

SEP

S.E.S

TecNM

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

**“PROPUESTAS SUSTENTABLES PARA LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO
DE CUERPOS DE AGUA POR LA INADECUADA
DISPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTORA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**PRESENTA:
IRIS MARGARITA PÉREZ PALACIOS
N. CONTROL 1928D0265**

**DIRECTORA DE TESIS
DRA. MARÍA DE LA LUZ JIMÉNEZ NÚÑEZ**

**CODIRECTORA DE TESIS
DRA. MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ BERRIEL**

Metepec, Estado de México, a febrero de 2023

Oficio de autorización de impresión



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Toluca
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Metepec, Edo. de México, 13/febrero/2023
DEPI-3200-DCAM-31/2023

IRIS MARGARITA PÉREZ PALACIOS
CANDIDATO AL GRADO DE DOCTOR EN
CIENCIAS AMBIENTALES
PRESENTE

De acuerdo con los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Tecnológico Nacional de México y las disposiciones en este Instituto, habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su Trabajo de Tesis titulado **"Propuestas sustentables para la reducción del impacto de cuerpos de agua por la inadecuada disposición de residuos sólidos"**, la División de Estudios de Posgrado e Investigación de este Instituto, concede la Autorización para que proceda a la impresión del mismo.

Sin más por el momento, quedo de usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica
"Educación, integridad y ciencia"

JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN

ccp. Archivo
JLGR/RCR



Av. Tecnológico S/N, Ccl. Agrícola Bellavista, Metepec, Edo. de México, C.P.52149. Tels. Dirección:
722 208 72 05, Subd. Académica: 722 208 7207, Subd. de Planeación: 208 7206, Subd. Administrativa:
722 208 7208, Conmut.: 722 208 72 00, e-mail: info@toluca.tecnm.mx | toluca.tecnm.mx



Dictamen de aprobación



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Tecnológico de Toluca
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Metepec, Edo. de México, 15/diciembre/2022

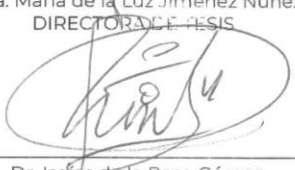
DR. JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE

Por este medio comunicamos a usted que la comisión Revisora designada para analizar la tesis denominada **"Propuestas sustentables para la reducción del impacto de cuerpos de agua por la inadecuada disposición de residuos sólidos"**, que como parte de los requisitos para obtener el grado académico de Doctora en Ciencias Ambientales presenta la **C. Iris Margarita Pérez Palacios** con número de control **1928D0265** para sustentar el acto de Recepción Profesional, ha dictaminado que dicho trabajo reúne las características de contenido y calidad para proceder a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE


Dra. María de la Luz Jiménez Núñez
DIRECTORA DE TESIS


Dra. María del Consuelo Hernández Berriel
CODIRECTORA DE TESIS


Dr. Isaías de la Rosa Gómez
REVISOR DE TESIS


Dr. Benigno Ortiz Muñoz
REVISOR DE TESIS


Dra. Rosa Elvira Zavala Arce
REVISORA DE TESIS


Dra. María del Consuelo Mañón Salas
REVISORA DE TESIS

ccp. Archivo
JLGR/IMAB



Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149, Metepec, Edo. de México. Tels. Dirección 722 208 72 05,
Subd. Académica 722 208 7207, Subd. de Planeación 208 7206, Subd. Administrativa 722 208 7208,
Conmut. 722 208 72 00, e-mail: info@toluca.tecnm.mx, technm.mx | toluca.tecnm.mx



Recibido
22/02/2023
Roberto Cano
Revis

Dedicatorias

A mis hijas

A mi hijo

Y a mi esposo

Agradecimientos

A la Dra. María de la Luz Jiménez y a la Dra. María del Consuelo Hernández Berriel por su asesoría, apoyo y contribuciones para la realización de este trabajo.

A mi comité tutorial por su sustancial contribución en cada uno de los avances de esta investigación.

Al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Toluca, por el apoyo del personal especializado y sus instalaciones del Laboratorio de Investigación en Ingeniería Ambiental (LIIA).

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo de la beca nacional con número 961276, así como al CONACYT y a la SEMARNAT por el financiamiento del proyecto SEMARNAT-2015-1-263615.

A las Administraciones 2019-2021 y 2022-2024 del municipio de Polotitlán, Estado de México, especialmente a la Dirección de Ecología y a la Dirección de Servicios Públicos, por la información proporcionada en la Cédula de Entrevista y las facilidades brindadas para las visitas al sitio de transferencia y trabajos de campo.

A la Administración 2022-2024 del municipio de Tianguistenco, Estado de México, especialmente la Dirección de Servicios Públicos, por la información proporcionada en la Cédula de Entrevista y las facilidades brindadas para las visitas al sitio de transferencia y trabajos de campo.

A la Oficina Regional Almoloya del Río, Subdirección del Sistema Lerma del Sistema de Aguas de la ciudad de México (SACMEX), por las facilidades brindadas para el muestreo de pozos.

A mi grupo de trabajo por su apoyo en el muestreo y determinaciones en campo y en laboratorio.

Resumen

La contaminación de cuerpos de agua ocasionada por el vertido de lixiviados y residuos sólidos provenientes de sitios no controlados (SNC), es un problema que afectan a la salud de las poblaciones aledañas o que se sirven del vital líquido para actividades agropecuarias.

Conforme a lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue proponer sistemas de protección para cuerpos de agua cercanos, posiblemente afectados por la incorrecta disposición de residuos sólidos (RS) en dos Sitio de Disposición Final (SDF). Para tal fin se realizó la identificación de sitios en los 60 municipios periféricos de dicha entidad, con riesgo de afectación a cuerpos de agua y se seleccionaron dos sitios representativos; se llevó a cabo el diagnóstico de las zonas geográficas donde están ubicados los sitios; se caracterizaron agua, suelo y lixiviados conforme a la normatividad vigente; se hizo la evaluación técnica, ambiental, socioeconómica y de vulnerabilidad del acuífero, así como las propuestas de reducción de afectaciones.

El primer lugar de estudio fue el SDF del municipio de Polotitlán y el segundo fue la Estación de Transferencia (ET) del municipio de Tianguistenco. Ambos sitios carecen de un manejo adecuado y falta de control de lixiviados. El SDF obtuvo 28% de cumplimiento de los criterios de la NOM-083-SEMARNAT-2003. Derivado de la Evaluación de Impacto Ambiental, el SDF de Polotitlán tuvo una calificación ambiental de 5.8 y la ET de Tianguistenco de 3.8. Si bien fueron afectaciones moderadas, ambos sitios requieren atención inmediata para evitar daños irreversibles a su entorno y a la salud de la población aledaña. El análisis de vulnerabilidad indicó que ambos acuíferos tienen riesgo de contaminación bajo, por lo que la propuesta de reducción del impacto en el componente abiótico “suelo” se centró en el control de lixiviados. Las propuestas para ambos sitios comprendieron un Tren de Tratamiento con un método de contención y adecuación de su infraestructura.

ABSTRACT

The contamination of water bodies caused by the discharge of leachates and solid waste from uncontrolled sites (NCS) is a problem that affects the health of the surrounding population or that uses the vital liquid for agricultural and food activities.

In this work, two waste disposal sites were selected in the State of Mexico, with the objective of determining the impact of uncontrolled disposal of Urban Solid Waste (USW) and Special Management Waste (SMW) near water bodies and to elaborate sustainable protection proposals to reduce their affectation. To this end, sites were identified in the 60 peripheral municipalities of that entity, with risk of affecting water bodies and two representative sites were selected; a diagnosis of the geographic zones where the sites are located was carried out; water, soil and leachate were characterized in accordance with current regulations; a water vulnerability analysis was performed; an environmental impact assessment of each site and proposals for reducing the impact were made.

The first study site was the landfill in the municipality of Polotitlán and the second was the Transfer Station (TS) in the municipality of Tianguistenco. The SDF obtained 28% compliance with the NOM-083-SEMARNAT-2003 criteria. Derived from the Environmental Impact Assessment, the POLOTITLÁN SDF had an environmental rating of 5.8 and the ET of 3.8 Tianguistenco. While they were moderate affectations, both sites require immediate attention to avoid irreversible damage to their environment and the health of the surrounding population. The vulnerability analysis indicated that both aquifers have a risk of low pollution, so the proposal to reduce the impact on the "soil" component focused on leaching control. The proposals for both sites included a treatment train with a method of containment and adaptation of their infrastructure.

CONTENIDO

CONTENIDO	vii
RELACIÓN DE FIGURAS	ix
RELACIÓN DE TABLAS	xiii
SIMBOLOGÍA Y NOMENCLATURA	xvi
INTRODUCCIÓN	1
1. FUNDAMENTOS	5
1.1 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	5
1.1.1 Disposición Final de los Residuos Sólidos	7
1.1.2 Estación de transferencia.....	8
1.1.3 Lixiviados	10
1.2 EL AGUA EN MÉXICO	12
1.2.1 Aguas superficiales	13
1.2.2 Aguas subterráneas	14
1.2.3 Contaminación del agua.....	15
1.3 TÉCNICAS DE PROTECCIÓN Y REMEDIACIÓN EN CUERPOS DE AGUA	19
1.3.1 Aplicaciones e investigaciones.....	21
1.3.2 Estudios complementarios	24
1.4 CONTAMINACIÓN DE AGUA POR RESIDUOS SÓLIDOS EN EL ESTADO DE MÉXICO	25
2. METODOLOGÍA	28
2.1 SELECCIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO	28
2.2 DIAGNÓSTICO DE LOS SITIOS DE ESTUDIO	30

2.2.1 Medio geográfico.....	30
2.2.2 Clasificación del sitio	31
2.2.3 Caracterización del sitio	31
2.3 EVALUACIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO	39
2.3.1 Evaluación técnica	39
2.3.2 Evaluación ambiental y socioeconómica.....	39
2.3.3 Análisis de vulnerabilidad.....	43
2.4 PROPUESTAS SUSTENTABLES	46
3. RESULTADOS.....	47
3.1 SELECCIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO	47
3.2 DIAGNÓSTICO DE LOS SITIOS DE ESTUDIO	50
3.2.1 Sitio de disposición “Rancho del municipio”	50
3.2.2 Sitio de transferencia Yototzingo	84
3.3 EVALUACIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO	109
3.3.1 Evaluación técnica	109
3.3.2 Evaluación ambiental y socioeconómica.....	115
3.3.3 Análisis de vulnerabilidad.....	132
3.4 PROPUESTAS SUSTENTABLES	138
3.4.1 Sitio de Disposición Final “Rancho del Municipio”.....	139
3.4.2 Estación de transferencia “Yototzingo”	144
CONCLUSIONES.....	147
REFERENCIAS.....	149
ANEXOS	172

RELACIÓN DE FIGURAS

Figura 1.1 Clasificación de los Residuos Sólidos	5
Figura 1.2 Regiones Hidrológicas Administrativas de México	14
Figura 1.3 Acuíferos por Región Hidrológica Administrativa	15
Figura 1.4 Tecnologías para protección de agua superficial y subterránea.	20
Figura 2.1 Metodología general de estudio	28
Figura 2.2 Equipos utilizados para la determinación de Coliformes Fecales y Totales	33
Figura 2.3 Preparación de la muestra	36
Figura 2.4 Triangulo Textural clasificación USDA	37
Figura 2.5 Pruebas para la determinación de límite líquido y plástico.....	38
Figura 2.6 Preparación de la muestra de suelo contaminado	38
Figura 2.7 Matriz de Leopold adecuada.	40
Figura 2.8 Escala de Vulnerabilidad de la contaminación del acuífero	44
Figura 3.1 Sitios de Disposición Final y Estaciones de Transferencia en la zona de estudio	47
Figura 3.2 Localización de los municipios de seleccionados para el estudio.	49
Figura 3.3 Ubicación del municipio de Polotitlán y su Sitio de Disposición Final.....	51
Figura 3.4 Hidrografía cercana al Sitio de Disposición Final	52
Figura 3.5 Mapa geológico del municipio de Polotitlán, EdoMéx.	54
Figura 3.6 Mapa edafológico del municipio de Polotitlán, EdoMéx.	54
Figura 3.7 Uso de suelo y vegetación circundante al Sitio de Disposición de Residuos Sólidos de Polotitlán, EdoMéx.	55
Figura 3.8 Área Natural Protegida Estatal “Santuario del Agua-Sistema Hidrológico Presa Huapango”	56
Figura 3.9 Zonas del Sitio de Disposición Final de Polotitlán, EdoMéx.	57
Figura 3.10 Zona 2 del Sitio de Disposición Final de Polotitlán EdoMéx.	57
Figura 3.11 Camión recolector en el SDF “Rancho del municipio” de Polotitlán, EdoMéx.	58

Figura 3.12 Segregadores en el SDF de Polotitlán, EdoMéx.	59
Figura 3.13 Afectación por residuos en el SDF de Polotitlán, EdoMéx, en marzo del año 2008.	60
Figura 3.14 Afectación por Residuos Sólidos en el SNC de Polotitlán, EdoMéx, el 7 de febrero del 2011.	60
Figura 3.15 Afectación en área del SDF de RSU de Polotitlán, EdoMéx,	61
Figura 3.16 Afectación por RSU en el SDF de Polotitlán, EdoMéx,	62
Figura 3.17 Áreas de disposición de RSU en el SDF de Polotitlán,	62
Figura 3.18 Áreas de disposición de RSU en el SDF de Polotitlán,	63
Figura 3.19 Áreas afectadas por disposición de Residuos Sólidos	65
Figura 3.20 Área total afectada por disposición de Residuos Sólidos.....	65
Figura 3.21 Puntos de muestreo de agua	66
Figura 3.22 Recolección de muestras de agua; laguna de lixiviados (izquierda) y bordo (derecha).....	67
Figura 3.23 Coliformes Totales en las muestras A1, A2 y A3	69
Figura 3.24 Presencia de Coliformes Fecales en la muestra A1, A2, A3	69
Figura 3.25 Escherichia Coli en la muestra A3.....	69
Figura 3.26 Puntos de muestreo de lixiviados en el SDF de Polotitlán, EdoMéx	71
Figura 3.27 Laguna de lixiviados (muestra L2) en el SNC del sitio de disposición final de Polotitlán, EdoMéx.	72
Figura 3.28 Puntos de muestreo L1 (izquierda) y L2 (derecha) en época de secas .	72
Figura 3.29 Extracción de muestra alterada de suelo sano	76
Figura 3.30 Puntos de muestreo de suelo en el Sitio de Disposición Final	77
Figura 3.31 Preparación de las muestras para inspección visual y análisis granulométrico.....	78
Figura 3.32 Prueba granulométrica de suelo sano del SDF	79
Figura 3.33 Extracción de muestras de suelo contaminado.....	81
Figura 3.34 Localización de la Estación de Transferencia “Yolotzingo” en el Municipio de Tianguistenco	85

Figura 3.35 Cortes litológicos proporcionales verticales de los primeros 35 m, zona estudiada a 2 km de la ETY, Tianguistenco, EdoMéx.	87
Figura 3.36 Uso de suelo y vegetación de la zona circundante a la Estación de Transferencia de Tianguistenco, EdoMéx.	88
Figura 3.37 Cuerpo de agua cercano a la ETY, Tianguistenco.	89
Figura 3.38 Estación de Transferencia "Yolotzingo", Tianguistenco, EdoMéx.	90
Figura 3.39 Área afectada por Residuos Sólidos en la ETY, Tianguistenco, EdoMéx., 31 de marzo del 2002	92
Figura 3.40 Afectación por Residuos Sólidos en la ETY de Tianguistenco, EdoMéx, el 31 de enero del 2009.....	93
Figura 3.41 Afectación por Residuos Sólidos en la ETY de Tianguistenco, EdoMéx el 26 de abril (izquierda) y 9 de junio (derecha) del 2012.....	94
Figura 3.42 Afectación por Residuos Sólidos en la Estación de Transferencia de Tianguistenco, EdoMéx el 09 de enero del 2013.	94
Figura 3.43 Afectación por Residuos Sólidos en la ETY de Tianguistenco,	95
Figura 3.44 Afectación por Residuos Sólidos en la ETY de Tianguistenco, EdoMéx, durante el año 2015; 14 de agosto (izquierda) y 18 de octubre (derecha).	95
Figura 3.45 Afectación por Residuos Sólidos en el SNC de Tianguistenco, EdoMéx, el 02 de enero del 2016.	96
Figura 3.46 Afectación por Residuos Sólidos en el SNC de Tianguistenco, EdoMéx, en enero (izquierda) y abril (derecha) del 2017.....	96
Figura 3.47 Vista aérea de la ETY de Tianguistenco, EdoMéx, septiembre 2019.....	97
Figura 3.48 Afectación por Residuos Sólidos Urbanos en la Estación de Transferencia de Tianguistenco el 13 de enero del 2020.....	98
Figura 3.49 ETY fotografiada el 05 de abril del 2022	98
Figura 3.50 Área afectada por almacenamiento y disposición de RSU en la ETY, Tianguistenco, EdoMéx, 23 de noviembre 2022	100
Figura 3.51 Localización de los puntos de muestreo de agua	101
Figura 3.52 Muestreo de agua en pozos.....	101
Figura 3.53 Puntos de escurrimiento de lixiviados en la ETY	105

Figura 3.54 Puntos de recolección de muestras de lixiviado.....	105
Figura 3.55 Perfil de suelo de la celda de disposición.....	108
Figura 3.56 Mapas de restricción obtenidos con el SIGMIRSU.....	110
Figura 3.57 Mapas de restricción obtenidos con el SIGMIRSU (continuación)	111
Figura 3.58 Restricciones por áreas naturales protegidas	111
Figura 3.59 Restricción por cuerpos de agua.....	112
Figura 3.60 Mapa hidrológico del Sitio de Disposición Final de Polotitlán.....	112
Figura 3.61 Evaluación de la Matriz de Leopold sin recomendaciones.....	117
Figura 3.62 Resultados de la matriz de Leopold con Recomendaciones.....	119
Figura 3.63 Resultados de la evaluación de actividades y componentes del entorno	126
Figura 3.64 Distancias del SDF y SNC de Polotitlán, EdoMéx a cuerpo de agua superficial.	134
Figura 3.65 Perfiles topográficos de la ETY a los pozos más cercanos.....	137
Figura 3.66 Proceso de reducción de contaminación por incidencia.....	142
Figura 3.67 Propuesta de mejora para la reducción de contaminación.....	143
Figura 3.68. Propuesta de mejora de la ET, Tianguistenco, EdoMéx.	146
Figura 3.69 Esquema del proceso de fitorremediación	146

RELACIÓN DE TABLAS

Tabla 1.1 Infraestructura mínima, constructiva y de operación que deben cumplir los sitios de disposición final conforme a la NOM-083-SEMARNAT-2021.....	8
Tabla 1.2 Tipos de Estación de Transferencia y características	9
Tabla 1.3 Composición y clasificación típica de lixiviados en función de su edad.....	11
Tabla 1.4 Parámetros de los componentes de lixiviado en Rellenos Sanitarios.....	12
Tabla 1.5 Contaminantes y procesos de afectación de la calidad de agua.	16
Tabla 1.6. Afectaciones provocadas por consumo de agua contaminada con lixiviados de Sitios de Disposición de Residuos Sólidos.....	17
Tabla 1.7 Normatividad utilizada para evaluar calidad de agua	18
Tabla 1.8 Resumen de los antecedentes para esta investigación.....	23
Tabla 2.1 Etapas de trabajo para cada proceso de selección.....	29
Tabla 2.2 Parámetros analíticos para agua.....	32
Tabla 2.3 Límites Máximos Permisibles bacteriológicos	33
Tabla 2.4 Parámetros analíticos para lixiviados	35
Tabla 2.5 Criterios de evaluación de impacto ambiental	41
Tabla 2.6 Rangos de valor de nivel de significancia.....	42
Tabla 2.7 Parámetros utilizados en el método DRASTIC.....	44
Tabla 2.8 Intervalos y valores asignados para el método DRASTIC.....	45
Tabla 3.1. Resultados de la selección de sitios mediante el proceso A	48
Tabla 3.2. Resultados de la selección de sitios de proceso B.....	49
Tabla 3.3 Disposición de residuos sólidos urbanos en el SDF “Rancho del municipio” de Polotitlán, EdoMéx	63
Tabla 3.4 Áreas afectadas por disposición de Residuos Sólidos Urbanos.....	64
Tabla 3.5 Áreas afectadas por Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial en el Municipio de Polotitlán, Edo. Méx.	64
Tabla 3.6 Resultados de la caracterización de agua del Sitio “Rancho del Municipio” de Polotitlán, EdoMéx.	70
Tabla 3.7 Presencia de Coliformes en las muestras de agua	71

Tabla 3.8 Resultados de la caracterización de lixiviados de la muestra L1 y L2 del SDF de Polotitlán, EdoMéx.	74
Tabla 3.9 Resultados de la caracterización de lixiviados de la muestra L3 y L4 del SDF de Polotitlán, EdoMéx	75
Tabla 3.10 Resultados de Coliformes Totales.....	75
Tabla 3.11 Resultados de la caracterización de suelo del SDF de Polotitlán, EdoMéx.	80
Tabla 3.12 Resultados de las determinaciones en suelos contaminados del SDF de Polotitlán EdoMéx	82
Tabla 3.13 Perfil estratigráfico del suelo del SDF "Rancho del Municipio"	83
Tabla 3.14 Cuadro comparativo de la clasificación considerando al sitio como Estación de Transferencia	91
Tabla 3.15 Áreas afectadas por Residuos Sólidos en la Estación de Transferencia del Municipio de Tianguistenco, EdoMéx.....	99
Tabla 3.16 Resultados de la caracterización de agua en Tianguistenco Estado de México.....	102
Tabla 3.17 Resultados de la determinación de Coliformes Totales en las muestras de agua	104
Tabla 3.18. Comparación de resultados obtenidos del pozo 56 en 2012 y 2022. ...	104
Tabla 3.19 Resultados de la caracterización fisicoquímica de lixiviado en la Estación de Transferencia de Tianguistenco EdoMéx.	107
Tabla 3.20 Cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003 y áreas de oportunidad según la Tabla de Verificación	114
Tabla 3.21 Tabla comparativa de resultados de la aplicación de la Matriz de Leopold en el Sitio de Disposición Final de la Polotitlán EdoMéx	120
Tabla 3.22 Oferta actual de recolección, traslado, reciclaje y disposición final	123
Tabla 3.23 Proyección de la demanda de servicios de recolección de RSU,	124
Tabla 3.24 Oferta actual de recolección, traslado, reciclaje y disposición final	129
Tabla 3.25 Proyección de la demanda por servicios de recolección de RSU,	130
Tabla 3.26 Intervalos para la clasificación de la vulnerabilidad	138

Tabla 3.27 Especificaciones para Estaciones de Transferencia	144
--	-----

SIMBOLOGÍA Y NOMENCLATURA

% por ciento

D

DBO Demanda bioquímica de oxígeno

DQO Demanda química de oxígeno

E

EdoMéx Estado de México

ET Estación de Transferencia

ETY Estación de Transferencia Yototzingo

L

L litros

LGPGIR Ley General para la prevención y Gestión Integral de los Residuos

M

MIRSU Manejo Integral de Residuos Sólidos Urbanos

ML Matriz de Leopold

m metros

mm Milímetros

mm/año milímetros por año

mm/s milímetros por segundo

MP Metales Pesados

N

NO₃⁻ Nitratos

P

PO₄³⁻ Fosfatos

R

RESA Relleno Sanitario

RH Región Hidrológica

RME Residuos de Manejo Especial

RO Residuos Orgánicos

RP Residuos Peligrosos

RS Residuos Sólidos

RSU Residuos Sólidos Urbanos

S

SC Sitio Controlado

SDF Sitio de Disposición Final

SIGMIRSU Sistema de Información Geográfica del MIRSU

SMAEM Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México

SNC Sitio no Controlado

T

t/día Toneladas por día

INTRODUCCIÓN

Los problemas ambientales incluyen daños a los recursos hídricos, como la contaminación de agua superficial y subterránea, causada por la erosión, mala ubicación y/o diseño de los sitios donde se vierten los desechos (Madroñero, *et.al.*, 2022; Merritt, 1994).

Desde hace una década, autores han propuesto desde diferentes puntos de vista soluciones para mitigar el daño ocasionado por disposición de residuos sólidos cerca de cuerpos de agua, donde se enfatizan la cartografía social, cultura ambiental y gestión de residuos sólidos (Bernache, 2012; Bernal, 2015), en general, estos trabajos incluyen el Manejo Integral de Residuos Sólidos Urbanos (MIRSU), el análisis de las condiciones actuales de los Sitios de Disposición Final (SDF) de Residuos sólidos (RSU) y la determinación del Impacto Ambiental (Machorro-Roman, *et.al.*, 2020; Rojas-Oviedo, 2020). Pocos son los estudios que incluyen el escudriño del área afectada con propuestas de solución técnica, ambiental, social y económicamente viables.

El manejo de los RSU en el Estado de México (EdoMéx) ha sido afectado por la falta de sitios para disponerlos ante el crecimiento de las poblaciones, siendo los más perjudiciales los sitios no controlados (SNC), que provocan contaminación en componentes biofísicos de la zona aledaña, sean éstos agua, suelo o aire, e influye en el riesgo para la salud humana. En el SDF se produce la descomposición de los residuos en líquidos, lixiviados y gases como dióxido de carbono y metano. Los lixiviados son una mezcla de compuestos orgánicos como la demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno y metales pesados que (en cantidades importantes) pueden percolarse o migrar fuera de los SDF y contaminar agua superficial o subterránea.

Considerando lo anterior, este trabajo tiene el objetivo de proponer sistemas de protección para cuerpos de agua cercanos, posiblemente afectados por la incorrecta disposición de residuos sólidos (RS) en dos SDF. Para lograrlo, de los 60 municipios periféricos del Estado de México, se identificó a dos SDF con capacidad de afectación

a cuerpos de agua, se llevó a cabo el diagnóstico de las zonas geográficas donde están ubicados los sitios y se elaboró un análisis histórico para identificar la zona afectada; se caracterizaron agua, suelo y lixiviados conforme a la normatividad vigente; se evaluó técnica, ambiental y socialmente cada sitio; se hizo el análisis de vulnerabilidad del agua y se elaboraron las propuestas de reducción de afectaciones.

La recolección de los datos representó un manejo vasto de información que se encontró dispersa en trabajos universitarios y secretarías gubernamentales, artículos científicos e Informes estatales y municipales, además de entrevistas personales y telefónicas con encargados de los sitios.

