentes de las actividades mencionadas anteriormente.
	Vertedero RSI	Disposición final de residuos sólidos industriales. Incluye el relleno de grandes depresiones naturales y/o artificiales con residuos industriales (canteras, bañados, lagunas, otras depresiones).
	Vertedero RSU	Enterramiento de residuos urbanos. Incluye el relleno de grandes depresiones naturales y/o artificiales con residuos domésticos.
	Tratamiento y reciclaje de residuos	Instalaciones o actividades informales para el tratamiento o clasificación de residuos peligrosos. Incluye: depósito y desagüe de baterías plomo-ácido, tratamiento y acondicionamiento de residuos de accidentes químicos, entre otros.

Fuente: Salvarrey y Gristo (2005).

2.1.6 Lixiviados

El lixiviado es un líquido que se genera a partir de la filtración del agua proveniente de fuentes externas, además de los líquidos que contienen y producen los propios residuos (Robles-Martínez et al., 2011). Los lixiviados provenientes de sitios de disposición final (SDF) activos o clausurados pueden ser una de las principales fuentes de contaminación de aguas subterráneas y superficiales, debido a su alto contenido de metales pesados,

compuestos orgánicos y la capacidad de transportar diversos contaminantes, lo que también afecta a la microflora y fauna del lugar (Isidori et al., 2003).

En la normativa mexicana, los lixiviados son considerados residuos peligrosos (NOM-052-SEMARNAT, 2005), por lo que diversos estudios, como el de Robles-Martínez (et al. 2011), subrayan la necesidad de caracterizarlos para evaluar su potencial contaminante en cada sitio de disposición, dado que representan un riesgo sanitario significativo.

Según la NOM-083-SEMARNAT-2003, es obligatorio implementar un sistema que asegure la captación y extracción de los lixiviados generados en los SDF. Sin embargo, la mayoría de estos sitios en México carecen de las instalaciones necesarias para recolectar y/o tratar los lixiviados.

2.1.7 Producción de biogás en rellenos sanitarios

La cantidad de biogás obtenida depende primordialmente del porcentaje de materia orgánica obtenida presente en los RSU. En países en desarrollo, según diversos autores, se puede generar hasta un 80% de la masa de los residuos, mientras que, en países desarrollados, llega a ser menor al 10%.

De acuerdo con Kiss-Kofalusi & Encarnación-Aguilar (2006), en México se genera ha reportado un rendimiento de producción de biogás en SDF de 223 L CH₄ / kg RSU. Esto basándose con Themelis y Ulloa (2007), ya que la composición de la materia orgánica es descrita como C₆H₁₀O₄; determinando el balance de materia para calcular la cantidad máxima de biogás generado durante la descomposición anaerobia de los RSU.

Por su parte, Sauri-Riancho et al., (2013) midió directamente el flujo de biogás en SDF. Donde, menciona que, en México, el flujo de gas es de 540 kg CH₄/m²*año obtenido por medio de la cámara de flujo.

2.1.8 Oportunidades de biogás como fuente de energía

La biomasa es una fuente de energía económica que puede ser aprovechada para el uso doméstico. Por esta razón, es fundamental promover, desarrollar e incentivar el uso de este tipo de energía, que aprovecha los residuos orgánicos como recurso energético (Díaz-Arias, 2022).

Es por ello, que el mismo autor, menciona el biogás como una alternativa en la era post-petrolera, tomando en cuenta que el combustible doméstico, es una de las energías más requeridas por la población a nivel mundial.

Según Pascal (et al. 2011), aunque el biogás ofrece numerosas ventajas en términos ambientales, sociales y económicos, no se convertirá en la principal fuente de energía en el futuro. No obstante, desempeñará un papel significativo en el sector energético, y su consumo global aumentará en comparación con los niveles actuales, según la Agencia Internacional de Energía en 2020.

Tabla 4. Origen, usos y ventajas del biogás.

Origen	La conversión de la materia orgánica en calor genera una sustancia llamada biogás, que es una mezcla de gases producidos a través de la descomposición de residuos orgánicos, como el estiércol animal o los desechos vegetales, en un ambiente anaeróbico, es decir, sin la presencia de oxígeno (Díaz, A. 2022).
Usos	El biogás se utiliza como alternativa a la leña y al gas LP para la cocina, lo cual tiene un impacto positivo en el medio ambiente. Según el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura en 2008, el uso de 1 m ³ de biogás para cocinar puede prevenir la deforestación de 0.335 hectáreas de bosques, considerando un ciclo de vida de los árboles de aproximadamente 10 años.
Ventajas	Además, este recurso contribuye a 'la protección ambiental a través de una gestión adecuada de los residuos orgánicos transformados en energía útil' (Castro y Rodríguez, 2022). También se descompone más rápidamente que los productos derivados del petróleo (Arce, 2011).

Fuente: Arias, A. (2022).

2.2 Biogás mediante residuos sólidos

Hay varios factores que afectan la producción de biogás, siendo las bacterias el componente clave del proceso. Es fundamental mantener estas bacterias en condiciones que optimicen su ciclo biológico. Como lo son:

Figura 3. Diagrama de condiciones a considerar para la generación de biogás.

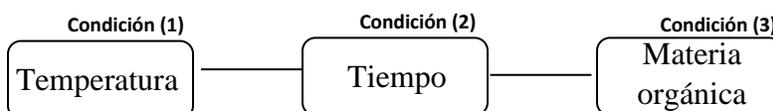


Tabla 5. Condiciones para considerar para la generación de biogás.

Condición	Descripción
Condición (1)	Dado que el proceso se desarrolla en un rango amplio de temperaturas, de 15 a 60 °C. No obstante, para que las bacterias productoras de metano funcionen de manera óptima, es necesario mantenerlas a temperaturas entre 30 y 60 °C, según el tipo de bacteria que se adapte y desarrolle en el sistema.
Condición (2)	Las bacterias necesitan tiempo para descomponer la materia orgánica, y la velocidad de esta degradación está estrechamente relacionada con la temperatura; a temperaturas más altas, el tiempo de retención necesario para lograr una buena producción de gas es menor. Por ejemplo, en un sistema de retención de 20 días, se introduce diariamente 1/20 del volumen total del digestor, lo que significa que, en promedio, la materia orgánica y la masa microbiana permanecen en el sistema durante 20 días.
Condición (3)	Para garantizar que el proceso sea efectivo, se ha demostrado que una carga con un contenido de sólidos totales entre el 7 y el 9% es óptima para la digestión.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.2.1 Cálculo de emisiones de biogás en SDF

Las emisiones de biogás provenientes de los rellenos sanitarios suelen ser calculadas. Este cálculo sirve como herramienta para entender el impacto que tiene la descomposición de los residuos en los sitios de disposición final (SDF), y el biogás generado se estima mediante

modelos que simplifican la compleja química y los procesos de degradación biológica involucrados (Cárdenas-Moreno, P. 2014).

No existe un modelo exacto para su cálculo, sin embargo, se han creado varios modelos para poder precisas o ser más cercano a un cálculo, como son los siguientes:

2.2.2 Modelo Mexicano de Biogás (MMB)

Este modelo fue desarrollado por primera vez en 2003 por SCS Engineers, en colaboración con el programa Landfill Methane Outreach (LMOP) de la EPA. La versión 1.0 del Modelo Mexicano de Biogás se utilizó para estimar la generación y recuperación de biogás en rellenos sanitarios en México que ya contaban o planeaban tener un sistema de recolección de biogás. Posteriormente, en 2009, se lanzó una actualización y mejora de esta versión, dando lugar al Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0 (Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P. & Ojeda-Benítez, 2011).

2.2.3 Zona Metropolitana del Valle de Toluca

La Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) se localiza en la región central del país y abarca una superficie de 2,410.5 km². Está compuesta por los municipios de Almoloya de Juárez, Calimaya, Chapultepec, Lerma, Metepec, Mexicaltzingo, Ocoyoacac, Otzolotepec, Rayón, San Antonio la Isla, San Mateo Atenco, Temoaya, Tenango del Valle, Toluca, Xonacatlán y Zinacantepec.

La urbanización de la ZMVT comenzó en la década de 1960, impulsada por la industrialización del corredor Toluca-Lerma. En los años 80, se la consideró una metrópoli semidiversificada, y en la década siguiente se consolidó en el sector terciario (SEDUYM).

A nivel nacional, la ZMVT es la quinta metrópoli más poblada del país, detrás de la Zona Metropolitana del Valle de México, Guadalajara, Monterrey y Puebla-Tlaxcala. Según el Grupo Interinstitucional, la ZMVT se definió por el criterio de conurbación física, incluyendo

nueve municipios centrales, seis municipios exteriores por integración funcional y un municipio exterior por política urbana.

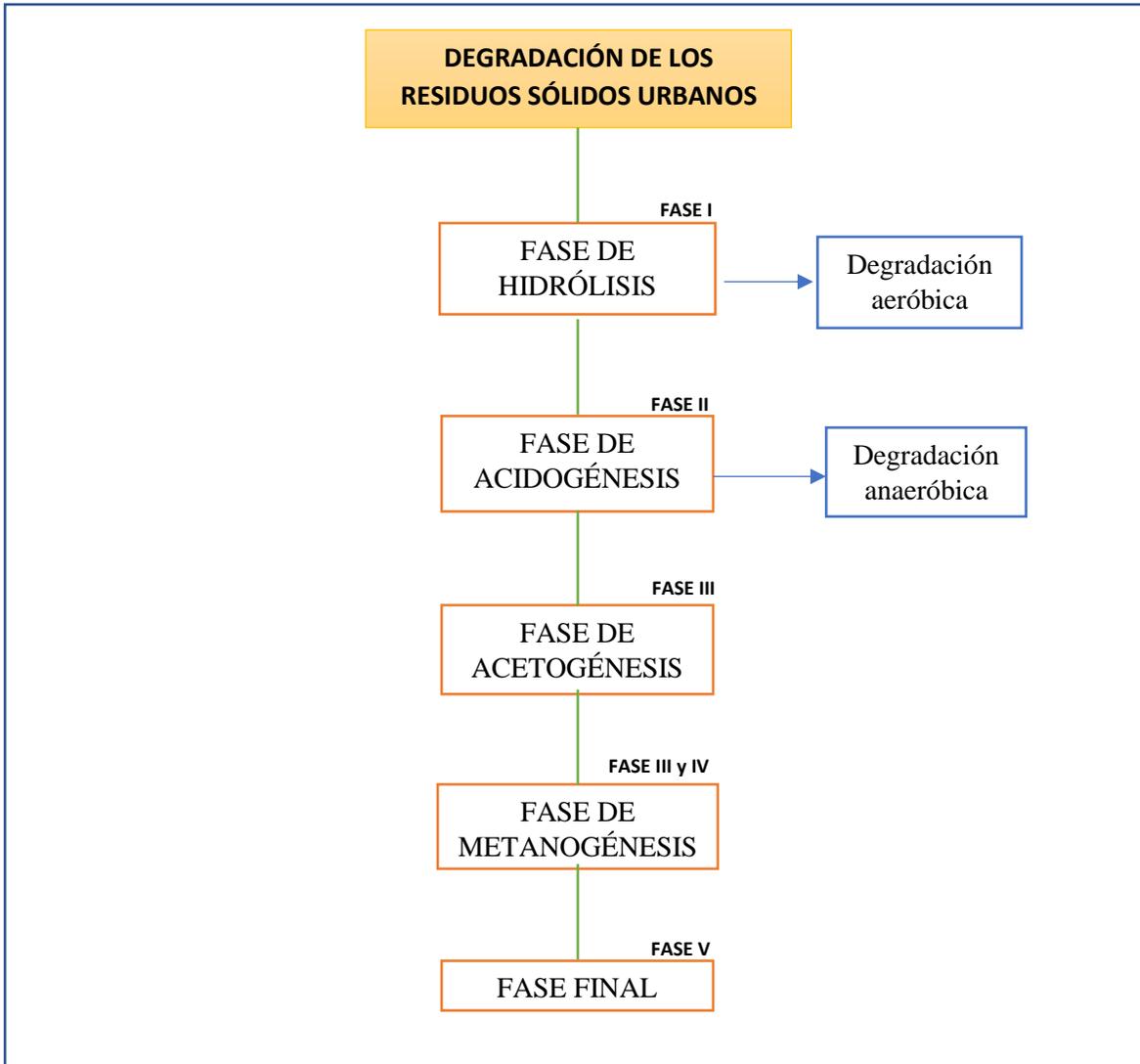
Actualmente, la población de la ZMVT es de 2,202,886 personas, lo que equivale al 13.1% de la población total del estado, con una tasa de crecimiento anual promedio del 1.9% y una densidad media urbana de 64.4 habitantes por hectárea.

2.2.4 Degradación biofísico-química de los RSU en los SDF

Según Cárdenas-Moreno (2014), la degradación de la materia orgánica en los residuos comienza durante su almacenamiento o transporte. Sin embargo, una vez que los residuos son depositados y enterrados en condiciones anaerobias, se activa una serie de procesos fisicoquímicos y biológicos que, dependiendo de la composición y las condiciones ambientales, determinarán la cantidad y calidad de los efluentes, como los lixiviados y el biogás (Colomer-Mendoza & Robles-Martínez, 2011).

A continuación, se muestran las fases de descomposición de los residuos:

Figura 4. Fases de la degradación de los RSU en SDF.



Fuente: elaboración propia, 2024.

Tabla 6. Descripción de fases de descomposición.

FASE	DESCRIPCIÓN
I	Esta fase sucede inmediatamente de que la basura llegue al SDF. Las sustancias que son fácilmente biodegradables comienzan a descomponerse al entrar en contacto con el oxígeno del aire (Colmenares-Mayanga & Santos-Bonilla, 2007). Las reacciones exotérmicas de la oxidación biológica provocan un aumento de la temperatura y la generación de CO ₂ .
II	En este proceso se genera una fermentación ácida, causando el descenso en el pH del lixiviado, altas concentraciones de ácidos volátiles y concentraciones considerables de iones inorgánicos, como el acético, propiónico y butírico (Colomer-Mendoza & Robles-Martínez, 2011).
III	En esta etapa, los productos son convertidos en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.
III y IV	Este proceso implica la producción de metano a partir de ciertos sustratos, que incluyen mezclas de H ₂ /CO ₂ , formiato, acetato, metanol y metilaminas (López-Barros, 2010). Se puede observar la presencia simultánea de metano y oxígeno, ya que ambas rutas de degradación ocurren a la vez en diferentes áreas del sitio de disposición final (SDF). En cualquier caso, estas reacciones producen biogás.
V	Si los residuos no son tratados, la producción de metano disminuye, y el dióxido de carbono es reemplazado por nitrógeno y oxígeno a medida que se introduce aire atmosférico (Kiss-Kofalusi & Encarnación Aguilar, 2006).

Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.2.5 Sistema de Información Geográfica (SIG)

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es un software especializado que permite a los usuarios realizar consultas interactivas, así como integrar, analizar y representar de manera eficiente cualquier tipo de información geográfica referenciada asociada a un territorio, conectando mapas con bases de datos (SGM, 2017).

2.2.6 Geotecnología

a geotecnología ofrece una nueva perspectiva del espacio geográfico, valorando el uso de la informática mediante sistemas cibernéticos, humanos y electrónicos para analizar sistemas físicos y sociales (Buzai, 2003), con un campo de aplicación que se expande constantemente (GEO blog, 2007). Desde la perspectiva de los límites en el espacio geográfico, la automatización mejoraría la perspectiva cuantitativa de la construcción regional, rescatando la tradición racionalista (Toudert y Buzai, 2004).

A inicios de la década de 1980, surgió un debate formal sobre la posibilidad de aplicar tecnologías computacionales integradas y su impacto en las prácticas disciplinarias. Según Jerome Dobson (1983), citado por Goodchild (1993), se iniciaron los primeros trabajos basados en el avance computacional, sugiriendo la posibilidad de automatizar muchos procedimientos de análisis espacial. Esto dio lugar a lo que él llamó "Geografía Automatizada", un campo técnico que se presenta como ventajoso frente a los métodos tradicionales, utilizando sistemas cibernéticos, humanos y electrónicos para el análisis de sistemas físicos y sociales, como detalla Toudert y Buzai (2004).

La integración de distintos sistemas (cartografía computacional, computación gráfica, procesamiento digital de imágenes, modelos digitales de elevación y sistemas de información geográfica) se consolidó más tarde bajo el concepto de geoinformática o geotecnología. Las contribuciones geográficas de Buzai están orientadas a fortalecer este nuevo paradigma geotecnológico. Según Gómez (1979), un nuevo paradigma debe cumplir tres exigencias clave: proporcionar soluciones a la crisis científica, ofrecer una visión del mundo y establecer una agenda de investigación para los científicos.

En la actualidad, la utilización de la geotecnología representa una gran oportunidad para que la geografía se presente de manera global en la red. Conocer y aplicar procedimientos geoinformáticos se convierte en un proceso dinámico de descubrimiento, tanto en el uso de la herramienta como en el contenido temático en diferentes áreas del conocimiento dentro del entorno digital. Esto plantea un desafío para los geógrafos, quienes deben usar la tecnología como un medio para generar soluciones concretas a los problemas de la población (Oropeza y Díaz, 2007).

2.2.7 Proceso cartográfico

El conjunto de operaciones que transforma la información geográfica en un documento conocido como mapa se denomina proceso cartográfico. Este proceso se divide en tres etapas distintas:

- **Concepción del mapa:** En esta etapa se definen las características del mapa de acuerdo con su finalidad, las necesidades del usuario, el tipo de impresión, los costos, entre otros factores.
- **Producción del mapa:** Aquí se llevan a cabo diversas operaciones, tales como:
- **Compilación y tratamiento de datos:** Esto varía según el propósito del mapa, su tipo, escala, fuentes de información y usuarios, e incluye actividades como trabajos de campo, vuelos fotogramétricos, teledetección, generalización y análisis estadísticos.
- **Diseño del mapa:** Se crea un modelo del mapa conocido como Hoja Piloto, donde se define la leyenda (signos convencionales, colores, formas de representación, etc.) y se analiza la composición general. Se lleva a cabo una consulta con los usuarios para evaluar la calidad de esta hoja piloto.
- **Producción del mapa:** En esta fase se elaboran diagramas de flujo que indican las tareas a realizar y los tiempos necesarios. Se preparan todos los elementos requeridos para la producción del mapa, como negativos, esgrafiados, tramados y positivos.
- **Reproducción del mapa:** A partir de los positivos se generan las planchas y se procede a imprimir el mapa, incluyendo su distribución.
- **Utilización del mapa:** Se realiza un seguimiento del mapa publicado, analizando su impacto en los usuarios, la facilidad o dificultad de uso y se programa su renovación periódica.

El avance de las tecnologías informáticas en el ámbito de las geociencias ha transformado profundamente los conceptos de captura, gestión y publicación de información geográfica. La cartografía digital y los servicios de mapas en línea han crecido de manera exponencial, convirtiéndose en el núcleo conceptual del proceso productivo.

Según el Instituto Geográfico Nacional, los principales procesos de producción cartográfica incluyen vuelos fotogramétricos, que permiten determinar con precisión los parámetros de

orientación interna y externa de las imágenes capturadas, así como la aerotrigulación por haces de rayo, que identifica puntos comunes entre fotogramas mediante un proceso de correlación automática y establece una grilla regular sobre el terreno.

Otro proceso relevante son las campañas de interpretación y nomenclatura, que implican la visita de personal técnico al campo para capturar elementos geográficos y su correspondiente toponimia utilizando tecnología GPS y programas orientados a Sistemas de Información Geográfica.

2.2.8 Proceso espacial

La geografía implica el estudio de por qué las cosas varían de un lugar a otro en la tierra, también conocidas como distribuciones espaciales o cualquier cosa que se pueda mapear. Las distribuciones espaciales que se pueden mapear pueden incluir cualquier cosa, desde las temperaturas en un océano, el idioma de un país, la propagación de los incendios forestales en una región y la demografía étnica de una ciudad en particular.

Una vez que se sepa qué fenómeno quiere estudiar, observará el proceso subyacente de cómo las cosas llegaron a ser de cierta manera. También intentan predecir lo que sucederá en el futuro, como si la gente seguirá migrando a un área en particular o no. El proceso subyacente que estudian los geógrafos se conoce como proceso espacial.

Según National Geographic, hay tres tipos generales de procesos espaciales: sistemas físico-naturales, relaciones ambiente-sociedad y sistemas humanos. Estos diferentes sistemas ayudan a explicar cómo surgió una distribución espacial, los cuales son:

-Los sistemas físico-naturales incluyen procesos causados por leyes naturales de la energía y la materia, como la temperatura. Estos fenómenos son locales y mensurables y se relacionan con la tierra física.