En la primera etapa, se llevó a cabo un análisis de 72 SDF del EdoMéx ubicados en los 60 municipios mexiquenses aledaños a las zonas metropolitanas de Toluca y Ciudad de México, a través de análisis espaciales con apoyo de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Se utilizaron dos criterios de estudio: a) Conjuntos de municipios que pertenecen a una misma Región hidrológica (RH) y b) SDF en los que se había realizado una caracterización de RSU, bajo el proyecto de CONACyT “Ubicación de rellenos sanitarios intermunicipales futuros en el Estado de México y estados aledaños”. El fin de esta primera evaluación fue seleccionar e identificar el número de SDF en el área de estudio que pudieran estar contaminando recursos hídricos, resultando dos sitios: el SDF de Polotitlán y la Estación de Transferencia (ET) de Tianguistenco.

Posteriormente se realizó un diagnóstico de los sitios seleccionados en que se incluyeron características geográficas como son: clima, hidrología y uso del suelo, entre otras. Debido a la variabilidad de la información obtenida en los sitios de estudio y a la incertidumbre que esa característica genera, se realizó un estudio para precisar su clasificación y su evolución histórica, donde se concluye que el SDF de Polotitlán es un SNC tipo D, cuenta con una celda de disposición e infraestructura para captación de lixiviados y biogás, en malas condiciones a consecuencia de una mala operación, y con un área afectada de 51,592 m².

Para el caso de Yolotzingo, en Tianguistenco, al no contar con edificio ni protocolos de operación, se clasificó de tipo indirecto sin procesamiento de residuos, por lo que no cumple con los mínimos requisitos para funcionar como ET; adicionalmente, resultó con un área de afectación de 13,828 m².

Se realizaron pruebas de campo y en laboratorio para suelo, agua y lixiviados, lo que permitió caracterizar sus propiedades fisicoquímicas e identificar a los posibles contaminantes. Los análisis describen a sitios con características de lixiviados jóvenes, y altos niveles de sólidos.

Continuando con la evaluación, se identificó, con apoyo de una tabla de verificación, que los sitios no cumplen con los requisitos mínimos establecidos por la normativa. En efecto, los resultados revelan un grado de incumplimiento con la NOM-083-SEMARNAT-2003, que resulta ser del 44% para el SDF, ya que está provocando afectaciones ambientales a la zona aledaña, principalmente en suelo, cuya calificación de 5.6 revela daño severo en Polotitlán. Mientras, para la ET de Tianguistenco la calificación ambiental de 3.8 no refleja el impacto en el suelo provocado por escurrimientos de lixiviado. Ahora, por lo que respecta a la evaluación social, los sitios se determinaron propicios para satisfacer la demanda de disposición actual y futura bajo la atención de sus particularidades y, sobre todo, combatiendo sus externalidades negativas.

El estudio de vulnerabilidad en el acuífero determinó el bajo impacto que provocan las acciones antropogénicas del vertimiento de residuos en ambas zonas de estudio, debido a la composición litológica y a que ambos sitios cuentan con capa impermeable. Por lo que la propuesta de protección se enfocó en contener el contaminante, reducir los perjuicios sobre la zona afectada y la rehabilitación de los sitios.

La importancia del control y manejo adecuado de los sitios de disposición es la etapa que consolida la propuesta de protección de sistemas hídricos de este trabajo, para prevenir la contaminación tanto de subterráneos como superficiales, debida a la falta de cumplimiento de la normatividad ambiental. La implementación de sistemas de

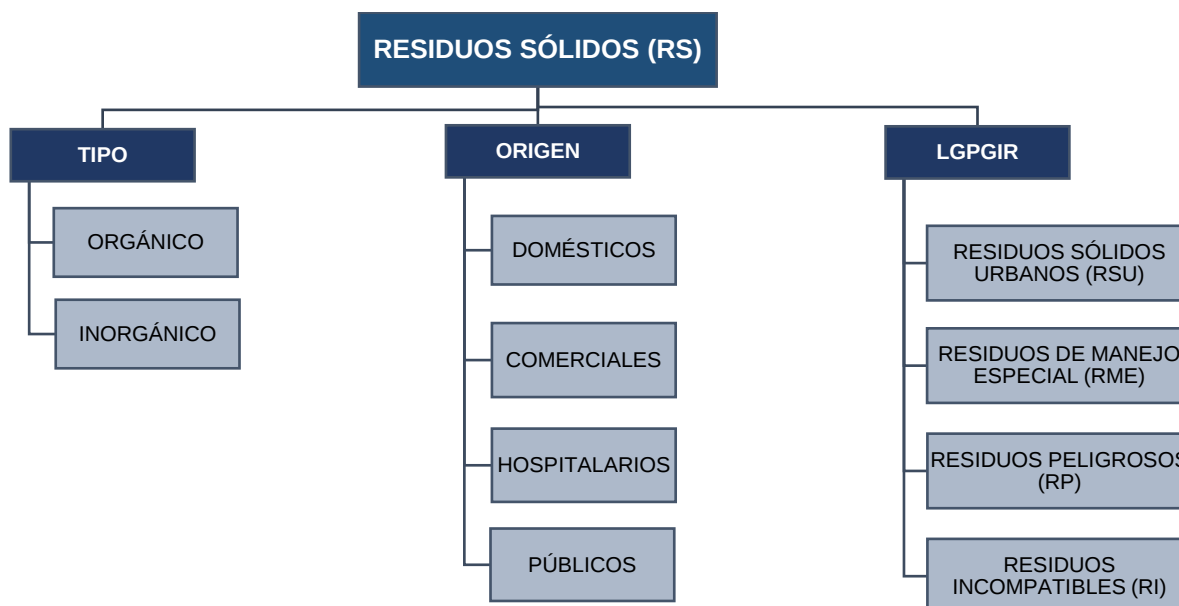
captación, almacenamiento y tratamiento en los SDF por las autoridades ayudará a reducir el impacto que generan los subproductos provenientes de la descomposición de residuos, los cuales tienen un impacto negativo en agua, suelo y aire.

1. FUNDAMENTOS

El deterioro ambiental en zonas aledañas a SDF o almacenamiento de RSU es generado debido a diferentes factores, entre ellos el mal manejo de los residuos y la falta de control de los SDF, que aumentan la producción de lixiviados como consecuencia de su descomposición, y afectan componentes bióticos como el agua.

1.1 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

La Ley General para la prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) establece que un residuo es el material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado, cuando este residuo no es valorizable requiere sujetarse a tratamiento o disposición final (DOF, 2021a). La clasificación de los residuos se puede establecer como se aprecia en la Figura 1.1.



Fuente: Modificado de CEUPE, 2019; DOF, 2004.

Figura 1.1 Clasificación de los Residuos Sólidos

La clasificación por tipo divide a los desechos en residuos orgánicos e inorgánicos. Los residuos orgánicos (RO) son todo residuo de origen biológico que alguna vez estuvo vivo o fue parte de un ser vivo, como el cuero, fibra vegetal y residuos alimenticios. Los residuos inorgánicos es todo deshecho de origen industrial o de algún proceso no natural como material ferroso, no ferroso, plástico rígido o película y envase de cartón (SEMARNAT, 2017a).

Por su origen, la clasificación es muy vasta como ejemplo podemos relacionar: domésticas, comerciales, oficinas, restaurantes, mercados; industriales; procesos de fabricación y transformación (CEUPE, 2019).

La LGPGIR, clasifica a los RS en cuatro tipos: Residuos Sólidos Urbanos (RSU), los generados en el hogar o casa-habitación; Residuos de Manejo Especial (RME), son aquellos generados en los procesos productivos; Residuos Peligrosos (RP), aquellos con alguna característica de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad y; Residuos Incompatibles (RI), aquellos que al entrar en contacto o al ser mezclados con agua u otros materiales o residuos, reaccionan produciendo calor, presión, fuego, partículas, gases o vapores dañinos (DOF, 2021; DOF, 2003).

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos otorga a los municipios la responsabilidad sobre el Manejo de los RSU y RME, estableciendo que tendrán a su cargo las funciones y servicios de limpia, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de residuos (DOF, 1917), actividades que constituyen etapas o subsistemas del Manejo Integral de Residuos Sólidos Urbanos (MIRSU), sistema integrado por generación, barrido, recolección, traslado, almacenamiento y disposición final, que tiene como propósito principal manejar los RS cumpliendo con objetivos de valorización, pero principalmente de eficiencias sanitaria, ambiental, tecnológica, económica y social, lo cual se traduce en la protección de la salud de la población y del medio ambiente (DOF, 2021a). Sin embargo, los Ayuntamientos se ven rebasados por el creciente número de habitantes y su producción de residuos, además en muchos casos, el personal de las dependencias municipales tiene baja productividad, lo cual

encarece aún más el costo de la gestión, la demanda del manejo de los RS y el costo de administrar un sistema de limpia (Bernache, 2012).

1.1.1 Disposición Final de los Residuos Sólidos

Un Sitio de Disposición Final de residuos sólidos (SDF) es el lugar donde se depositan los RSU y RME en forma definitiva, la Norma NOM-083-SEMARNAT-2021, contempla tres tipos (DOF, 2021b):

- a) Relleno Sanitario (RESA): Es una obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición de los residuos, con el fin de controlar los impactos ambientales.
- b) Sitio controlado (SC): Sitio inadecuado de disposición final que cumple con las especificaciones de un RESA en lo que se refiere a obras de infraestructura y operación, pero no cumple con las especificaciones de impermeabilización.
- c) Sitio no controlado (SNC): SDF que no cumple con los requisitos establecidos en la NOM-083-SEMARNAT-2021.

En la clasificación de los sitios se establecen categorías basadas en el tonelaje recibido por día en cuatro tipos: A (500 toneladas o más), B (100-500), C (50-100), D (menores a 50), en función a esta categorización se establecen los requisitos de infraestructura y obras de ingeniería con los que un SDF debe contar (Tabla 1.1).

La infraestructura de los SDF de RSU debe considerar la legislación estatal y municipal en cuanto a funcionamiento, ubicación y clasificación, que garanticen el cumplimiento de los requisitos mínimos. En algunos casos, los departamentos de limpia de los municipios no cuentan con SDF, por lo que retienen o almacenan los RSU en centros o estaciones de transferencia (ET) donde esperan a ser transportados a un SDF.

Tabla 1.1 Infraestructura mínima, constructiva y de operación que deben cumplir los sitios de disposición final conforme a la NOM-083-SEMARNAT-2021

TIPO	OBRAS Y SERVICIOS	CARACTERISTICAS CONSTRUCTIVAS	CARACTERISTICAS DE OPERACIÓN
A	Caminos de acceso e interiores	Sistema de impermeabilización	Manual de operación
B	Cerca perimetral y puerta de acceso	Sistema para el control y monitoreo de biogás	Control de registro
C	Caseta de vigilancia y control de acceso	Instalaciones y sistemas para el control y monitoreo de lixiviados y acuíferos	Informe mensual de actividades
D	Báscula para registro y control del ingreso de los RSU y RME	Sistema de recirculación de lixiviados	Reglamento interno
	Franja de amortiguamiento	Drenaje pluvial	Perfil
	Almacén para combustibles y lubricantes		
	Instalaciones y servicios sanitarios		
	Instalaciones y servicios para mantenimiento de maquinaria y equipo de operación		
	Servicio médico con Primeros Auxilios y Equipo de Protección Personal		
	Agua potable, drenaje o sistema de captación de aguas residuales y electricidad		
	Oficinas		
	Pararrayos o apartarrayos		

Fuente: DOF, 2021a

1.1.2 Estación de transferencia

La Estación de Transferencia (ET) es una instalación donde se transfieren los RSU de las unidades de recolección a vehículos de mayor capacidad para su traslado a las instalaciones de tratamiento o disposición final (Gaceta, 2009). Su objetivo básico es incrementar la eficiencia global del servicio de recolección a través de la economía en el sistema de transporte y de la mayor productividad de la mano de obra empleada en la recolección para ello se utilizan vehículos recolectores como camiones compactadores y camiones abiertos tipo volquete, camiones portacontenedores, de

redilas y remolques de tracción animal. La buena ubicación y operación de las ET generan ventajas y beneficios, entre ellas disminuir el número de recorridos de las rutas de recolección a la instalación, así como y evitar viajes hasta un sitio más lejano para la disposición final (INECC, 2022a; SEMARNAT, 2010). Además, contribuye a:

- a) Disminución de costos de transporte y de horas productivas requeridas
- b) Mayor aprovechamiento del tiempo productivo por recorrido al SDF
- c) Aumento de vida útil y menor costo de mantenimiento de vehículos de recolección
- d) Regularidad en el servicio de recolección
- e) Reducción de contaminación ambiental
- f) Capacidad de atender el aumento de la demanda en las rutas de recolección

Una ET deben contar con maquinaria para carga, descarga y equipo de transferencia y recolección. Se clasifica por sus características en estaciones de carga directa, de carga indirecta y estaciones combinadas (INECC, 2022b). En la Tabla 1.2, se muestran las características principales de las ET.

Tabla 1.2 Tipos de Estación de Transferencia y características

TIPO	CONCEPTO	CARACTERÍSTICAS	INFRAESTRUCTURA
Carga directa	Esta estación recibe a vehículos recolectores, los cuales son registrados y pesados, posteriormente se dirigen a las rampas de acceso del patio de maniobras donde se ubican las líneas de servicio, las cuales cuentan con un número determinado de servidores (tolvas),	No almacena Residuos	Barda perimetral Caseta de control de accesos Rampa y patio de maniobras de vehículos recolectores Tolvas para descarga Área de almacenamiento de residuos separados. Taller, oficinas y jardines Techumbre en patio de carga Aspersor de agua Sistema de ventilación mecánica Básculas Acceso de recolectores

TIPO	CONCEPTO	CARACTERÍSTICAS	INFRAESTRUCTURA
	que descargan los residuos al vehículo de transferencia.		Acceso de vehículos de transferencia Área de despunte de vehículos de transferencia Salida de vehículos de transferencia. Trampas de sólidos y grasas
Carga indirecta	La descarga de residuos de los vehículos de recolección se realiza a una fosa de almacenamiento o sobre una plataforma donde posteriormente los residuos son cargados en los vehículos de transferencia con equipos auxiliares.	Los vehículos recolectores descargan los residuos transportados. Los usuarios menores llevan separados los subproductos reciclables.	Barda perimetral y caseta de control Patio de maniobras de vehículos recolectores Fosa o área de almacenamiento de residuos Taller, oficinas y jardines Techumbre de patio de carga Aspersor de agua en fosa Sistema de ventilación mecánica Básculas Patio de maniobras de vehículos recolectores Acceso de vehículos de transferencia Área de despunte de vehículos de transferencia Salida de vehículos de transferencia.

Fuente: ENECC, 2022a; ENECC, 2022b.

1.1.3 Lixiviados

Los lixiviados son emisiones líquidas provenientes de la descomposición de residuos acumulados que se percolan a través de los RS. Este líquido se forma por la reacción, arrastre o filtrado de materiales integradores que contienen en forma disuelta o en suspensión sustancias que se infiltran al suelo o escurren fuera de los SDF (DOF, 2021b).

La generación de lixiviados en un SDF suele deberse al grado de compactación y humedad de los residuos, material de cobertura e infiltración de la precipitación; otra parte de ellos se forma por la descomposición anaeróbica de los residuos (López, 2022 *et al.*; Méndez *et al.*, 2002). La composición puede ser variable y compleja debido a

diferentes factores entre los que destaca su constitución, la edad del SDF y los procesos de conversión microbiana y química (Rosas-Varga & Ramón-Valencia, 2020).

Esta sustancia se caracteriza por contener altas concentraciones de carga orgánica, sustancias inorgánicas, elevados niveles de amonio, mayor conductividad, metales pesados (MP) y altos contenidos de sales totales y disueltos, alta concentración de cloruros y variabilidad de pH (García, Ferrer, & Albarran, 2008; López *et al.*, 2022; Najera Aguilar *et al.*, 2008), atendiendo a estas características, los lixiviados se pueden clasificar en jóvenes, medios y viejos. En la Tabla 1.3 se aprecia la clasificación propuesta por Bagchi (1990) y en la El adecuado control de lixiviados en los SDF incluye un sistema de impermeabilización y canalización por medio de un sistema de drenaje para ser recolectados y tratados, cuando no se tiene, la contaminación de agua por escurrimientos o filtraciones de esta sustancia son una fuente potencial en corrientes de agua, manantiales y pozos, dando lugar al deterioro de suelo y agua, así como riesgo eventual a la salud humana. Cuando esto ocurre, hay una relación de contaminación suelo-agua, que se debe controlar antes de iniciar la limpieza. Por lo que se debe calcular la cantidad de lixiviados que entraron al suelo, para proponer, los tratamientos que serán utilizados como primera etapa debido a que los lixiviados son variables, así, para lixiviados jóvenes es recomendable pensar en sistemas biológicos; mientras para un lixiviado viejo los procesos fisicoquímicos se convierten en la mejor opción, dada su baja biodegradabilidad .

Tabla 1.4 los valores de referencia utilizados por López Ramírez *et al.* (2022) para su clasificación.

Tabla 1.3 Composición y clasificación típica de lixiviados en función de su edad

EDAD DEL RELLENO (AÑOS) Y TIPO DE LIXIVIADO			
	< 5 (joven)	5-10 (medio)	>10 (viejo)
Parámetro	I (biodegradable)	II (intermedio)	III (estabilizado)
Ph	<6.5	6.5-7.5	>7.5

DQO (mg/L)	>20,000	3,000-15,000	<5,000
DQO/COT	<2.7	2.0-2.7	>2.0
DBO ₅ /DQO	>0.5	0.1-0.5	<0.1
AGV (%COT)	>70	5-30	<5.0

Fuente: Bagchi, 1990.

El adecuado control de lixiviados en los SDF incluye un sistema de impermeabilización y canalización por medio de un sistema de drenaje para ser recolectados y tratados, cuando no se tiene, la contaminación de agua por escurrimientos o filtraciones de esta sustancia son una fuente potencial en corrientes de agua, manantiales y pozos, dando lugar al deterioro de suelo y agua, así como riesgo eventual a la salud humana. Cuando esto ocurre, hay una relación de contaminación suelo-agua, que se debe controlar antes de iniciar la limpieza. Por lo que se debe calcular la cantidad de lixiviados que entraron al suelo, para proponer, los tratamientos que serán utilizados como primera etapa debido a que los lixiviados son variables, así, para lixiviados jóvenes es recomendable pensar en sistemas biológicos; mientras para un lixiviado viejo los procesos fisicoquímicos se convierten en la mejor opción, dada su baja biodegradabilidad (Gutierrez & Becerra, 2014; Jaramillo, 1991).

Tabla 1.4 Parámetros de los componentes de lixiviado en Rellenos Sanitarios

PARÁMETRO	VERTEDERO NUEVO	VERTEDERO VIEJO
	RANGO (mg/L)	RANGO (mg/L)
DQO	200-60	100-500
Nitrógeno amoniacal	00010-800	20-40
Nitratos	5-40	5-10
Fósforo total	5-100	5-10
Alcalinidad	1 000-10 000	200-1 000
pH	4.5-7.5	6.6-7.5
Calcio	200-10 000	100-400
Manganeso	200-3 000	50-200
Potasio	50-1 500	50-400
Sodio	200-2 500	100-200
Cloro	200-3 000	100-400

PARÁMETRO	VERTEDERO NUEVO	VERTEDERO VIEJO
	RANGO (mg/L)	RANGO (mg/L)
Sulfatos	50-1 000	20-50
Hierro Total	50-1 200	20-200

Fuente: Modificado de López Ramírez *et al.*, 2022.

La contaminación de aguas subterráneas por lixiviados se caracteriza por producir malos olores, cambio de coloración del agua, aumento de amonio, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), reducción de sulfatos, incremento de dióxido de carbono y número de bacterias (Díaz-Delgado *et al.*, 2005).

1.2 EL AGUA EN MÉXICO

La ubicación de cuerpos de agua en México está relacionada con la distribución geográfica de montañas y el clima en cada región. Dos terceras partes del territorio se consideran áridas o semiáridas con precipitaciones anuales menores a los 500 mm, mientras que el sureste es húmedo con precipitaciones anuales que superan los 2 000 mm por año (CONAGUA, 2019).

En México, los usos del agua son principalmente para producción agrícola, agua potable y recreación. De cada 100 litros (l), 76 son empleados para la explotación agropecuaria, 14.40 para abastecimiento público, 4.90 para uso industrial y 4.70 para generación de energía eléctrica (CONAGUA, 2018a). El origen de ese recurso hídrico es superficial y subterráneo.

1.2.1 Aguas superficiales

Nos referimos a ríos, arroyos, lagos y lagunas con el término “agua superficial”, que en México se forma a partir de escurrimientos superficiales.

Los ríos y arroyos son vertientes que constituyen una red hidrográfica de 633,000 kilómetros de longitud, en el país se clasifican en: Occidental o del Pacífico, Oriental o

del Atlántico (Golfo de México y Mar Caribe) e Interior, estos últimos no tienen salida al mar. Los principales cauces se integra por siete ríos: Grijalva-Usumacinta, Papaloapan, Coatzacoalcos, Balsas, Pánuco, Lerma-Santiago y Tonalá que representan el 22% de la superficie de nuestro país (CONAGUA, 2019; CONAGUA, 2018).

Los lagos y lagunas son cuerpos de agua en forma de depresiones de tierra firme contiguos al océano o dentro del territorio, que contienen agua (FCyEA, 2019). Los principales son: Chapala en Jalisco y Pátzcuaro en Michoacán, Guzmán, Santa María y Palos, en Chihuahua; Parras en Coahuila; Santa Ana en Tabasco; Laguna de Términos en Campeche y Zumpango, San Cristóbal, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco y Chalco, en el Valle de México (CONAGUA, 2018).

El territorio mexicano se agrupa en 13 Regiones Hidrológicas Administrativas (Figura 1.2), distribuidas en 37 Regiones Hidrológicas (RH) las cuales se clasifican en 757 cuencas hidrológicas que son zonas de la superficie terrestre en donde existe una acumulación de agua y son drenadas hacia una corriente, se clasifican por su punto de salida y las podemos dividir en dos tipos: endorreicas y exorreicas, éstas pueden depositarse a un lago o río, superficial o subterráneo (SMA, 2018).



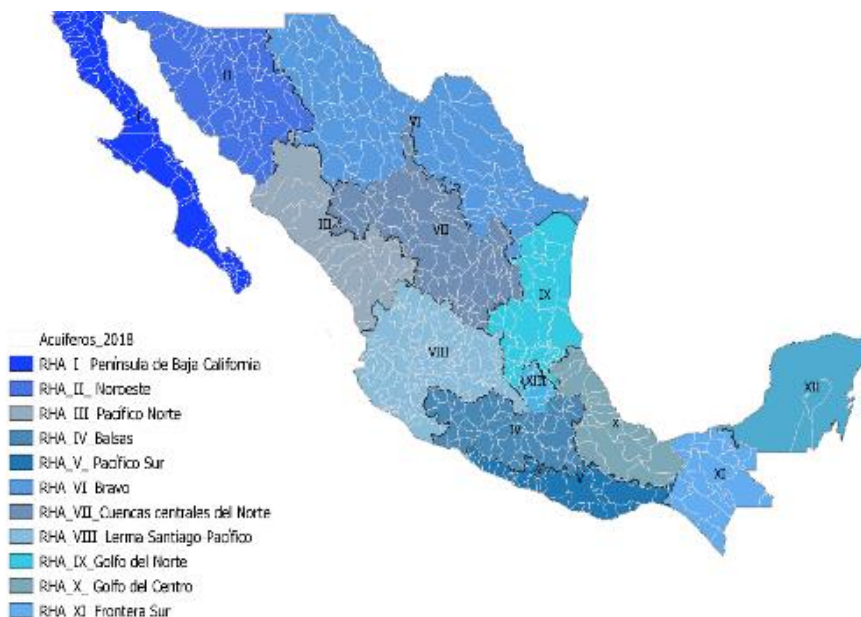
Fuente: Modificado de CONAGUA, 2017

Figura 1.2 Regiones Hidrológicas Administrativas de México

1.2.2 Aguas subterráneas

Al agua que se encuentra en el subsuelo, en formaciones geológicas parcial o totalmente saturada, le llamamos subterránea. Su importancia radica en la magnitud del volumen utilizado, el 75% del agua que se consume en las ciudades viene del subsuelo; en México, la proporción es mayor en regiones áridas, donde el subsuelo suele ser la principal o la única fuente permanente de agua. En términos nacionales, agua subterránea es una de las principales fuentes de abastecimiento de agua potable, su uso a nivel nacional es del 39.20% (CONAGUA, 2018).

Administrativamente, el país se divide en 653 acuíferos (Figura 1.3) que son formaciones geológicas o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectados entre sí, por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento. En México 115 acuíferos se encuentran sobreexplotados y 50 contienen agua salada marina o se encuentran en suelos salinos, por lo que solo el 24% es adecuado para su explotación y 195 no están disponibles para su explotación (CONAGUA, 2018a; CONAGUA, 2017; CONAGUA, 2018b; CONAGUA, 2019; DOF, 2016).



Fuente: Modificado de CONAGUA, 2017.

Figura 1.3 Acuíferos por Región Hidrológica Administrativa

1.2.3 Contaminación del agua

El concepto de contaminación de agua se refiere a la presencia de materiales en el agua en cantidad suficiente para producir cambio químico, físico o biológico en su calidad, que produzca efectos negativos a la salud y medio ambiente o cualquier cosa viva que la consuma de modo que no reúna las condiciones para el uso destinado. Por tanto, la contaminación del agua priva a la humanidad de recursos hídricos fundamentales para agricultura y de agua potable.

La afectación en agua es producida por actividades antropogénicas y naturales, las que podemos subdividir en biológicas y químicas, algunos de estos procesos contaminantes provienen de actividades como la minería, meteorización, excretas de animales y descargas de aguas residuales, que introducen agentes patógenos, compuestos químicos y orgánicos al agua (Guadarrama-Tejas R., 2016; Gutierrez & Becerra, 2014), entre otros contaminantes Tabla 1.5.

Tabla 1.5 Contaminantes y procesos de afectación de la calidad de agua.

CONTAMINANTE O PROCESO	DESCRIPCIÓN	FUENTE
Contaminantes orgánicos	Se descomponen en el agua y disminuyen el oxígeno disuelto, induciendo la eutrofización	Industriales, domésticas, asentamientos humanos
Nutrientes	Incluyen principalmente fosfatos y nitratos, su incremento en el agua induce a una eutrofización. Se originan de desechos humanos y animales.	Domésticas, industriales, escorrentía de fertilizante agrícola, detergentes.
Metales pesados	Se originan principalmente alrededor de centros industriales y mineros. También pueden provenir de actividades militares o a través de lixiviados.	Industriales, mineras, asentamientos humanos, actividades militares.
Contaminación microbiológica	Desechos domésticos no tratados, criaderos de animales (E. coli, amibas).	Municipales
Compuestos tóxicos orgánicos	Químicos industriales, dioxinas, plásticos, pesticidas agrícolas, hidrocarburos de petróleo y policíclicos generados de la combustión del petróleo.	Industriales, asentamientos humanos, escorrentía agrícola
Acidificación	Está relacionada con un pH bajo del agua dado por la deposición sulfúrica producida por la actividad industrial y por las emisiones urbanas.	Industriales y fuentes municipales.

Fuente: Modificado de Escobar *et al.*, 2002.

Dentro de las actividades antropogénicas contaminantes de agua se encuentra la generada por RSU que han afectado tanto agua superficial como subterránea con procesos como la disposición inadecuada de RSU, RP y RME en terrenos baldíos, bodegas, almacenes y patios de las industrias; o lixiviación de materiales en RESA y SNC (SEMARNAT, 2012). Los contaminantes presentes con mayor frecuencia en sitios contaminados por esta actividad son componentes químicos inorgánicos como los MP. El incremento de la concentración de estos elementos en las aguas es debido a procesos de lixiviación de los materiales dispuestos en los SNC. Estos elementos representan un riesgo para la salud humana, ya que su consumo o ingesta provoca enfermedades y efectos negativos. En tanto que, la presencia de nitratos (NO_3^-) provocan en los niños el síndrome del niño azul; el fosfato (PO_4^{3-}) provoca

eutrofización; la presencia de Coliformes Fecales (CF) es indicativa de contaminación con excretas de organismos no necesariamente humanos; la presencia de plástico refiere a una predisposición al cáncer y es nocivo para microorganismos, plantas, animales y humanos (Cabrejos, 2019; Garcia M., 2020; Guadarrama-Tejas R., 2016; RNMCA, 2019). Algunas consecuencias de consumir agua contaminada con lixiviados procedentes de SDF de RSU se aprecian en la Tabla 1.6.

Tabla 1.6. Afectaciones provocadas por consumo de agua contaminada con lixiviados de Sitios de Disposición de Residuos Sólidos.

CONTAMINANTE	AFECCIÓN	NMC (mg/L)
Arsénico (As)	Lesiones en la piel; trastornos circulatorios; alto riesgo de cáncer.	0.0500
Benceno	Anemia; trombocitopenia; alto riesgo al cáncer	0.0050
Bifenilos policlorados (PCB)	Cambios en la piel, problemas de glándula timo, deficiencia de reproducción y sistema nervioso.	0.0005
Cadmio (Cd)	Lesiones renales, trastornos respiratorios y pérdida de peso	0.0050
Cromo (total)	Dermatitis alérgica	0.1000
Cobre (Cu)	Molestias gastrointestinales, lesiones hepáticas o renales, necrosis hepática	1.3000
Estireno	Trastornos hepáticos renales o circulatorios	0.1000
Plomo (Pb)	Inhibidor de enzimas, retardo en desarrollo físico y mental en niños y trastornos renales e hipertensión en adultos.	0.0150
Mercurio (Hg)	Lesiones renales	0.0020

NMC: Nivel Máximo del Contaminante en agua potable.

Fuente: Modificado de EPA, 2017; Guadarrama-Tejas et al, 2016; Gutiérrez & Becerra, 2014;

La calidad de agua se determina basada en sus características fisicoquímicas y bacteriológicas, para llevar a cabo su evaluación y análisis es necesario el monitoreo de estos componentes, desde la perspectiva de uso (Pradana Pérez, 2019; Sierra-Ramírez, 2011).

Basados en la vinculación de uso y calidad de agua, se establecen estándares y criterios de calidad que definen los requisitos que han de reunir para un fin específico, requisitos generalmente expresados en rangos cuantitativos determinados por características físicas, químicas y biológicas (Moreno, 2010) y normadas para regular la calidad de agua para diversos usos (Tabla 1.7).

Tabla 1.7 Normatividad utilizada para evaluar calidad de agua

NORMA	USO	PARÁMETROS
NOM-127-SSA1-2000 ^a	Uso y consumo humano	Físicos, químicos y bacteriológicos
NOM-001-SEMARNAT-2021 ^b	Descarga en aguas nacionales	Físicos, químicos y bacteriológicos
EPA 815-F-00-007 ^c	Calidad de agua	Físicos, químicos y bacteriológicos

Fuente: DOF, 2021^a, DOF 2020^b, USEPA 2017^c

NOM: Norma Oficial Mexicana, EPA: Environment Protection Agency USA.

La Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua, utiliza para el diagnóstico de calidad de agua superficial indicadores como DBO₅, DQO, Sólidos Suspendidos Totales (SST), CF y MP (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y zn) entre otros (CONAGUAa, 2022).

La DBO₅ y la DQO son indicadores de la cantidad de materia orgánica presente en los cuerpos de agua. La DBO₅ indica la cantidad de materia orgánica biodegradable, el incremento de su concentración incide en la disminución del contenido de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua con la consecuente afectación a los ecosistemas acuáticos, tales que se consideran contaminados si sobrepasan los 30 mg/L. En tanto que la DQO indica la cantidad total de materia orgánica, se considera contaminada si este valor sobre pasa los 40 mg/L. Los SST miden la cantidad de sólidos sedimentables, sólidos y materia orgánica en suspensión y/o coloidal, el incremento de los niveles hace que un cuerpo de agua pierda la capacidad de soportar la diversidad de la vida acuática (CONAGUA, 2019).

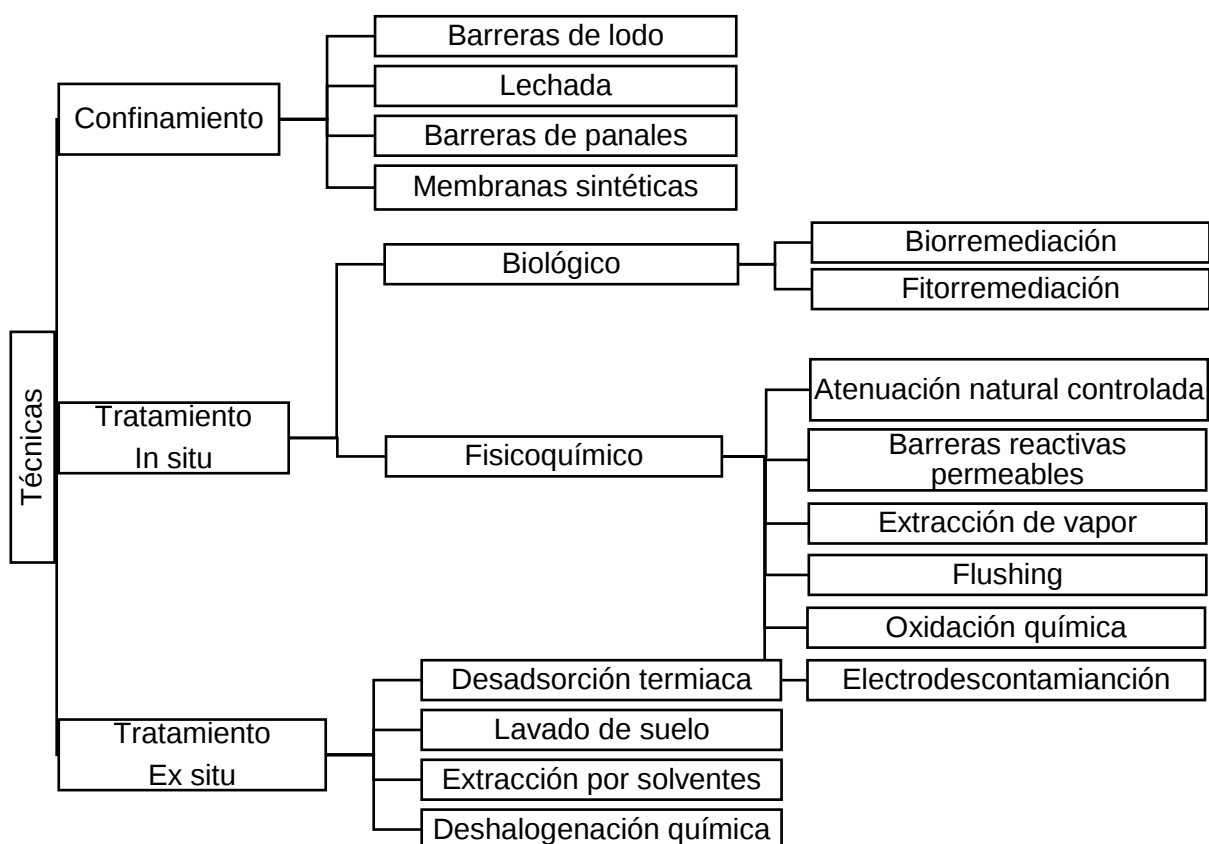
1.3 TÉCNICAS DE PROTECCIÓN Y REMEDIACIÓN EN CUERPOS DE AGUA

La protección de cuerpos de agua se realiza generalmente para proteger las áreas aledañas contra procesos de erosión, mientras que los protocolos de remediación inician en países desarrollados con la finalidad de proteger a la salud humana de la contaminación en suelo y agua, producida por la segunda guerra mundial. Desde entonces se han desarrollado técnicas de tratamiento tradicionales e innovadoras para contrarrestar la dispersión de procesos contaminantes. En México son pocos los trabajos elaborados, el primero en ser registrado se elaboró en 1990, donde se realizó un estudio para determinar la contaminación por fuga de hidrocarburos. (Gutiérrez & Becerra, 2014).

Para el control, remediación y reducción de contaminantes en cuerpos de agua se ha implementado una variedad de métodos específicos para la problemática de una zona. Estas técnicas involucran trabajos de investigación extensos que interrelacionan disciplinas como son la geología, hidrología, química, ingeniería y construcción. El análisis de sitio y de su entorno no sólo implica el reconocimiento visual *in situ* de la zona de estudio para conocer el contexto del proyecto, sino fundamentalmente se requiere identificar al sitio o al emplazamiento en el que se interrelacionan diferentes procesos y factores, para establecer la técnica de remediación adecuada.

Las tecnologías de remediación de aguas abarcan todas aquellas operaciones que tienen por objetivo reducir la toxicidad, movilidad o concentración del contaminante presente en el medio, a través de acciones químicas, físicas o biológicas (FCH, 2015). En la implementación de medidas remediales para agua tanto superficial como subterránea se utilizan, por lo general, las mismas tecnologías con métodos e ingeniería distintos. Para la elección del sistema óptimo; el parámetro más importante a conocer es la dirección del flujo sin dejar de lado el volumen de agua que entra al sitio, otros factores importantes a considerar son el tipo de contaminante y la velocidad

de limpieza. Estas tecnologías se clasifican en general en técnicas de confinamiento, tratamientos *in situ* y tratamientos *ex situ* (Figura 1.4).



Fuente: FCH, 2015; Gutiérrez & Becerra, 2014

Figura 1.4 Tecnologías para protección de agua superficial y subterránea.

Las técnicas de confinamiento consisten en la contención, aislamiento o estabilización de la zona contaminada con el objetivo de evitar la propagación o transferencia lateral. El tratamiento *in situ* es el que se aplica sin necesidad de trasladar el medio afectado por el problema, es decir se trata en el mismo sitio. Suelen ser de utilidad cuando se afecta a un volumen muy importante del suelo, que haga inviable su aislamiento y su tratamiento *ex situ*, o cuando se busca un menor costo. Los tratamientos *ex situ* tienen en común que el medio contaminado es removido de su lugar original y tratado en una planta externa (off site) o en el mismo sitio (on site), para la eliminación del contaminante mediante una variedad de técnicas disponibles, requiere de excavación,

dragado u otro proceso de remoción (FCH, 2015; Gutierrez & Becerra, 2014; Volke Sepúlveda & Antonio Velasco, 2002).

1.3.1 Aplicaciones e investigaciones

Hoy en día algunos de los trabajos estudiados en los que podemos revisar las problemáticas, soluciones y recomendaciones para mitigar la contaminación de fuentes hídricas son las elaboradas por;

Grajales-Mesa *et al.* (2020), realizó estudios para diseñar una barrera reactiva impermeable para controlar la contaminación de aguas subterráneas. Revisó hidrología y estratigrafía de 39 pozos y piezómetros. Los resultados mostraron que para una conductividad hidráulica entre 1×10^{-7} a 4×10^{-4} m/s, con concentraciones de TCE hasta 6 130 $\mu\text{g/L}$ y una precipitación de 847 mm (20-25%), se puede implementar una barrera reactiva rellena de composta y carbón café (lignito), con dos pantallas y una compuerta, de 1,310 m de longitud, 3 m de espesor y un ángulo de 180 grados en la zona contaminada. Para su control se instalaron pozos de observación que permitirán evaluar el desempeño de la barrera a lo largo del tiempo.

Susunaga-Miranda *et al.* (2020), realizó una caracterización de arena sílica para comparar sus propiedades con materiales usados para barreras reactivas permeables y usarla como para la remediación de acuíferos contaminados por lixiviados de SNC. Mediante análisis granulométrico, determinación de humedad y concentración de sílice y fierro determinó su cumplimiento.

Por su parte, León-Gómez *et al.* (2015), realizó un estudio sobre el impacto de lixiviado generado en un RESA municipal en México, donde evaluó la calidad del agua superficial y subterránea. Revisó el cumplimiento químico de la normatividad en el RESA analizando la presencia de lixiviados en aguas de la presa cercana, del arroyo y de pozos aledaños. Como resultado, se encontró la geomembrana rota y nula gestión de lixiviados, se obtuvieron altas concentraciones de NO_3^- ($>10 \text{ mg/l}$) Pb ($>10 \mu\text{g/l}$)

Mn ($>150 \mu\text{g/l}$) Fe ($>300 \mu\text{g/l}$) por lo que recomendó un programa de monitoreo, tratamiento de lixiviados, y modelado hidrogeológico.

Por otro lado, Herráez Sánchez *et al.* (2015) recomienda realizar tres estudios en diferentes fases de la vida de un RESA para controlar la contaminación de aguas subterráneas. Las medidas de control que recomienda deben ser planteadas desde la etapa constructiva del sitio, para evitar posibles condiciones adversas (tormentas, crecidas, inundaciones, roturas de diques, inestabilidad del terreno, fugas descontroladas, riesgos sísmicos, incendios, etcétera), que aseguren y controlen la estanqueidad y estabilidad y por lo tanto fugas, medidas de seguridad y planes de emergencia. Lo más importante dice, son los sistemas de impermeabilización, aislamiento y drenaje, los que requieren una mayor atención y cuidado a la hora de su instalación puesto que son el punto clave de posibles problemas con la contaminación de las aguas subterráneas.

Hablando de Ordoñez Suarez *et al.* (2015) en su trabajo realizado en España; “Procesos y tecnologías emergentes de remediación de aguas subterráneas contaminadas con disolventes clorados”, demostró que la contaminación de agua subterránea se puede remediar mediante muros de lodos y controles hidráulicos, sin embargo, este sistema tiene que ser indefinido debido a su inestabilidad. La reducción del contaminante se puede aumentar por medio de reacciones químicas o biológicas aplicadas en el lugar de contención.

Otras investigaciones que complementan la instalación de un sistema de control de contaminantes son los que se muestran en la Tabla 1.8.

Tabla 1.8 Resumen de los antecedentes para esta investigación.

AUTOR/AÑO	PAÍS	TITULO	DESCRIPCIÓN
Victoria R. Propp a Amila O. De Silva (2021)	Canadá	Organic contaminants of emerging concern in leachate of historic municipal landfills	Evaluó el posible impacto de la filtración de lixiviado en 20 RESA. Se encontró la presencia de productos orgánicos y PFAS en aguas subterráneas al analizar muestras de agua y suelo.
Sousa Pessoa et al (2019)	Brasil	Avaliação de impactos ambientais em área de disposição final de resíduos sólidos no semiárido.	Se evaluó el SDF del municipio de campaña Grande en Brasil, conforme a la Política Nacional de Sólidos, mediante registro fotográfico y lista de verificación aérea. Se detecto que no había eliminación de RS del sitio, a pesar de que ha estado deshabilitado durante años y se observaron sitios con acumulación de lixiviados.
Niño (2016)	México	Contaminación fisicoquímica de acuíferos por los lixiviados generados del Relleno Sanitario. El Carrasco, de Bucaramanga	Se realizó en el área de influencia directa del RESA. Por medio de sondeos eléctricos verticales se establece un modelo con MODELFLOW para determinan ruta de migración de los contaminantes presentes en los lixiviados.
Allende-Ccahuana (2005)	Perú	A geological - geotechnical study of the area for a sanitary fill in the city of suyo, province of ayabaca, department of piura	Revisó área que presenta condiciones geológicas-geotécnicas para la instalación de RESA, pero con medidas como la impermeabilización de la base del RESA, para controlar la filtración de lixiviados, para mantener estables las estructuras formadas, y adecuar un sistema de drenaje de evacuación de las aguas de precipitación pluvial.

En México se han aplicado técnicas de remediación principalmente en zonas contaminadas con hidrocarburos y cromatos, el método más utilizado fue el de extracción y eliminación del contaminante para saneamiento del sitio.

1.3.2 Estudios complementarios

Para la elección del método adecuado, es necesario el análisis del sitio donde es básico identificar, analizar, comprender, revisar, actualizar y considerar los elementos físico-biótico y la información que se tiene. El sistema de información debe estar conformado por todos los aspectos relacionados con el medio natural, en general, lo que refiere a la localización y caracterización del sitio; las características del contaminante y las características del medio donde se transporta; suelo y/o agua (Volke Sepúlveda & Antonio Velasco, 2002).

Para identificar las características del contaminante es necesario evaluar mediante estudios fisicoquímicos *in situ* o en el laboratorio para determinar su concentración, grado de toxicidad, densidad, solubilidad entre otros.

Para determinar las características del medio de transporte de un contaminante existen diferentes métodos, y su selección depende de la naturaleza del sitio. El suelo, por ejemplo, constituye un recurso natural que desempeña diversas funciones en la superficie de la Tierra, proporcionando un soporte mecánico, así como nutrientes para el crecimiento de plantas y microorganismos. La matriz del suelo está formada por cinco componentes principales: minerales, aire, agua, materia orgánica y organismos vivos, todos estos factores definen el tipo de suelo.

Los aspectos que se deben considerar antes de la selección del tipo de remediación son entre otros, el tamaño de la partícula, densidad y permeabilidad. Para determinar el tamaño de la partícula, en México, la clasificación del suelo se determina a través de dos sistemas el ASSTHO y el Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), este último es el método utilizado con fines de ingeniería el cual puede ser aplicado en general en materiales sin consolidar que, junto con condiciones particulares del sitio, pueden limitar o anular la selección de un proceso de tratamiento. Otros aspectos importantes que considerar son:

- El pH: determina el grado de alcalinidad o acidez, expresado en una escala numérica del 0 al 14, que corresponde a la actividad del logaritmo negativo de los iones hidrogeno.
- La conductividad eléctrica (σ): propiedad de un material que le permite conducir el flujo de la electricidad (DOF D. , 2002).
- Humedad: este parámetro aplica solo para el caso de suelos. Normalmente el contenido óptimo de agua para reacciones de degradación en la zona insaturada del suelo estará entre 40 y 60% de la capacidad de retención de agua del suelo. En suelos más secos, las velocidades de degradación serán menores (FCH, 2015).

1.4 CONTAMINACIÓN DE AGUA POR RESIDUOS SÓLIDOS EN EL ESTADO DE MÉXICO

El Estado de México (EdoMéx), es la entidad con mayor población a nivel nacional cuenta con 16,992,418 habitantes (INEGI, 2022), genera 16,739 toneladas por día (t/día) de RSU, de los cuales los ayuntamientos municipales recolectan el 74.13%. Para su disposición el estado cuenta con 17 RESA y seis Centros Integrales de Residuos, además de SC y SNC, en algunos municipios los RSU se almacenan temporalmente en alguna de las 12 ET (SEMARNAT, 2022a; SEMARNAT, 2020a; SMAGEM, 2022).

Hasta 2019, el EdoMéx contó con 104 SDF (CGPCEDOMEX, 2019), de los cuales 68 son SNC, por lo que se consideró que el 45 % de los SDF registrados ante la Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México SMAEM no cuentan con infraestructura para captura de lixiviados, lo que ha generado posible contaminación en agua, suelo y aire.

Entre los años 2016 y 2018 se reportó una reducción de 20 a 12 ET, de las cuales tres son para almacenamiento temporal, en dos se realizó proceso de compactación y/o selección de materiales, en tres selección o separación de residuos, en uno el trasvase

y en seis el proceso de trituración (SEMARNAT, 2022b; SEMARNAT, 2020a; SEMARNAT, 2017b).

Los gobiernos estatales y el federal establecen normas para regular, seleccionar y gestionar, entre otras actividades, la disposición de RS. En el EdoMéx, la SMAEM es la encargada del cumplimiento de las disposiciones legales en materia de residuos a través de la Procuraduría de Protección al Ambiente del Estado de México (PROPAEM), algunas de sus funciones son regularizar, inspeccionar y clausurar los SDF conforme a la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004), sin embargo, solo el 60% de los SDF que operan en la entidad cumplen con las disposiciones que marca esta normativa (Cardenas-Moreno *et al.*, 2019), sin contar las malas prácticas.

Como ejemplo, tenemos el caso de la disposición inadecuada de RME (residuos de la construcción) para la construcción de viviendas, que se realizó en el lago de Xico, en Valle de Chaco que es una reserva ecológica, lo cual provoca afectación en flora, fauna y en el almacenamiento hídrico (Velazco, 2022).

El deficiente control de lixiviados en el RESA de Puente de Piedra provoca la contaminación del Río San Juan, el cual descarga en la presa Madín, que presentó muerte de peces y malos olores, aunado a la descomposición de RSU mal dispuestos en sus laderas y a descargas de aguas residuales sin tratamiento. En los estudios de calidad de agua se encontró Fe y Al en concentraciones de MP fuera de la norma. El riesgo ambiental es mayor debido a que esta presa se utiliza para consumo de agua potable de los poblados aledaños (Universal, 2021).

Otro ejemplo de contaminación es la Laguna de Tlapacoya en el municipio de Toluca, donde los trabajadores y usuarios del transporte acuático son propensos a contraer enfermedades debido a la lixiviación de residuos orgánicos, RSU y RME que se encuentran mal dispuestos en sus orillas (Olvera, 2020).

Otra problemática en el estado son los sitios no controlados, los cuales vierten los desechos sin control por lo que no es cuantificable el daño que están provocando al

medio que los rodea y a posibles filtraciones a cuerpos de agua subterráneos (Roman, 2022).

El uso del agua en el EdoMéx en general es para riego y agua potable, parte de este último se exporta a otra entidad. Hidrológicamente en el Estado se encuentran tres RH; RH12-Lerma-Santiago, RH18-Balsas y RH26-Pánuco, y nueve acuíferos; 1501 Valle de Toluca, 1502 Ixtlahuaca-Atlacomulco, 1503 Polotitlán, 1504 Tenancingo, 1505 Villa Victoria-Valle de Bravo, 1506 Chalco-Amecameca, 1507 Texcoco, 1508 Cuautitlán-Pachuca y 1509 Temascaltepec (CONAGUA, 2022b), la contaminación cualquiera de ellas es de relevancia pues influye en la calidad del recuso que se consumen.

2. METODOLOGÍA

El proceso metodológico que se aplicó para desarrollar esta investigación se muestra en la Figura 2.1:

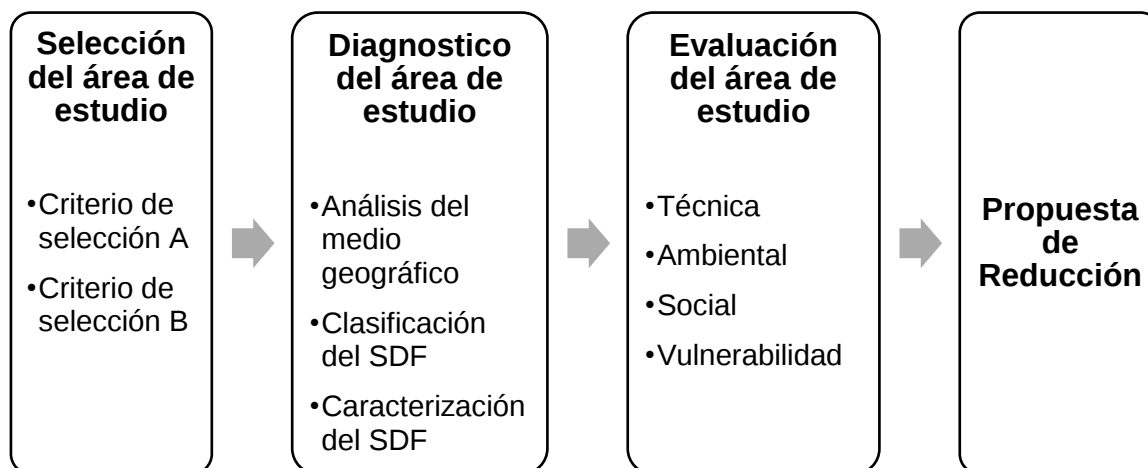


Figura 2.1 Metodología general de estudio

2.1 SELECCIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a 60 municipios del EdoMéx colindantes con las zonas metropolitanas. Para delimitar el área del proyecto se elaboró un mapa en el programa *ArcGIS online*, ahí se ubicaron los municipios referidos. Mediante investigación documental, y fuentes de información espacial de libre acceso (CGPCEDOMEX, 2019; DGPCEM D. G., 2018; DGPCEM D. G., 2015; INEGI, SIATL, 2012), se identificaron los SDF ubicados en el área de estudio con apoyo del programa Google Earth Pro (Google, 2019); a continuación, en el mismo programa, se verificaron, actualizaron y corrigieron las ubicaciones geográficas de cada SDF. Se elaboró una base de datos con información de cada SDF que incluyó coordenadas geográficas, clasificación, altitud y región hidrológica (DOF, 2004).

Con esta información se creó una capa tipo shape para construir un mapa de referencia y mapas temáticos por cada SDF en el programa QGIS 3.10, un Sistema de

Información Geográfico (SIG), donde se montaron datos hidrológicos y topográficos en formatos Shape y Web Map Service (WMS) obtenidos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA) y la Comisión Nacional de Biodiversidad (CONABIO) (CONAGUA, 2019; INEGI, 2019; CONABIO, 2017). Con toda esa información en QGIS, se evaluó la zona geográfica y se determinaron los sitios idóneos para los objetivos de este estudio.