-Las relaciones medio ambiente-sociedad son los procesos que involucran el impacto de la sociedad sobre el medio ambiente, como la erosión del suelo y la destrucción de las selvas tropicales.

-Los sistemas humanos describen procesos relacionados con el comportamiento humano y la innovación, como el lenguaje, la tecnología y la religión.

Cuando se apunta a observar patrones y procesos, se observa el movimiento de personas y recursos a través del espacio, que se describe como procesos espaciales. También se observan estos cambios durante un período de tiempo, ya que un proceso temporal involucra eventos que pueden observarse en un orden particular.

2.8.1 Evaluación multicriterio (EMC)

Se fundamenta en la creación de una matriz de decisión que refleja las características de la unidad de observación, definidas por sus atributos específicos. Una vez que la matriz de decisión ha sido elaborada, se puede aplicar el procedimiento de evaluación necesario para asignar un valor a cada alternativa disponible en función del objetivo de la evaluación.

De este modo, la combinación de los SIG y la EMC permite llevar a cabo análisis simultáneos de los componentes espaciales y temáticos, utilizando herramientas como álgebra de mapas o superposición en software como ArcGIS, lo que facilita la solución de problemas espaciales complejos (Flores Salazar, 2013).

2.8.1.1 Método Saaty

Según Gómez y Barredo (2005), esta pondera una comparación de la importancia de una variable con otras, le damos el valor a cada una para que esta, nos establezca los pesos y determinar nuestro vector principal.

La escala de medida establecida para la asignación de los juicios de valor es la siguiente:

Tabla 7. Juicios de valor de Saaty.

1/9	Absolutamente menos importante
1/7	Demostablemente menos importante
1/5	Notablemente menos importante
1/3	Ligeramente menos importante
1	Igualmente importante
3	Ligeramente más importante
5	Notablemente más importante
7	Demostablemente más importante
9	Absolutamente más importante

Fuente: Gómez y Barredo (2005).

2.8.1.2 Método Fuzzy AHP (Analytic Hierarchy Process)

El método de análisis multicriterio basado en lógica difusa, comúnmente conocido como método Fuzzy AHP, es una técnica que combina la teoría de conjuntos difusos con el proceso analítico jerárquico para la toma de decisiones en situaciones donde la información es incompleta o incierta.

El método propuesto por Thomas Saaty consiste en un procedimiento de comparación por pares de criterios, utilizando una matriz cuadrada donde el número de filas y columnas corresponde a la cantidad de criterios a evaluar.

-Fundamentos de la lógica difusa:

Conjuntos Difusos: En lugar de asignar valores binarios (verdadero o falso), la lógica difusa permite la asignación de grados de verdad difusos entre 0 y 1.

Funciones de Pertenencia: Cada elemento tiene una función de pertenencia que indica en qué grado pertenece al conjunto difuso.

-Analytic Hierarchy Process (AHP):

Jerarquía de Criterios y Alternativas: El AHP descompone un problema de toma de decisiones en una jerarquía de criterios y subcriterios, así como alternativas asociadas.

Matriz de Comparación Pareada: Se utilizan matrices de comparación pareada para capturar las preferencias y relaciones de importancia entre criterios y subcriterios.

-Integración con Lógica Difusa (Fuzzy AHP):

Matrices Difusas: En lugar de utilizar valores precisos en las matrices de comparación, se emplean valores difusos para reflejar la incertidumbre o la imprecisión en las comparaciones.

Operaciones Difusas: Se aplican operaciones difusas para combinar las preferencias y calcular las puntuaciones finales de las alternativas.

-Pasos en el Proceso de Fuzzy AHP:

Establecimiento de la Jerarquía: Identificación de criterios y subcriterios relevantes, así como alternativas.

Matrices de Comparación Difusa: Los expertos proporcionan comparaciones de importancia entre criterios y subcriterios, y se construyen matrices de comparación difusa.

Cálculo de Pesos Difusos: Utilizando métodos de álgebra lineal y lógica difusa, se determinan los pesos de los criterios y subcriterios.

Consistencia y Sensibilidad: Se verifica la consistencia de las matrices de comparación y se realiza un análisis de sensibilidad.

Obtención de Resultados Finales: Se combinan los pesos difusos para obtener las puntuaciones finales de las alternativas.

-Ventajas del Fuzzy AHP:

Manejo de la incertidumbre y la imprecisión en los juicios expertos.

Flexibilidad para modelar relaciones complejas y no lineales.

Captura de la subjetividad y la ambigüedad en la toma de decisiones.

Análisis jerárquico (Saaty)

A partir de esto, se crea una matriz de comparación en la que se valora la importancia relativa de cada criterio en relación con los otros. Después, se asignan los pesos correspondientes y se obtiene una medida cualitativa que evalúa la consistencia de los juicios realizados entre los diferentes factores (Saaty, 1980:17). La escala de valoración es la siguiente:

Tabla 8. Valores de criterios de comparación.

VALOR	CUANDO UN CRITERIO SE COMPARA CON OTRO ES
1	Igualmente importante
3	Ligeramente importante
5	Notablemente más importante
7	Demostrablemente más importante
9	Absolutamente más importante

Fuente: Barba-Romero y Pomerol,1997

Variable independiente (X):

Modelo del proceso Jerárquico Analítico: su aplicación disminuye el nivel de subjetividad en la evaluación o calificación de los factores cualitativos en una localización, optimizando la búsqueda, en nuestro caso, identificación de sitios potenciales de biogás.

Indicadores:

- Calificación de factores
- Priorización por factores y localidades
- Nivel de subjetividad

Variable dependiente (Y):

Proceso de localización: se optimiza el proceso de sección al aplicar el modelo de proceso jerárquico analítico.

Capítulo 3: Marco legal y normativo

3.1 CONVENIOS INTERNACIONALES

Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP) del 22 de mayo de 2001, el cual entró en vigor el 17 de mayo de 2004, noventa (90) días después de la presentación del quincuagésimo instrumento de ratificación, aceptación, aprobación o adhesión con respecto al Convenio, mismo que fue firmado por México el 23 de mayo de 2001, en Suecia, ratificado el 10 de febrero de 2003.

El Convenio de Estocolmo tiene por objeto proteger la salud humana y el medio ambiente frente a los contaminantes orgánicos persistentes (COP), así como promover las mejores prácticas y tecnologías disponibles para reemplazar a los COP que se utilizan actualmente, y prevenir el desarrollo de nuevos COP a través del fortalecimiento de las legislaciones nacionales y la instrumentación de planes nacionales de implementación para cumplir estos compromisos.

En su 4ª Conferencia celebrada del 4 al 8 de mayo de 2009 en Ginebra (Suiza), la Conferencia de las Partes en sus decisiones SC-4/10 a SC-4/18, enmendó los anexos A, B y C del Convenio para incluir 9 sustancias nuevas en los Anexos del Convenio.

Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación y protocolo sobre responsabilidad e indemnización por daños resultantes de los movimientos transfronterizos de desechos peligrosos y su eliminación, del 22 de marzo de 1989, texto firmado por los representantes de 53 gobiernos y la Comunidad Económica Europea., dicho convenio entró en vigor el 5 de mayo de 1992, para el 07 de noviembre de 2005 166 países eran parte de él, México ratificó el convenio el 22 de febrero de 1991, siendo publicado en el Diario Oficial el 9 de agosto de ese mismo año, y las disposiciones generales fueron adoptadas el 5 de mayo de 1992, fecha de la entrada en vigor de este instrumento.

El Convenio de Basilea tiene como objetivo reducir al mínimo la generación de desechos peligrosos y su movimiento transfronterizo, así como asegurar su manejo ambientalmente racional, para lo cual promueve la cooperación internacional y crea mecanismos de coordinación y seguimiento.

Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono de marzo de 1985, México lo ratificó el 14 de septiembre de 1987

El Convenio tiene por objetivo alentar a las Partes a promover la cooperación a través de observaciones sistemáticas, investigaciones e intercambio de información sobre el impacto de las actividades humanas en la capa de ozono y para adoptar medidas legislativas o administrativas en contra de actividades que puedan producir efectos adversos en la capa de ozono.

Asimismo, alienta la cooperación intergubernamental para la investigación, la observación sistemática de la capa de ozono, el intercambio de información y el control y eventual eliminación del empleo de las sustancias agotadoras de la capa de ozono, en primera instancia los Clorofluorocarbonos (CFCs). Para este fin, se adoptó el Protocolo de Montreal, el 16 de septiembre de 1987 y entra en vigor el 1° de enero de 1989. México fue de los primeros países en ratificar el Protocolo de Montreal, el 31 de marzo de 1988.

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y su Protocolo de Kioto. (CMNUCC), firmada por el Gobierno de México el 13 de junio de 1992 y aprobada unánimemente por la Cámara de Senadores del H. Congreso de la Unión el 3 de diciembre del mismo año. Tras la aprobación del senado, la Convención fue ratificada ante la Organización de las Naciones Unidas el 11 de marzo de 1993.

La convención es el organismo de la ONU encargado de establecer las bases para la acción internacional conjunta en cuanto a mitigación y adaptación al cambio climático. Los países que integran la Convención (también llamados “estados parte”), se obligan a controlar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) mediante la instrumentación de políticas y medidas de mitigación y la aplicación de nuevas tecnologías económica y socialmente beneficiosas, entre otros factores.

Convención sobre la Prohibición del Desarrollo, la Producción, el Almacenamiento y el Empleo de Armas Químicas y sobre su Destrucción, del 13 de enero de 1993, misma que entró en vigor el 29 de abril de 1997.

Esta convención propone a los Estados Miembros de la OPAQ políticas que permiten aplicar la CAQ, y elabora y ejecuta programas con ellos y para ellos. Estos programas tienen cuatro objetivos principales:

Proporcionar un régimen creíble y transparente de verificación de las operaciones de destrucción de las armas químicas y evitar de este modo su fabricación futura, velando al

mismo tiempo por los intereses nacionales legítimos en materia de seguridad y derechos de propiedad;

Prestar asistencia y protección contra las armas químicas;

Promover la colaboración internacional para el uso de la química con fines pacíficos; y

Conseguir la universalidad de la OPAQ facilitando la cooperación internacional y la creación de capacidad a nivel nacional.

Esta labor se fundamenta en dos principios esenciales: primero, el carácter multilateral de la CAQ como factor central; y segundo, la aplicación por igual de las disposiciones de la CAQ a todos los Estados Partes.

Convenio de Róterdam sobre el Consentimiento Fundamentado Previo Aplicable a Ciertos Plaguicidas y Productos Químicos Peligrosos Objeto de Comercio Internacional, aprobado el 11 de septiembre de 1998, fecha en la que México lo suscribió. El 24 de febrero de 2004 el Convenio entró en vigor. México depositó el instrumento de adhesión el 4 de mayo de 2005 ante la Secretaría General de la ONU, y es Parte del mismo a partir del 2 de agosto de 2005.

Tiene por objetivo establecer un mecanismo de autorización previa a la importación y exportación de sustancias químicas peligrosas y plaguicidas comerciales, denominado Consentimiento Fundamentado Previo, PIC por sus siglas en inglés – y que frecuentemente se le conoce por este acrónimo al convenio-, con la finalidad de tener toda la información necesaria para conocer las características y los riesgos que implica el manejo de dichas sustancias, permitiendo que los países importadores decidan que sustancias químicas desean recibir y excluir aquellas que no puedan manejar de manera segura para evitar riesgos a la salud humana y el ambiente.

V Foro del marco de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE)

El objetivo principal para asistir a este evento fue el de conocer ejemplos concretos del impacto de las políticas, marcos e instituciones que están usando las nuevas mediciones del bienestar alrededor del mundo, y explorar cómo esta experiencia acumulada puede contribuir a las acciones adoptadas a nivel nacional en la búsqueda de un nuevo conjunto universal de objetivos de desarrollo sostenible (SDG).

3.2 LEGISLACIÓN FEDERAL

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, Artículos 4, párrafo quinto; 73, párrafo primero, fracción XXIX-G y 115 párrafo primero, fracción III inciso c) y g)

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR), artículos 1; 2; 3; 5 fracción II, X, XIII, XVII, XXI; XXIX, XXX, XXXIII y XXXV; 10; 25; 95; 96; 97 y 99.

Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), artículos 1; 2; 4; 8; 15; 19; 28; 36; 134; 135; 137; 138; 139 y 141

Ley General de Salud

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos

LEY General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano

3.3 LEGISLACIÓN ESTATAL

Ley Estatal del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente

Ley Estatal de Prevención y Gestión y Gestión Integral de Residuos

Ley Estatal del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente

3.4 LEGISLACIÓN MUNICIPAL

Los municipios cuentan con el fundamento legal para actuar de manera autónoma y responsable en la gestión de los RSU y RME generados por su población, pero debe cumplir en tiempo y forma con ciertos lineamientos.

Bando Municipal

Ordenamientos municipales

Los municipios tendrán a su cargo las funciones de manejo integral de residuos sólidos, que consiste en la recolección, traslado, tratamiento y disposición final, así como formular, por sí o en coordinación con las entidades federativas, y con la participación de los representantes

de los distintos sectores sociales, los Programa Municipales para la Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos, observando el PEPGIR y el PNPGIR.

Bandos de Policía y Buen Gobierno Reglamentos Municipales de Protección al Ambiente

Facultades de los municipios establecidos en la LGEEPA:

La prevención y el control de la contaminación de la atmósfera proveniente de fuentes fijas y móviles de jurisdicción federal.

Programa para el Desarrollo Ambiental del municipio: Es un conjunto de acciones que el Ayuntamiento de Toluca, deberá de llevar a cabo, en el mediano plazo (5 años, 2017 – 2021) y largo plazo (9 años, 2022 – 2030), en él se establecen las políticas públicas y acciones que conducirán al Municipio hacia la Sustentabilidad (aplicado al municipio de Toluca).

3.4.1 REGLAMENTOS

Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
Precisión

Reglamentos de Gestión Integral de los Residuos

Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en
Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera

Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos

3.4.2 DECRETOS

Decreto de promulgación de la Convención sobre la Prohibición del Desarrollo, la Producción, el Almacenamiento y el Empleo de Armas Químicas y sobre su Destrucción, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 05 de octubre de 1994.

Decreto promulgatorio del Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 09 de agosto de 1991.

3.5 NORMAS OFICIALES MEXICANAS (NOM)

Las NOM son regulaciones técnicas de observancia obligatoria expedidas por las dependencias competentes, que tienen como finalidad establecer las características que deben reunir los procesos o servicios cuando estos puedan constituir un riesgo para la seguridad de las personas o dañar la salud humana; así como aquellas relativas a terminología y las que se refieran a su cumplimiento y aplicación, en otras palabras una NOM es un instrumento que describe las características y/o especificaciones que deben reunir los productos, procesos y servicios.

Las NOMs ambientales establecen los requisitos, especificaciones, condiciones, procedimientos, metas, parámetros y límites permisibles que deberán observarse para asegurar el bienestar de la población y la preservación.

NOM-083-SEMARNAT-2003. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Los rellenos sanitarios se categorizan de según la cantidad de RSU y RME que reciben diariamente, tanto de domicilios, comercios e industrias (no peligrosos), como de los servicios de limpieza de calles y lugares públicos.

Resumen de los requisitos y especificaciones generales para los sitios de disposición final, de acuerdo con la categorización presentada en la NOM-083-SEMARNAT-2003.

Tabla 9. Requisitos para un sitio de disposición final (A: Residuos domésticos; B: Residuos comerciales; C: Residuos industriales; D: Residuo peligroso).

Requisitos	Tipo de sitio de disposición final			
	A	B	C	D
A. Especificaciones de selección del sitio.				
A.1 Restricciones.	•	•	•	•
A.2 Estudios y análisis previos a la selección del sitio.	•			
A.3 Estudios y análisis previos a la construcción.				
A.3.1 Topográfico.	•	•		
A.3.2 Geotécnico.	•	•	•	
A.3.3 Geológico / Hidrogeológico.	•	•		
A.3.4 Generación y composición de los residuos.	•	•	•	
A.3.5 Generación de biogás.	•	•	•	
A.3.6 Generación de lixiviados.	•	•		

B. Características constructivas y operativas	•	•		
B.1 Barrera impermeable.	1x10-7cm/s	1x10-7cm/s	1x10-7cm/s	1x10-7cm/s
B.2 Extracción, captación, conducción y control del biogás.	•	•	•	
B.3 Captación y extracción de lixiviados.	•	•	•	
B.4 Drenaje pluvial.	•	•	•	
B.5 Área de emergencia.	•	•	•	
B.6 Compactación (Kg /m3).	600 - 700	>500	>400	>300
C. Clausura del sitio.				
C.1 Cubierta final.	Ver NOM	Ver NOM	Ver NOM	Ver NOM
C.2 Conformación final.	•	•	•	•
C.3 Mantenimiento.	•	•	•	•
C.4 Programa de monitoreo.	•	•	•	•
C.5 Uso final	•	•	•	•

Fuente: NOM-083-SEMARNAT-2003

- NOM-098-SEMARNAT-2002, Protección Ambiental-Internacional de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes, esta NOM establece las especificaciones de operación, así como los límites máximos permisibles de contaminantes a la atmosfera para las instalaciones de incineración de residuos.

3.5.1 NORMAS MEXICANAS (NMX)

Las NMX son instrumento de referencia para determinar la calidad de los productos y servicios. Son elaboradas para uso público por un organismo nacional de normalización o la secretaría de economía, su objetivo es proteger y orientar a los consumidores. No tienen un carácter obligatorio su cumplimiento es voluntario y su campo de aplicación es determinado por la propia Norma; éste puede ser nacional, regional o local. Es importante aclarar que si una NOM hace referencia a una NMX ésta adquirirá el carácter de obligatoria.

- NMX-AA-15-1985: Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Muestreo - Método de cuarteo.
- NMX-AA-016-1984 Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de humedad.

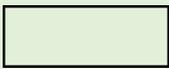
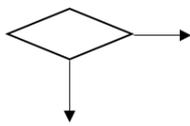
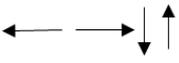
- NMX-AA-18-1984: Protección al ambiente - Contaminación de suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de cenizas.
- NMX-AA-19-1985: Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Peso volumétrico “in situ”.
- NMX-A 3A-21-1985: Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de materia orgánica.
- NMX-AA-22-1985: Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Selección y cuantificación de subproductos.
- NMX-AA-024-1984 Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de nitrógeno total.
- NMX-AA-025-1984 Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos - Determinación del PH - Método potenciométrico.
- NMX-AA-033-1985 Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de poder calorífico superior.
- NMX-AA-061-1985 Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de la generación.
- NMX-AA-067-1985 Protección al ambiente - contaminación del suelo -Residuos sólidos municipales - Determinación de la relación carbono / nitrógeno.
- NMX-AA-068-1986 Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de hidrógeno a partir de materia orgánica.
- NMX-AA-080-1986 Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación del porcentaje de oxígeno en materia orgánica.
- NMX-AA-091-1987 Calidad del suelo – Terminología.

Capítulo 4: Metodología

En este capítulo se describe y explican los procesos efectuados para el desarrollo de la metodología empleada, así como los objetivos y la descripción de las herramientas geoinformáticas a utilizar para la aplicación de estos.

La metodología que se empleó en el presente trabajo se basó en el seguimiento de cinco procesos, principalmente para su implementación como se muestra en la Figura 5, dichos procesos se describen en la tabla 11. Indicando los criterios que deben cumplir para lograr los objetivos propuestos de la investigación. En la siguiente tabla 10 se presentan los símbolos que se utilizan.