La elección de los sitios de estudio se realizó mediante dos criterios de selección; A) Conjunto de SDF por RH; y B) Listado de SDF caracterizados por Santana Rodríguez *et al.* (2017). Las etapas de trabajo para cada uno de los dos procesos se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Etapas de trabajo para cada proceso de selección.

CONJUNTO DE SDF POR RH	LISTADO DE SDF
• Delimitación de conjuntos conforme a RHA • Creación de capas de SDF y ET • Montaje de capas por SDF y ET • Aplicación de criterios de exclusión • Análisis y selección de los sitios	• Ubicación del grupo muestral • Creación de capas de SDF y ET • Montaje de capas por SDF y ET • Aplicación de criterios de exclusión • Análisis y selección de los sitios

En los mapas temáticos para cada SDF, se aplicaron criterios de exclusión, a propósito de elegir los sitios con base en las secciones 6.1.4 a la 6.1.7 de la NOM-083-SEMARNAT-2003 y mediante proporción indirecta se utilizaron los siguientes (DOF-2004):

- a) El SDF debe de estar ubicado a una distancia máxima de 500 metros de una corriente de agua superficial
- b) El SDF debe de estar ubicado en zona de recargas de acuíferos
- c) El SDF debe de estar ubicado a una distancia máxima de 500 metros de un cuerpo de agua.

- d) El SDF debe de estar ubicado a una distancia máxima de 500 metros de una fuente de abastecimiento de agua potable.

Por medio de una ponderación binaria, donde uno es cumple y cero es incumple, se realizó la suma algebraica para obtener los sitios de mayor puntaje los cuales fueron los SDF elegidos.

2.2 DIAGNÓSTICO DE LOS SITIOS DE ESTUDIO

Se realizó la descripción del municipio y de la ubicación del sitio y la caracterización del entorno. Para la realización del diagnóstico se contemplaron varias etapas las cuales se refieren a continuación:

2.2.1 Medio geográfico

Se realizó la recopilación de información geográfica de cada municipio y de cada sitio de estudio, por medio de fuentes gubernamentales y académicas, que incluyó: Clima, Hidrografía, Fisiografía, Geología, Uso de Suelo y Vegetación y Áreas Naturales Protegidas. Esta información se complementó al realizar visitas de campo al sitio para conocer la situación actual y manejo de los RSU.

Se utilizó el Sistema de Información Geográfica de Evaluación Ambiental (SIGEA), para ubicar a los sitios seleccionados del estudio y se verificó si se ubican en Áreas Naturales Protegidas.

Se realizó un mapa hidrográfico para identificar los afluentes y cuerpos de agua cercanos, que permitió verificar el cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003 y determinar la posible contaminación del sitio. Después se revisó la información, se analizó y se actualizó para poder describir los datos hidrográficos.

2.2.2 Clasificación del sitio

Para clasificar el SDF según su tipo (RESA, SC o SNC), se realizó una investigación documental de las características del sitio (nombre, superficie, área utilizada y vida útil, entre otras) y se comparó con la información publicada, referente al manejo de los servicios de recolección y disposición de RS del municipio (SEMARNAT, 2020b; DGPCCEM D. G., 2015).

Con apoyo de un Dron DJI Phantom 4 en los SDF, se sobrevolaron las zonas de disposición actuales. Se describió la infraestructura existente, la operación del SDF y la existencia de valorización de RSU. Se calculó el promedio de toneladas recibidas en el SDF, según los registros municipales y estatales del INEGI y de la SEMARNAT.

Debido a que no hay certeza del año de instalación de los SDF, se elaboró un análisis histórico del sitio por medio de imágenes satelitales de Google Earth, donde se detectaron áreas de tiro y disposición de RSU y, en su caso RME, utilizando las herramientas de área, perímetro, distancia y perfil topográfico (Google E. , 2020).

De acuerdo con la cronología fotográfica satelital, se calcularon las áreas de afectación por la disposición de RSU, delimitando el área de uso por año y posteriormente se consideró los vértices externos de las áreas afectadas (AF#) para calcular el área total por AF#.

2.2.3 Caracterización del sitio

La caracterización del SDF se realizó por medio del muestreo y evaluación de agua, suelo y lixiviados; para conocer sus características físicas, químicas y biológicas. El muestreo se realizó en los periodos de época de lluvias y en estiaje.

- a) Muestreo y caracterización de agua. Las muestras de agua fueron obtenidas por duplicado con la NMX-AA-014-1980 en cuerpos superficiales (DOF, 1980), para los sistemas de abastecimiento de agua para consumo humano se utilizó la NOM-014-SSA1-1993 (DOF, 1994), ambas muestras fueron trasladadas al Laboratorio

de Investigación de Ingeniería Ambiental (LIIA) del Instituto Tecnológico de Toluca (ITTol).

Los parámetros determinados en la caracterización fisicoquímica fueron: temperatura (T), potencial de hidrogeno (pH) conductividad eléctrica (σ), Solidos volátiles totales (SVT), DQO, DBO₅, nitrógeno amoniacal (N-NH₃), sulfatos (SO₄⁻²) y MP, mediante las normas y métodos que se listan en la Tabla 2.2. Los resultados se compararon con los Límites Máximos Permisibles (LMP) de la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 1996) y el proyecto de la NOM-127-SSA1-2021, si el recurso es para agua potable y la CE-CCA-001/89, si el agua es utilizada para riego.

Tabla 2.2 Parámetros analíticos para agua

PARAMETRO	NORMA/MÉTODO
T	NMX-AA-008-SCFI-2011 ^d , NMX-AA-007-SCFI-2016
pH	NMX-AA-008-SCFI-2016 ^a
σ	NMX-AA-093-SCFI-2000 ^e
SVT	NMX-AA-034-SCFI-2015 ^b
DQO	Método dicromato, aprobado por la USEPA ^c
DBO ₅	NMX-AA-028-SCFI-2001
N-NH ₃	NMX-AA-026-SCFI-2010
SO ₄ ⁻²	NMX-AA-074-SCFI-2014 ^f
MP	NMX-AA-051-SCFI-2016, método de absorción atómica

Fuente: ^aSE, 2016a; ^bSE, 2015; ^cFNS, 2013; ^dSE, 2013; ^eSCFI, 2000; ^fSE, 2016b; SE, 2021

En las muestras se determinó la presencia de Coliformes Fecales (CF) y Coliformes Totales (CT), mediante el método de filtración de membrana en el laboratorio de investigación de microbiología del Edificio LIIA, bajo la Norma NMX-AA-102-SCFI-2006 (GOB, 2006) o la NMX-AA-042-SCFI-2015 (DOF, 2015). Los resultados se compararon con LMP de la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 1996) (Tabla 2.3) o en su caso con la NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF, 2022) y CE-CCA-001/89 (DOF, 1989).

Las muestras para las determinaciones bacteriológicas se recolectaron, una sin conservación y la otra con preservación, en frascos de polietileno con tapón de rosca estériles de 500 ml y se conservaron en una hielera a 4°C. La prueba se realizó 6 horas después de la recolección de las muestras cumpliendo con lo que marca la norma.

Tabla 2.3 Límites Máximos Permisibles bacteriológicos

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
Organismos coliformes totales (CT)	2UFC/100 ml
Organismos coliformes fecales (CF)	Cero UFC/100 ml

Fuente: DOF, 1996.

Para la esterilización de los materiales se utilizó un horno de aire caliente (marca Riossa digital modelo HCF-62) y una autoclave marca Felisa (Figura 2.2), a 120°C.



Figura 2.2 Equipos utilizados para la determinación de Coliformes Fecales y Totales

Como solución diluyente se utilizó fosfato monobásico de Potasio (KH_2PO_4), preparada en 500 ml de agua destilada para CT y desionizada para CF ajustada a pH 7.5, la cual se aforó a 1000 ml de agua con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 1 mol/L. Se realizaron diluciones de 1×10^0 , 1×10^1 y 1×10^2 y dos blancos (B1 y B2) y se procedió al filtrado. Posterior a la filtración, las diluciones se llevaron a una caja Petri con un medio selectivo; “Base para caldo m FC” para CF

y se incubaron a $36^{\circ}\text{C} \pm 5$ por 24 horas, y “Caldo m Endo MF” para CT incubadas a $36^{\circ}\text{C} \pm 5$ durante 22 horas, en la incubadora marca Riossa digital E-71.

El conteo de microorganismos se realizó mediante cuenta directa de las colonias desarrolladas en las membranas (GOB, 2006). Finalmente se realizó el cálculo del número de microorganismos presentes en 100 ml de la muestra, mediante la fórmula siguiente que se expresa como se muestra en la ecuación 2.1:

$$\frac{\text{Colonias coliformes totales}}{\text{volumen de referencia}} = \frac{\text{Colonias coliformes contadas} \times \text{volumen de referencia}}{\text{Volumen filtrado de la muestra}}$$

$$C_s = \frac{\sum N_i}{(n_1 V_1 F_1) + (n_2 V_2 F_2) + \dots + (n_n V_n F_n)} V_s \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

C_s = número de unidades formadoras de colonias en el volumen V_s de la muestra.

$\sum N_i$ = suma de las colonias en todas las cajas o membranas contadas filtradas/siembra de disolución F_1 .

n_1 = número de cajas contadas para una disolución F_1 .

V_1 = volumen de disolución de la muestra F_1 en la placa i .

F_n = disolución usada para la porción de muestra V_1 ($F=1$ una muestra no diluida).

b) Muestreo y caracterización de Lixiviados. Para determinar la contaminación producida por lixiviados provenientes de los SDF, se realizaron determinaciones fisicoquímicas y de MP.

Para la caracterización fisicoquímica, los lixiviados fueron considerados como agua residual, compuestos de alta carga orgánica, orgánicos solubles y compuestos inorgánicos. Fueron muestreados con la NMX-AA-003-1980 (DOF, 1980), debido a que en México no se cuenta con una Norma para determinar características químicas y físicas en lixiviados.

Los parámetros determinados en la caracterización fisicoquímica fueron: T, pH, O, DQO, SVT, N-NH₃, SO₄⁻² y MP. Las muestras se analizaron mediante las normas y métodos que se listan en la Tabla 2.4, y comparadas con las Normas Oficiales Mexicanas NMX-052-SEMARNAT-2005 (DOF, 2006) y NMX-001-SEMARNAT-2021 (DOF, 2022).

Tabla 2.4 Parámetros analíticos para lixiviados

PARAMETRO	NORMA/MÉTODO
T	NMX-AA-007-SCFI-2016
pH	NMX-AA-008-SCFI-2016 ^a ,
O	NMX-AA-093-SCFI-2000 ^e
SVT	NMX-AA-034-SCFI-2015 ^b
DQO	Método dicromato, aprobado por la USEPA ^c
DBO	NMX-AA-028-SCFI-2001
N-NH ₃	NMX-AA-026-SCFI-2010
SO ₄ ⁻	NMX-AA-074-SCFI-2014
Metales pesados	NMX-AA-051-SCFI-2016 ^f

Fuente: SE, 2016a; SE, 2015b; FNS, 2013c; dSE, 2013; eSCFI, 2000; fSE, 2016b, SE, 2021

La presencia de CF y CT se determinó bajo la Norma NMX-AA-102-SCFI-2006 (GOB, 2006). Los resultados se compararon con los LMP establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 1996) y la NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF, 2022).

c) Muestreo y caracterización de suelo. Se realizó un recorrido de campo para inspeccionar y seleccionar, en la zona, los puntos de muestreo anteriormente identificados mediante imágenes satelitales. Se obtuvieron muestras de suelo alteradas a cielo abierto, de suelo sano y muestras de suelo con lixiviado.

Las muestras de suelo sano se envasaron en recipientes de polietileno, previa cobertura de suelo con película de polietileno para conservar sus características. Las muestras se trasladaron al LIIA, donde se realizó el examen visual-Manual

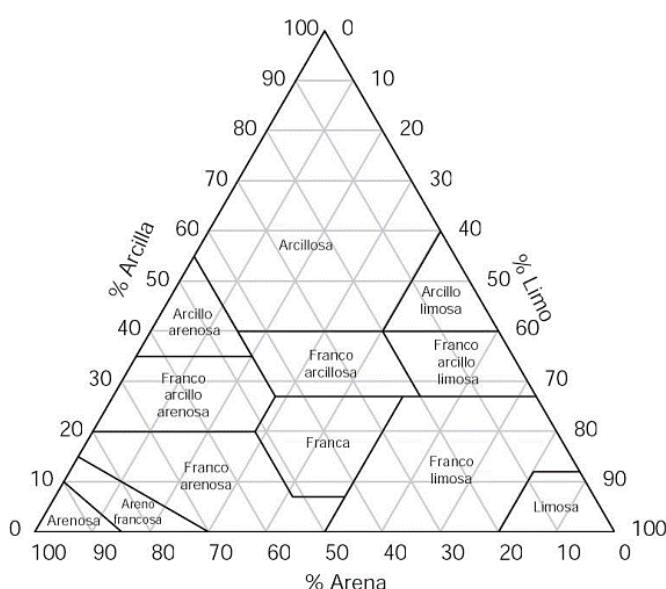
bajo la Norma ASTM Designation: D 2488-06 Standard Practice for description and identification of Soils (práctica estándar para descripción e identificación de suelos), en la cual se determinaron (por medio de una tabla de control), características en las fracciones gruesa y fina el color, el tono, la textura, el lustre y la humedad (ASTM, 2010).

Se realizó la identificación del suelo según el SUCS, mediante la prueba de tamiz, bajo la Norma NMX-C-416-ONNCCE-2003 (ONNCCE, 2013), que consistió en separar y clasificar por tamaños las partículas del suelo. El procedimiento para la preparación de la muestra consistió en varias etapas: limpieza de materiales orgánicos y RSU, secado, disgregación, cuarteo manual y tamizaje (Figura 2.3). Para el secado, se extendió la muestra en una superficie plana colocándola al sol.



Figura 2.3 Preparación de la muestra

La clasificación se ejecutó a través de tamizado en partículas menores a 3" con lo que se obtuvieron los porcentajes de grava finas, arena y arcilla en el suelo, así como los tamaños de partícula. Para los suelos finos se realizó el análisis de Textura mediante la técnica recomendada por el USDA (Departamento de agricultura de los Estado Unidos, por sus siglas en inglés), la cual utiliza un gráfico en forma de triángulo equilátero con porcentajes granulométricos de arena, arcilla y limo (USDA, 2021) (Figura 2.4).



Fuente: USDA, 2021

Figura 2.4 Triángulo Textural clasificación USDA

En los suelos finos, se realizó la prueba de índice Plástico, con lo que se obtuvieron el límite líquido y el límite plástico, estos se leyeron en la carta de plasticidad (Anexo A). Para este ensayo se utilizaron 400 g de suelo seco cribado por el tamiz #40, se le colocó agua hasta saturarla en porcentajes de 20 % y 2 %. Una vez maleable, se vertió en un recipiente cilíndrico para comprobar si se encontraba en su límite líquido por medio de penetración (Figura 2.5). Una vez llegado a su límite líquido se tomaron 5 g de la muestra y se pusieron a secar al horno por periodos de 30 minutos hasta lograr un peso constante.



Figura 2.5 Pruebas para la determinación de límite líquido y plástico.

Las muestras representativas de suelo con lixiviado fueron de tipo alterado y se extrajeron a 10 cm de profundidad con una pala. Las muestras se conservaron empleadas en un lugar fresco y se transportaron al LIIA, donde se les realizaron los análisis fisicoquímicos. Para la determinación de MP con absorción atómica, parte del suelo muestreado se preparó mediante secado natural y molienda (Figura 2.6), cumpliendo así con la NMX-AA-051-SCFI-2016 (DOF, 2016).



Figura 2.6 Preparación de la muestra de suelo contaminado

2.3 EVALUACIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO

A los sitios de estudio se les realizaron evaluaciones técnica, ambiental, social y de vulnerabilidad.

2.3.1 Evaluación técnica

Para el análisis de la ubicación del SDF y del ST se utilizó el SIGMIRSU (Mañón-Salas & Hernández Berriel, 2021), que proporciona una serie de mapas binarios de los municipios de la periferia del EdoMéx (60 municipios) y de los municipios vecinos (61) de los estados aledaños (Querétaro, Michoacán, Guerrero, Morelos, Puebla, Tlaxcala, Hidalgo y Ciudad de México). Para el SDF y el ST en cuestión, los mapas se generaron con base en los criterios indicados por la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004a) y al Método Analítico Jerárquico (AHP, Analytic Hierarchy Process, por sus siglas en inglés), los que al sobreponerse, permite la visualización de áreas idóneas (en color verde) y no idóneas (en color rojo). La información proporcionada por el SIGMIRSU se integró con el trabajo de gabinete realizado con las herramientas de INEGI (2021) y de Google Earth Pro (Google Earth, 2021).

Para realizar la evaluación técnica se aplicó la Tabla de Verificación (TV) elaborada por Hernández-Berriel *et al.* (2021) con base en la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004; Ortiz-Conde & Hernández-Barrios, 2012; SEMARNAT *et al.*, 2004). Dependiendo del cumplimiento del SDF, a cada condicionante se le asignó un valor: uno cuando “Cumple”, cero cuando “No Cumple y a las condicionantes que no se requiriere cumplir, se les marcó en la casilla “No aplica” y no se consideraron en la suma de la puntuación final.

2.3.2 Evaluación ambiental y socioeconómica

Se elaboraron evaluaciones de Impacto Ambiental y socioeconómica por medio de la Matriz de Leopold adecuada para las actividades realizadas en un SDF (Figura 2.7) y una ET. La Matriz de Leopold tiene por objetivo garantizar que los impactos de diversas

acciones sean evaluados, para lo cual se requiere la definición de dos aspectos “Magnitud” e “Importancia” (Ponce, 2022). Los criterios de valoración considerados para ponderar Magnitud e Importancia del impacto en cada sitio se obtuvieron de los trabajos de Conesa (1993) y Madrid-León (2011), los cuales se presentan para cada uno con su respectiva definición en la Tabla 2.5.

La agregación de impactos ambientales fue determinada por la suma del producto de la “Magnitud” del impacto y su Intensidad, estimándose tanto para los factores como para las actividades, a efecto de evaluar las alternativas y hacer una comparación, de manera que produzca consideraciones precisas acerca de la gravedad de todos los impactos de cada alternativa. La “Magnitud” de los impactos puede ser positiva o negativa y está determinada por la intensidad y nivel de la afección que se produzca, calificada desde el nivel más alto (10) al más bajo (1).

MATRIZ DE LEOPOLD TCA			ACTIVIDADES DE LA DISPOSICION DE RSU EN TCA							AFECTA- CIONES	NIV. DE SIG.								
Leyenda: <table><tr><td>MAGNITUD</td><td>IMPORTANCIA</td></tr></table>			MAGNITUD	IMPORTANCIA	1. Transporte y descarga	2. Disposición de RSU y RME	3. Disposición de RP	4. Compactación y cobertura	5. Manejo de biogás generado	6. Manejo de lixiviados	7. Contratación de maquinaria, personal y servicio	AFECTACIONES POSITIVAS	AFECTACIONES NEGATIVAS	NUMERO DE INTERACCIONES	AGREGACION DE IMPACTOS	BAJO	MODERADO	SEVERO	CRITICO
MAGNITUD	IMPORTANCIA																		
Magnitud: Intensidad del impacto que se puede ocasionar, siendo máxima 10 y mínimo 1. Impacto positivo () / Impacto negativo (-)																			
Importancia: Escala del impacto (local, regional, etc.), siendo máximo 10 y mínimo 1.																			
Agregación de impactos determinado conforme a sección 2.5.2 y nivel de significancia respecto a sección 2.5.3, ec. 2.1 y tabla 1.4																			
COMPONENTES BIOFISICOS	CATEGORIA	ATRIBUTO																	
	SUELO	Calidad de suelo																	
		Cambio de uso de suelo																	
		Estabilidad de suelo																	
	AGUA	Subterránea																	
		Calidad del agua																	
	ATMOSFERA	Material particulado																	
		Ruidos																	
		Gases																	
FLORA	Olores																		
	Productos agrícolas (Maíz)																		
	Remoción de cobertura vegetal																		
COMPONENTES SOCIO- ECONOMICOS	FAUNA	Ahuyentamiento de especies nativas																	
		Proliferación de nuevas especies																	
	ESTETICA	Vistas escénicas y panorámicas																	
		Calidad de espacio abierto																	
		Parques y reservas forestales																	
	SOCIAL	Salud poblacional y laboral																	
		Seguridad laboral																	
	ECONOMICO	Calidad de vida																	
Ingresos economicos adicionales																			
Sitios de interes arqueologico/ cultural																			
Uso potencial del suelo																			
AFECTA- CIONES	Emprendimientos productivos																		
	AFECTACIONES POSITIVAS																		
	AFECTACIONES NEGATIVAS																		
	NUMERO DE INTERACCIONES																		
NIV. DE SIG.	AGREGACION DE IMPACTOS																		
	BAJO																		
	MODERADO																		
	SEVERO																		
CRITICO																			

Fuente: Mendoza Delgado (2017).

Figura 2.7 Matriz de Leopold adecuada.

Tabla 2.5 Criterios de evaluación de impacto ambiental

CRITERIO	CLASIFICACIÓN	EVALUACIÓN	DEFINICIÓN
VALORACIÓN	Magnitud	Positiva (+)	Beneficio para el recurso
		Negativa (-)	Perjuicio para el recurso
	Importancia	No tiene signo	
MAGNITUD	INTENSIDAD	Baja (1-3)	Intensidad baja de la actividad
		Media (4-6)	Intensidad media de la actividad
		Alta (7-9)	Intensidad alta de la actividad
		Muy alta (10)	Intensidad muy alta de la actividad
	AFECTACIÓN	Baja (1, 4, 7)	La intensidad define si la magnitud es baja en los diferentes niveles
		Media (2, 5, 8)	La intensidad define si la magnitud es media en los diferentes niveles
		Alta (3, 6, 9)	La intensidad define si la magnitud es alta en los diferentes niveles
IMPORTANCIA	INFLUENCIA	Puntual (1-3)	La afectación del sitio o sus alrededores
		Local (4-6)	La afectación alcanza más allá de la zona donde se halla el sitio
		Regional (7-9)	La afectación llega más allá de la ciudad
		Nacional (10)	La afectación cubre todo el territorio nacional
	DURACIÓN	Temporal (1, 4, 7)	Está determinado por el tiempo de afectación y siempre que la misma sea esporádica y pueda revertirse
		Media (2, 5, 8)	La afectación es de mayor frecuencia en el tiempo y es más duradera
		Permanente (3, 6, 9)	La afectación es continua en el tiempo y no se puede revertir

Fuente: Conesa, 1993

Una vez valorizada la Matriz de Leopold, se evaluó e interpretó con la Tabla 2.6 el nivel de significancia, para así determinar la Magnitud de afectación.

Tabla 2.6 Rangos de valor de nivel de significancia

RANGOS	SIGNIFICADO
0 a 2.5	Bajo
2.6 a 5.5	Moderado
5.6 a 7.5	Severo
7.6 a 10	Critico

Fuente: Espinoza, 2002

Se estimó la Calificación Ambiental (Ca) por medio de la Ecuación 2.2, como resultado de la interacción de cada atributo (Espinoza, 2002).

$$Ca = \sqrt{\frac{|\sum m * i|}{n}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Dónde:

M = magnitud

i = intensidad

n = número de interacciones

El resultado de cada operación con los datos asignados a la Matriz de Leopold permitió comparar los resultados respecto a la Tabla 2.6 y de esta manera determinar si la afectación fue Baja, Moderada, Severa o Crítica (Madrid, 2013).

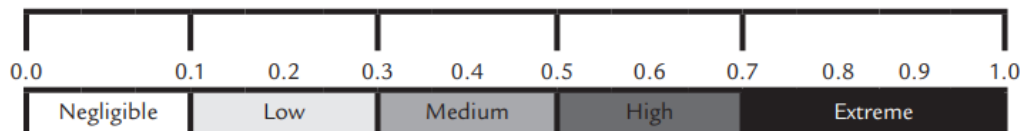
Como parte y complemento de las propuestas sustentables, para reducir el perjuicio que las malas prácticas en el manejo de RSU provocan en los acuíferos, se hizo un análisis social de la situación actual de dos recintos escogidos para ejemplificar la operatividad, funcionalidad y conveniencia de la propuesta que se sustenta. Se realizaron estudios de la situación actual de la disposición de RSU en el sitio, que se enfocó en determinar la oferta y demanda actual del servicio, utilizando fuentes información de INEGI, SEMARNAT, Municipales y el diagnóstico realizado en el apartado 2.2 de este trabajo.

2.3.3 Análisis de vulnerabilidad

Se utilizó el método de análisis de vulnerabilidad hídrica para determinar la afectación de la zona adyacente y del acuífero a ser contaminado. En este apartado se realizó un “Estudio de vulnerabilidad del acuífero” donde se encuentra el SDF, considerando aspectos geográficos del diagnóstico (Apartado 2.2, a)). La fuente de colecta principal de información fue el “Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales” (SEMARNAT, 2022) y el “Servicio Meteorológico Nacional” (CONAGUA, 2022), con cuyos datos se calcularon los parámetros utilizados de acuerdo con el método elegido. Los métodos considerados fueron el conocido como GOD (por sus siglas en inglés: Groundwater Overlying lithology and Depth to groundwater) y el Método DRASTIC.

El Método GOD desarrollado por Foster (1987), es un método utilizado en América Latina como una alternativa accesible, debido a la simplicidad de su manejo de información, pues su requerimiento de datos se basa en tres parámetros principales: ocurrencia, distancia al agua y tipo de sustrato litológico. Para el primer parámetro, que es la Ocurrencia o presencia de agua subterránea (G), se asigna un valor en una escala de 0.0 a 1.0. En segundo término, se considera la distancia al agua, misma que se determina mediante la profundidad de la napa o techo del acuífero (D), con la consiguiente asignación de valores en una escala de 0.6 a 1.0. Otro factor es el tipo de sustrato litológico del acuífero (O), en términos de grado de consolidación y tipo de litología, a este parámetro se le asigna un valor en una escala de 0.4 a 1.0. El producto de estos parámetros define el índice de Vulnerabilidad establecido por GOD ((Ec 2.3), por lo que al determinar el grado de peligro de contaminación en agua subterránea, definirá la probabilidad de que en efecto esté contaminada, debido a acciones en la parte superior de un acuífero la cual se puede determinar con la gráfica de vulnerabilidad de la Figura 2.8 (Madroñero, F., R., & J., 2022; Iturbe, 2014; A Gómez-Cruz, 2019).

$$I\ GOD = G \times O \times D \quad (\text{Ec } 2.3)$$



Fuente: Gómez-Cruz et al, 2019.

Figura 2.8 Escala de Vulnerabilidad de la contaminación del acuífero del método GOD

El método DRASTIC, es un modelo empírico desarrollado por Allet (1987), que asigna un determinado peso a los siete parámetros que se aprecian en la Tabla 2.7 (Sanches Fernandes, 2014; Iturbe, 2014), los cuales son calculados mediante el producto de valores de categorías o rangos (Tabla 2.8), que se sustituyen en la (Ec 2.4).

Para complementar el análisis, se calculó el volumen de lixiviados generado, con el método suizo, el cual es una metodología que permite estimar de manera rápida y sencilla esta medida, de acuerdo con la Ec. 2.5.

Tabla 2.7 Parámetros utilizados en el método DRASTIC

PARÁMETROS	PESO
Profundidad del agua (D)	5
Recarga neta (R)	4
Tipo de acuífero (A)	3
Tipo de suelo (S)	2
Pendiente topográfica (T)	1
Impacto a la zona vadosa (I)	5
Conductividad hidráulica (C)	3

Fuente: Modificado de Allet et al, 1987.

$$\text{Índice}_{DRASTIC} = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \quad (\text{Ec } 2.4)$$

Tabla 2.8 Intervalos y valores asignados para el método DRASTIC.

RECARGA (mm)		PROFUNDIDAD DEL AGUA	
Intervalo	Valor	Intervalo	Valor
0-50	1	4.5-9	7
50-100	3	9-15	5
100-180	6	15-23	3
180-255	8	23-30	2
ACUÍFERO		TOPOGRAFÍA	
Intervalo	Valor	Intervalo	Valor
Metamórfico	3	0-2	10
Arenisca-caliza	6	2-6	9
Arena y grava	8	6-12	5
Basalto	9	12-18	3
SUELO		IMPACTO DE LA ZONA VADOSA	
Intervalo	Valor	Intervalo	Valor típico
Grava	10	Esquisto	3
Arena	9	Arcilla/limo	3
Arcilla expansiva	7	Arena y grava con arcilla y limo	6
Franco	5	Arena y grava	8

Modificado de Allet et al, 1987.

$$Q = \frac{1}{t} P \times A \times K \quad \text{Ec. 2.5}$$

Donde:

 Q = Caudal medio del lixiviado (L/s) P = Precipitación media anual (mm/s) A = Área superficial del relleno (m²) t = segundos en un año (s) k = coeficiente de compactación de residuos

2.4 PROPUESTAS SUSTENTABLES

Con los resultados obtenidos del diagnóstico (Apartado 2.2) de la evaluación de los sitios y de su vulnerabilidad (Apartado 2.3), se propuso un método contención con el fin de aislar el contaminante en el medio, sin actuar sobre él.

El planteamiento constó de un medio constructivo para asegurar la estabilidad e interferir con la migración de lixiviados o sustancias contaminantes, hacia los cuerpos de agua cercanos al SDF o a la ET. En cada caso, se hicieron las recomendaciones pertinentes para dar cumplimiento a la NOM-083-SEMARNAT-2021.

Para el confinamiento de los contaminantes, se consideraron los métodos de solidificación/estabilización (S/E) *in situ*, donde el suelo contaminado se mezcla con aditivos para inmovilizarlos. La solidificación se refiere a las técnicas que atrapan físicamente contaminantes, formando un material sólido y la estabilización limita su movilidad, generalmente por la adición de materiales, para cubrir los suelos contaminados sin necesidad de excavar (EPA, 2001).

Para el control de los contaminantes, se contempló incluir maleza en las zonas contaminadas, para contribuir con la reducción de algunos parámetros que estuvieran fuera de norma, determinados en el análisis fisicoquímico.

3. RESULTADOS

3.1 SELECCIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO

Se identificaron 72 SDF por medio de visualización satelital; ocho más de los que se encontraron registrados en los Atlas de Riesgos municipales y del EdoMéx, ubicados en 54 municipios de los 60 estudiados (Figura 3.1). El 22 % de los SDF fueron RESA, el 13% SC y el 65 % SNC. También se visualizaron 12 ET, todas con instalaciones poco apropiadas, donde se almacenan temporalmente residuos reciclables.

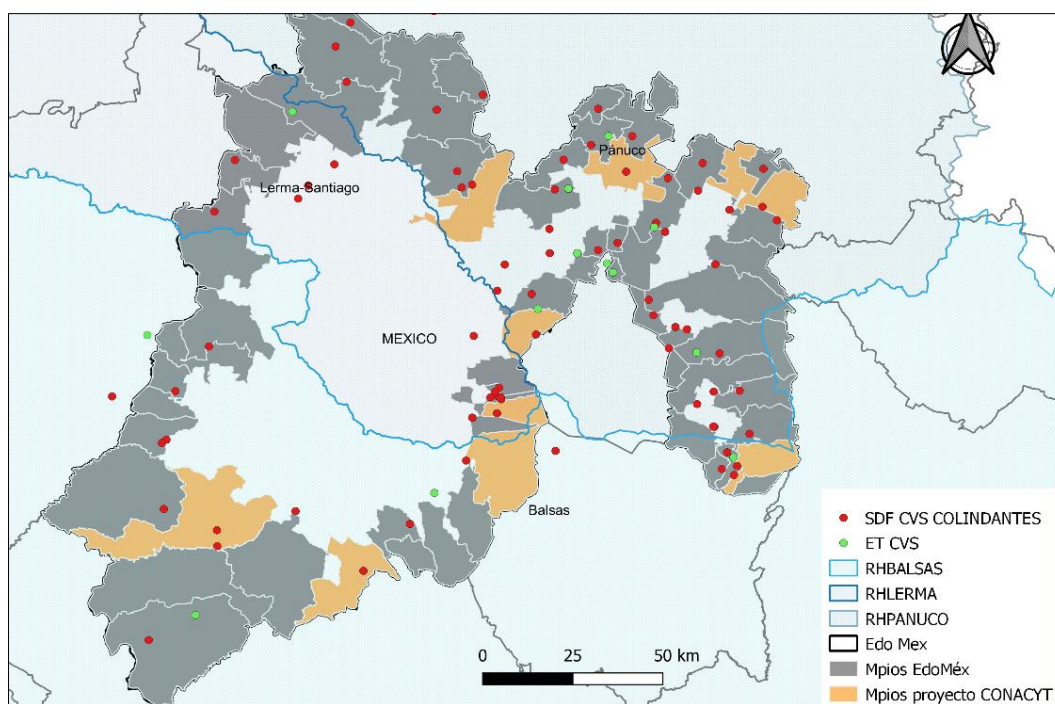


Figura 3.1 Sitios de Disposición Final y Estaciones de Transferencia en la zona de estudio

En el escudriño de la información, se obtuvieron capas de límites municipales, hidrografía (RH, cuerpos de agua perenes e intermitentes, corrientes de agua y ríos), topografía y recursos hídricos (pozos, presas y bordos) y, se crearon dos: SDF y ET, las cuales fueron incluidas en mapas temáticos mediante el SIG de uso libre QGIS 3.10, donde se evaluaron.

En el proceso A Conjunto de municipios por RH, se identificaron 12 SDF en la RH12-Lerma-Santiago; 16 en la RH18-Balsas y 45 en la RH26-Pánuco. Al aplicar los criterios de selección (Tabla 2.1), se evaluaron los sitios conforme a los criterios de exclusión, eligiéndose los que obtuvieron mayor puntaje que se muestran en la Tabla 3.1, para la siguiente fase de la investigación.

Tabla 3.1. Resultados de la selección de sitios mediante el proceso A

CRITERIOS DE EXCLUSIÓN	ET TIANGUIS_ TENCO	SNC POLOTITLÁN	SNC TLALPUJA_ HUA
a) El SDF debe de estar ubicado a una distancia máxima de 500 m de una corriente de agua superficial	0	0	1
b) El SDF debe de estar ubicado en zona de recargas de acuíferos	1	1	0
c) El SDF debe de estar ubicado a una distancia máxima de 500 m de un cuerpo de agua	1	1	1
d) El SDF debe de estar ubicado a una distancia máxima de 500 m de una fuente de abastecimiento de agua potable	1	0	0
Puntaje Total	3	2	2

Para el proceso B se consideró una lista de 12 de municipios caracterizados previamente (Díaz Archundia, 2016; Santana, 2017), después de evaluarlos conforme a la metodología de la Tabla 2.1, se obtuvieron cuatro SDF que cumplieron con las condiciones para realizar el estudio (Tabla 3.2).

A partir de los resultados obtenidos, se sostuvo comunicación con los municipios seleccionados para la presentación del trabajo de investigación. Finalmente, después de analizar factores como apertura de autoridades municipales y paz social, los sitios seleccionados fueron el SDF “Rancho del Municipio” del municipio de Polotitlán y la ET “Yolotzingo” en el municipio de Tianguistenco, la cual está registrada como SNC por la SMAGEM (2022). Su ubicación se puede observar en la Figura 3.2.

Tabla 3.2. Resultados de la selección de sitios de proceso B.

CRITERIOS DE EXCLUSIÓN	SNC ATLAUTLA	SNC AXAPUSCO	RESA TEJUPILCO	SNC ZUMPANGO
a) El SDF debe de estar ubicado a una distancia máxima de 500 metros de una corriente de agua superficial	3	2	1	1
b) El SDF debe de estar ubicado en zona de recargas de acuíferos	0	0	0	1
c) SDF debe de estar ubicado a una distancia máxima de 500 metros de un cuerpo de agua	0	0	1	1
d) El SDF debe de estar ubicado a una distancia máxima de 500 metros de una fuente de abastecimiento de agua potable	0	0	0	0
Puntaje Total	3	2	2	3

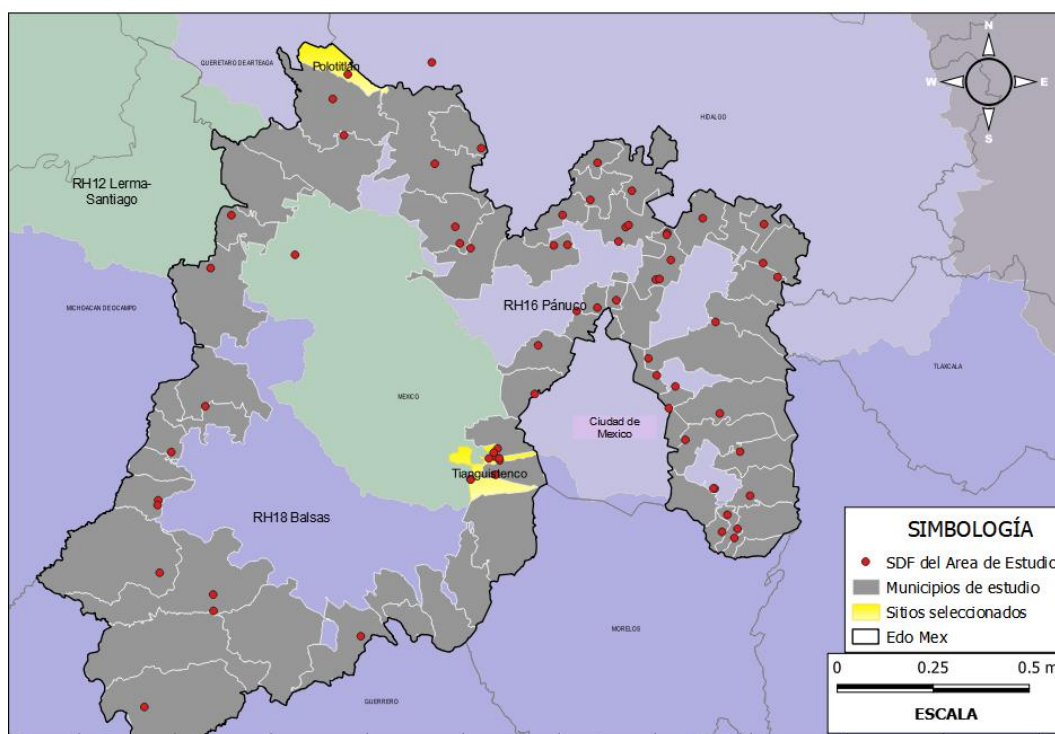


Figura 3.2 Localización de los municipios de seleccionados para el estudio.

3.2 DIAGNÓSTICO DE LOS SITIOS DE ESTUDIO

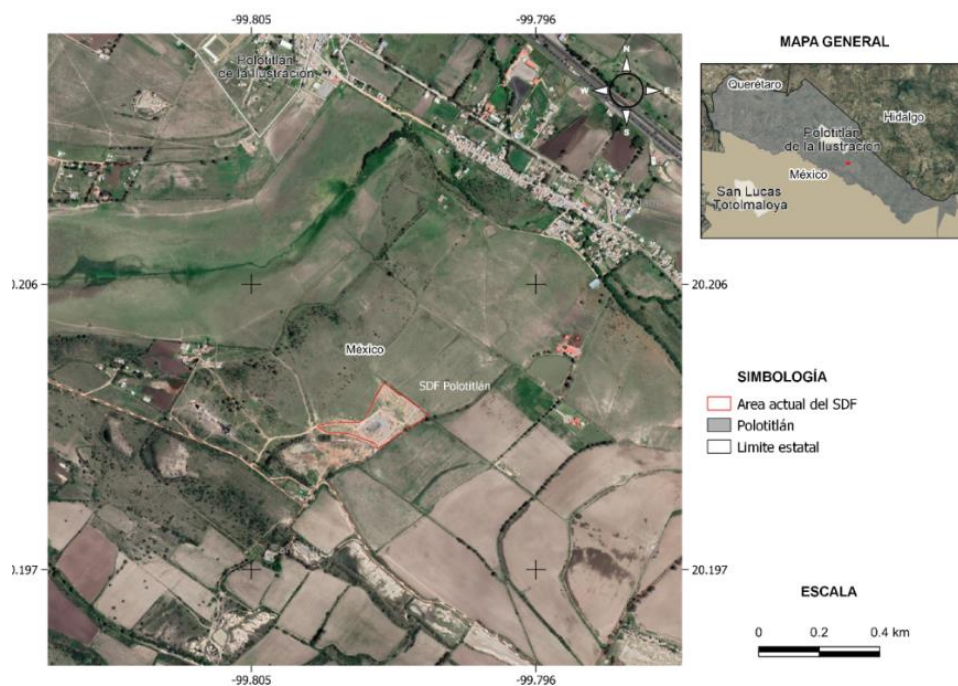
A continuación, se describen los resultados obtenidos para cada sitio seleccionado.

3.2.1 Sitio de disposición “Rancho del municipio”

El municipio de Polotitlán, EdoMéx, se encuentra entre las coordenadas longitud 99.9341 a 99.6952, latitud 20.1383 a 20.156667, con altitudes entre 2,200 y 2,700 msnm (INEGI, 2020a). Limita al norte con los estados de Querétaro e Hidalgo; al sur con el municipio de Aculco, EdoMéx; al oriente con el estado de Hidalgo y el municipio de Jilotepec, EdoMéx; y al poniente colinda con Querétaro y el municipio Aculco, EdoMéx. Tiene una población de 14,895 habitantes, distribuidos entre la cabecera municipal denominada Polotitlán de la Ilustración, 13 delegaciones y 15 rancherías (González-Polo, 2020; INEGI, 2022a; INEGI, 2020a).

El MIRSU del municipio está a cargo de la Dirección de Servicios Públicos del ayuntamiento, el cual comprende cuatro etapas: limpia, recolección, valorización y disposición final de RS. La disposición de RSU y RME se realiza en el SDF municipal denominado “Rancho de municipio” (H. Ayuntamiento de Polotitlán, 2010, 2012, 2017, 2018, 2019, 2020).

El SDF “Rancho de municipio” se localiza en las coordenadas geográficas latitud 20.201935 y longitud -99.801273 (Figura 3.3). Se encuentra en la delegación de San Antonio el Viejo, en los límites con El Álamo, tiene una elevación promedio de 2,344 msnm y se encuentran a una distancia recta de 2.9 km del Palacio Municipal de Polotitlán (Google, 2021; INEGI, 2021).



Fuente: Modificado de INEGI, 2021

Figura 3.3 Ubicación del municipio de Polotitlán y su Sitio de Disposición Final

a) Medio Geográfico. El medio geográfico comprende el clima, la hidrografía, la fisiografía, la geología, el uso de suelo y las áreas naturales protegidas.

- El clima predominantemente de Polotitlán es C(w1), templado subhúmedo con lluvias en verano, 87 % de humedad y humedad media del 12 % (INEGI, 2009). Las temperaturas que prevalecen van desde los 12 a los 18 °C, la temperatura del mes más frío oscila entre -3 °C y 18 °C y, la temperatura promedio del mes más cálido es 22 °C. La precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm; lluvias de verano con índice de Precipitación/Temperatura entre 43.2 y 55.0 y, el porcentaje de lluvia invernal es del 5.0 % al 10.2 % del total anual (SIGEA, 2021).
- Hidrográficamente el municipio está ubicado en la RH IX Pánuco, en la cuenca del Río Moctezuma dentro de la subcuenca del Arroyo Zarco y el Río Tecozutla. Los cuerpos de agua del municipio ocupan el 1.43 %, la mayoría intermitentes y solo 0.46 % del total perennes. El territorio del municipio comprende dos

microcuencas: Ejido Encinillas y Polotitlán de la Ilustración (SIGEA, 2021; INEGI, 2010).

El municipio cuenta con la presa “El Derramadero” de carácter intermitente y 23 bordos, entre los que se encuentran Los Lirios, San José, Mérida, Ruano, El Álamo, La Cantina y Los Carrizos, entre otros, que son utilizados para riego agrícola. Con respecto a aguas subterráneas, existen cinco pozos profundos denominados: Los Gavilanes, San Isidro, San Isidro II, Celayita y Encinillas; utilizados para agua potable. Las Viborillas, San Agustín, Blanco, Zarco, El Charcón y La Pasadita son corrientes de agua que fluctúan en el municipio (PDM, 2016; CONAGUA, 2021).

El SDF se ubicó a 523 m en línea recta de la presa “El Derramadero” y cercano a bordos y corrientes intermitentes que se forman en época de lluvia y son utilizados para riego agrícola (Figura 3.4).

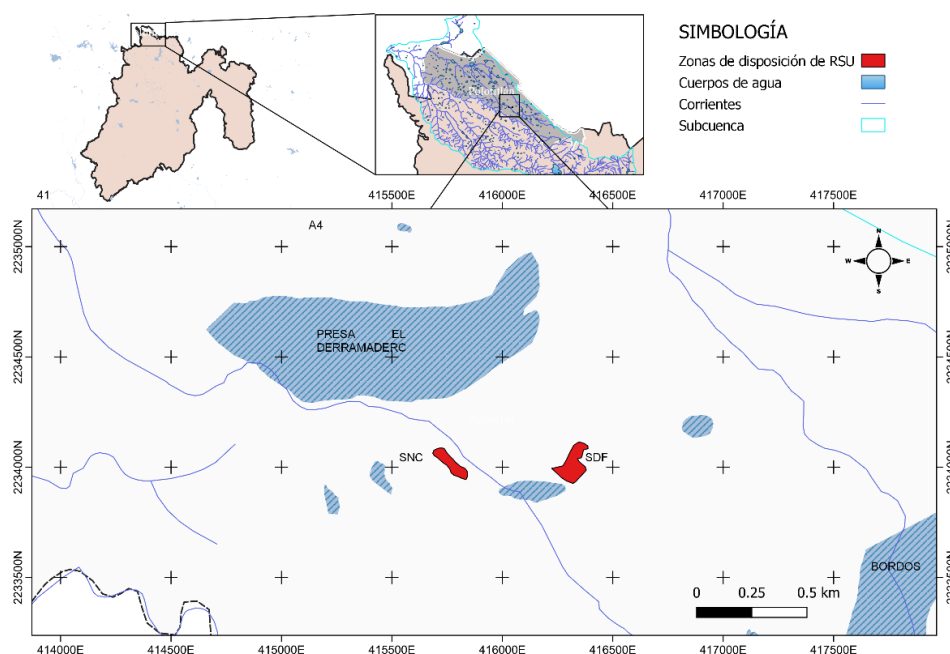
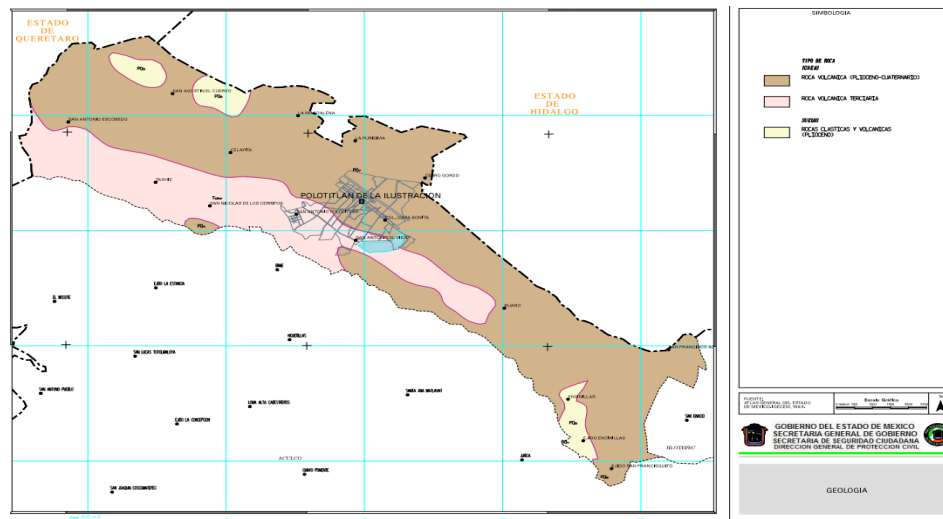


Figura 3.4 Hidrografía cercana al Sitio de Disposición Final de Polotitlán, EdoMéx.

- Fisiológicamente, el municipio forma parte del sistema montañoso de la Sierra Nevada del Eje Neovolcánico Transversal, dentro de la Subprovincia Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo y queda constituido dentro de una secuencia diversa de rocas volcánicas, que van desde los derrames de basalto, tobas y brechas volcánicas hasta suelos areno-limosos, donde predomina el relieve en lomerío y llanura. El suelo preponderante es el planasol, aluvial y vertisol (INEGI, 2010; Sotelo, 2020; CONAGUA, 2015 b). El SDF se encuentra ubicado en la zona de transición entre los relieves dominantes llanura y lomerío.
- Geológicamente, el suelo del municipio de Polotitlán está formado por rocas clásticas y volcánicas. Entre los tipos de roca más comunes se pueden mencionar las tobas ácidas, brechas volcánicas basálticas, basaltos y andesitas, incluyendo depósitos piroclásticos y vulcanoclásticos; los tipos de rocas ígneas son roca volcánica formada en el periodo Plioceno-cuaternario y roca volcánica terciaria. La formación restante es de rocas volcánicas, esencialmente de intermedias a básicas, predominando las calcialcalinas de arcos continentales; e incluye depósitos de piroclastos asociados y rocas clásticas y piroclásticas, de composición dacítica, andesítica y basáltica, así como depósitos sedimentarios fluviales y lacustres producidos simultáneamente con el vulcanismo y como consecuencia directa de éste por bloqueo del drenaje (DGPCEM, 2018). El SDF se encuentra asentado sobre roca volcánica terciaria (Figura 3.5).
- Edafológicamente, el municipio cuenta con cuatro unidades edafológicas: Phaeozem, Litosol, Planasol, y vertisol. El suelo dominante en el municipio es el Planasol, además de otros como Leptosol en menor proporción (DGPCEM, 2018; INEGI, 2010)

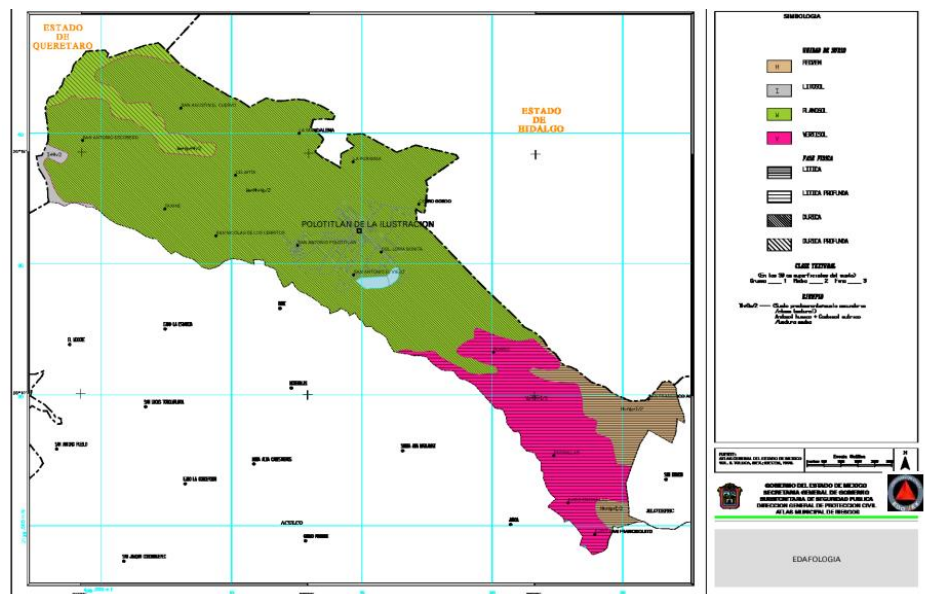
El SDF se ubicó en un área con suelo de tipo Planasol, éste se caracteriza por tener capa subsuperficial de acumulación de arcilla; estos suelos son típicamente áreas húmedas bajas que pueden soportar la vegetación de la hierba o del bosque abierto. Sin embargo, son pobres en nutrientes vegetales, y su contenido de arcilla conduce tanto al agua estacional como al estrés por sequía, su uso principal es

el pastoreo (FAO, 2021). En la Figura 3.6, se visualiza un cambio de suelo muy cercano al SDF.



Fuente: CGPCCEM, 2020

Figura 3.5 Mapa geológico del municipio de Polotitlán, EdoMéx.