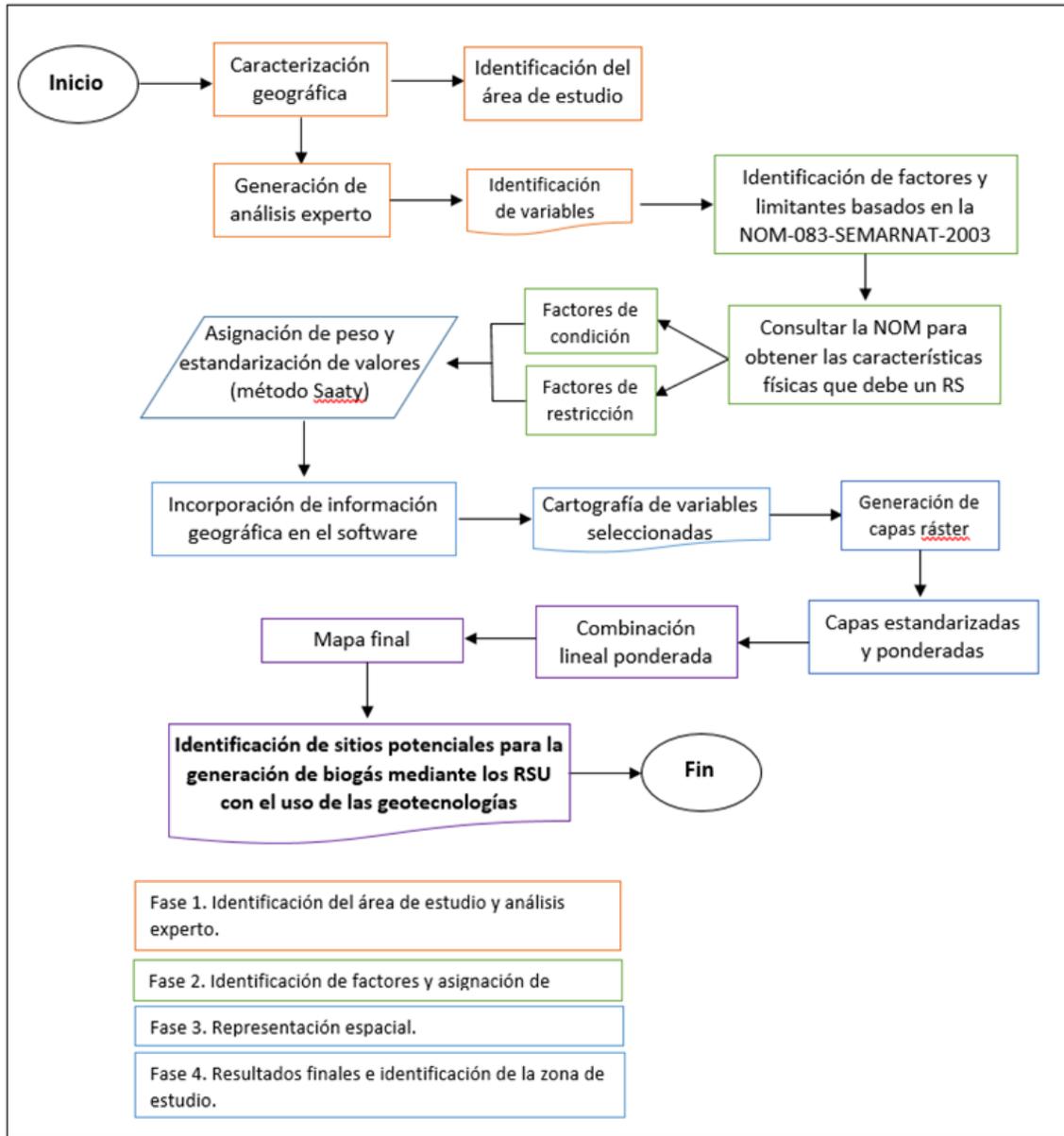
Tabla 10. Símbolos utilizados para la esquematización de los diseños conceptuales.

EXPLICACIÓN DEL SÍMBOLO	
	Marca el inicio y fin del diagrama de flujo.
	Introduce los datos de entrada. Expresa lectura.
	Representa un proceso. En su interior expresa asignaciones, operaciones aritméticas, cambios de valor, etc.
	Representa decisión, almacenando una condición y dependiendo del resultado de evaluación de esta se sigue por caminos alternativos.
	Representa la impresión de un resultado.
	Se utilizan para expresar la dirección de flujo del diagrama.

Fuente: Elaboración propia, (2024). Con base en Cairo, 2016.

En la figura 5 se observa el diagrama general ejecutado, para el seguimiento y evaluación de las características físicas de la ZMVT y, después, se muestra la descripción para el desarrollo metodológico de la investigación. La finalidad de la metodología es contribuir con la gobernanza local de los recursos sólidos urbanos para una adecuada separación de los RSU.

Figura 5. Diagrama de operaciones para el desarrollo metodológico de la investigación.



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla 11. Descripción del diagrama general para el desarrollo metodológico de la investigación.

FASE	DESCRIPCIÓN
Caracterización geográfica y análisis experto	Búsqueda bibliográfica que comprendan la problemática planteada, tomando en cuenta el punto de vista de diferentes autores para poder identificar indicadores y cuantificar variables que nos permitirá conocer escenarios futuros.
Identificación de factores y asignación de pesos	Identificar factores y restricciones que marca la NOM-083-SEMARNAT-2003, para tomarse en cuenta al tomar decisiones. Así mismo, asignar los pesos a nuestras variables de acuerdo con lo que se establece la metodología Saaty.
Representación espacial	A partir de que nuestras variables se le asignaron pesos, se generó la cartografía pertinente a estas mismas, así como, la generación de un álgebra de mapas con nuestra cartografía principal para que nos arroje los resultados requeridos.
Resultados finales e identificación de la zona de estudio	Identificación de sitios potenciales para la generación de biogás mediante los residuos sólidos urbanos mediante las geotecnologías.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

4.1 Caracterización geográfica

En este apartado, se realizará una caracterización de los Zona Metropolitana del Valle de Toluca con la finalidad de que esta permita tomar en cuenta una lista de indicadores, además de escribir cuantitativa y cualitativamente sus recursos para la investigación. Cabe señalar que en esta etapa se consideran elementos geográficos dentro de la zona de estudio. En la tabla 12 se explican las variables fisiográficas que se consideraron para la caracterización del Valle de Toluca.

4.1.1 Delimitación de la zona de estudio

En esta etapa, se caracteriza por el Valle de Toluca para identificar los municipios con relleno sanitario y usarlos como base para realizar el proyecto de investigación, logrando que esto permita considerar un listado de variables.

Tabla 13. Descripción de procesos.

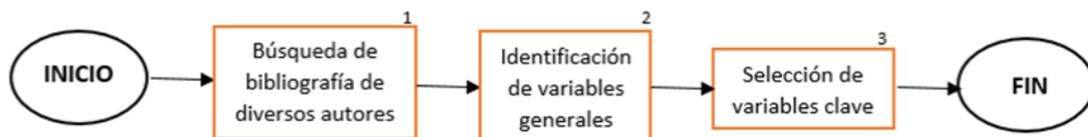
Elementos	Descripción
Ubicación geográfica de los rellenos sanitarios	Se considera los municipios centrales de la zona metropolitana del Valle de Toluca para especificar el espacio geográfico.
Identificación de los municipios que cuentan con un R.S. dentro de la ZMVT	Localización y descripción de los rellenos sanitarios del Valle de Toluca.
Densidad de población por municipio	Identificación de cuantas personas hay por municipio.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Delimitamos nuestra zona de estudio con ayuda el uso de la cartografía del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), acotando la división del Estado de México a solo los municipios que se localizan dentro del área de interés, que son Almoloya de Juárez, Calimaya, Lerma, Metepec, Mexicaltzingo, San Antonio la Isla, San Mateo Atenco, Toluca, Xonacatlán y Zinacantepec, considerando que, son los municipios centrales de la zona conurbada, y de acuerdo con los registros de densidad de población del Consejo Estatal de Población Estado de México (COESPO, 2021) son en los que mayor población reside, por lo que serían los mayores generadores de residuos sólidos.

A continuación, se muestra la descripción del proceso que se llevó a cabo para la obtención de las variables que nos va a permitir priorizarlas, ya que fueron las que utilizamos para generar nuestro modelo prospectivo:

Figura 6. Diagrama de flujo para la obtención de variables.



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla 14. Descripción de los procesos.

PROCESO	DESCRIPCIÓN
1	Se realizó un análisis experto, donde se tomó como base la bibliografía de distintos autores para identificar las variables que utilizan. Después, se realizó una ponderación de aquellas que cumplieran con la zona de estudio, previamente elegidas.
2	Este proceso se basó en saber que contamos con estas variables en formato shapefile, ya sea recabando la información en portales de gobierno como INEGI, SEMARNT, etc., o por elaboración propia.
3	En este paso generamos la cartografía con ayuda del software QGis para visualizar espacialmente nuestras variables dentro de la zona de interés,

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Búsqueda bibliográfica

Para esta parte, se realizó una búsqueda de antecedentes sobre el uso de las geotecnologías en materia de sustentabilidad, así como del biogás y los residuos sólidos urbanos en SDF, utilizando plataformas de artículos y revistas en las que encontramos publicaciones con base a los criterios de medio ambiente y sistemas de información geográfica. La búsqueda abarcó diversos proyectos y tesis similares a nuestro tema, nacionales e internacionales.

4.1.3 Análisis experto

Dándole continuidad con una búsqueda de artículos sobre el tema, llamado análisis experto, para identificar las variables que podrían considerarse según varios autores expertos en el tema, desarrollada en la tabla 15.

Para abordar nuestra compleja realidad, nos hemos embarcado en un proceso de selección meticuloso de indicadores para cada una de las variables pertinentes. Este proceso se ha basado en un exhaustivo análisis llevado a cabo por expertos en el campo, quienes han evaluado minuciosamente las características y particularidades de nuestro entorno.

Tabla 15. Formato de bibliografías utilizadas.

Autor	Cita	Variables	Modelo de análisis

Fuente: elaboración propia, 2024.

4.1.3.1 Revisión para la elección de variables

En esta etapa se enlistan y ponderan las variables por orden de importancia, dándole a cada variable un valor según la repetición de la bibliografía realizada y según la problemática principal de la investigación.

Tabla 16. Formato de orden de variables.

Orden de importancia	Variable	Repetición

Fuente: elaboración propia, 2024.

En nuestro siguiente paso, era importante identificar las variables motrices y dependientes a utilizar para nuestro análisis prospectivo, según el análisis de impacto cruzado, pensamiento sistemático y métodos exploratorios y normativos de nuestro estudio, para desarrollar un planteamiento estratégico.

4.1.3.2 Identificación de factores

La identificación de las zonas de interés va de la mano con lo establecido en la Norma Oficial Mexicana (NOM-083-SEMARNAT-2003), que especifica los factores de condición y restricción de los rellenos sanitarios, entre estos, criterios ecológicos.

Para el monitoreo de biogás, conforme a la NOM-083-SEMARNAT-2003, es necesario desarrollar un programa cuyo objetivo sea evaluar el nivel de estabilización de los residuos, asegurando la protección del sitio de disposición final y detectando posibles migraciones del biogás fuera del terreno. Este programa debe incluir la especificación de parámetros como la composición, explosividad y el flujo del biogás.

4.1.3.3 Factores de restricción

- a) Los sitios de disposición final no deben ubicarse en lugares donde sus estudios geotécnicos resulten con una permeabilidad alta.
- b) b) La distancia entre el límite del sitio de disposición final y cualquier pozo de extracción de agua para uso doméstico, industrial, riego o ganadería, tanto en operación como en desuso, debe ser de al menos 100 metros adicionales a la proyección horizontal de la mayor circunferencia del cono de abatimiento. Si el cono de abatimiento no puede determinarse, la distancia mínima será de 500 metros.
- c) Los sitios de disposición final no tienen que ubicarse asentamientos humanos, selvas, vegetación halófila y bosques.

4.4 Representación espacial y asignación de pesos. Método Saaty

4.4.1 Construcción de base de datos cartográfica

Se utilizó un modelo conceptual para desarrollar el diseño lógico, para exponer cómo se integró la evaluación en el Sistema de Información Geográfica (SIG), incluyendo su conexión, procesamiento, elementos y resultados finales, junto con las particularidades de cada capa de información en la descripción de la base de datos.

Esta parte conduce a la selección de la información geográfica necesaria para llevar a cabo la determinación en cuanto al contenido de datos posibles y a la estructura de datos (como sirven), como insumo para nuestro objetivo de identificación de sitios.

4.4.2 Ponderación de criterios

Al tener lista la cartografía y los requerimientos del método, así como el conocimiento de saber con qué capas contamos, se establecieron jerarquías y pesos a los factores para cada uso, a través de la asignación de un valor relativo de ponderación.

Este procedimiento se basa en la estructuración de una matriz cuadrada de filas y columnas, en la que se comparan por pares los factores temáticos o variables a ponderar para determinar su relevancia. Thomas Saaty, creador de esta metodología, propuso una escala numérica que oscila entre 1/9 como valor mínimo y 9 como máximo (Gómez y Barredo, 2005).

Tabla 17. Escala por comparación de pares.

Valor	Definición	Descripción
1/9	Importancia extrema	A es extremadamente menos importante que B
1/7	Importancia muy fuerte	A es mucho menos importante que B
1/5	Importancia fuerte	A es menos importante que B
1/3	Importancia moderada	A es ligeramente menos importante que B
1	Igual de importante	A y B tienen la misma importancia
3	Importancia moderada	A es ligeramente más importante que B
5	Importancia fuerte	A es más importante que B
7	Importancia muy fuerte	A es mucho más importante que B
9	Importancia extrema	A es extremadamente más importante que B

Fuente: elaboración propia con base en Barba y Pomerol (1997).

Valoración y normalización de datos

4.4.3 Aplicación de las técnicas de evaluación multicriterio (EMC)

Las fases del método se dividen en:

- a) Estructuración: implica definir los factores y limitantes que guiarán el análisis en función de los objetivos establecidos.
- b) Estandarización de criterios: consiste en convertir los valores de cada factor en unidades comparables, dependiendo del costo o beneficio asignado, y puede ser lineal o no lineal.
- c) Ponderación: se refiere al peso o importancia que se asigna a cada factor en el proceso de análisis.
- d) Obtención de alternativas: implica identificar áreas con las condiciones óptimas, y
- f) Análisis de sensibilidad: busca determinar el nivel de confianza en los resultados obtenidos (Sharifi, Van Herwijnen y Van der Toorn, 2004).

Cada indicador se seleccionó con sumo cuidado, considerando no solo su relevancia intrínseca, sino también su capacidad para capturar de manera precisa los aspectos clave de cada variable. Además, se ha prestado especial atención al ordenamiento de estos indicadores, siguiendo un criterio propio que busca priorizar los aspectos considerados de mayor importancia o impacto en nuestra situación específica.

Este proceso de asignación de valor y ponderación ha sido fundamental para garantizar la adecuada representación y precisión de nuestras dimensiones.

El siguiente paso consistió en estandarizar las capas utilizando los valores de peso previamente asignados en la etapa anterior. El propósito era transformarlas en variables cuantitativas para evitar problemas de cálculo derivados de la utilización de escalas y/o unidades diferentes en la matriz de decisión.

Se aplicó un método basado en la teoría de conjuntos difusos (Fuzzy) para esta normalización, que se caracteriza porque los puntajes normalizados carecen de unidades de dimensión. En lugar de determinar si un elemento específico pertenece o no a un conjunto, se asigna a un rango continuo de valores que va de 0 a 250. En cuanto a los atributos de beneficios, cuanto mayor sea el puntaje normalizado, mayor será su preferencia, reflejando así una variación gradual (Campos, M., Monroy, J., Campos, J. y Cadena, E., 2012).

4.5 Implementación de los Sistema de Información Geográfica

4.5.1 Cartografía de los factores de restricción

Al establecer los valores de las clases para los criterios, se examinaron los criterios de las capas de restricción, para asegurar que ningún lugar candidato esté en áreas donde las actividades propuestas no estén permitidas, ya sea por consideraciones físicas o normativas.

La técnica para la elaboración de la cartografía se basó en la técnica booleana, en la que las restricciones corresponden a capas de información solo con dos valores numéricos; 1 que indica el lugar óptimo y el valor 0, que indica la anulación total del sector para la actividad evaluada.

4.5.2 Integración de factores

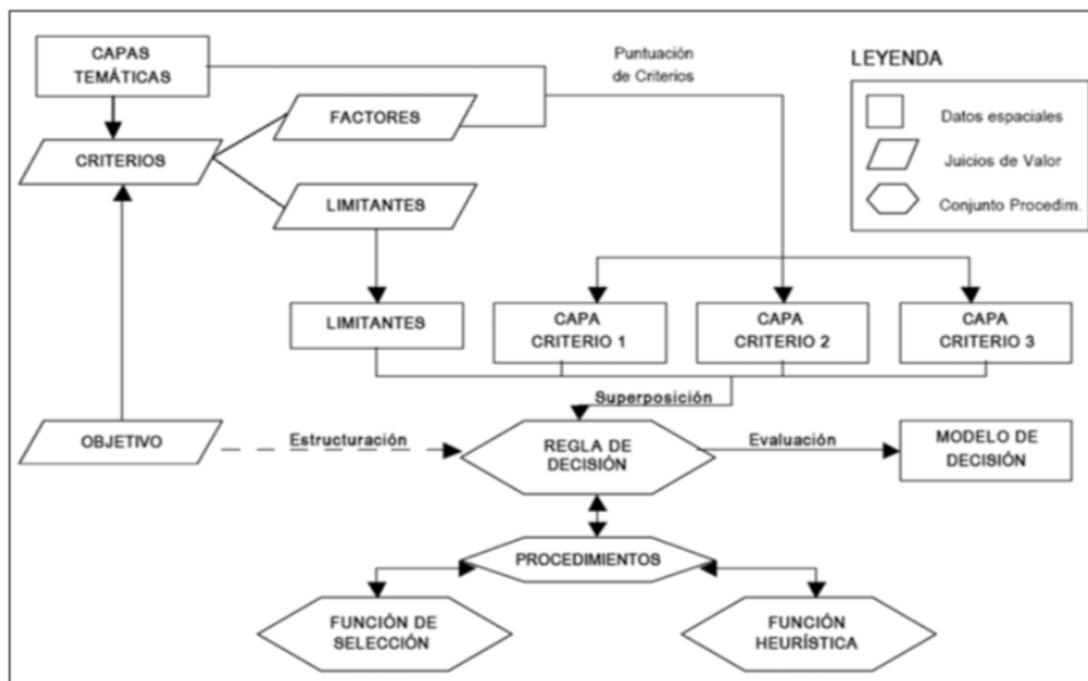
Una vez teniendo los mapas ponderados y estandarizados, se realizó una evaluación de las alternativas, o sea, se identificó el nivel de adecuación de cada elemento espacial en función de los criterios propuestos para conseguir áreas por objetivos planeados. Para este paso se utilizó la técnica compensatoria aditiva Sumatoria Lineal Ponderada (SLP), aplicada en EMC del SIG Terrset.

4.6 Evaluación Multicriterio en los SIG

Para implementar este modelo en los sistemas de información geográfica (SIG), es necesario considerar la aparición de diferentes escenarios futuros. Primero, se deben integrar los datos de “entrada”, que consisten en un conjunto de capas geográficas con los valores correspondientes a los factores. Luego, se realiza el “procesamiento”, donde se aplica el modelo prospectivo en el área de estudio utilizando los datos de entrada. Finalmente, el resultado o “salida” es un mapa que muestra los escenarios futuros en distintas zonas del territorio.

A continuación, se muestra las relaciones de cada proceso de EMC, modificada por Gómez y Barredo (2005).

Figura 7. Evaluación multicriterio en el entorno de los SIG.



Fuente: Gómez y Barredo (2005).

El procedimiento inició con la entrada de las capas temáticas en formato ráster de cada criterio, con una salida de píxel de 30 m., cada capa delimita el área de estudio.

Las clases y atributos de cada capa (representados por X_{ij}) se establecen utilizando la herramienta Weight (figura 1-8), que permite respaldar los pesos asignados a cada factor mediante un fundamento matemático. Esta herramienta se fundamenta en la comparación de pares de elementos mediante un Procedimiento del Análisis Jerárquico. Para ello, debemos tener en cuenta que la razón de consistencia es baja (cercano a 0), los coeficientes de ponderación son aceptados; si es alto (cercano a 1), se inicia el proceso de generación de una matriz. (Campos, M., Monroy, J., Campos, J. y Cadena, E., 2012).