Fuente: CGPCCEM, 2020

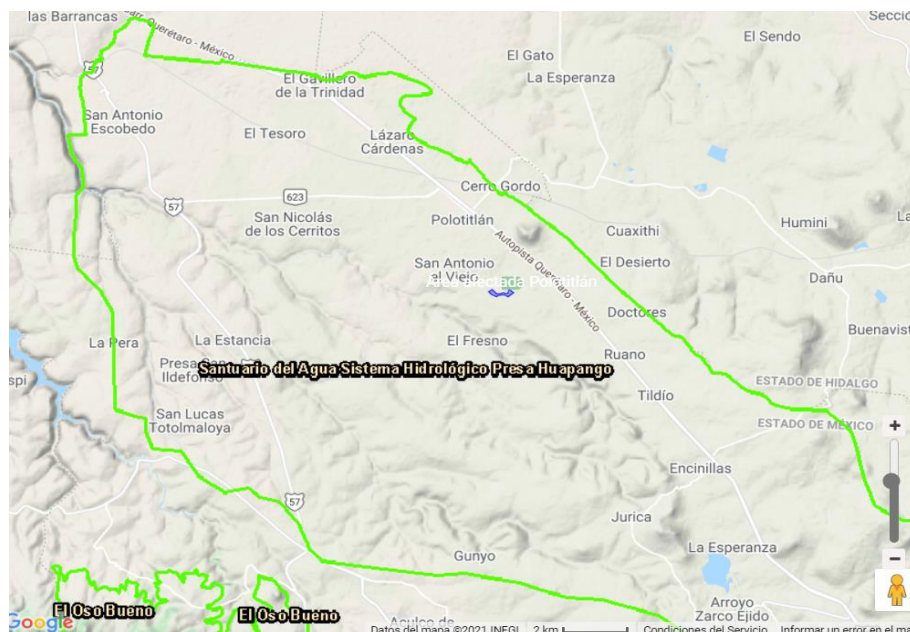
Figura 3.6 Mapa edafológico del municipio de Polotitlán, EdoMéx.

- Uso de suelo y vegetación. El uso principal del suelo es para agricultura, entre la mecanizada y la tradicional suman un 77 % del total, el resto del territorio municipal es ocupado por zona urbana y vegetación; pastizales, bosque y matorrales (INEGI, 2009). En la zona donde se localiza el SDF del municipio se identificaron dos tipos de uso de suelo: Ecológica-Florística-Fisonómica con vegetación y pastizal inducido (Figura 3.7) y el Agrícola-Pecuaria-Forestal, con agricultura de riego anual y semipermanente (SIGEA, 2021; INEGI, 1974).



Figura 3.7 Uso de suelo y vegetación circundante al Sitio de Disposición de Residuos Sólidos de Polotitlán, EdoMéx.

- Áreas Naturales Protegidas. El SDF de Polotitlán se ubicó dentro del “Santuario del Agua Sistema Hidrológico Presa Huapango”, área natural protegida de índole estatal (Figura 3.8), decretada el 08 de junio del 2004, el cual cuenta con una superficie de 71,024.37 ha (GEM, 2014; SIGEA, 2021).



Fuente: SIGEA, 2021

Figura 3.8 Área Natural Protegida Estatal “Santuario del Agua-Sistema Hidrológico Presa Huapango”

- b) Clasificación del sitio. El SDF de Polotitlán se identificó con varios nombres: “Rancho del municipio”, “Relleno Sanitario Municipal Celda de disposición” y “Tiradero municipal”, en este trabajo se le refiere como “Rancho del municipio”. El terreno que abarca está registrado con una superficie entre 3.44 a 5.00 ha, de las cuales 0.76 ha se utilizan para depositar RSU y RME. Es clasificado como RESA desde 2016, debido a que fue rehabilitado con la construcción de una celda de disposición para RSU, sin embargo, no contó con la operación y manejo correspondiente (CGPCEM, 2020; DGPCEM D. G., 2015; SEMARNAT, 2020a). El SDF contaba hasta el año 2021 con una vida útil de 22 años (Entrevista Telefónica Polotitlán, 2021).

El análisis visual realizado con Dron durante la visita el 11 de octubre de 2021, permitió identificar tres zonas (Figura 3.9). La zona de disposición de RSU (Z1), donde se ha lleva a cabo el vertido de residuos provenientes de la recolección municipal, donde la mayoría de ellos son susceptibles de ser valorizados: papel, cartón, tetrapak, plásticos, vidrio y textiles. La zona RME y RSU (Z2) ubicada en el

área noroeste, donde se pudo observar una gran cantidad de RME del sector automotriz, principalmente llantas, autopartes de plástico y RSU (Figura 3.10). Los RME provinieron de la autopista México-Querétaro, cuya empresa operadora tenía un convenio con el municipio para recibir los desechos automotores con vigencia hasta 2021 (Públicos, 2021). Con la llegada de la administración 2022-2024, se dejó de recibir estos RME, sin embargo, se continúan depositando de forma clandestina, aunque en menor cantidad (Ecología, 2023). La Zona de RME (Z3), área ubicada en un predio colindante a la Z1, donde principalmente se depositan residuos cárnicos.

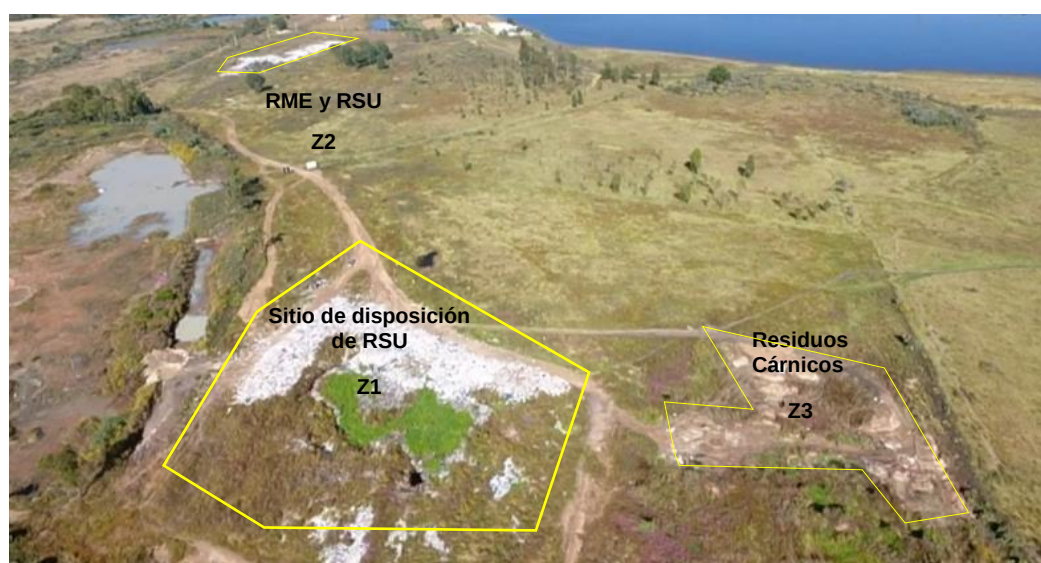


Figura 3.9 Zonas del Sitio de Disposición Final de Polotitlán, EdoMéx.



Figura 3.10 Zona 2 del Sitio de Disposición Final de Polotitlán EdoMéx.

En cuanto a su infraestructura, el SDF cuenta con captura de lixiviados a través de una geomembrana, pozos de venteo para captura de biogás (inhabilitados con piedras), cerca perimetral de llanta para controlar fauna nociva y caseta de vigilancia para control de acceso, la que se encontró desmantelada.

La operación del sitio consiste en el control de acceso vehicular y peatonal por parte de un encargado, sin embargo, este no revisa exhaustivamente que solo ingresen RSU y hasta la visita realizada en diciembre del 2021, no se apreció actividades de compactación y cubrimiento con tierra de RS. Para la disposición final de residuos cárnicos, se lleva a cabo un entierro con cubrimiento de cal y tierra; la tarea es realizada por usuarios que paga una cuota al ayuntamiento (SEMARNAT, 2020b; E2, 2022).

En las visitas realizadas durante octubre y diciembre del 2021 y marzo 2022, se observó la disposición de residuos mezclados (Figura 3.11), lo que puede atribuirse a que los camiones recolectores no están adaptados para realizar la recolección en forma separada, entre orgánicos e inorgánicos.



Figura 3.11 Camión recolector en el SDF “Rancho del municipio” de Polotitlán, EdoMéx.

La valorización de los RSU se realiza en el SDF a través de segregadores primarios (Figura 3.12), que acopian lata, cartón, vidrio y plásticos (H. Ayuntamiento de Polotitlán, 2020, 2019, 2018, 2017, 2012, 2010).



Figura 3.12 Segregadores en el SDF de Polotitlán, EdoMéx.

Durante la operación del SDF “Rancho del Municipio” se han ocupado diferentes espacios al interior del predio para la disposición de RS. Se encontró con apoyo de Google Earth, evidencia fotográfica aérea de su uso como SNC clandestino. La primera imagen satelital corresponde al 5 de marzo del 2008, visualizándose RSU dispersos que afectaban un área de 4,069 m², distribuida en diferentes superficies delimitadas en rojo en la Figura 3.13.

Para el 7 de febrero del 2011, el área afectada ya era de 7,144.7 m², lo que representó un incremento de 75.59 % respecto de 2008 (Figura 3.14).

En el año 2012, el SDF se catalogó como SNC operado por el municipio de Polotitlán, EdoMéx. En ese entonces, se generaban aproximadamente 5 t/día de RSU, un promedio de 450 g/hab día y un promedio máximo de disposición de 11 t/día. La disposición se efectuó de manera deficiente en cuanto a maquinaria, equipo y personal (H Ayuntamiento de Polotitlán, 2012; PCEM, 2012). Hacia el 13 de diciembre del 2012, el área de afectación incremento su tamaño en 160 % respecto al registrado en 2008 y en un 46 % respecto al año anterior.



Fuente: Adaptado de Google Earth, 2021

Figura 3.13 Afectación por residuos en el SDF de Polotitlán, EdoMéx, en marzo del año 2008.

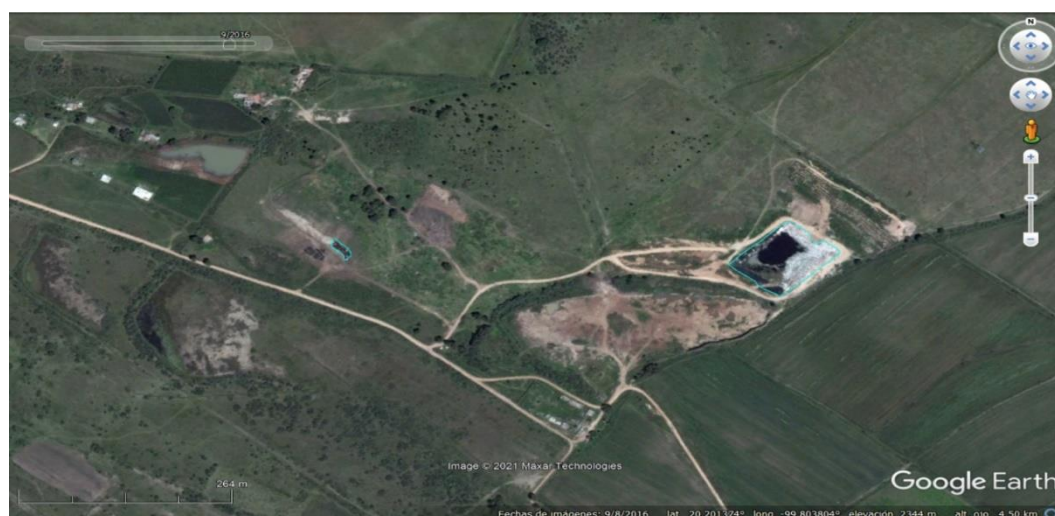


Fuente: Adaptado de Google Earth, 2021

Figura 3.14 Afectación por Residuos Sólidos en el SNC de Polotitlán, EdoMéx, el 7 de febrero del 2011.

En 2014, el Ayuntamiento designó al SDF como “Sitio de Disposición Final celda nueva tipo “C”, con una superficie de 5 ha (Ayuntamiento Polotitlan, 2015). Aunque es hasta 2016 cuando se registra la construcción de una celda de disposición, producto de este rezago es la designación de este SDF como RESA (Ayuntamiento Polotitlan, 2016).

Entre los años 2016 al 2020 la disposición se concentró en dos áreas principales (Figura 3.15, Figura 3.16 y Figura 3.17). El área afectada promedió 8,000 m², lo que permite suponer que las autoridades responsables del sitio realizaron un mejor manejo administrativo que en trienios anteriores (Google Earth, 2021).



Fuente: Adaptado de Google Earth, 2021

Figura 3.15 Afectación en área del SDF de RSU de Polotitlán, EdoMéx, el 9 de agosto del 2016.

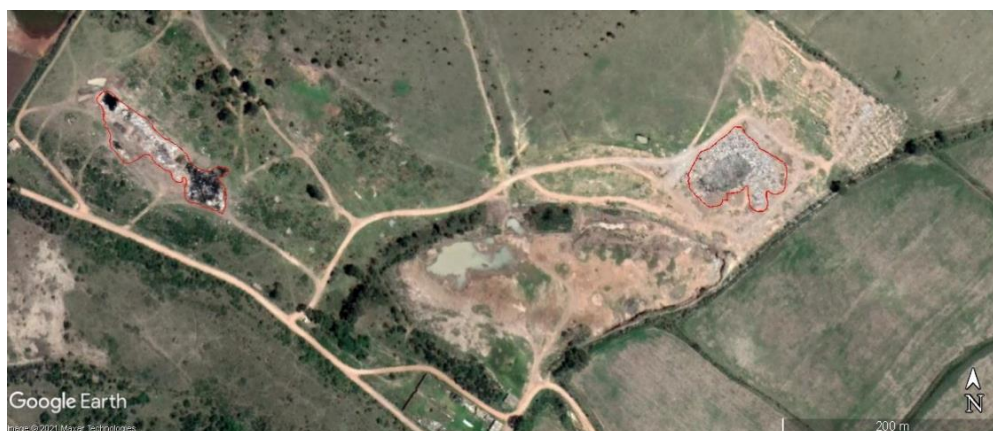
Durante el 2019, el SDF recibió entre 8 y 10 t/día de RSU para disponer en una superficie de terreno de 2,000 m². En este año el SDF fue un RESA tipo C operado por el municipio, en el que se realizó la valorización de residuos por recolectores primarios (Ayuntamiento Polotitlán, 2019).

Para el 16 de enero del 2020 (Figura 3.17), el área afectada incrementó a 9,020 m² lo que se atribuye a un menor control en la zona oeste de este SDF, según se aprecia en imágenes de Google Earth Proo (Google Earth, 2021).



Fuente: Adaptado de Google Earth, 2021

Figura 3.16 Afectación por RSU en el SDF de Polotitlán, EdoMéx, el 6 de agosto del 2019.



Fuente: Adaptado de Google Earth, 2021

Figura 3.17 Áreas de disposición de RSU en el SDF de Polotitlán, el 16 de enero del 2020.

En imagen satelital del 13 de noviembre de 2021 se observaron las zonas de disposición de RSU y RME, las cuales en la Figura 3.18 se delinearon en color rojo. El área que abarcaban representa un incremento del 47 % respecto al área determinada en 2020 (Figura 3.17), lo cual puede deberse a una mayor actividad en la disposición de RSU.

La cantidad de RSU y RME dispuestos en el sitio ha variado en la última década, como se muestra en la Tabla 3.3, con una generación promedio de 2988.30 t/año.



Fuente: Adaptado de Google Earth, 2021

Figura 3.18 Áreas de disposición de RSU en el SDF de Polotitlán, el 13 de noviembre del 2021.

Tabla 3.3 Disposición de residuos sólidos urbanos en el SDF “Rancho del municipio” de Polotitlán, EdoMéx

AÑO	RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DISPUESTOS		
	(t/día)	(t/semana)	(t/año)
2009	s/d	20.0	3,780.0
2010	12.0	84.0	4,368.0
2011	11.8*	82.3	4,277.0
2012	11.5*	80.5	4,186.0
2013	5.0	35.0	1,680.0
2014	10.0	70.0	3,640.0
2016	8.0	48.0	1,680.0
2017	8.0	48.0	1,680.0
2018	7.0	48.0	1,680.0
2019	8.0	56.0	2,912.0
2020	7.0*	48.0*	1,680.0*
2022	6.0	36.0*	1,872.0*
PROMEDIO	8.6	57.18	2988.3

Fuente: INEGI, 2020; H. Ayuntamiento de Polotitlán, 2012, 2013; 2016a; 2019; DGPCEM, 2018; 2020. * datos calculados; s/d: sin datos.

Conforme a la tabla 3.3, el SDF “Rancho del municipio” recibió en promedio 8.6 t/día, por lo que se clasificó como tipo “D” acorde con la NOM-083-SEMARNAT-2021 (DOF, 2021b). La disposición de RSU y RME en el SDF entre marzo del 2008 y noviembre del 2021 varió entre 4,069 y 22,668 m²(Tabla 3.4), alcanzando un área de afectación de 52,000 m² aproximadamente (Tabla 3.5), que comprende tres zonas de afectación: AF1, AF2 y AF3 (Figura 3.19), que abarca un área total de afectación de 8.85 ha (Figura 3.20).

Tabla 3.4 Áreas afectadas por disposición de Residuos Sólidos Urbanos.

AÑO DE FOTOGRAFÍA SATELITAL	NÚMERO DE ÁREAS AFECTADAS POR RSU Y RME	PERÍMETRO TOTAL DEL ÁREA IMPACTADA POR RSU Y RME (ml)	ÁREA TOTAL IMPACTADA POR RSU Y RME (m ²)
2008	4	552.3	4,069.0
2011	11	1,044.0	7,144.7
2012	9	1,044.0	10,469.9
2016	2	979.2	7,942.0
2019	2	634.0	7,962.0
2020	2	741.0	9,020.0
2021	2	1,092	22,668.0

Fuente: Google Earth Pro, 2021.

Tabla 3.5 Áreas afectadas por Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial en el Municipio de Polotitlán, Edo. Méx.

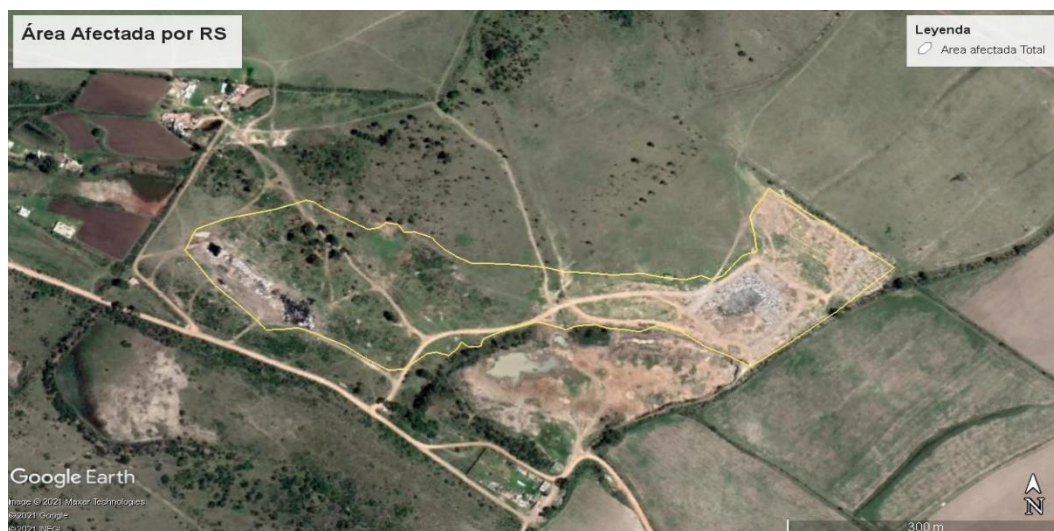
NOMBRE	ÁREA (m ²)	ÁREA TOTAL (m ²)
AF1	15,269	51,592
AF2	9,961	
AF3	26,362	

Fuente: Google Earth Proo, 2021



Fuente: Adaptado de Google Earth, 2021

Figura 3.19 Áreas afectadas por disposición de Residuos Sólidos en el Municipio de Polotitlán, EdoMéx, el 9 de diciembre del 2021.



Fuente: Adaptado de Google Earth Proo, 2021.

Figura 3.20 Área total afectada por disposición de Residuos Sólidos en el Municipio de Polotitlán, EdoMéx.

- c) Caracterización del Sitio de Disposición Final. Para la caracterización de agua, suelo y lixiviados del SDF del Municipio de Polotitlán, se realizaron dos visitas; la primera el 11 de octubre del 2021 correspondiente al periodo de lluvias; y la segunda el 23 de marzo del 2022, dentro del periodo de secas. A continuación, se detallan las determinaciones realizadas:

- Muestreo y caracterización de agua. Se tomaron muestras de tres cuerpos de agua naturales superficiales cercanos al SDF por duplicado. Las muestras del punto A1, correspondieron a la laguna de lixiviados que actualmente solo recibe escurrimientos pluviales. Las muestras en A2 se realizaron en el bordo de tipo intermitente, ubicado al oeste del SDF; y las muestras A3 y A4 se tomaron en la presa “El Derramadero”. Las muestras A1, A2 y A3 se tomaron en época de lluvias y la A4 en estiaje. Los puntos y muestreo se presentan en la Figura 3.21 y 3.22.

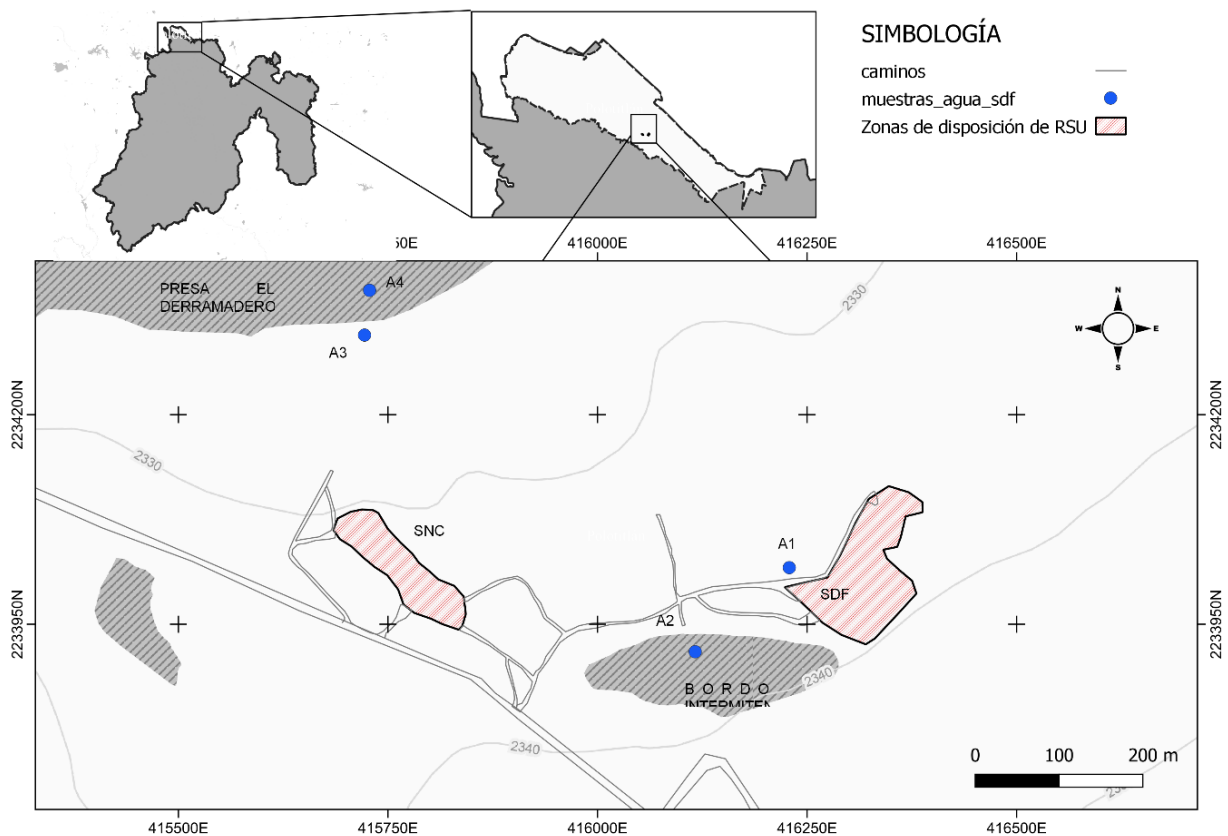


Figura 3.21 Puntos de muestreo de agua



Figura 3.22 Recolección de muestras de agua; laguna de lixiviados (izquierda) y bordo (derecha).

Los resultados de las determinaciones fisicoquímicas que se obtuvieron en las muestras A1, A2, A3 y A4 se presentan en las Tablas 3.6 y 3.7, donde puede apreciarse que sus valores no representaron en lo general un riesgo ambiental, debido a que se encontraron dentro de los LMP de la NOM-001-SEMARNAT-2021. El pH fue ligeramente básico en A1 y A3, mientras que A2 fue prácticamente neutro, en cuanto que A4 presenta los niveles más altos de alcalinidad, superando el LMP de la NOM-001-SEMARNAT-2021. La O para las muestras A1, A2 y A3 fue baja, lo cual denota un pobre contenido de sales; empero la A3 tuvo mayor contenido que la A2, respecto a la muestra A4, la O se manifestó casi nula (DOF, 2022).

Las cargas orgánicas (SVT y DQO), el N-NH_3 y el SO_4^{2-} , tuvieron valores bajos en las muestras A1, A2 y A3, los cuales pueden atribuirse a la flora y fauna circundante, o un posible escurrimiento de lixiviados. Por otro lado, la muestra A4 no presentó niveles detectables de DQO y concentró niveles ocho veces mayores

de SVT al de la muestra A3, tomada en el mismo cuerpo de agua cuatro meses antes, por el contrario, los niveles de N-NH_3 y el SO_4^{2-} fueron más bajos. Los niveles altos en SVT, pueden atribuirse a que este sitio es un lugar de pastoreo, donde los animales ingresan al agua y genera remoción del suelo, aumentando la turbidez (G, V, & JA, 2021).

En cuanto a MP, solo fue cuantificable Manganeseo (Mn) en la muestra A3 (presa). La presencia de Mn regularmente se asocia a la existencia de Hierro (Fe), el cual está presente también en este punto de la muestra (A3) y en A2 (bordo), con concentración menor a 10 mg. Para las muestras tomadas en la presa (A3 y A4), sus valores en términos generales fueron no aptos para riego, pues rebasan los LMP de temperatura y SVT (DOF, 1989).

El análisis bacteriológico de CF y CT se realizó en las muestras A1, A2 y A3; estos parámetros fueron utilizados como indicadores de contaminación de agua por escurrimientos o infiltraciones de líquidos fuera del SDF. El conteo y cálculo de los microorganismos de las colonias desarrolladas en las membranas (Figura 3.23 y Figura 3.24) se presentan en la Tabla 3.7. Los resultados evidenciaron la presencia de CT en dos puntos muestreados (A2 y A3 con una disminución de la A2 a la A3), que rebasaron los LMP establecidos por la Norma NOM-127-SSA-1994. La presencia de CF se observó en las tres muestras analizadas con valores superiores a los LMP de la Norma mencionada, siendo las más cercanas al SDF las de menor valor, por lo que se consideró que los escurrimientos principales de lixiviados son hacia el punto de muestreo A2 y los altos valores de A3 son debido a la descarga de aguas residuales (DOF, 1996).

En la muestra A3, se encontró presencia de *Estericha Coli* (Figura 3.25), que es un indicador de contaminación por materia fecal y debido a que esta muestra se obtuvo de la zona urbana contigua a la presa, el agua puede estar contaminada con heces fecales humanas por descarga de aguas residuales o por migración de heces de animales de pastoreo que se encuentran en la zona. La presencia de *E. Coli*, puede ocasionar graves enfermedades digestivas (García M., 2020), lo que

indicó las malas condiciones sanitarias de la presa y problemas de salud que pudieran derivar por el consumo de alimentos agrícolas regados con esta agua.

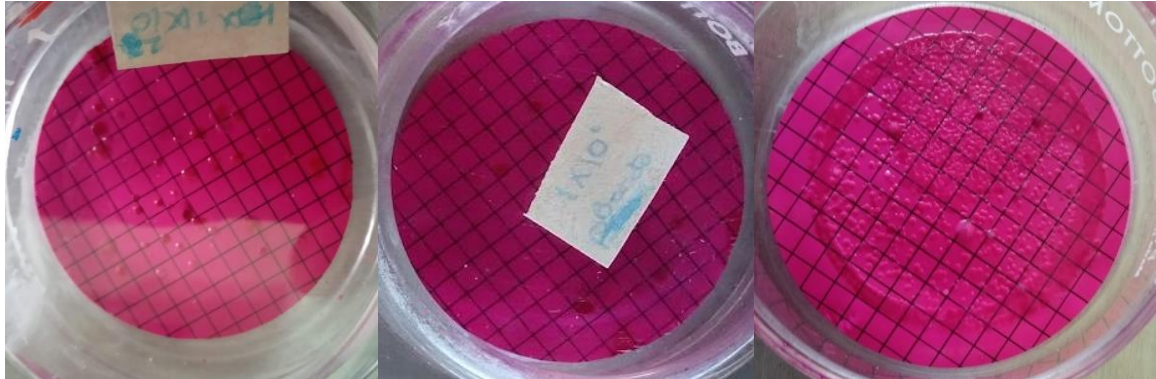


Figura 3.23 Coliformes Totales en las muestras A1, A2 y A3

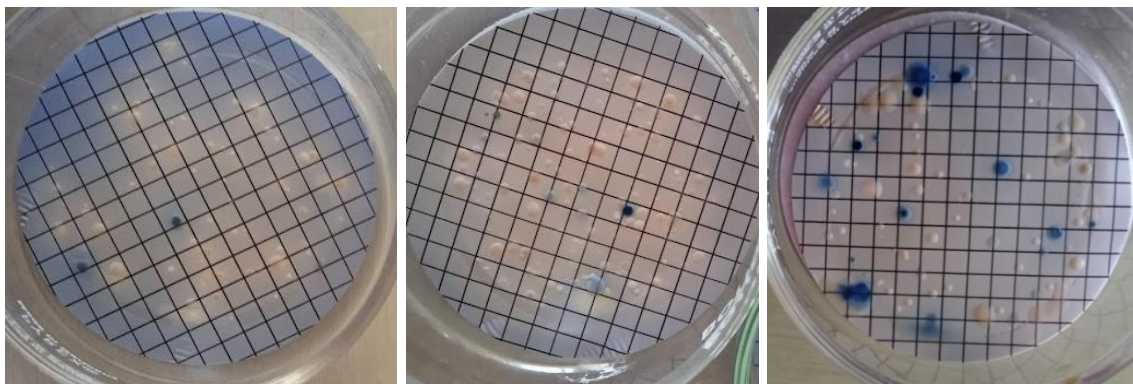


Figura 3.24 Presencia de Coliformes Fecales en la muestra A1, A2, A3

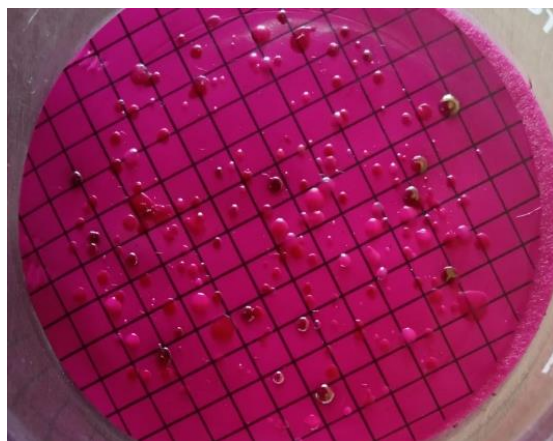


Figura 3.25 Escherichia Coli en la muestra A3

Tabla 3.6 Resultados de la caracterización de agua del Sitio “Rancho del Municipio” de Polotitlán, EdoMéx.

PARÁMETRO	FECHA DE ANÁLISIS	CONDICION AMBIENTAL (°C)	UNIDADES	LLUVIAS			SECAS	LMP/VI embalses, agos y lagunas NOM-001-SEMARNAT-2021	CE-CCA-001/89 para (A3 y A4)
				A1	A2	A3	A4		
T “ <i>in situ</i> ”	2021/10/11	22.0	°C	24.70	24.20	24.40	27.70	NA – 40.0	Ambientales+-2.5
pH “ <i>in situ</i> ”	2021/10/11	22.0	NA	8.38	6.91	7.99	9.98	6.0–9.0	NA
O “ <i>in situ</i> ”	2022/10/11	22.0	µS/cm	290.00	80.00	140.00	0.11	NA	1000.00
SVT	2021/10/13	18.0	mg/L	383.33	327.00	136.11	1,083.33	NA	50.00
DQO	2021/10/13	18.0	mg/L	484.00	346.00	271.00	ND	NA	NA
DBO	2021/10/17	22.0	mg/L	10.20	10.28	17.72	0.89	NA	NA
N-NH ₃	2021/10/14	19.0	mg/L	9.67	8.63	1.71	0.10	NA	NA
SO ₄ ⁻²	2021/10/14	19.0	mg/L	0.15	0.15	0.13	--	NA	130.00
Cu	2021/10/26	21.0	mg/L	NQ	NQ	NQ	--	4.0 – 6.0	0.20
Cd	2021/10/26	21.0	mg/L	NQ	NQ	NQ	--	0.1 – 0.2	0.01
Cr	2021/10/26	21.0	mg/L	NQ	NQ	NQ	--	0.5 – 1.0	1.00
Fe	2021/10/26	21.0	mg/L	NQ	4.23	2.82	--	NR	5.00
Mn	2021/10/26	21.0	mg/L	NQ	NQ	0.16	--	NR	NA
Ni	2021/10/26	21.0	mg/L	NQ	NQ	NQ	--	2.0 – 4.0	0.20
Pb	2021/10/26	21.0	mg/L	NQ	NQ	NQ	--	0.2 – 0.4	5.00
Zn	2021/10/26	21.0	mg/L	NQ	NQ	NQ	--	NR	2.00

CPR: Códigos de peligrosidad de los residuos, LMP: Límite máximo permisible, NA: No aplica, NQ: No cuantificable, NR: No reportado, VI: Valor instantáneo. Se reporta NQ, porque la concentración en la muestra se encuentra por debajo de la concentración del primer estándar preparado para la curva de calibración que es: Para Cu 0.20 mg/L; Cd 0.10 mg/L; Pb 0.20 mg/L; Ni 0.20 mg/L; Zn 0.10 mg/L; Cr 0.15 mg/L; Al 1.00 mg/L; As 0.50 mg/L.

Tabla 3.7 Presencia de Coliformes en las muestras de agua

PARÁMETRO	UNIDADES	A1	A2	A3	NOM-127-SSA1-1994	LMP V.I. BALSES, LAGOS Y LAGUNAS NOM-001-SEMARNAT-2021	LMP V.I. SUELO FILTRACIÓN) NOM-001-SEMARNAT-2021
Coliformes Totales (CT)	UFC/100 ml	NRE	23	10	2	NA	NA
Coliformes Fecales (CF)	UFC/100 ml	20	90	190	2	NA	NA
E. coli	UFC/100 ml	0	0	130	0	600	600

NRE: no realizado.

- Muestreo y caracterización de Lixiviados. Para este análisis se muestrearon cuatro puntos conforme a la NMX-AA-003-1980 de aguas residuales (DOF, 1980). Durante la visita de campo en periodo de lluvias al SDF de Polotitlán, se tomaron dos muestras de lixiviados; la primera, en la laguna de lixiviados formada en la celda ubicada en el centro del SDF (L1) y la segunda en la laguna de lixiviados del SNC (L2), ambas se muestran en las Figura 3.26 y Figura 3.27.

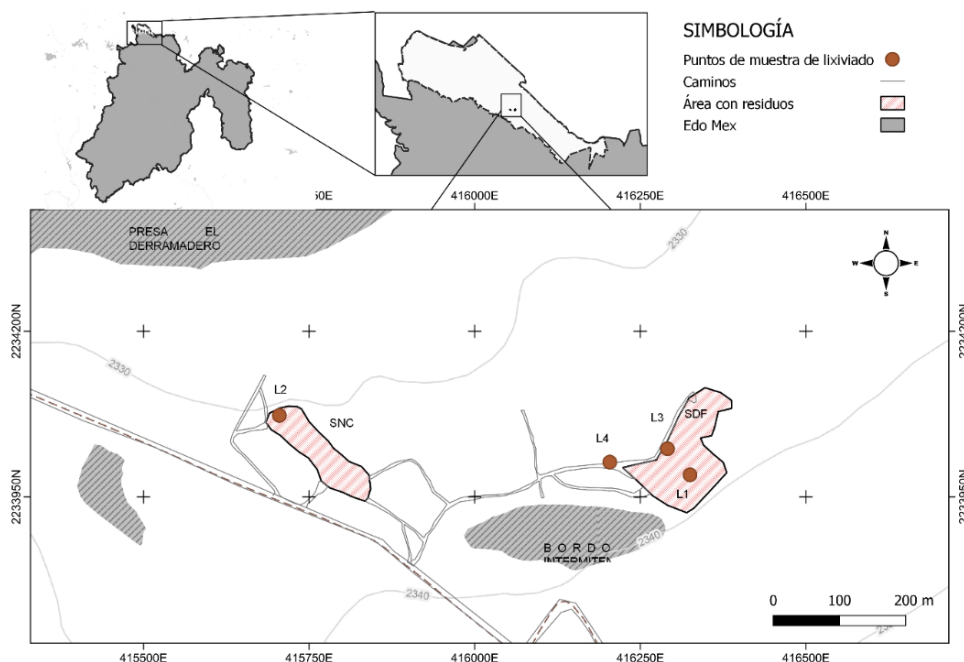


Figura 3.26 Puntos de muestreo de lixiviados en el SDF de Polotitlán, EdoMéx



Figura 3.27 Laguna de lixiviados (muestra L2) en el SNC del sitio de disposición final de Polotitlán, EdoMéx.

En la segunda visita al sitio (época de secas), el muestreo no se realizó debido a que los puntos de muestreo L1 y L2 se encontraban secos (Figura 3.28). Sin embargo, durante trabajos de limpieza en el SDF se descubrieron 2 estructuras que aparentemente trabajan como pozos de lixiviados, por lo que se realizó el muestreo en ellos, siendo el pozo más cercano a la celda L3 y el pozo más alejado a la celda L4 (Figura 3.26).



Figura 3.28 Puntos de muestreo L1 (izquierda) y L2 (derecha) en época de secas

La caracterización fisicoquímica para las muestras de lixiviados obtenidas en el SDF, se realizó conforme a las normas y métodos que se listan en la Tabla 2.4. Los valores de la caracterización de lixiviados del SDF de Polotitlán no representa en lo general un riesgo ambiental, debido a que se encuentra dentro de los LMP de la NOM-001-SEMARNAT-2021 (Tabla 3.8 y 3.9). El pH de las muestras L2 y

L3 fueron neutras y el de L1 y L4 ligeramente básicas, mientras que la D es baja en todos los casos, lo cual es indicio de un contenido bajo en sales.

Los valores altos de las cargas orgánicas (SVT y DQO) en los lixiviados, pueden atribuirse a los residuos orgánicos detectados de manera visual entre los RSU (pañales y residuos de alimentos), que indican que son lixiviados viejos para L1, L2 y L3, mientras que L4 presenta cargas de lixiviado intermedio (Bagchi, 1990). Los valores determinados de N-NH_3 y SO_4^{2-} no representan un riesgo para la metanogénesis, por lo que los lixiviados pueden recircularse sin riesgo a la celda para acelerar la biodegradación de la fracción orgánica (Gerardi, 2003). Para los valores de N-NH_3 en L1 y L4 pueden volatilizarse o ser asimilados por las raíces de las plantas o microorganismos porque el sistema tiene un pH superior a 8 (Arteaga-Cortez, 2019).

La determinación de los MP (Cu, Cd, Pb, Ni, Zn, Al y Cr) en las muestras L1 y L2, presentó concentraciones no cuantificables (NQ, por sus siglas en inglés). Para el caso de Fe se cuantificó 1.98 mg/L para la laguna (L2) y 8.18 mg/L para la laguna en la celda norte. Estos valores se consideran de no riesgo, aunque las NOM-052-SEMARNAT-2005 y la NOM-001-SEMARNAT-2021 no reportan (NR) LMP, por lo que se puede atribuir la presencia de este metal al tipo de suelo que existe en el SDF (FAO, 2021).

Debido a que las muestras L3 y L4 fueron tomados de tanques de lixiviados, es de posible que éstos actúen como filtros, ya que los parámetros obtenidos disminuyeron del tanque más cercano a la celda (L3) al más lejano, el cual tiene una salida a lo que pareciera ser una laguna de lixiviados (muestra A1).

La caracterización biológica de los lixiviados se realizó en las muestras L1 y L2, en las que se determinó un alto contenido CT, que rebasa el LMP de la NOM-127-SSA1-1994. No se detectó en ninguna de las muestras E. coli (Tabla 3.10).

Tabla 3.8 Resultados de la caracterización de lixiviados de la muestra L1 y L2 del SDF de Polotitlán, EdoMéx.

PARÁMETRO	FECHA DE ANÁLISIS	CONDICIONES AMBIENTALES (°C)	UNIDADES	L1	L2	LMP V.I. EMBALSES, LAGOS Y LAGUNAS NOM-001-SEMARNAT-2021	LMP / CPR NOM-SEMARNAT-052-2005
T	2021/10/11	22.3	°C	17.63	18.90	35.00	NA
pH	2021/10/11	22.3	NA	8.34	7.51	6.00-9.00	NA
Ɔ	2021/10/11	22.4	mS/cm	2.12	1.99	NA	NA
SVT	2021/10/12	18.3	mg/L	3,091.67	4,575.00	NA	NA
DQO	2021/10/13	18.1	mg/L	2,500.00	5,400.00	140.00	NA
DBO ₅	2021/10/17	22.4	mg/L	57.30	82.42	NA	NA
N-NH ₃	2021/10/14	18.8	mg/L	116.02	337.58	NA	NA
SO ₄ ⁻²	2021/10/14	18.8	mg/L	7.28	5.28	NA	NA
Cu	2021/10/15	18.6	mg/L	NQ	NQ	6.00	NR/Th
Cd		19.8	mg/L	NQ	NQ	0.20	1.00
Cr		19.0	mg/L	NQ	NQ	1.00	5.00
Pb		19.0	mg/L	NQ	NQ	0.40	5.00
Ni		19.3	mg/L	NQ	NQ	4.00	NR/Th
Zn		19.0	mg/L	NQ	NQ	20.00	NR/Th
Al		18.5	mg/L	NQ	NQ	NR	NR/R,Th
Fe		19.3	mg/L	8.18	1.98	NR	NR

CPR: Códigos de peligrosidad de los residuos, LMP: Límite máximo permisible, NA: No aplica, ND: No Detectado, NQ: No cuantificable, NR: No reportado. Se reporta NQ, porque la concentración en la muestra se encuentra por debajo de la concentración del primer estándar preparado para la curva de calibración que es: Para Cu 0.20 mg/L; Cd 0.10 mg/L; Pb 0.20 mg/L; Ni 0.20 mg/L; Zn 0.10 mg/L; Cr 0.15 mg/L; Al 1.00 mg/L; As 0.50 mg/L.

Tabla 3.9 Resultados de la caracterización de lixiviados de la muestra L3 y L4 del SDF de Polotitlán, EdoMéx

PARÁMETRO	FECHA DE ANÁLISIS	CONDICIONES AMBIENTALES (°C)	UNIDADES	L3	L4	LMP V.I. EMBALSES, LAGOS Y LAGUNAS NOM-001-SEMARNAT-2021	NOM-052-SEMARNAT-2005
T <i>"in situ"</i>	2022/04/07	31.0	°C	27.10	19.20	35.0	NR
pH <i>"in situ"</i>	2022/04/07	31.0	NA	7.90	8.67	6.0-9.0	NR
Ɔ <i>"in situ"</i>	2022/04/07	31.0	mS/cm	3.47	0.80	NA	NR
ST	2022/04/07	20.0	mg/L	9,233.33	9,000.00	NA	NR
SVT	2022/04/07	20.0	mg/L	3,922.22	3,850.00	NA	NR
DQO	2022/04/07	18.0	mg/L	9,350.00	1,411.00	140	NR
N-NH ₄	2022/04/07	18.0	mg/L	247.58	ND	NA	NR
SO ₄ ⁻²	2022/04/07	18.0	mg/L	6.99	5.18	NA	NR

CPR: Códigos de peligrosidad de los residuos, LMP: Límite máximo permisible, NA: No aplica, ND: No Detectado, NQ: No cuantificable, NR: No reportado, P.D.: Promedio diario, P.M.: Promedio Mensual, R: Reactividad, Th: Toxicidad aguda.

Tabla 3.10 Resultados de Coliformes Totales

PARÁMETRO	UNIDADES	L1 (CELDA)	L2 (SNC)	NOM-127-SSA1-1994	LMP V.I. EMBALSES, LAGOS Y LAGUNAS NOM-001-SEMARNAT-2021
CT	UFC/100 ml	553	797	0	NA
E. Coli	NMP/100 ml	--	--	--	600

LMP: Límite máximo permisible, VI: valor instantáneo, NA: No aplica

- Muestreo y caracterización de suelos. Durante la primera visita realizada en época de lluvias se tomaron dos muestras alteradas de suelo sano (S1 y S2), obtenidas a una profundidad de 30 cm (Figura 3.29) y dos muestras de suelo contaminado con lixiviados (SC1 y SC2) extraídas a 10 cm de profundidad. Ambos tipos de muestra fueron acondicionados para su traslado al LIIA del ITToluca.

En la segunda visita, hecha en época de secas, se colectó una muestra mixta (SM) formada por tres puntos de muestreo de la periferia del SDF (1, 2 y 3) y un corte de perfil estratigráfico (SP). Las muestras SM, S1 y S2 se utilizaron para determinar las propiedades: Índice de los materiales superficiales constitutivos del suelo y granulometría. Los puntos se muestran en la Figura 3.30.



Figura 3.29 Extracción de muestra alterada de suelo sano en el SDF de Polotitlán, EdoMéx.

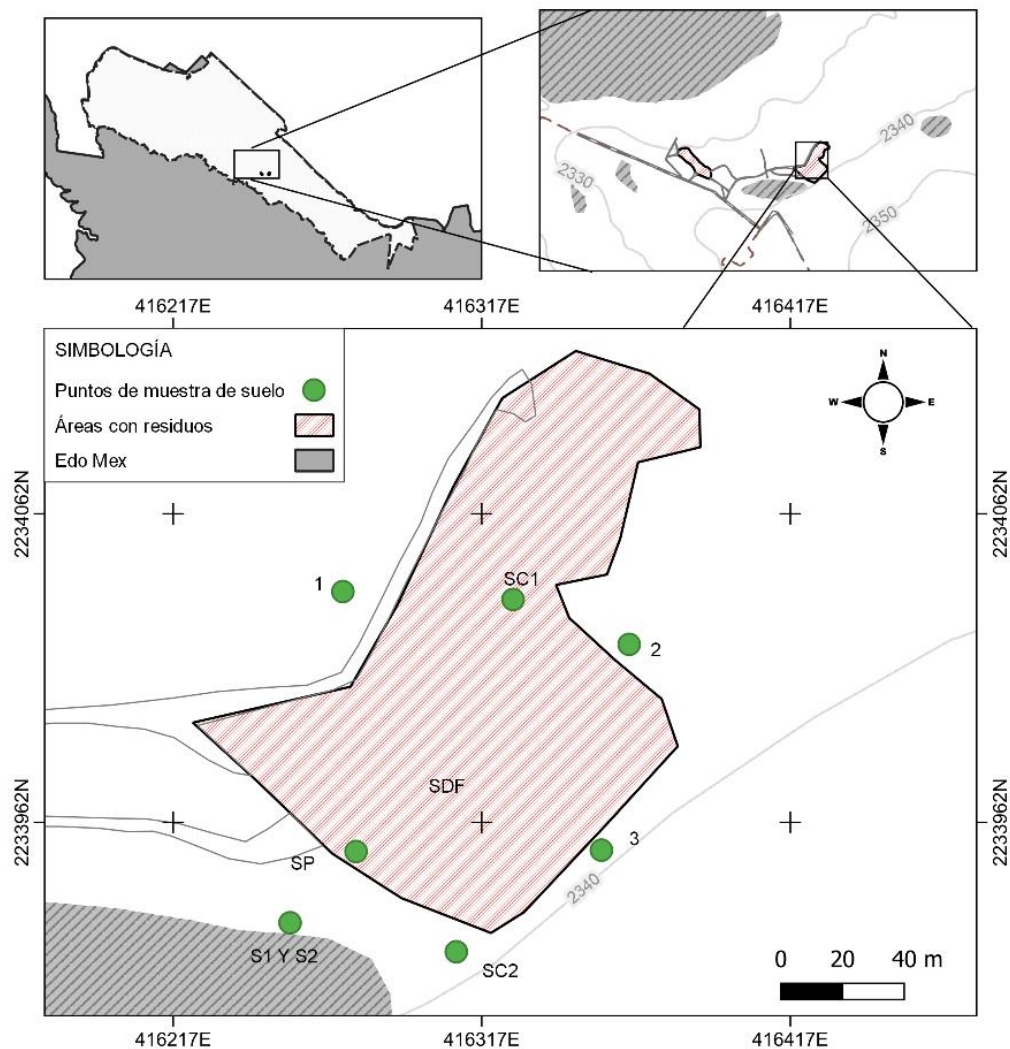


Figura 3.30 Puntos de muestreo de suelo en el Sitio de Disposición Final de Polotitlán, EdoMéx.

En el análisis visual del sitio se identificó la muestra SM como suelo grueso y a S1 y S2 como suelo fino, por lo que se extrajo 6 y 2 kg respectivamente (CFE, 1976).

De acuerdo con la clasificación manual y visual, muestras S1 presentó un color café parduzco, S2 café blancuzco y SM café grisáceo. La muestra S1 se clasificó como un suelo con baja compacidad, de media a alta resistencia en estado seco. La muestra S2 se consideró como suelo con compacidad media. El suelo

adyacente a la zona de tiro del SDF (SM) fue arenoso con gruesos y finos según la clasificación por tamaño y graduación de las partículas, arena bien o mal graduada con limo (ONNCCE, 2013). Las consideraciones de resistencia para las tres muestras fueron de medianas a bajas (Tabla 3.11).

Antes de iniciar la prueba granulométrica se preparó la muestra (Figura 3.31) y se extrajo una porción representativa, aplicando el método de cuarteo: 1,485 g para la muestra S1, 1,330 g para S2 y 5,975 g para la SM.



Figura 3.31 Preparación de las muestras para inspección visual y análisis granulométrico

De acuerdo con la prueba de granulometría (Figura 3.32), la muestra S1 del suelo resultó Franco-Arenosa-Gravosa (19 % grava, 72 % arena y 9 % limo). La muestra S2, fue un tipo arena bien graduada (1.3% grava, 95.4% arena y el 3.3% limo). En ambas muestras de suelos sanos, con el método del Triángulo Textura, las partículas finas corresponden a un limo de baja plasticidad (USDA, 2021). La muestra SM fue una Grava poco graduada con limo (11.2 % grava, 80.4 % arena y el 8.4 % limo) (ONNCCE, 2013).



Figura 3.32 Prueba granulométrica de suelo sano del SDF de Polotitlán, EdoMéx.

Debido a que las muestras ensayadas de S1, S2 y SM correspondieron a suelo fino, se les realizaron pruebas para determinar el límite Plástico. Conforme a la carta de plasticidad se obtuvo para S1 un limo inorgánico de compresibilidad media y para S2 el valor no fue determinante, lo que significa que la composición de sus granos fue referente a una arena, por tal motivo a estas muestras no se les pudo realizar la prueba de índice plástico. Para SM el Índice plástico fue de 4.73, que lo colocó en un rango de arcilla con baja plasticidad y no admite una gran cantidad de agua (SCT, 2003).

En cuanto a las determinaciones fisicoquímicas, las muestras S1 y S2 presentaron un pH ligeramente básico, un contenido de humedad manual moderado (2.0), pues estaban prácticamente secas (ASTM, 2006). La muestra SM, tuvo un pH neutro, un contenido orgánico reportado como SVT de 10.98 %, un contenido de humedad manual moderado y humedad base húmeda de 4.73 %Hbh. Estos resultados se presentan en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11 Resultados de la caracterización de suelo del SDF de Polotitlán, EdoMéx.

PARÁMETRO	FECHA DE ANÁLISIS	CONDICION AMBIENTAL (°C)	UNIDADES	FRACCION	SUELO SANO (S1)	SUELO SANO (S2)	SUELO MIXTO (SM)
Color	2021/11/14	--	--	Gruesa	Rojizo	Gris	Marmoleado
				Fina	Pardo	Café	Pardo
Tono	2021/11/14	--	--	Gruesa	Parduzco	Blancuzco	Marmoleado
				Fina	Parduzco	Amarillento	Opaco
Olor	2021/11/14	--	--	Gruesa y fina	Ninguno	Ninguno	Orgánico
Textura	2021/11/14	--	--	Gruesa	Grumosa	Grumosa	Grumoso
				Fina	Grumosa	Terroso	Terroso
Cementación	2021/11/14	--	--	Gruesa y fina	Débil	Débil	Débil
Consistencia	2021/11/14	--	--	Gruesa y fina	Blanda	Blanda	Blanda
Humedad manual	2021/11/14	--	--	Fina	2.00 Seco	2.00 Seco	2.00 Seco
Granulometría	2021/11/13	--	--		Franco-Arenosa-Gravosa	Arena-graduada	Grava poco graduada con limo
Índice plástico	-	19	--		4.51	--	4.73
T	2021/10/11	22	°C		20.30	21.20	20.50
pH	2021/10/11	22	--		8.70	8.02	6.78
Humedad	2021/11/14	18	%Hbh		NRE	NRE	4.70
SVT	2022/04/07	18	% peso seco		NRE	NRE	10.98

NRE: No realizado

Las muestras SC1 y SC2, correspondientes a suelos contaminados por lixiviados, fueron extraídas de forma alterada y superficial (Figura 3.33). En la Tabla 3.12, se concentran los resultados fisicoquímicos observándose que ambas muestras presentaron color “negro”, debido a la presencia de lixiviados. Los parámetros de Textura, Cementación, Resistencia y SVT, no se realizaron (Nre) por cuestiones de seguridad, ya que se desconocía su potencial de toxicidad.