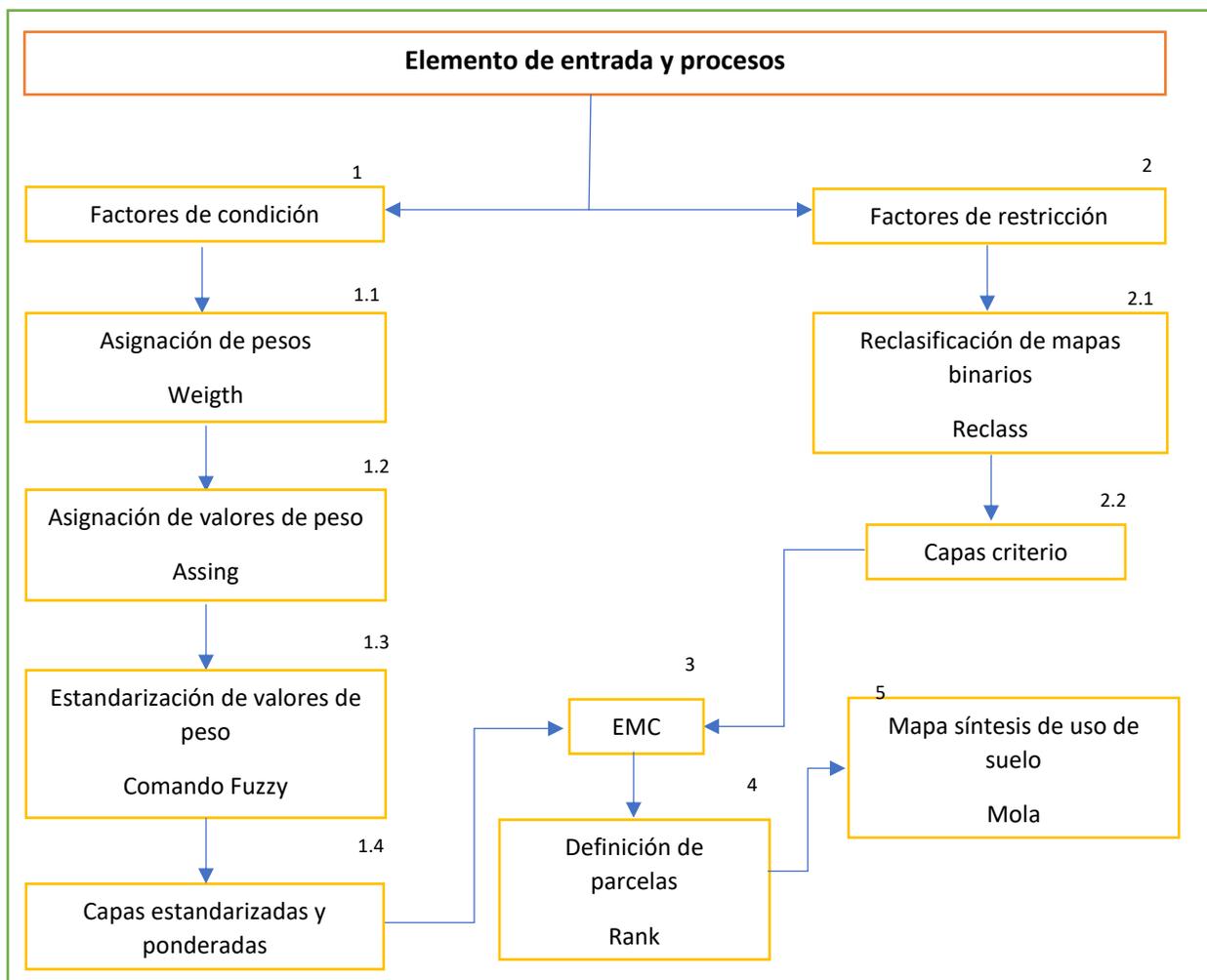
4.6.1 Integración de factores

Una vez teniendo los mapas ponderados y estandarizados, se realizó una evaluación de las alternativas, o sea, se identificó el nivel de adecuación de cada elemento espacial en función de los criterios propuestos para conseguir áreas por objetivos planeados. Para este paso se

utilizó la técnica compensatoria aditiva Sumatoria Lineal Ponderada (SLP), aplicada en EMC del SIG Terrset.

En la siguiente tabla, se describen los procesos para realizar la representación espacial y temporal. Esta parte, es primordial para señalar la importancia del proceso, ya que es una forma de monitorear la problemática situacional del área de estudio, mediante variables que serán almacenados en un software para su visualización.

Figura 8. Modelo Lógico de la EMC en el SIG Terrset



Fuente: basado en (Campos, M. et al., 2012), elaboración propia.

Tabla 18. Descripción de los procesos del EMC.

PROCESO	DESCRIPCIÓN
1	Esta parte, es identificar los factores que se requieren en el ambiente para poder generar biogás.
1.1	Ponderación, peso o importancia que va tener cada factor dentro del proceso de análisis.
1.2	Asignar el valor de acuerdo con lo que indica la metodología.
1.3	Importancia que va tener cada factor dentro del proceso de análisis.
1.4	La transformación de los valores de los factores a unidades comparables está relacionada con el costo o beneficio asignado a cada factor, y esta transformación puede ser de tipo lineal o no lineal.
2	Las condiciones que no permitirán que sean sitios factibles.
2.1	Uso de Terrset para reclasificar las capas de restricciones.
2.2	Al obtener el resultado, se podrá hacer uso de este para darle continuidad a la metodología.
3	Aquí entran todas nuestras capas a la clasificación multicriterio.
4	Delimitar las áreas con las condiciones más óptimas.
5	Resultado final para realizar el análisis de sensibilidad para determinar el grado de confianza de los resultados.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Capítulo 5: Análisis de resultados

En este capítulo se presentan los resultados de la aplicación de la metodología mencionada, mediante un enfoque que abarca el análisis de la ubicación, el manejo de residuos, las prácticas de disposición, las operaciones generales, y la identificación de la emisión de biogás. Se utilizaron los sistemas de información geográfica (SIG) y la cartografía de la zona para generar datos espaciales y evaluar los sitios, considerando factores y parámetros de riesgo para su correcto funcionamiento.

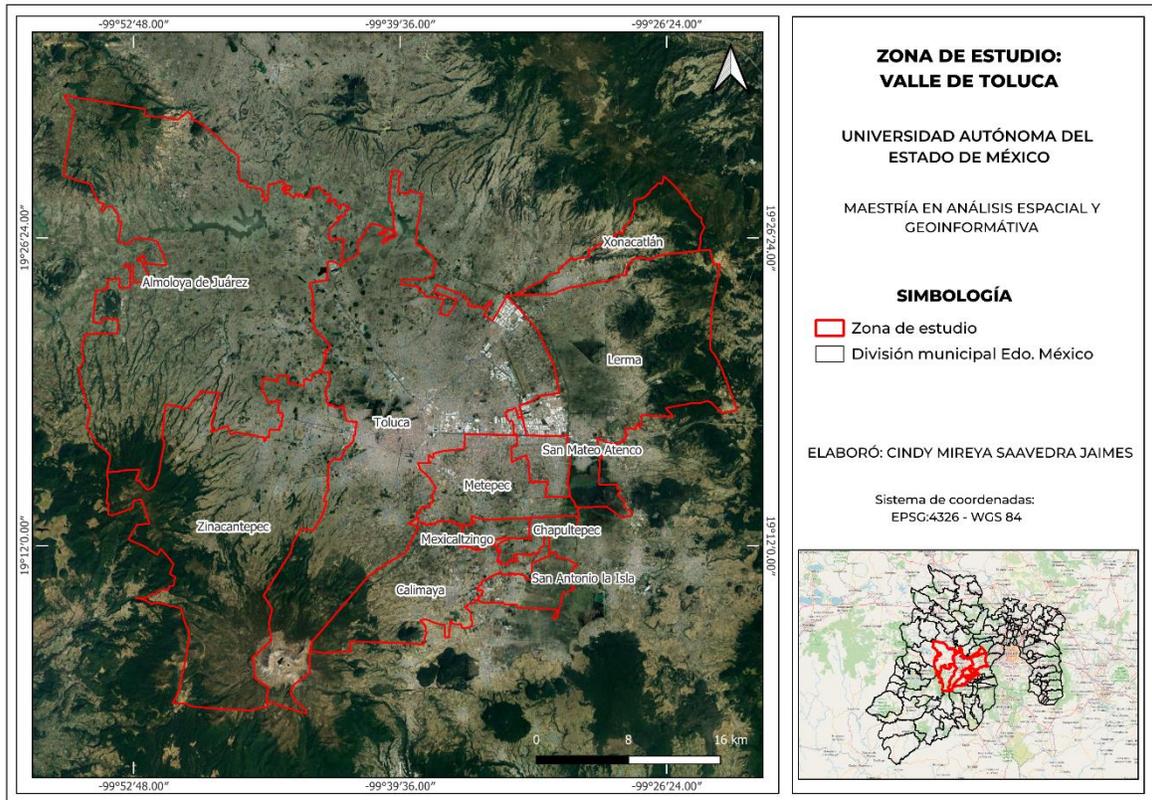
5.1 Caracterización geográfica

5.1.1 Delimitación de la zona de estudio

El Valle de Toluca está localizado en el centro-oeste del Estado de México, México y formando parte de la cuenca del río Lerma. Se seleccionó el Valle de Toluca por ser una de las zonas metropolitanas más importantes del centro del país. Como parte inicial de esta investigación, se propondrá un análisis de un modelo prospectivo mediante los sistemas de información geográfica, para identificar los sitios potencialmente factibles para la generación de biogás.

Nuestra área de estudio abarcó ocho municipios dentro de la ZMVT, estos fueron Almoloya de Juárez, Calimaya, Lerma, Metepec, Mexicaltzingo, San Antonio la Isla, San Mateo Atenco, Toluca, Xonacatlán y Zinacantepec, en donde se encuentran en función solo tres sitios de disposición final (SDP), que son los principales de la gestión de residuos de los municipios más importantes de nuestra zona de estudio. Estos municipios son San Antonio la Isla, Xonacatlán y Zinacantepec.

Figura 9. Ubicación de la zona de estudio.



Fuente: elaboración propia.

El Valle de Toluca se caracteriza por su clima templado subhúmedo, su topografía de cuenca rodeada por montañas y una vegetación que ha sido alterada por el desarrollo urbano y agrícola. Sin embargo, este crecimiento puede utilizarse a favor para aprovechar los residuos generados por la urbanización, siendo el motivo de esta investigación.

5.1.2 Residuos Sólidos Urbanos en el Valle de Toluca

En los últimos años, el Valle de Toluca se ha expandido de manera rápida, esto implica un aumento de generación de residuos y con ello, aumento de contaminación del suelo y aire. Analizando teóricamente, no existe un relleno sanitario que cumpla con los requerimientos

necesarios para una correcta clasificación de los residuos sólidos urbanos y un cumplimiento del uso correcto de cada tipo de residuos generado (doméstico, residual, industrial).

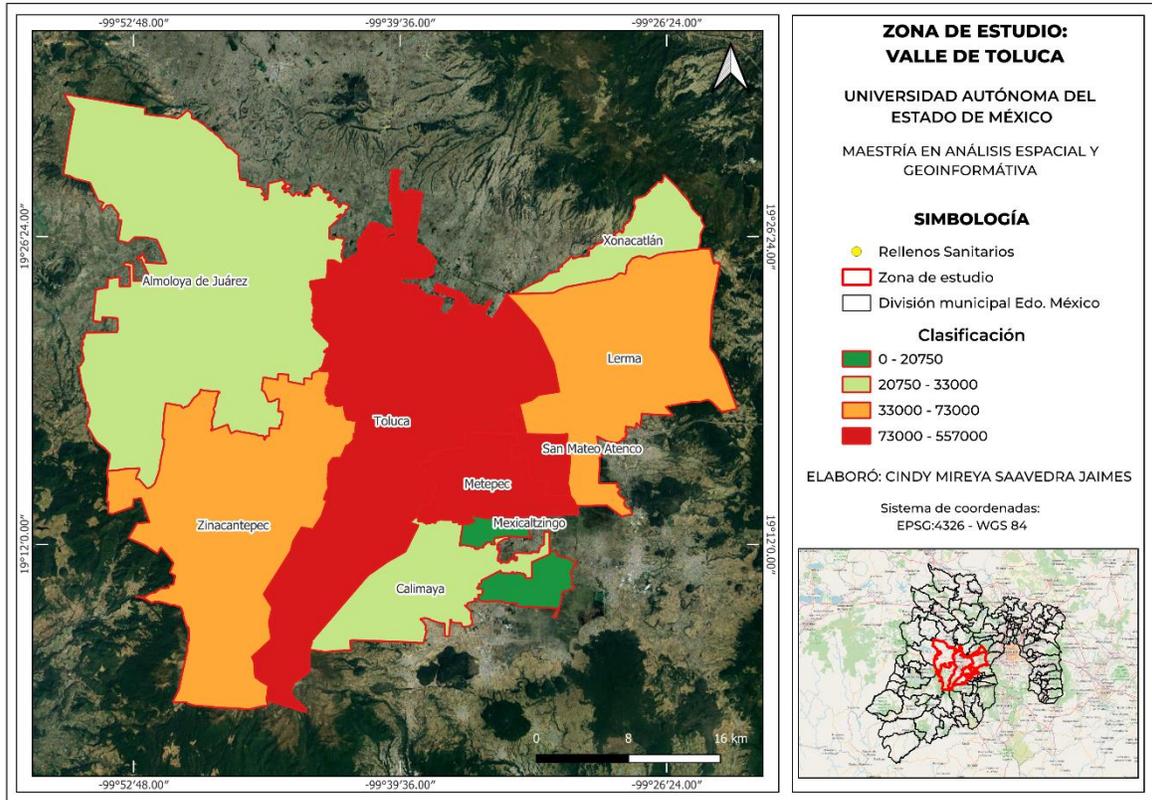
Tabla 19. Promedio diario de residuos sólidos urbanos recolectados por municipios y delegación por kg.

MUNICIPIOS	RSU/kg
Almoloya de Juárez	32,000
Calimaya	31,000
Lerma	71,000
Metepec	250,000
Mexicaltzingo	10,000
San Antonio la Isla	10,500
San Mateo Atenco	75,000
Toluca	557,000
Xonacatlán	33,000
Zinacantepec	65,000

Fuente: INEGI, 2014.

Con base al cuadro anterior, a continuación, se presenta la figura 10 en la que nos muestra visualmente, la clasificación de los municipios de los que generan de menor a mayores residuos.

Figura 10. Clasificación de municipios que generan mayores residuos sólidos.

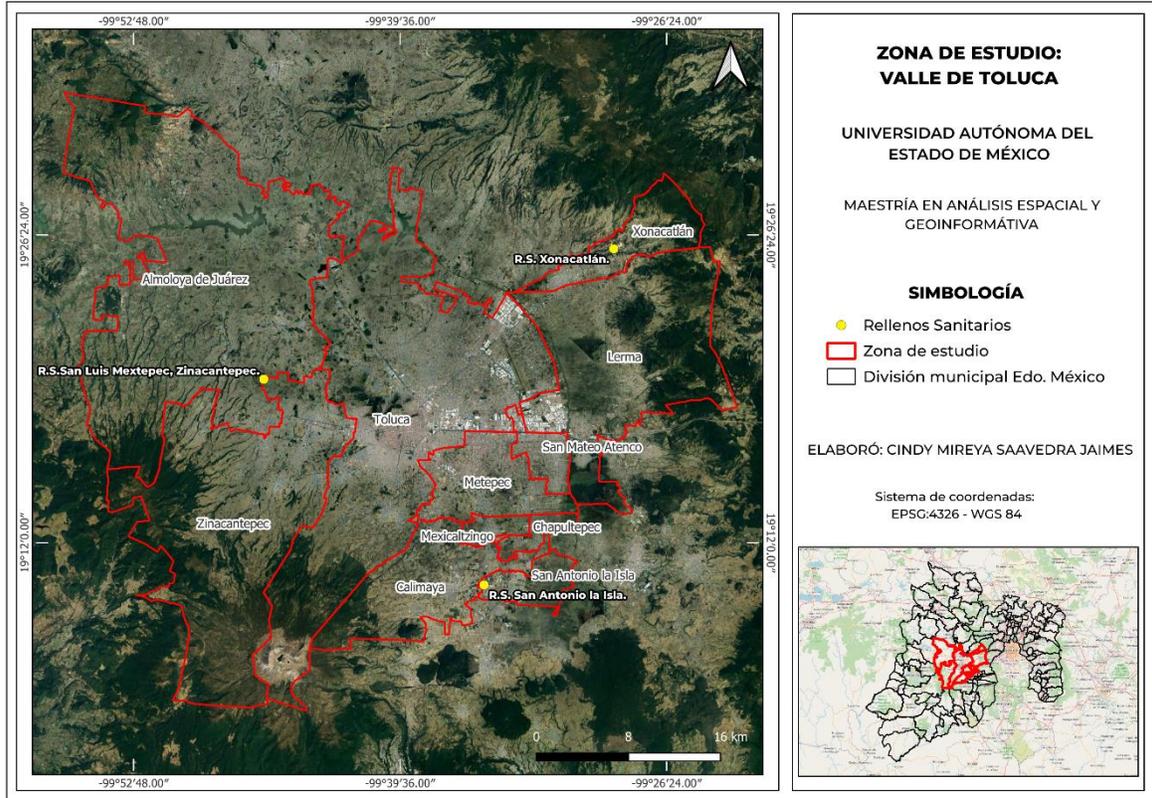


Fuente: elaboración propia, 2023.

5.1.3 Identificación de los municipios que cuentan con un relleno sanitario dentro de la ZMVT

Dentro de los 10 municipios seleccionados, se detectaron 3 Sitios de Disposición Final (SDF) operativos, lo que indica que la mayoría de los municipios en todo el Valle de Toluca dependen de estos sitios para la gestión de sus residuos. Estos SDF están ubicados en los municipios de Zinacantepec, Xonacatlán y San Antonio la Isla, como se ilustra en la siguiente figura 11.

Figura 11. Ubicación de rellenos sanitarios dentro de la zona de estudio.



Fuente: elaboración propia.

5.1.4 Densidad de población de la zona de estudio

La densidad de población es crucial al planificar la gestión de residuos sólidos urbanos por la eficiencia en la recolección, debido a que, en las áreas con alta densidad de población, hay una mayor concentración de residuos generados por unidad de área. Así como, afecta directamente la cantidad y naturaleza de los residuos sólidos urbanos generados, así como las estrategias necesarias para su gestión sostenible y eficiente.

Tabla 20. Densidad de población 2020 de los municipios de nuestra zona de estudio.

MUNICIPIOS	RSU/kg
Almoloya de Juárez	174,587
Calimaya	68,489
Lerma	170,327
Metepec	242,307
Mexicaltzingo	13,807
San Antonio la Isla	31,962
San Mateo Atenco	97,418
Toluca	910,608
Xonacatlán	54,633
Zinacantepec	203,872

Fuente: Visor Atlas cibernético del Estado de México.

5.2 Búsqueda bibliográfica

5.2.1 Análisis experto

Con base a la metodología revisada, se tomó como sustento teórico la bibliografía expuesta de doce autores enfocados en los sistemas de información geográfica y de la generación de biogás en rellenos sanitarios. Ordenando la información por autor, metodología y variables.

Tabla 21. Aplicación del análisis experto.

Autor	Cita	Variables	Modelo de análisis
Siome Leao, Ian Bishop y David Evans	Leao, S., Bishop, I., & Evans, D. (2001a). Assessing the demand of solid waste disposal in urban region by urban dynamics modelling in a GIS environment. <i>Resources, Conservation and Recycling</i> , 33(4), 289–313. https://doi.org/10.1016/s0921-3449(01)00090-8	Tasa de consumo de energía, la tasa de emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera y el costo económico neto de las operaciones involucradas (costos de operación menos ingresos)	Modelo desarrollado mediante la integración de un sistema de información geográfica (SIG), autómatas celulares (CA) y evaluación multicriterio/proceso jerárquico analítico (MCE/AHP).
Karadimas, N. V., & Loumos, V. G	Karadimas, N. V., & Loumos, V. G. (2008). GIS-based modelling for the estimation of municipal solid waste generation and collection. <i>Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy</i> , 26(4), 337–346. https://doi.org/10.1177/0734242x07081484	Densidad de población, las actividades comerciales, las características de las carreteras y su influencia en la ubicación y asignación de los contenedores de basura.	Este modelo es parte de un sistema extendido de gestión de residuos sólidos y utiliza una Geodatabase espacial, integrada en un entorno GIS.
Ghose, M., Dikshit, A., & Sharma, S	Ghose, M., Dikshit, A., & Sharma, S. (2006). A GIS based transportation model for solid waste disposal – A case study on Asansol municipality. <i>Waste Management</i> , 26(11), 1287–1293. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.09.022	Densidad de población, capacidad de generación de residuos, red vial y tipos de vías, contenedores de almacenamiento y vehículos recolectores.	Modelo de enrutamiento óptimo GIS
Grazhdani, D.	Grazhdani, D. (2016). Assessing the variables affecting on the rate of solid waste generation and recycling: An empirical analysis in Prespa Park. <i>Waste Management</i> , 48, 3–13. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.028	Económicas, demográficas, de estructura de vivienda y de política de gestión de desechos.	Estadística descriptiva, análisis de correlación bivariado y Las pruebas F
Sumathi, V., Natesan, U., & Sarkar, C.	Sumathi, V., Natesan, U., & Sarkar, C. (2008). GIS-based approach for optimized siting of municipal solid waste landfill. <i>Waste Management</i> , 28(11), 2146–2160. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.032	La geología, los recursos de suministro de agua, el uso de la tierra, los sitios sensibles, la calidad del aire y la calidad del agua subterránea.	La ubicación de un nuevo vertedero utilizando un análisis de decisión de criterios múltiples (MCDA) y un análisis de superposición utilizando un sistema de información geográfica (GIS).
Xiao, S., Dong, H., Geng, Y., Fujii, M., & Pan, H.	Xiao, S., Dong, H., Geng, Y., Fujii, M., & Pan, H. (2021). Greenhouse gas emission mitigation potential from municipal solid waste treatment: A combined SD-LMDI model. <i>Waste Management</i> , 120, 725–733. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.040	Desarrollo económico, la escala de población y la intensidad de las emisiones.	Modelo SD-LMDI

Kolekar, K., Hazra, T., & Chakrabarty, S	Kolekar, K., Hazra, T., & Chakrabarty, S. (2016). A Review on Prediction of Municipal Solid Waste Generation Models. <i>Procedia Environmental Sciences</i> , 35, 238–244. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.087	Cinco criterios de clasificación característicos, a saber, el método de modelado, el área cubierta, las series temporales, las variables independientes y los flujos de residuos.	Método de modelado
Keser, S., Duzgun, S., & Aksoy, A.	Keser, S., Duzgun, S., & Aso, A. (2012). Application of spatial and non-spatial data analysis in determination of the factors that impact municipal solid waste generation rates in Turkey. <i>Waste Management</i> , 32(3), 359–371. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.017	Residuos a escala local, incluida la minimización, la recogida, el tratamiento y la eliminación de residuos.	Datos espaciales se utilizan modelos simultáneos de autorregresión espacial (SAR) y de regresión ponderada geográficamente (GWR).
Fei, F., Wen, Z., & Ri, S.	Fei, F., Wen, Z., & Ri, S. (2022). Urban biowaste integrated management based on synergy mechanism and multi-objective optimization: A case study in Suzhou, China. <i>Science of The Total Environment</i> , 823, 153691. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153691	Simulación cuantitativa dinámica de la coincidencia numérica y la conducción de influencias basada en el mecanismo de sinergia del sistema tecnológico.	Modelo integrado de gestión de biorresiduos urbanos (UBMIM).
Cárdenas, P., Piña, A., Colomer, F., Carlos, M. & Robles, F.	CÁRDENAS-MORENO, Paulina R.; PIÑA-GUZMÁN, Ana Belem; COLOMER-MENDOZA, Francisco J.; CARLOS-ALBEROLA, María del Mar; ROBLES-MARTÍNEZ, Fabián EVALUATION OF COMPLIANCE WITH REGULATORY FACTORS OF WASTE DISPOSAL SITES BY USING GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS, CASE OF STUDY: STATE OF MEXICO <i>Revista Internacional de Contaminación Ambiental</i> , vol. 35, no. 4, 2019, pp. 1025-1037 Universidad Nacional Autónoma de México.	Gestión de residuos, suelo, geomorfología, ubicación de sitios de disposición final, infraestructura, cartografía digital de la zona, biogás, lixiviados y emisiones.	Evaluación de la gestión de RSU de sitios de disposición fina estudiado con respecto a su ubicación geográfica y cumplimiento de la normativa.
Campos, R., Del Razo, O., Almaraz, I., Ramírez, E., Soriano, R., Salinas, J., Arias, L. y González, S.	Campos-Montiel, Rafael Germán; del Razo-Rodríguez, Óscar Enrique; Almaraz Buendía, Isaac; Ramírez-Bribiesca, Efrén; Soriano-Robles, Ramón; Salinas-Martínez, Jesús Armando; Arias-Margarito, Ladislao; González-Muñoz, Sergio Segundo BIOCONVERSIÓN DE DESPERDICIOS VEGETALES A BIOGÁS A PARTIR DE MICROORGANISMOS RUMINALES <i>Revista Internacional de Contaminación Ambiental</i> , vol. 34, núm. 1, 2018, febrero-abril, pp. 149-155 Universidad Nacional Autónoma de México.	Degradación in vitro de la materia seca (DIVMS), pH, cinética de producción de gas y concentración de metano.	

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2 Revisión para la elección de variables

Estas variables se ponderaron por orden de importancia, de acuerdo con la opinión de investigadores expertos en el tema, dándole a cada variable un valor. Tomando en cuenta esto, se obtuvieron 17 variables de interés.

Tabla 22. Variables seleccionadas de la búsqueda bibliográfica.

Orden de importancia	Variable	Repetición
1	Densidad de población	4
2	Desarrollo económico	2
3	Tratamiento de residuos	2
4	Suelo	1
5	Ubicación de sitios de disposición final	1
6	Infraestructura	1
7	Cartografía digital de la zona MDE	1
8	Emisiones de biogás	1
9	Lixiviados	1
10	Calidad del aire	1
11	Características de las carreteras (y su influencia en la ubicación de contenedores de basura)	1
12	Capacidad de generación de residuos	1
13	Política de gestión de desechos	1
14	Geología	1
15	Intensidad de emisiones	1
16	Residuos a escala local	1
17	Recogida de residuos	1

Elaboración propia, 2024.

5.2.3 Selección de variables

Después se seleccionó a las que cumplieran con el objetivo de nuestra investigación, así como las características para poder cartografiar, basándose en nuestra zona de estudio. Las cuales se identificaron que solo 9 variables cumplían con nuestros objetivos y con las características buscadas, las cuales son las siguientes:

Tabla 23. Variables elegidas seleccionadas.

No.	Variables
1	Permeabilidad
2	Modelo Digital de Elevación
3	Uso de suelo y vegetación
4	Geología
5	Clima
6	Carreteras (atlas cibernético)
7	Densidad de población (atlas cibernético)
8	Rellenos sanitarios
9	Pozos de agua (no hay pozos en un radio de 500 m. del R.S.)

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Con base en los datos de la tabla anterior, se necesitó una descripción detallada de cada variable para identificar claramente lo que buscamos. Este proceso implicó analizar minuciosamente cada una de las variables incluidas en la tabla, para comprender su naturaleza y relevancia en el contexto de nuestro estudio o análisis. Al describir cada variable, estábamos buscando entender su significado, su relación con otras variables, su importancia en el conjunto de datos y cómo podría influir en los resultados finales de nuestra investigación. Esta fase de descripción fue fundamental para establecer una base sólida y precisa para realizar nuestro análisis posterior, permitiéndonos interpretar adecuadamente los resultados y sacar conclusiones significativas.

Cuando asignamos ponderaciones a las variables según nuestro criterio, buscamos bases de datos e información relevante en portales gubernamentales, como el INEGI, SEMARNAT,

entre otros. El propósito de esta búsqueda era llevar a cabo una espacialización detallada de un entorno espacial-temporal, lo que nos permitiría comprender la distribución geográfica y la evolución temporal de las variables seleccionadas.

Construcción de base de datos cartográfica de los factores de localización

Esta etapa resultó crucial para asegurarnos de que contáramos con datos confiables y actualizados que respaldaran nuestro análisis. Además, nos permitió contextualizar adecuadamente las variables dentro de su entorno geográfico y temporal, lo cual es fundamental para una interpretación precisa y significativa de los resultados obtenidos.

Tomando en cuenta, se debe meter todas nuestras variables en formato shapefile, esto se realizó al momento de elegir nuestras variables, saber que contamos con estas en el formato requerido.

Identificación de factores

Al tener claro nuestras variables, nos basamos en las especificaciones de la Norma Oficial Mexicana NOM-083- SEMARNAT-2003, que contiene los factores específicos a cumplir para la selección del sitio designado para los rellenos sanitarios, sin embargo, primero se deben tomar en cuenta los factores de restricciones que marca la misma norma, como se muestra a continuación en la tabla 24.

Tabla 24. Restricciones y especificaciones de los RS.

TIPO DE RESTRICCIÓN	ESPECIFICACIONES
Áreas Naturales Protegidas	No debe ubicarse en áreas naturales protegidas, excepto en los sitios contemplados en el Plan de Manejo de estas.
Fallas y Fracturas	No debe localizarse en zonas con fallas activas, fracturas o grietas.
Pozos	Debe haber una distancia mínima de 50 metros entre el límite del sitio de disposición final y cualquier pozo de extracción de agua destinado a uso doméstico, industrial, riego o ganadería, ya sea en operación o abandonado.
Asentamientos Humanos	En localidades con más de 2,500 habitantes, el borde del sitio de disposición final debe estar al menos a 500 metros del límite de la traza urbana actual o proyectada en el plan de desarrollo urbano, y se debe restringir el cambio de uso de suelo dentro de esa distancia tras la instalación del sitio.
Uso de suelo	Se deberá realizar un estudio para obtener los elementos de diseño necesarios y garantizar la protección del suelo, subsuelo, agua superficial y subterránea, así como asegurar la estabilidad de las obras civiles del sitio de disposición final a construir.
Pistas de un aeródromo o aeropuerto	La distancia mínima será de 13 kilómetros, y la elección de esta distancia deberá estar respaldada por un estudio de riesgo aviario.

Fuente: elaboración propia, 2024.

En esta parte, ya se definen los elementos de entrada de los datos representados en cartografía temática en formato ráster con sus entidades, como se detalla en la tabla 25.

Tabla 25. Descripción de los datos espaciales que integran el SIG para el estudio.

Nombre de la capa criterio	Tipo de entidad	Elementos que contiene	Campos	Descripción del campo
Edafología	Ráster	Tipo de suelo	Ao+1/2 Bc+Th/2 Hg+Gm/2 I+Lc/3 Lc/3 Oe+Gh/2 Re+Hh/1 Th+Bc/2 Vp/3 We+Hh/2	Acrisol Cambisol Feozem Leptosol Luvisol Histosol Regosol Andosol Vertisol Planosol
Uso de suelo	Ráster	Tipo de uso de suelo	ANP Estatal POEL Local Aprovechamiento sustentable	
Geología	Ráster	Tipo de roca	Sedimentaria Extrusiva Intrusiva	Lacustre, aluvial Andesita-basalto, lahar Granito
Clima	Ráster	Tipo de clima	C(w2)(w)b(i)g C(E)(w2)(w)b(i)g E(T)H	Templado Semifrío Frío
Pendientes	Ráster	Pendiente en grados	Rango	0-5 grados 5-10 grados 10-20 grados 20-40 grados

Fuente: Elaboración propia, 2024.

5.3 Ponderación de criterios

Ya con la cartografía y requerimientos de acuerdo con la NOM, se establecieron las jerarquías y pesos a los factores para cada uso, a través de la asignación de un valor relativo de ponderación, con el propósito de obtener la importancia de distintos elementos para seleccionar una correcta actuación, esto de acuerdo con el método de jerarquías analíticas propuesto por Saaty (1977, 1980, en Gómez y Barredo, 2005).

Se determinó el peso de los factores tomado y adaptado de la matriz de pesos ponderados de variables por Gómez y Barredo (2005), para el método Fuzzy, de análisis multicriterio, mostrado en la tabla 26, para ubicar las condiciones óptimas de un relleno sanitario para que sea apto para generar biogás.

Tabla 26. Matriz de ponderación de variables de terreno para ubicar un SDF (sitios de disposición final).

No	Variable	Ponderación		Ponderación		Ponderación		Ponderación		Como se va a interpretar
1	Uso de suelo y vegetación	1	Asentamientos humanos, selvas, vegetación haófila y bosques	2	Palmar, agricultura de riego o humedad	3	Mezquital, matorrales	4	Áreas con riego suspendido	Los sitios van de 4 a 1 donde 4 es muy óptimo y 1 el menos óptimo
2	Permeabilidad	1	Baja	2	Media	3	Alta	4	Muy alta	La permeabilidad se medirá que entre menos es mejor, por lo que 1 será muy óptimo y 4 menos óptimo.
3	Geología	1	Sedimentaria	2	Extrusiva	3	Intrusiva	4	No aplica	Aquí cambia, donde 1 es menos óptimo y el 4 más óptimo debido a lo que

										se especifica en la normatividad.
4	Clima	1	Semicálido	2	Templado	3	Semifrío	4	Frío	El clima óptimo para que los residuos se aprovechen, es semicálido, por lo que 1 será muy óptimo y 4 menos óptimo.
5	Pendientes	1	Muy estable	2	Estable	3	Poco estable	4	Inestable	Los sitios van de 1 a 4 donde 1 es muy óptimo y 4 el menos óptimo.
6	Densidad de población	1	Muy alto	2	Alto	3	Medio	4	Bajo	Al tener mayor densidad de población, encontraremos una zona más óptima para generar residuos y puedan generarse biogás, por lo que 1 es muy óptimo y 4 menos óptimo.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

5.4 Procedimiento en los SIG

5.4.1 Cartografía de factores seleccionados

Para visualizar la distribución espacial de los sitios de disposición final (SDF) en el Valle de Toluca como fuentes de biogás y lixiviados, se almacenan los datos en una base georreferenciada que contiene los atributos de los SDF. Utilizando el software ArcGIS, se crea una cartografía que permite identificar y diferenciar las áreas con mayor concentración

de biogás y lixiviados, visualizando su distribución geográfica y su potencial de interés para diversas dependencias que buscan aprovechar estos recursos.

Después de que tuvimos las variables definidas y listas para ser aplicables en formato shapefile, en este caso se trabajó con el software ArcGIS, al tener nuestra zona de estudio visualizada como se observa en la figura 11.

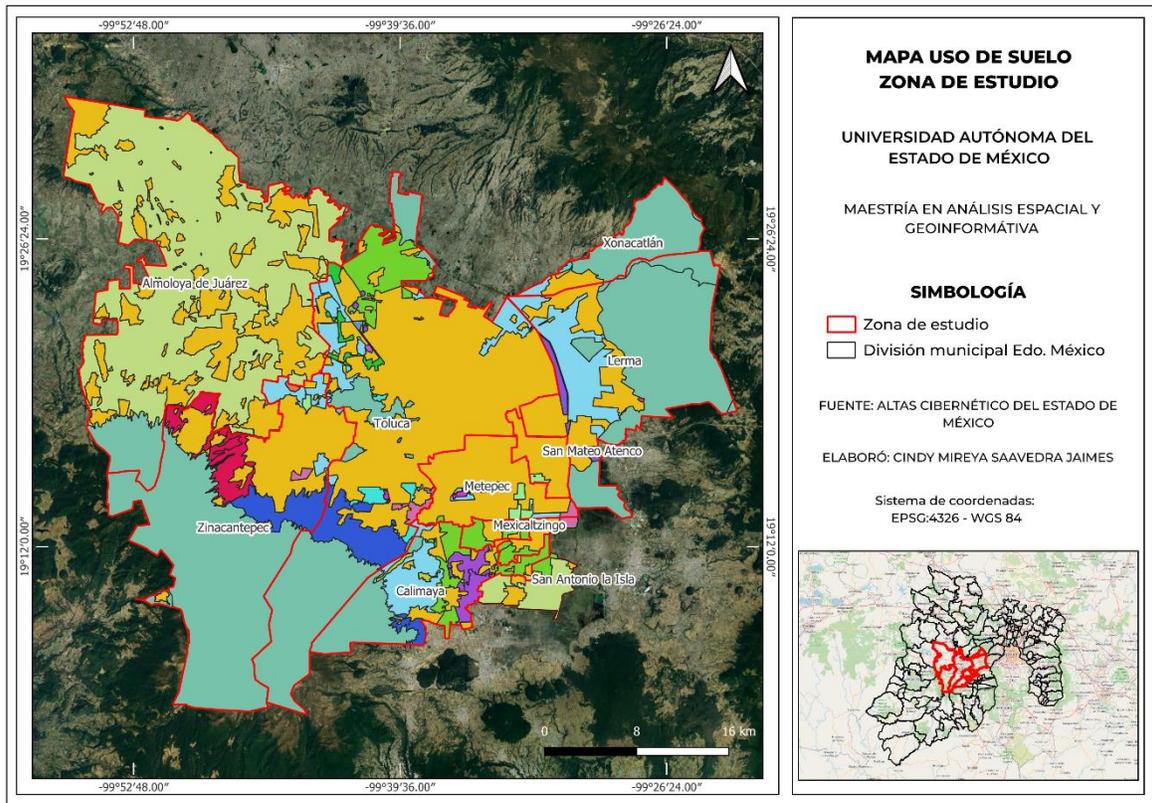
- **Uso de suelo**

La superficie de un terreno se determina según su capacidad agrológica y su potencial de desarrollo. Según su ubicación, puede clasificarse como urbano o rural, siendo fundamental para el crecimiento de la ciudad y el bienestar de sus habitantes (PAOT, 2024).

Nuestro uso de suelo predominante en la zona fue la agricultura y los usos de suelo definidos conforme al Plan Municipal de Desarrollo Urbano de cada municipio involucrado. Este último, es parte generador de mayores residuos urbanos debido a que son las zonas donde mayor se concentra la población.

Esta variable es primordial para nuestro software, debido a que es parte de identificar las zonas óptimas a nuestro objetivo de investigación.

Figura 12. Mapa de uso de suelo.



- Acuacultura,
- Acuacultura, Agricultura,
- Acuacultura, Agricultura, Asentamientos humanos rurales, Asentamientos humanos urbanos, Ganadería extensiva, Ganadería intensiva, Industria ligera, Industria pesada,
- Acuacultura, Agricultura, Asentamientos humanos rurales, Asentamientos humanos urbanos, Ganadería extensiva, Industria ligera,
- Acuacultura, Agricultura, Asentamientos humanos rurales, Forestal maderable, Forestal no maderable, Ganadería extensiva, Ganadería intensiva, Industria ligera,
- Acuacultura, Agricultura, Forestal maderable, Forestal no maderable, Ganadería extensiva,
- Acuacultura, Agricultura, Forestal no maderable,
- Acuacultura, Agricultura, Forestal no maderable, Ganadería extensiva,
- Acuacultura, Agricultura, Ganadería extensiva,
- Acuacultura, Agricultura, Ganadería extensiva, Industria ligera,
- Acuacultura, Asentamientos humanos rurales, Asentamientos humanos urbanos, Ganadería extensiva, Industria ligera,
- Acuacultura, Asentamientos humanos rurales, Asentamientos humanos urbanos, Industria ligera,
- Agricultura, Forestal maderable, Forestal no maderable,
- Agricultura, Forestal maderable, Forestal no maderable, Ganadería extensiva,
- Agricultura, Ganadería extensiva, Industria ligera, Industria pesada,
- Agricultura, Industria ligera, Industria pesada,
- Forestal no maderable,
- Industria ligera, Industria pesada,
- Usos definidos conforme al Plan Municipal de Desarrollo Urbano
- Usos permitidos conforme al Decreto y Programa de Manejo.

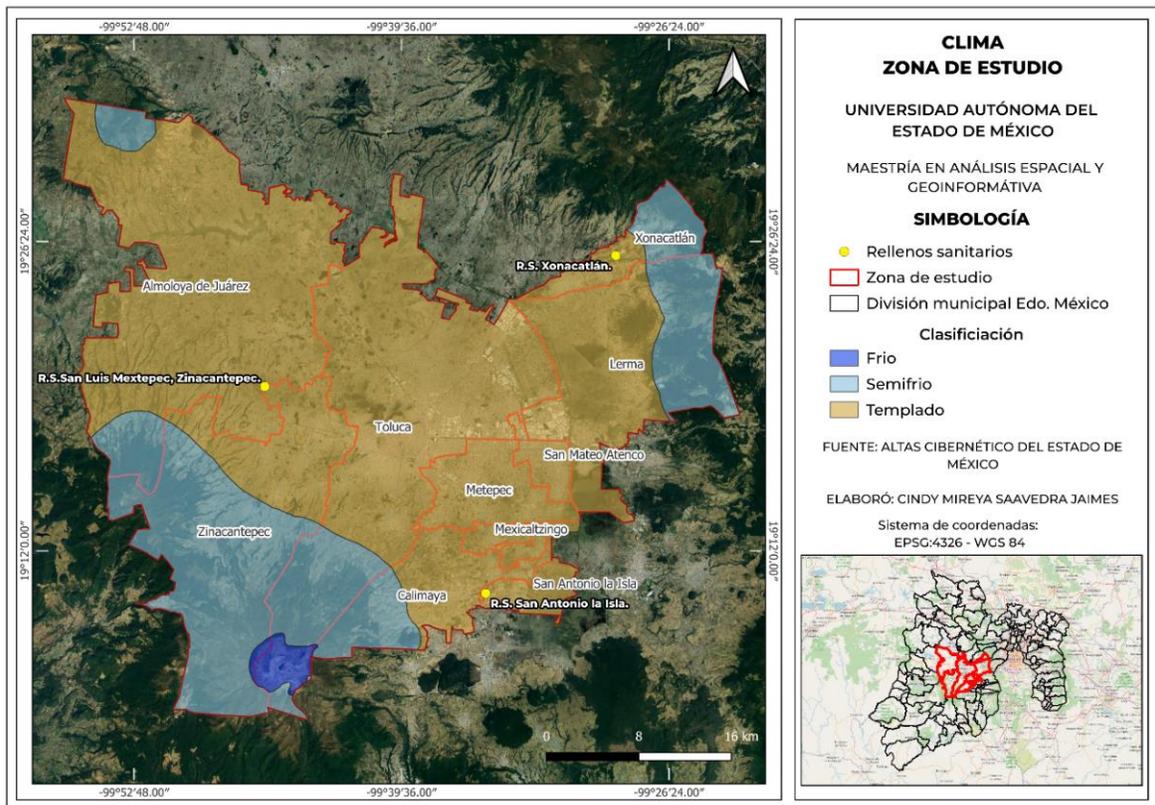
Fuente: Visor del atlas cibernético del Estado de México. Elaboración propia, 2024.

- **Clima**

El clima es el conjunto de condiciones meteorológicas que predominan en un lugar durante meses y años. Estas condiciones se calculan como promedios mensuales y anuales, basados en un período de observación de 30 años (Andrades, M. y Muñoz, C., 2012).

En el Valle de Toluca el clima predominante es templado subhúmedo con lluvias en verano y su temperatura media anual oscila entre los 28°C -13°C. La precipitación media anual fluctúa entre 1600-1000 mm y la región más seca que corresponde al noreste de la entidad donde la precipitación va de 600-700 mm. Por otro lado, las heladas y granizadas presentan una frecuencia que va desde 10 hasta 160 días estudio (Atlas de riesgos del Estado de México, 2012).

Figura 13. Mapa de clima de la zona de estudio.

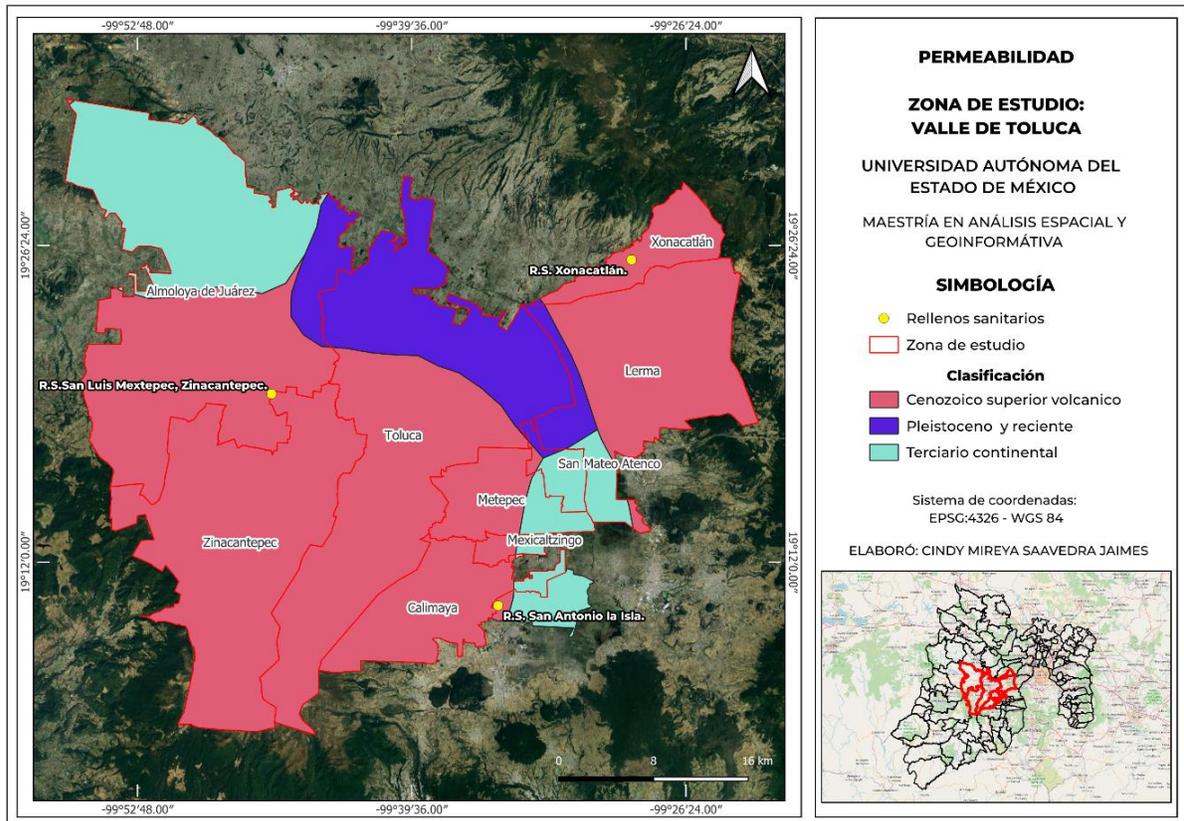


Fuente: Visor del atlas cibernético del Estado de México. Elaboración propia, 2024.

- **Permeabilidad**

La permeabilidad es la capacidad de un material para permitir el paso de un fluido sin modificar su estructura interna. Un material se considera permeable si deja pasar una cantidad significativa de fluido en un tiempo determinado (COAT, Cáceres, 2019).

Figura 14. Mapa de permeabilidad de la zona de estudio.



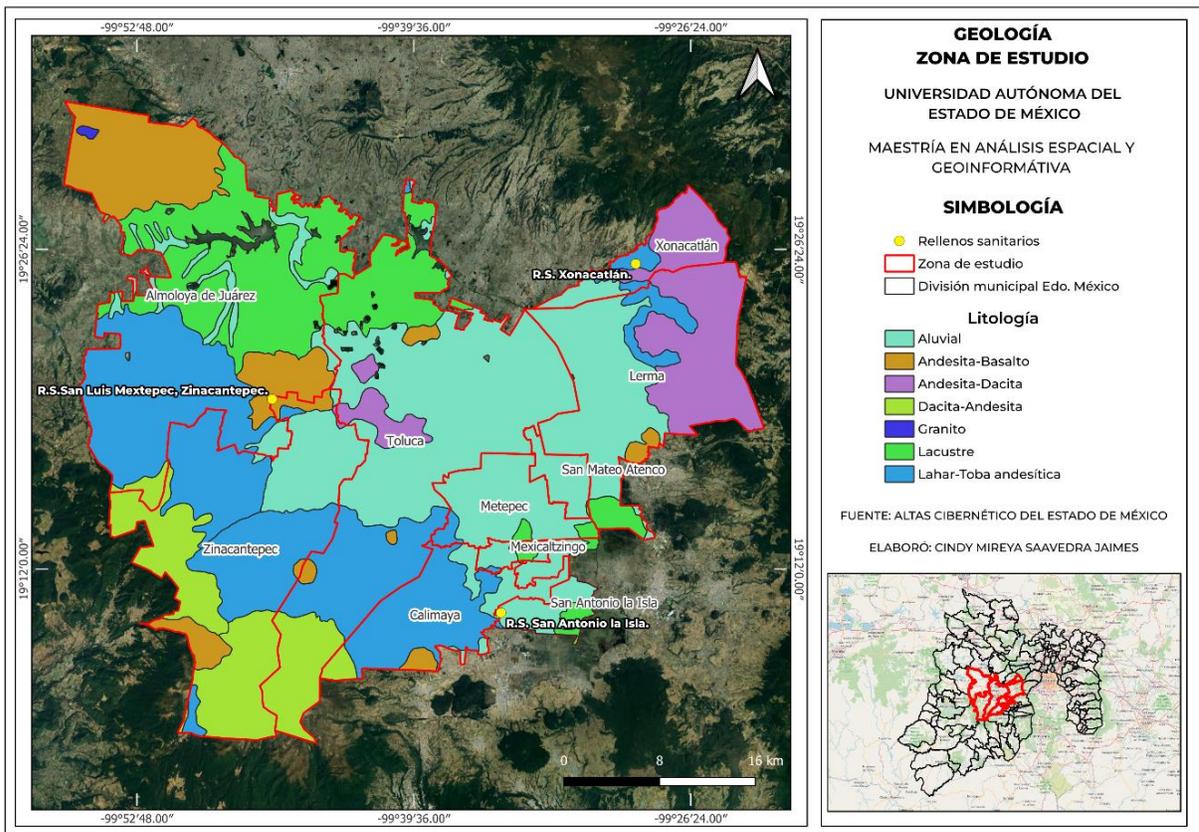
Fuente: Visor del atlas cibernético del Estado de México. Elaboración propia, 2024.

- **Geología**

Se refiere a la información que describe, a nivel nacional, el origen, clasificación y antigüedad de las rocas, así como la ubicación de fallas, fracturas, volcanes, minas y zonas hidrotermales, entre otros aspectos (INEGI).

Nuestros rellenos sanitarios se encuentran en litología lahar-toba andesítica, andesita-basalto y aluviales, de los cuales, el tipo aluvial, ya que se recomienda ubicar un relleno sanitario en suelos arcillosos por su baja permeabilidad y evitar suelos arenosos.

Figura 15. Mapa de geología de la zona de estudio.



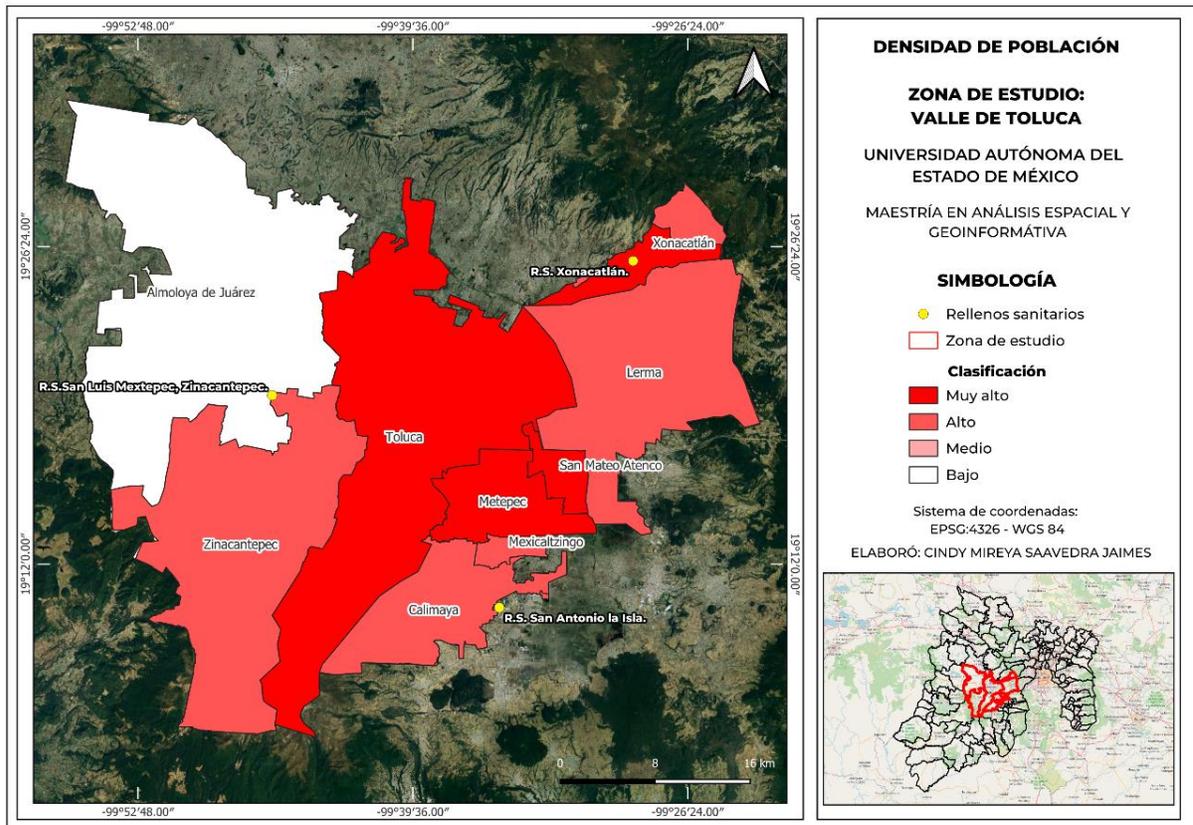
Fuente: Visor del atlas cibernético del Estado de México. Elaboración propia, 2024.

- **Densidad de población**

La densidad de población es el promedio de personas que habitan en un área específica. Esta característica demográfica puede tener importantes repercusiones sociales, económicas y ambientales (INEGI, 2024).

En nuestra zona de estudio, tenemos a los municipios de Toluca, Metepec, Xonacatlán y San Mateo Atenco con una densidad de población muy alta, lo cual nos indica que son zonas que pueden generar mayores residuos sólidos, por lo que se debe de dar mayor prioridad a la gestión de estos. Los demás municipios de la ZE se encontraron en una clasificación alta, a excepción del municipio de Almoloya de Juárez, encontrándose en una densidad de población baja, siendo de los municipios más alejados de la zona céntrica del Valle de Toluca.

Figura 16. Mapa de la densidad de población de la zona de estudio.



Fuente: Visor del atlas cibernético del Estado de México. Elaboración propia, 2024.

- **Modelo Digital de Elevación**

Es una representación tanto visual como matemática de las alturas en relación con el nivel medio del mar, que permite describir las características del relieve y los elementos u objetos presentes en él (INEGI, 2012).

5.4.2 Cartografía de los factores de restricción

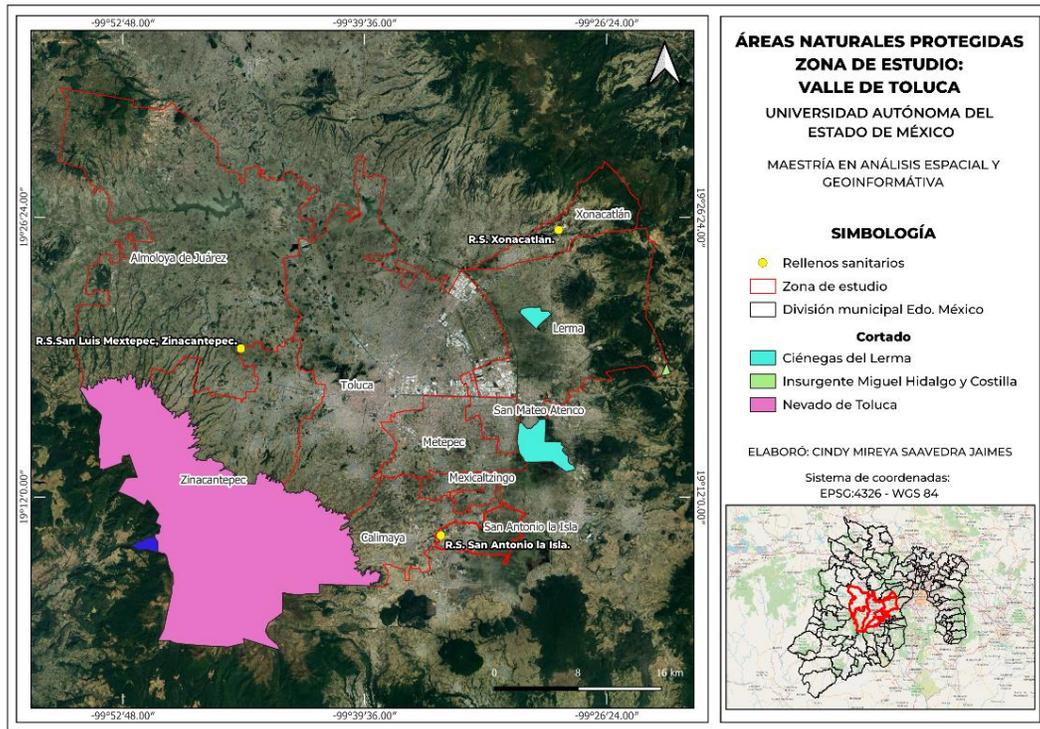
A continuación, se muestra la cartografía de los factores de restricción antes mencionados, esto para identificar el cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003 respecto a la ubicación de los sitios de disposición final, así como la cartografía de las demás variables seleccionadas.

- **Áreas Naturales Protegidas**

Un Área Natural Protegida (ANP) es una zona del territorio nacional, donde la nación ejerce su soberanía y jurisdicción además de que los ambientes originales no han sido modificados significativamente o que requieren ser preservadas y restauradas. Garantizando la protección de los recursos naturales culturales y los servicios ecosistémicos (CONANP, 2019).

En el Estado de México, el sistema de áreas naturales protegidas (ANP) está compuesto por 84 unidades con diferentes niveles de jerarquía, las cuales abarcan un total de 990,243.61 hectáreas, lo que equivale al 44 % del territorio estatal. En la microcuenca Villa Victoria, se encuentra el Área Natural Protegida Estatal de “Santuario del agua y forestal Mariposa Monarca” además del ANP federal Bosencheve y la zona protegida federal de los ríos Valle de Bravo, Malacatepec y Tilostoc como se ve en la Figura 17 (SMA, 2018).

Figura 17. Mapa de ANP dentro de la zona de estudio.

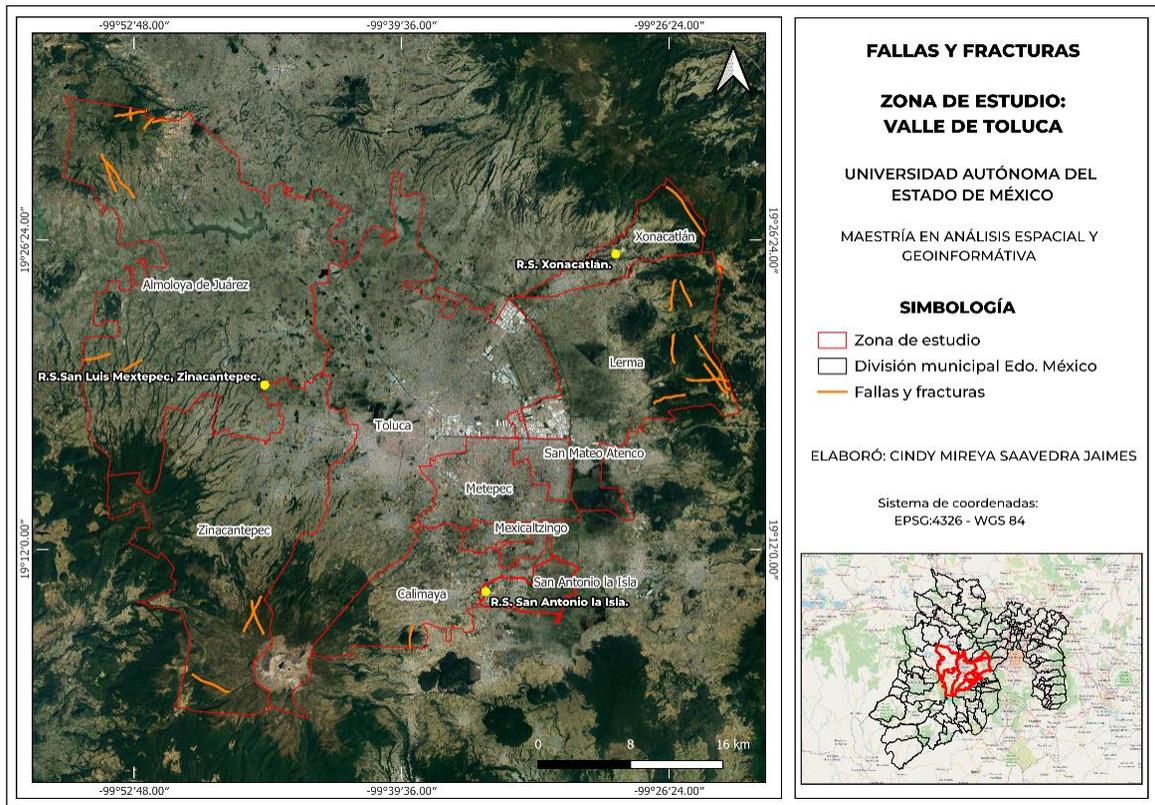


Fuente: Visor del atlas cibernético del Estado de México. Elaboración propia, 2024.

- **Fallas y Fracturas**

La restricción que marca la NOM., es que un relleno sanitario no debe de ubicarse en zonas de fallas activas, fracturas o en dado caso grietas.

Figura 18. Mapa de fallas y fracturas de la zona de estudio.

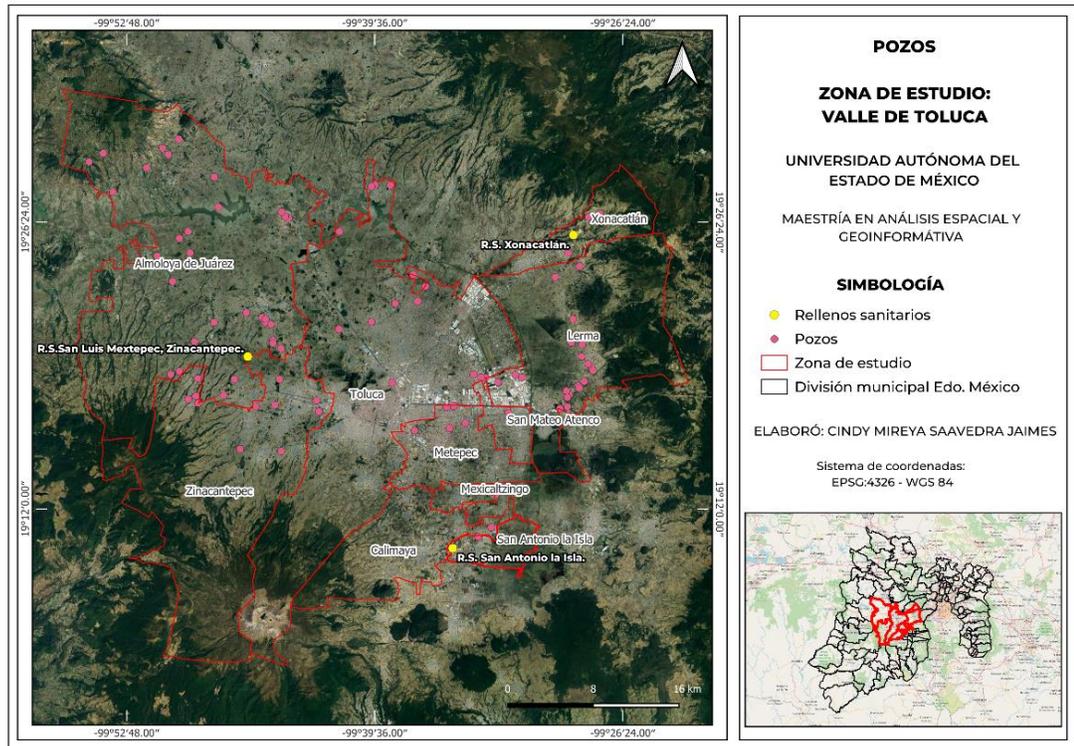


Fuente: Visor del atlas cibernético del Estado de México. Elaboración propia, 2024

- **Pozos**

Debe haber una distancia de 100 metros entre el límite del sitio de disposición final y cualquier pozo de extracción de agua destinado a uso doméstico, industrial, riego o ganadería, ya sea en funcionamiento o en desuso.

Figura 19. Mapa de pozos de la zona de estudio.

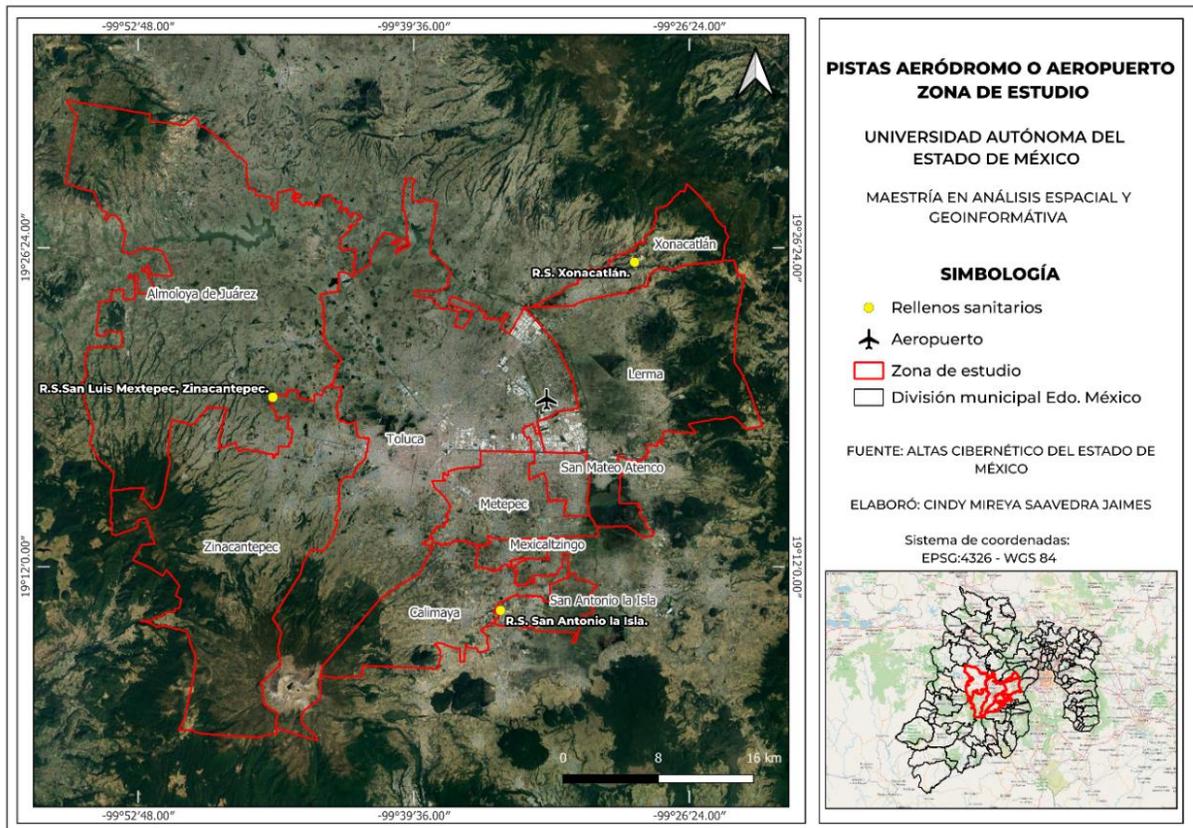


Fuente: Visor del atlas cibernético del Estado de México. Elaboración propia, 2024.

- **Pistas de un aeródromo o aeropuerto**

Un relleno sanitario debe de permanecer no menor a 13 km., la distancia elegida se determinará mediante un estudio de riesgo aviario para determinar el impacto que este tendría cerca de la zona.

Figura 20. Mapa de pistas aeródromos o aeropuertos en la zona de estudios.

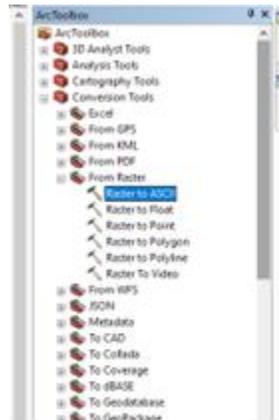


Fuente: Visor del atlas cibernético del Estado de México. Elaboración propia, 2024.

5.5 Evaluación Multicriterio en el SIG

Ya teniendo nuestras capas en formato raster, las pasamos a formato ASCII para poder correrlas en el software Terrset como se muestra a continuación, en la figura 21.

Figura 21. Proceso raster to ASCII.



Y después, utilizamos nuestro software TerrSet, donde ya metemos nuestras capas ASCII, una por una, para poder realizar nuestro algebra de mapas.

Figura 22. Uso de software TerrSet

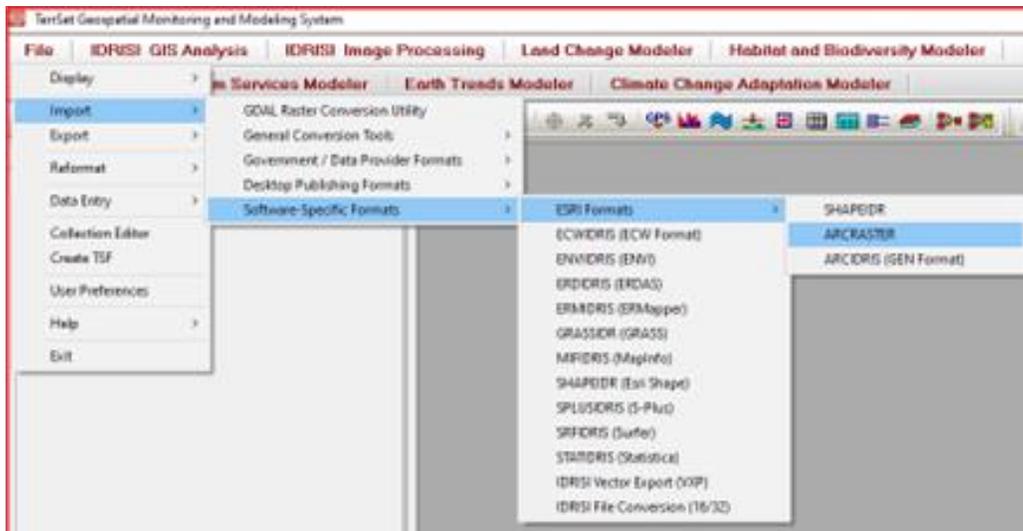
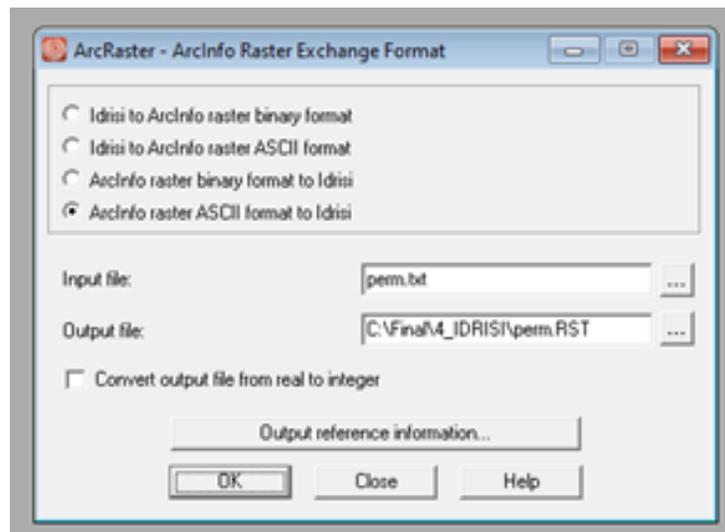


Figura 23. Proceso para pasar capa ASCII al software.



5.5.1 Algebra de los mapas

El proceso de asignación de pesos se realizó en cada capa de nuestras variables, considerando los niveles jerárquicos de acuerdo a nuestro criterio, ponderándolos por pesos como se muestra a continuación en la tabla 27.

Tabla 27. Módulo para la definición de pesos

	Clima_fuzzy	ca_fuzzy2	dp_fuzzy	edaf_fuzzy7	geol_fuzzy	perma_fuzzy	uds_fuzzy
Clima_fuzzy	0.00	----	----	----	----	----	----
ca_fuzzy2	5.31	0.00	----	----	----	----	----
dp_fuzzy	2.30	2.00	0.00	----	----	----	----
edaf_fuzzy7	-1.43	-2.35	2.35	0.00	----	----	----
geol_fuzzy	-5.39	1.72	4.46	0.03	0.00	----	----
perma_fuzzy	-1.41	-2.31	-1.60	0.01	-2.01	0.00	----
uds_fuzzy	-1.44	4.00	1.69	0.54	-3.55	-5.50	0.00

Fuente: elaboración propia

Como resultado, el software nos da como resultado los niveles jerárquicos de acuerdo con nuestros pesos previamente establecidos.

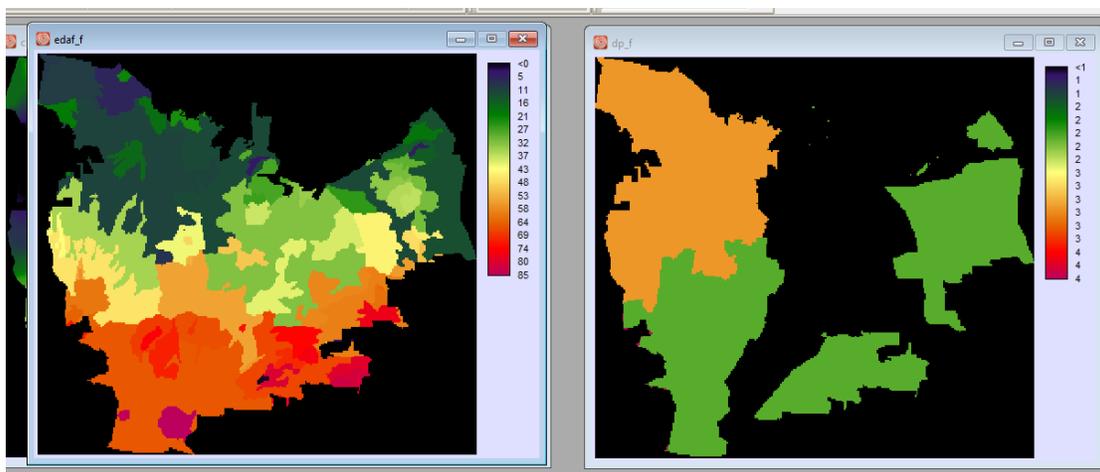
Tabla 28. Niveles jerárquicos y valores de ponderación de los factores de condición.

FACTOR	NIVELES JERÁRQUICOS	PESOS
Densidad de población	1	0.3800
Geología	2	0.0838
Permeabilidad	3	0.0826
Edafología	4	0.081
Clima	5	0.0520
Curvas de nivel	6	0.0308
Uso de suelo	7	0.02832

Fuente: elaboración propia.

Esto generó los mapas ponderados con sus valores de pesos asignados como valores reales a cada píxel por cada categoría de cada criterio, como se muestra en las figuras 24 y 25.

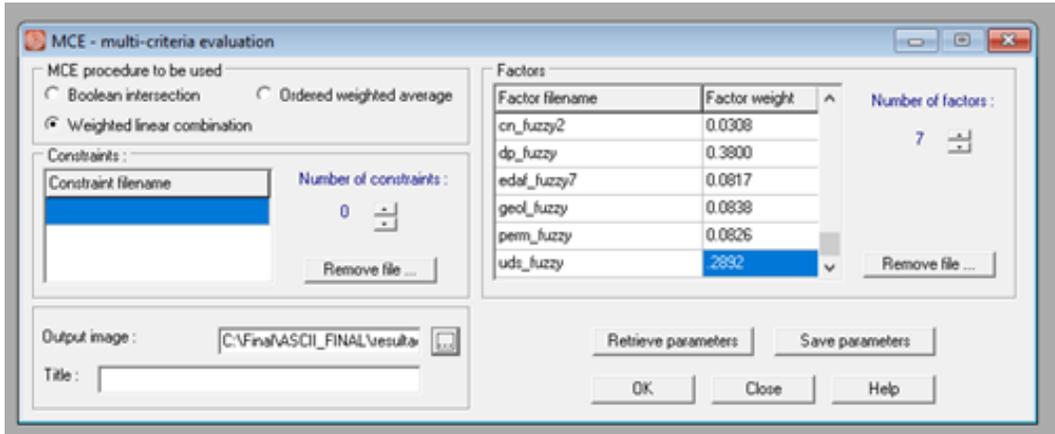
Figuras 24 y 25. Mapas generados por variable al asignar y jerarquizarlos por pesos.



Fuente: elaboración propia.

Al tener calculados los pesos para cada variable, se reclasificaron los criterios sustituyendo el valor unitario por el peso obtenido anteriormente, con nuestra herramienta de MCE (Multi-criterio evaluation), en el cual se combinan los factores de condición y restricción, a partir de un método estadístico que permite valorar las condiciones requeridas.

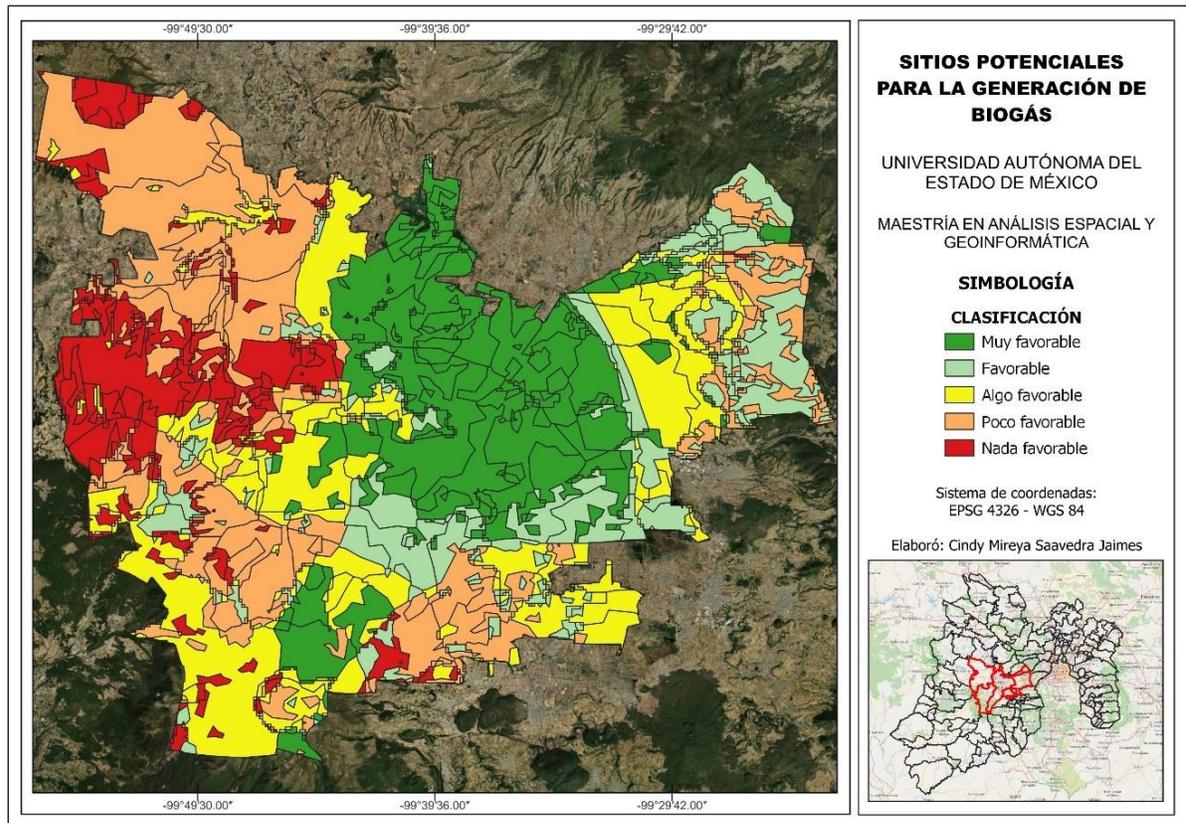
Figura 26. Módulo MCE.



Fuente: elaboración propia.

5.6 Resultado

Figura 27. Mapa final



Fuente: elaboración propia, 2024.

5.6.1 Discusión

Discusión de Resultados del Mapa: Identificación de Sitios Potenciales para la Generación de Biogás en el Valle de Toluca.

El análisis geoespacial realizado en el Valle de Toluca ha permitido identificar sitios potenciales para la generación de biogás mediante residuos sólidos urbanos (RSU), integrando múltiples variables físicas mediante herramientas geoinformáticas. La selección del sitio más óptimo se realizó a través de un enfoque de relación multicriterio que ponderó siete variables clave: **edafología, uso de suelo y vegetación, densidad de población, modelo digital de elevación, geología, permeabilidad y clima.**

El uso de esta metodología permitió asignar pesos diferenciados a cada variable en función de su influencia sobre la factibilidad para la generación de biogás. Esta asignación de pesos fue crucial para priorizar los sitios que presentan las mejores condiciones físicas para recibir y gestionar RSU de manera eficiente, optimizando así la generación de biogás.

5.6.2 Resultado Principal: El Relleno Sanitario de Xonacatlán

El mapa final generado mediante álgebra de mapas y análisis multicriterio indicó que el sitio más óptimo para la generación de biogás en el Valle de Toluca es el **relleno sanitario del municipio de Xonacatlán**. Este sitio cumple con cinco de las siete variables analizadas, lo que lo posiciona como el lugar más adecuado para el desarrollo de un proyecto de generación de biogás basado en RSU. Las variables que mostraron mayor relevancia en la elección de este sitio incluyen:

- **Edafología:** Los suelos de Xonacatlán son favorables para el manejo y tratamiento de RSU, permitiendo una mayor estabilidad para la instalación de infraestructura de biogás.

- **Uso de suelo y vegetación:** La tipología del uso de suelo en esta área, principalmente industrial y de manejo de residuos, favorece la implementación de tecnologías para la gestión de RSU sin comprometer áreas agrícolas o de conservación.
- **Densidad de población:** Al ser una zona con alta concentración de población y cercana a otros municipios, Xonacatlán recibe una gran cantidad de residuos sólidos, lo que asegura un suministro constante de materia prima para la generación de biogás.
- **Modelo Digital de Elevación:** La topografía del área es adecuada para la construcción de infraestructura sin riesgos significativos de inundaciones o problemas topográficos que dificulten la operación.
- **Permeabilidad:** El suelo presenta una permeabilidad moderada, que es un factor crucial para evitar la filtración de contaminantes en capas freáticas.

Ventajas del Sitio

Una de las principales ventajas que presenta el relleno sanitario de Xonacatlán es su capacidad de recepción de residuos sólidos no solo de su propio municipio, sino también de otros municipios aledaños del área metropolitana del Valle de Toluca. Esto lo convierte en un punto estratégico para centralizar los residuos y maximizar la eficiencia en la generación de biogás. Además, el hecho de que este sitio cumpla con cinco de las siete variables analizadas lo hace uno de los más viables para implementar un sistema de biogás que sea económicamente rentable y ambientalmente sostenible.

Variables Críticas y Posibles Limitaciones

Aunque Xonacatlán se identifica como el sitio más óptimo, hay dos variables de las siete analizadas que no cumplen con las condiciones ideales: geología y clima. En cuanto a la geología, podría haber algunas limitaciones en la estabilidad del terreno o en la profundidad de las capas de roca que podrían complicar el proceso de instalación de infraestructura. Respecto al clima, factores como la precipitación y temperatura podrían influir en la

eficiencia del proceso de generación de biogás, especialmente si se comparan con regiones más cálidas o con menor humedad. No obstante, estas limitaciones no anulan las ventajas generales del sitio, que siguen siendo significativas en comparación con otras áreas.

5.7 Conclusión

El relleno sanitario de Xonacatlán ha demostrado, a través de este análisis geoespacial y multicriterio, ser el sitio más viable para la generación de biogás en el Valle de Toluca. Al cumplir con la mayoría de las variables físicas clave, y considerando su rol como receptor de RSU de otros municipios, Xonacatlán ofrece una solución integral para la producción de biogás, que contribuye tanto a la gestión eficiente de residuos sólidos urbanos como a la generación de energía renovable en la región. Sin embargo, será necesario continuar evaluando y monitoreando las variables geológicas y climáticas para optimizar el desarrollo del proyecto y garantizar su sostenibilidad a largo plazo.

7. Bibliografía

- Agencia Internacional de Energía. Crisis Energética Mundial. Fecha de consulta: enero 2022. <https://www.iea.org/topics/global-energy-crisis?language=es>
- Aguilar, J. (2017). Diseño y automatización de un suministro de biogás residencial en el municipio de Chalco [Tesis licenciatura]. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P.A., & Ojeda-Benítez, S. (2011). Modelo mexicano para la estimación de la generación de biogás. Ingeniería, Revista Académica de a FI-UADY, 15(1), 37-45.
- Aguirre, Luis (2013). Tecnología limpia, la nueva clave para la vida cotidiana. Forbes. <https://www.forbes.com.mx/tecnologia-limpia-la-nueva-clave-para-la-vida-cotidiana/>
- Álvarez, R., Riera, V. y Villca, S. (2004). Producción anaeróbica de biogás aprovechamiento de los residuos del proceso anaeróbico. Universidad Mayor de San Andrés. Instituto de Investigaciones de Procesos Químicos – Proyecto 09 CNIIDEPROG. La Paz, Bolivia. 100 p.
- Andrades, M. Múñez, C. (2012). Fundamentos de climatología. Universidad de la Rioja. Material didáctico agricultura y alimentación. ISBN: 978-84-695-2799-3.
- Arce, J. (2011). Diseño de un biodigestor para generar biogás y abono a partir de desechos orgánicos de animales aplicable en las zonas agrarias del litoral [Tesis de pregrado]. Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1593/15/UPSGT000209.pdf>
- Arvizu, J. y Huacuz, J. (2003). Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad. Boletín IIE. Aplicaciones tecnológicas, pp 118-123.
- Asociación de Empresas de Energías Renovables [APPA]. (2018). Renovables en el mundo y en Europa. [https://www.appa.es/energias-renovables/renovables-en-el-mundo-y-europa/#:~:text=En%202018%2C%20el%20consumo%20global,9%25%20\(Gr%C3%A1fico%201\).&text=Las%20energ%C3%ADas%20renovables%20representaron%20el,8%25%20respecto%20al%20a%C3%B1o%20anterior.](https://www.appa.es/energias-renovables/renovables-en-el-mundo-y-europa/#:~:text=En%202018%2C%20el%20consumo%20global,9%25%20(Gr%C3%A1fico%201).&text=Las%20energ%C3%ADas%20renovables%20representaron%20el,8%25%20respecto%20al%20a%C3%B1o%20anterior.)
- Barba, R. S. y S. Pomerol (1997), Decisiones MultiCriterio. Fundamentos teóricos y utilización práctica, Colección de Economía, Universidad de Alcalá.
- Bogner, J. & Scot, P. (1995). Landfill methane emissions: guidance for field measurements. Final Report to IEA Expert Working Group on Landfill Gas, Technical University of Lulea.
- Buzai, G. (2004a). Geografía global. Primera edición. Lugar Editorial. Buenos Aires.
- Buzai, G. (2004b). Geografía y tecnologías digitales del siglo XXI: una aproximación a las nuevas visiones del mundo y sus impactos científicos-tecnológicos. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales, 8(170), 58. <http://www.ub.es/> HYPERLINK "http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-170-58.htm" geocrit/sn/sn-170-58.htm.
- Buzai, G. (2003). Mapas sociales urbanos. Primera edición. Lugar Editorial. Buenos Aires.
- Buzai G. & Duran D. (1997). Enseñar e investigar con sistemas de información geográfica (SIG). Primera edición. Editorial Troquel. Buenos Aires.
- Campos, M., Monroy, J., Campos, J. y Cadena, E. (2012). Geografía y análisis espacial hacia la ciudad del conocimiento. Evaluación MultiCriterio y SIG IDRISI en la zonificación del uso de suelo urbano del CRCYTAB en Almoloya de Juárez, México en Campos, M., Monroy, J. y Pineda, N., Estudios Geográficos con Técnicas de Evaluación Multicriterio (pp. 19-65). CLAVE Editorial.
- Candia, D., Cid, D. & Sepúlveda, G. (2021). Política de Gestión y Reciclaje de Residuos Domiciliarios en la comuna de Villarricca. Revista Territorios y Regionalismos, 4, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.29393/rtr4-14PGDC40014>
- Cárdenas-Moreno P. (2014). Estimación de biogás y lixiviados generados en sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos del Estado de México. Tesis de Maestría. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, Instituto Politécnico Nacional. Mexico City, Mexico.
- Castillo, P. (2011). Política económica: crecimiento económico, desarrollo económico, desarrollo sostenible. Revista Internacional del Mundo Económico y del Derecho, 3, 1-12. <http://www.revistainternacionaldelmundoeconomicoydelderecho.net/wp-content/uploads/RIMED-Pol%C3%ADtica-econ%C3%B3mica.pdf>
- Castro, I. y Rodríguez, M. (2022). Potencial de producción de biogás para su aprovechamiento energético en el contexto rural de Manabí. Ingeniería Energética, 43(3).

- COAAT, Cáceres (2019). Permeabilidad. Recuperado en: <https://www.coatcaceres.es/FTP/NORMATIVA/02%20NACIONAL/02%2002%20B%C3%81SICA%20CONSTRUCTIVA/02%2002%2002%20CTE/02%2002%2002%2001%20DB-SE%20Seguridad%20Estructural/2007%20PERMEABILIDAD%20DE%20SUELOS.pdf>
- Colmenares-Mayanga, W. & Santos-Bonilla, K. (2007). Generación y manejo de gases en sitios de disposición final. Obtenido de http://www.ingenieriaquimica.org/articulos/relleno_sanitario
- Consejo Estatal de Población del Estado de México COESPO (2021). Registros de densidad de población.
- Colomer-Mendoza, F. y Robles-Martínez, F. (2011). Generación de biogás en los vertederos controlados. *Agrónomos*, 42, 10-17.
- CHANG, A.T.; YING HSUAN, H.; MINGHSIANG, L.; CHYI, H.; CHIU YUE, L. (2011). Hydrogen production by the anaerobic fermentation from acid hydrolyzed rice straw hydrolysate. *International Journal of Hydrogen Energy*. 36(21): 14280- 14288.
- Díaz, A. (2022). Biogás: una fuente de energía para las generaciones futuras en la era post-petrolera. *Revista Científica Agroindustria, Sociedad y ambiente*. ISSN: 2343-6115. DOI: <http://doi.org/10.5281/zenodo.7365402>
- Díaz, C., Esteller, M., Velasco, A., Arriaga, C., Martínez, J., Colín, M. & Ramírez, J. (2011). Resultados preliminares de la implementación de la guía de planeación estratégica participativa para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago. En: *Retos de la investigación del agua en México* (Ú. Oswald, ed.). México, 573-582.
- Diario Oficial de la Federación DOF (2003). Ley general para la prevención y gestión de residuos. México.
- EUSTAT. Residuos urbanos (RU). Recuperado en: https://www.eustat.eus/documentos/opt_0/tema_454/elem_12570/definicion.html
- Esquivel, L. (2002). Aspectos importantes al introducir biodigestores en explotaciones lecheras a pequeña escala. *Livestock Research for Rural Development*, 14 (3).
- Fei, F., Wen, Z., & Ri, S. (2022). Urban biowaste integrated management based on synergy mechanism and multi-objective optimization: A case study in Suzhou, China. *Science of The Total Environment*, 823, 153691. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153691>
- Fernández, S. P. 2002. Investigación cuantitativa y cualitativa. *Cad Aten primaria complejo Hospitalario Juan Canalejo*. Coruña, España. 76-78 p.
- Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C. Cuerpos de agua. Rescatado en: <https://agua.org.mx/cuerpos-de-agua/>
- Forigua-Moyano, L. (2018). Construcción de escenarios prospectivos aplicados a la planificación estratégica territorial: una alternativa para el manejo de la incertidumbre en la toma de decisiones. Tesis de posgrado. Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación. En *Memoria Académica*. Disponible en: <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/ProduccionCartografica/proceso-de-produccion%C3%B3n-cartografica>
- Gamillo D. (2005). Estudio de la viabilidad de cogeneración de biomasa en la comunidad indígena de San Juan Parangaricutiru Michoacán. Maestría en Ingeniería Eléctrica. UNAM. México.
- Grazhdani, D. (2016). Assessing the variables affecting on the rate of solid waste generation and recycling: An empirical analysis in Prespa Park. *Waste Management*, 48, 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.028>
- Ghose, M., Dikshit, A., & Sharma, S. (2006). A GIS based transportation model for solid waste disposal – A case study on Asansol municipality. *Waste Management*, 26(11), 1287–1293. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.09.022>
- Gómez Delgado, M. y Barredo, J. (2005), *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación MultiCriterio aplicados al Ordenamiento del Territorio*, Madrid, Ra-Ma.
- Gómez G., Meneses M., Ballinas L. y Castells F. (2009). Characterization of urban solid waste in Chihuahua, Mexico. *Waste Manage*. 28 (12), 2465–2471. DOI: 10.1016/J. wasman.2007.10.023
- Hadi, A., Premakumara, J., Chen, L., Michael K, Onoda, H., Mahichi, F. y Guo, Y. (2019). —Challenges and An Implementation Framework for Sustainable Municipal Organic Waste Management

Using Biogas Technology in Emerging Asian Countries. Sustainability 11: 1-28. doi: 10.3390/su11226331

- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) (2008). Biodigestores.
- Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE).
- INEGI. Censos y Conteos de Población y Vivienda > Series históricas > Tabulados predefinidos > Población total. Consultado en: <https://www.inegi.org.mx/datos/?ps=Programas>. Fecha de consulta: abril de 2024.
- Isidori, M., Lavorgna, M., Nardelli, A. & Parrella, A. (2003). Toxicity identification evaluation of leachates from municipal solid waste landfills: a multispecies approach. *Chemosphere*, 52, 85-94.
- Jiménez-Cisneros, B. (2002). Residuos sólidos. En la contaminación ambiental en México. Pp. 453-545- México: Limusa.
- Karadimas, N. V., & Loumos, V. G. (2008). GIS-based modelling for the estimation of municipal solid waste generation and collection. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 26(4), 337–346. <https://doi.org/10.1177/0734242x07081484>
- Keser, S., Duzgun, S., & Aso, A. (2012). Application of spatial and non-spatial data analysis in determination of the factors that impact municipal solid waste generation rates in Turkey. *Waste Management*, 32(3), 359–371. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.017>
- Kiss, G. y Encarnación, G. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta Ecológica*, Instituto Nacional de Ecología, 79, 39-51.
- Kolekar, K., Hazra, T., & Chakrabarty, S. (2016). A Review on Prediction of Municipal Solid Waste Generation Models. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 238–244. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.087>
- Leao, S., Bishop, I., & Evans, D. (2001a). Assessing the demand of solid waste disposal in urban region by urban dynamics modelling in a GIS environment. *Resources, Conservation and Recycling*, 33(4), 289–313. [https://doi.org/10.1016/s0921-3449\(01\)00090-8](https://doi.org/10.1016/s0921-3449(01)00090-8)
- Lozano, B. (2019). Ley 9/2018: análisis de las modificaciones de la Ley de Evaluación Ambiental, *Revista Actualidad Jurídica Ambiental*, 86.
- Medina, J. (2013). *Prospectiva y política pública para el cambio estructural en América Latina y el Caribe*, Santiago de Chile, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Libros de la CEPAL 129.
- Molina, M., Sarukhán, J., & Carabias, J. (2017). *El Cambio Climático, causas, efectos y soluciones*. Fondo de cultura Económica: México. Pp. 1-193.
- Mojica, F. (2010). Introducción a la prospectiva estratégica para la competitividad empresarial. Programa Bogotá Emprende de la Cámara de Comercio de Bogotá, 1-49 pp. <http://sigug.uniguajira.edu.co:8080/planeacion/word/documentos/Introducci%C3%B3n%20a%20la%20prospectiva%20estrat%C3%A9gica.pdf>
- Mojica, F. J. (2008). Dos modelos de la escuela voluntarista de prospectiva estratégica. Centro de pensamiento estratégico y prospectiva. Universidad Externado de Colombia: 1-11 pp. <http://Franciscomojica.Com/Index.Htm>
- Cárdenas-Moreno, P. (2014). Estimación de biogás y lixiviados generados en sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos del Estado de México. Tesis para obtener grado de maestría. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología.
- Oropeza, M. y Díaz, N. (2007). La geotecnología y su inserción en el pensamiento geográfico. *Universidad Central de Venezuela. Terra Nueva Etapa*, 23(34) pp. 71-95.
- PAOT. Procuraduría y de Ordenamiento Territorial. ¿Qué es el uso de suelo?. Fecha de consulta: 22-04-2024. URL: https://paot.org.mx/micrositios/sabias_que/USO_SUELO/tema_3.html#:~:text=El%20USO%20DE%20SUELO%20determina,en%20una%20ciudad%20es%20habitacional.
- Pascal, A., Ruiz, B., Gómez, P., Flotats, X. y Fernández, B. (2011). Situación y potencial de generación de biogás. Estudio Técnico PER 2011-2020. Instituto para Diversificación y Ahorro de la Energía. https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_11227_e16_biogas_d_b43a675.pdf

- Pérez Porto, J., Gardey, A. (2014). Relleno sanitario - Qué es, definición y concepto. Definicion.de. Última actualización el 21 de noviembre de 2015. Recuperado el 24 de abril de 2023 de <https://definicion.de/relleno-sanitario/>
- Pozo, J. y Elosegí, A. (2009). Capítulo 3: EL marco físico: la cuenta. Conceptos y técnicas en ecología fluvial. Fundación BBVA: primera edición. ISBN: 978-84-96515-87-1.
- RBA Ambiental (2017). ¿Qué es la bioenergía? Consultado en: <http://172.29.151.45:15871/cgi-bin/ws-session=917219949>
- Robles, F., Morales, Y., Piña, A.B., Espíndola, O., Trovar, L.R. & Valencia, G. (2011). Medición de pH y cuantificación de metales pesados en los lixiviaos del relleno sanitario más grande de la zona metropolitana de la Ciudad de México. *Universidad y Ciencia, Trópico húmedo*, 27, 121-132.
- Robles-Martínez, F., Morales, Y., Piá, A., Espíndola, O., Tovar, L- y Valencia, G. (2011). Medición de pH y cuantificación de metales pesados en los lixivados del relleno sanitario más grande de la zona metropolitana de la ciudad de México, *Universidad y Ciencia, Trópico húmedo*, 27, 121, 132.
- Rodríguez, D. y Montesillo, C. (2017). Propuesta para la gestión sustentable de los residuos sólidos urbanos en la zona central conurbada de Toluca. *Revista Legado de Arquitectura y Diseño*, (21). Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=477948279059>
- Saaty, T. (1980), *The Analytic Hierarchy Process Planning, Priority Setting, Resource Allocation*, McGrawHill.
- Salvarrey, A. y Gristo, P. (2005). Guía para la identificación y Evaluación Preliminar de Sitios Potencialmente Contaminados. Plan Nacional de Implementación de Programa Sitios Contaminados: Uruguay.
- Sampeiro, J. y Martínez, A. (2010). Bioenergía. *Revista Ciencia*, pp 30-39. Recuperado en: https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/61_2/PDF/Bioenergia.pdf
- Sauri-Riancho, M., Stendiford, E., Gamboa, M., Reza G., Cahuch, N. y Méndez, R. (2013). Superfiicial Methane Emissions from a Landfill in Merida, Yucatan, Mexico. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 14(3), 299-310.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT (2015). Informe de la situación del medio ambiente en México. México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT (2013). Informe de la situación del medio ambiente en México. México.
- Servicio Geológico Mexicano (2017). Sistemas de Información Geográfica. <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/SIG/Introduccion-SIG.html>
- Sharifi, A., M. Van Herwijnen y W. van den Toorn (2004). *Spatial Decision Support Systems*, Holanda, Enschede, ITC.
- Sistema Estatal de Información Urbana, Metropolitana y Vivienda (SEDUYM). Descriptiva de cada zona metropolitana. Secretaría del Desarrollo Urbano y Metropolitano.
- SMA. (2018). Descripción Estado de México. En SMA, Iniciativa ante el Cambio Climático en el Estado de México (págs. 19-43). México.
- Spellman, F. (2014). *Environmental Impacts of Renewable Energy*. New York: CRC Press.
- Sturzenegger, G. (2014). ¿Sabes cuánta basura generas en un día? BID: mejorando vidas. URL: <https://blogs.iadb.org/agua/es/sabes-cuanta-basura-generas-en-un-dia/>
- Sumathi, V., Natesan, U., & Sarkar, C. (2008). GIS-based approach for optimized siting of municipal solid waste landfill. *Waste Management*, 28(11), 2146–2160. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.032>
- Themelis, N-. Y Ulloa, P. (2007). Methane generation in landfills. *Renewable Energy*, 32, 1243-1257.
- Turner, B. L., Kasperson, R., Matson, P., McCarthy, J., Corell, R. W., Christensen, L., Eckley, N. et al. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(14), 8074-8079.
- Veolia Environment (2006). El centro de almacenamiento de residuos de Bouqueva/Plessis-Gassot. Francia. Url: <http://www.veoliaenvironnement.com/fr>
- Vermehren, M., & Erlwein, A. (2016). Potencial estimado de biogás en XIV Región a base de residuos urbanos y agroindustriales. *Agro Sur*, 44(1), 35–46. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2016.v44n1-04>
- Viscidi y Yépez (2018). La solución energética que América Latina necesita. En *New York Times*. Recuperado de: <https://www.nytimes.com/es/2018/02/02/espanol/opinion/opinion-energias-renovables-america-latina.htm>

- Visor del Atlas Cibernético del Estado de México. Fecha de consultado: 2024. Url: <https://acvisor.edomex.gob.mx/AtlasCibernetico/portal/visorAtlas.do>
- Xiao, S., Dong, H., Geng, Y., Fujii, M., & Pan, H. (2021). Greenhouse gas emission mitigation potential from municipal solid waste treatment: A combined SD-LMDI model. *Waste Management, 120*, 725–733. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.040>
- Zapata, A. (2022). Utilización de biogás para generación de electricidad. *Livestock Research for Rural Development*, 14 (3).