Figura 3.33 Extracción de muestras de suelo contaminado

Se detectaron seis de los ocho MP analizados (Pb, Ni, Mn, Cr, Zn y Fe) en la muestra SC1 y solo cinco (Ni, Mn, Cr, Zn y Fe) para SC2 (Tabla 3.12). La presencia de Pb, Cr, Cd y Zn en ambos suelos contaminados con lixiviado puede atribuirse a los residuos depositados en el SDF, mientras que Mn y Fe, están relacionados con el tipo suelo del lugar, en especial por la presencia de óxidos férricos que le dan una tonalidad rosa según la Tabla Munsell modificada por la FAO (2009).

Ambas muestras de suelos tienen valores similares de Ni, Cr, Zn y Fe y, la muestra de SC1 tiene el doble de Mn que la SC2 y 32.54 mg/kg de Pb, MP que no se cuantificó en SC2; lo que representa una contaminación ambiental directa al suelo, que puede migrar por corrientes superficiales o lixiviación a los cuerpos de aguas cercanos (Leon-Gómez et al., 2015).

Tabla 3.12 Resultados de las determinaciones en suelos contaminados del SDF de Polotitlán EdoMéx

PARÁMETRO	FECHA DE ANÁLISIS	CONDICIONES AMBIENTALES (°C)	UNIDADES	SUELO CONTAMINADO (SC1)	SUELO CONTAMINADO (SC2)
Color	21/11/14	18.8	---	Negro	Negro
Textura	21/11/13	18.1	---	Nre	Nre
Cementación	21/11/14	18.8	---	Nre	Nre
Consistencia	21/11/14	-----	---	Nre	Nre
T	21/10/11	22.3	°C	19.50	19.70
pH	21/10/11	22.3	NA	7.11	7.53
Humedad manual	21/11/14	18.3		12.70 "Húmedo"	13.20 "Húmedo"
SVT	21/10/12	18.3	%	Nre	Nre
Cu	21/11/09	18.6	mg/kg	NQ	NQ
Cd	21/11/10	19.8	mg/kg	NQ	NQ
Pb	21/11/10	19.0	mg/kg	32.54	NQ
Ni	21/11/10	19.3	mg/kg	27.43	28.55
Mn	21/11/10	19.0	mg/kg	143.33	74.88
Cr	21/11/11	19.0	mg/kg	48.66	45.38
Zn	21/11/11	18.5	mg/kg	65.51	69.87
Fe	21/11/12	19.3	mg/kg	2,3873.05	23,700.63

Nre: No realizado. Se reporta NQ, porque la concentración en la muestra se encuentra por debajo de la concentración del primer estándar preparado para la curva de calibración que es: Para Cu 0.20 mg/L; Cd 0.10 mg/L; Pb 0.20 mg/L; Ni 0.20 mg/L; Zn 0.10 mg/L; Cr 0.15 mg/L; Al 1.00 mg/L; As 0.50 mg/L.

El perfil de suelo se obtiene mediante un corte vertical que exhibe todos los horizontes genéticos que lo integran y parte del material subyacente relativamente inalterado (DOF D. , 2002). Al ser las muestras superficiales S1, S2 y SM, de tipo arenas y limos, se requirió realizar un sondeo para conocer el tipo de suelo donde se asienta el SDF. El punto muestreado se identificó durante la exploración realizada al sitio, en una zona de suelo expuesto a una profundidad de 1.50 m. La extracción de la muestra se realizó en bloques, por medio de muestreo alterado, obteniendo que el perfil estratigráfico se compone de cuatro estratos, las cuales se presentan en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13 Perfil estratigráfico del suelo del SDF "Rancho del Municipio" de Polotitlán, EdoMéx

PROFUNDIDAD/ COTA (m)	ESTRATO	SUCS	DESCRIPCIÓN	PANEL FOTOGRAFICO
0.00				
0.01 / 0.40	E1	---	Estrato conformado por RSU semicompactados y material de compactación	
0.40-0.80 / 0.40	E2	---	Estrato con material contaminado y geomembrana expuesta, desintegrabilidad en agua muy alta	
0.70-1.0 / 0.30	E3	MH limo arenoso de alta plasticidad	Suelo de partículas finas, color café blancuzco, desintegrabilidad en agua muy alta, consistencia suave	
1.00-1.50 / 0.50	E4	MH limo arenoso de alta plasticidad	Suelo de partículas finas, color pardo rojizo, desintegrabilidad en agua muy alta, consistencia suave	

En el primer estrato E1 de la Tabla 3.13, se presentaron los RS con baja compactación o no compactados, constituidos mayormente por residuos plásticos, restos de comida y pañales.

El estrato E2 está conformado por arcilla con alta plasticidad y compactación, por lo que se utilizó como base para la celda de disposición. La frontera de esta capa y la subsecuente, presentó restos de geomembrana.

Los análisis realizados en el estrato E3 arrojaron un suelo con compacidad de densa a muy densa, tipo seco y de color café pálido. En los estudios de clasificación del suelo se identificó como arcilla o limo arenoso de alta plasticidad, con un pH neutro cercano a 7.35.

En cuanto al estrato E4, se observó un suelo seco, que va del color café rojizo al rosado, con compacidad densa a muy densa, compuesto por un 75 % de arenas y un límite líquido de 50 que lo ubica como un suelo con alta plasticidad conforme a la carta de plasticidad.

3.2.2 Sitio de transferencia Yolotzingo

El Municipio de Tianguistenco está en el centro del EdoMéx, entre las coordenadas longitud 99°32'12.84" W a 99°18'23.76" W, y latitud 19°5'11.4" N a 19°14'16.8" N; tiene una población de 84,259 hab (INEGI, 2020). Colinda al norte con los municipios de Chapultepec, Metepec, Lerma y Capulhuac, al sur con el Municipio de Ocuilán, al oeste con los municipios de Texcalyacac, Almoloya del Río, Atizapán de Zaragoza, San Antonio la Isla, Calimaya y Chapultepec (CPCEMEX, 2022), como se aprecia en la Figura 3.34.

Este municipio cuenta con el “Sitio de transferencia Yolotzingo” (STY), que está localizado en la carretera “Marquesa-Tenango”, en la población de San Lorenzo Huehuetitlán, en las coordenadas latitud 19.14558 y longitud -99.482236, a una elevación de entre 2590 y 2603 msnm. Es el sitio de almacenamiento temporal de RSU

del municipio, debido a que no se cuenta con un SDF, donde son colocados hasta su traslado al RESA de San Antonio la Isla (E1, 2022).

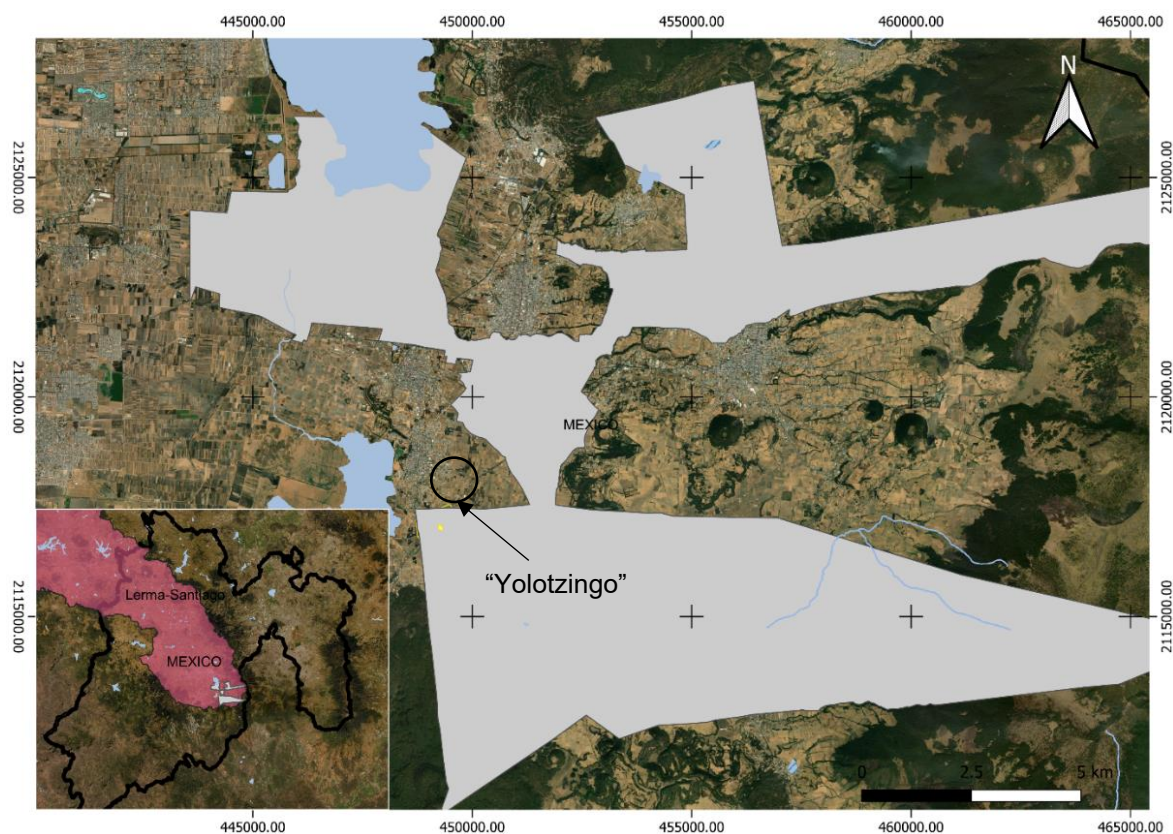


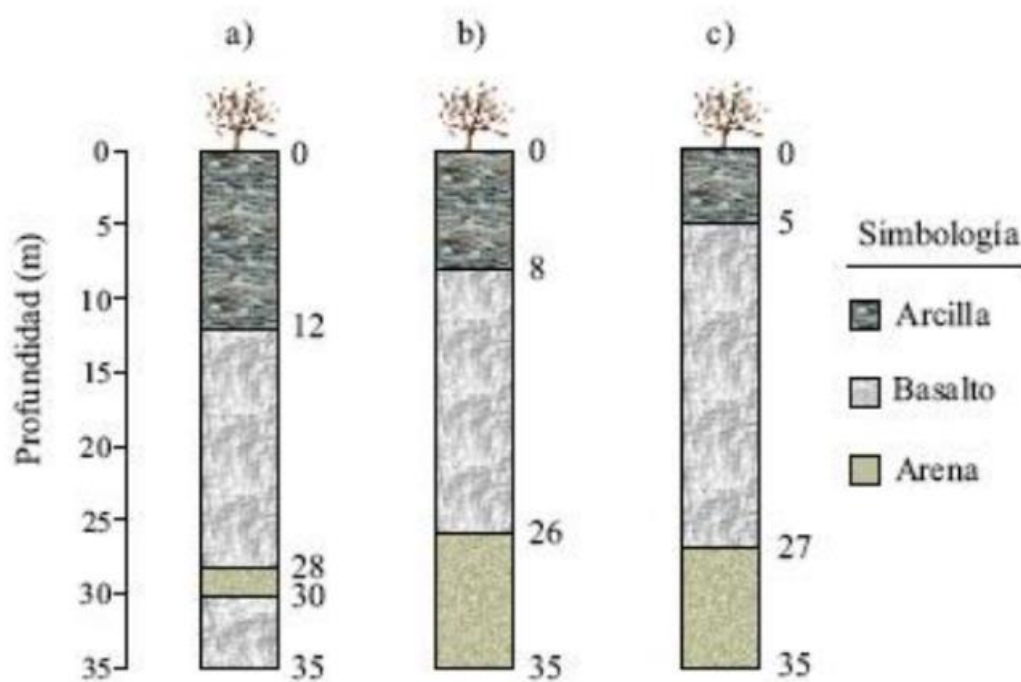
Figura 3.34 Localización de la Estación de Transferencia “Yolotzingo” en el Municipio de Tianguistenco

a) Medio Geográfico: Este medio geográfico comprende clima, la hidrografía, la fisiografía, la geología, el uso de suelo y las áreas naturales protegidas.

- Clima. En Tianguistenco predomina el clima templado subhúmedo con lluvias en verano, con rangos de temperatura entre 8 y 14 °C. Las heladas que se presentan en la zona tienen valores mínimos y máximos, que descienden hasta los -11°C. La presencia de nieblas en la zona cercana a la STY tiene registros máximos de 87 días al año, provocadas por la cercanía a la laguna de Chignahuapan. El rango de precipitación varía de 1,000 a 1,200 mm anuales (Tianguistenco, 2019).

- **Fisiografía.** El municipio se encuentra ubicado en la subprovincia de lagos y volcanes de Anáhuac en la provincia del Eje Neovolcánico, dentro del sistema de topoformas del vaso lacustre de piso rocoso, sierra volcánica con estrato y escudo volcánico con mesetas. La ETY se encuentra ubicada en un vaso lacustre de piso rocoso o cementado (51.47 %), Sierra volcánica con estrato volcanes o estrato volcanes aislados (29.91 %) y Escudo volcanes con mesetas (18.62 %), perteneciente a Lagos y Volcanes de Anáhuac, sobre el eje Neovolcánico. Los volcanes más cercanos a la ETY son el Santa Fe Mezapa (4,307 m), el Tres Cruces (5,829 m) y el Holotepec (6,552 m) (INEGI, 2022; Tianguistenco, 2022; Tianguistenco, 2019).
- **Geología.** En el municipio predomina la presencia de rocas de origen volcánico y constituidas de materiales por sedimentación, entre las que se encuentran rocas ígneas extrusivas como basalto, aluvial, andesita, lacustre, residual y toba básica, además de brecha volcánica básica. En la zona donde se ubica la ETY, la roca predominante es de tipo ígnea extrusiva formada en el cuaternario neógeno (Tianguistenco, 2022; Tianguistenco, 2019; INEGI I. N., 2009).
- **Suelo.** El suelo dominante en el municipio es el Andosol en un 75 % y se encuentran también Phaeozem, Lepsol, Vertisol, Regosol e Histosol. La ETY se encuentra ubicada sobre suelo Phaeozem, caracterizado por ser un suelo suave, rico en materia orgánica y en nutrientes, en el primer metro de profundidad no contienen generalmente carbonato cálcico, que colinda al sur con suelo regosol destrico.

En la zona adyacente, el uso del suelo es agrícola de tipo estacional en un 38 %, predominando el relieve de tipo llanura (INEGI, 2016; INEGI, 2022; CPCEMEX, 2022). La exploración litológica del suelo (Figura 3.35) indica una composición de arcilla, basalto y arena (Salas-Garcia, 2011).



a): pozo de monitoreo perforado en zona de estudio; b) y c): pozos de extracción a 900 m y 2 km de la zona de fractura.

Fuente: Salas-García, 2011.

Figura 3.35 Cortes litológicos proporcionales verticales de los primeros 35 m, zona estudiada a 2 km de la ETY, Tianguistenco, EdoMéx.

- **Uso de suelo y Vegetación.** El uso de suelo en el municipio se caracteriza por ser agrícola, clasificado como de tipo Agrícola-Pecuaria-Forestal. La cobertura vegetal en Tianguistenco considera tres tipos; bosque de coníferas, bosque de encino de tipo densa y pastizales. En la zona circundante a la ETY, el uso de suelo es para actividades agrícolas de temporal y existen algunos asentamientos urbanos, aunque la población más cercana es San Lorenzo Huehuetitlán. La poca vegetación que se encuentra en el sitio es característica de bosque de encino, vegetación hidrófila y pastizal (INEGI, 2022; CPCEMEX, 2022), como se puede observarse en la Figura 3.36.



Figura 3.36 Uso de suelo y vegetación de la zona circundante a la Estación de Transferencia de Tianguistenco, EdoMéx.

- Hidrología. Hidrológicamente el municipio se encuentra ubicado en la cuenca Río Lerma y el Acuífero del Valle de Toluca, la corriente más importante es el Río Lerma (Figura 3.37). La cuenca del Lerma es explotada por el sistema Lerma como fuente externa para la importación de agua por la Ciudad de México. El Acuífero del Valle de Toluca, junto con otros acuíferos de la zona, tiene un buen potencial de aguas subterráneas, el cual ha sido mermado por la exportación de grandes volúmenes, mediante la batería de pozos del sistema Lerma para la Ciudad de México.

La ETY se ubica en el oeste de la microcuenca Tlajipehualpa en colindancia con las microcuencas Almoloya del Río y Texcalyacac, de la subcuenca RH12Aa Almoloya-Otzolotepec de tipo exorreica con drenaje dendrítico, cuenca Río Lerma 1 que pertenece a la Región Hidrológica 12 Lerma-Santiago, concerniente a la RHAVIII, Lerma-Santiago-Pacífico.

La corriente de agua más cercana a la ETY es el Río Huayatlaco de tipo perenne, que nace en el volcán El Huilote a una altura de 3500 msnm. El cuerpo de agua cercano es la laguna de Chignahuapan, localizada en los municipios de Almoloya del Río, Texcalyacac y Santa Cruz Atizapán. La ETY se ubica cerca de un área de concentración de pozos.

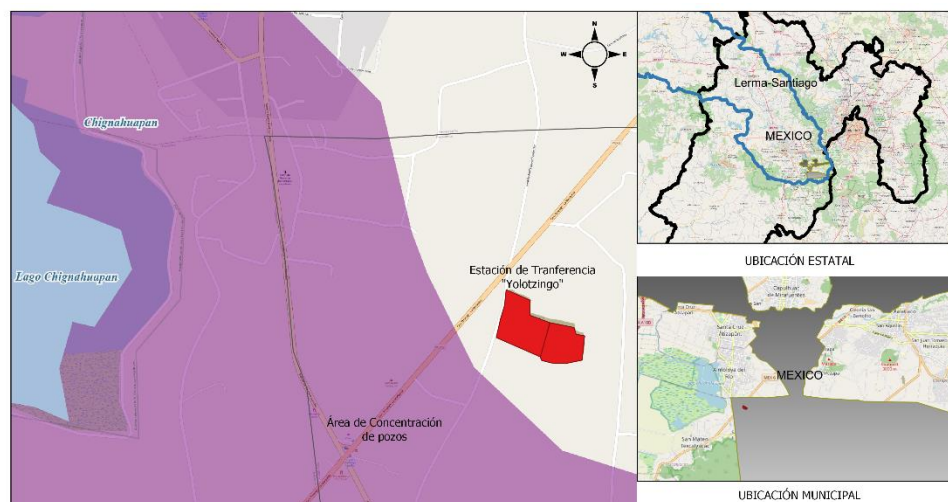


Figura 3.37 Cuerpo de agua cercano a la ETY, Tianguistenco.

Garfias *et al.* (2017), realizan un esquema general hidrogeológico del acuífero del Valle de Toluca, en el que clasifica la zona de estudio con depósitos de basaltos, formación Cichinautzin (Qb) y permeabilidad alta, que proporciona la infiltración de abundante precipitación, manifestada hacia el fondo de Valle de Toluca, bajo la forma de manantiales, que desde tiempo inmemorable dieron lugar al sistema lagunar de Almoloya del Río. El acuífero Valle de Toluca, se encuentra dentro de la provincia del Eje Neovolcánico, los principales materiales que lo constituyen son aluviales y lacustres originados por derrames volcánicos. El clima predominante según la clasificación de Köppen corresponde a Templado húmedo con lluvias en verano. El uso del agua en este acuífero es principalmente agrícola, publico-urbano, Industrial y servicios.

- Áreas Naturales Protegidas. La ETY no se encuentra dentro de alguna área natural protegida, donde la más cercana es la denominada Mazahua-Matlazincá, ubicada a 1.6 km al sur (CPCEMEX, 2022).

b) Clasificación del Sitio. El Municipio de Tianguistenco almacena RS en el ETY. En entrevista realizada en marzo del 2022, el Director de Servicios Públicos del ayuntamiento 2022-2024 de Tianguistenco, manifestó que la ETY contaba con una vida útil aproximada de 15 años. Desde año 2014 pretende ser un ET debido que el

municipio no cuenta con sitios de disposición. Su clasificación es incierta, algunos documentos la refieren como ET (Mérida, 2018), otros como SNC municipal (Ayuntamiento Polotitlán, 2019) y algunos otros como la Mina “Yolotzingo”, en donde se inició a tirar basura clandestinamente en la década de los 90 del siglo pasado, provocando molestia de la población cercana (Huehuitlan, 2019). En la Figura 3.38 se muestra el área actual.



Fuente: Google Earth, 2022

Figura 3.38 Estación de Transferencia "Yolotzingo", Tlanguistenco, EdoMéx.

Para solventar la deficiencia de datos se realizó una clasificación del sitio de estudio según se muestra en la Tabla 3.14. Esta clasificación ayudó a resolver el problema de elección de normas, leyes y reglamentos, que se manejaron para la justificación de la propuesta técnica, que se presenta más adelante en esta investigación. Los datos que se utilizaron en la clasificación fueron tomados de documentos municipales y observación en visitas al sitio.

Tabla 3.14 Cuadro comparativo de la clasificación considerando al sitio como Estación de Transferencia

NOMBRE DEL SITIO: ET "YOLOTZINGO"		
TIPO:	DESCRIPCIÓN	CUMPLE
POR OPERACIÓN DE CARGA		
DIRECTA	Emplea la gravedad para el traslado de la basura de los camiones recolectores a los vehículos de transferencia	
INDIRECTA	Utiliza locales de almacenamiento, además de equipos mecanizados, para mover la basura y alimentar los vehículos de transferencia.	X
POR PROCESAMIENTO DE RECURSOS		
SIN PROCESAMIENTO	No sufre ningún procesamiento, salvo la compactación recibida, y por lo tanto es transferida en su estado original	X
PROCESAMIENTO	Se realiza compactación, trituración y/o selección de materiales en el sitio.	
POR CARACTERÍSTICAS DEL EDIFICIO		
SIMPLE	Plataforma elevada a cielo abierto	X
	Rampa de acceso de hormigón, estructura metálica o terraplén	
	Cerro o terraplén natural	X
	Cantidad mínima de residuos sólidos	
	Sin gran precipitación pluvial y vientos fuertes	
	Tela o malla de protección	
SIMPLIFICADA	Gato hidráulico o por aire comprimido	
	Sitio cerrado	
	Construcción atendiendo especificaciones para las construcciones industriales	
	En el área urbana armonía de la instalación con el vecindario	

Fuente: Modificado de Sedesol; INECC, 2022 b; SEMARNAT, 2010.

Con base en la Tabla 3.14, la ETY se clasificó de tipo “Indirecta, sin procesamiento de residuos”. Entre su infraestructura, solo cuenta con una plataforma elevada a cielo abierto, soportada por un muro de concreto y piedra braza, una rampa de acceso natural en la zona oeste y entrada de acceso de tierra con escombros.

Para el análisis histórico de la ETY, se ha considerado que inicia actividades como SNC desde el año 2002 (Google, 2021; PDU Tianguistenco, 2003). En la imagen satelital del 31 de marzo del 2002 (Figura 3.39), se observó quema de los RSU que se encontraban dispersos, posiblemente depositados por la cercanía al SDF de Almoloya del Río (Google Earth, 2022).



Fuente: Adaptado de Google Earth, 2021

Figura 3.39 Área afectada por Residuos Sólidos en la ETY, Tianguistenco, Edo. Méx., 31 de marzo del 2002

Para 2004, el municipio registró una recolección de residuos de 12,770 t/año y no hay datos de disposición. Durante el año 2005, se tuvo una recolección de 20,400 t/año, con una disposición en 10 SNC (ríos, barrancas y parajes), entre ellos la ETY, por lo que se desconoce la cantidad exacta depositada (Ayuntamiento Tianguistenco, 2005).

Ya para 2009, el servicio de limpia recolectó de 75 a 110 t/día, lo que equivale en promedio a 40.56 % más de lo que se recolectaba en años previos, con un promedio por habitante de 1.5 kg/día. En la Figura 3.40, se observa en el sitio bajo estudio, las zonas donde se acumulan RSU, lo que puede deberse a que en ese año la ETY fue una zona de excavación con diferentes terraplenes, denominada “Tiradero socavón de San Lorenzo” (Ayuntamiento Tianguistenco, 2009).

Durante el periodo municipal 2010-2012, el Ayuntamiento en funciones trabajó para la instalación de un SDF que cumpliera con la normatividad vigente, por lo que se realizó un saneamiento que incluyó: la instalación de una capa de material impermeable, cuatro pozos de venteo y cubrimiento de residuos cada 2 m (E3, 2022).



Fuente: Adaptado de Google Earth, 2021

Figura 3.40 Afectación por Residuos Sólidos en la ETY de Tianguistenco, EdoMéx, el 31 de enero del 2009.

En las imágenes satelitales de las Figura 3.41 y Figura 3.42, se observa la zona de recepción de residuos definida y camiones de traslado. De acuerdo con datos del INEGI (2022) y Tianguistenco (2013), entre los años 2012 y 2013, se recolectaban en promedio 40 t/día, trasladándose entre 20,000 y 23,000 t/año de

RSU a los RESA de los municipios de Tenango del Valle y San Antonio la Isla, además, se contaba con nueve SNC.



Fuente: Adaptado de Google Earth, 2021

Figura 3.41 Afectación por Residuos Sólidos en la ETY de Tianguistenco, EdoMéx el 26 de abril (izquierda) y 9 de junio (derecha) del 2012.



Fuente: Adaptado de Google Earth, 2021

Figura 3.42 Afectación por Residuos Sólidos en la Estación de Transferencia de Tianguistenco, EdoMéx el 09 de enero del 2013.

En el año 2014, la ETY fue un SNC municipal, que almacenó aproximadamente 14,965 t de RSU, sin proceso de saneamiento (Figura 3.43). El ayuntamiento en funciones contempló en su “Plan de Desarrollo Urbano”, el proyecto para un espacio destinado a la disposición de RSU con una superficie de 12,500 m² aproximadamente, el cual debió de estar terminado en 2020. En promedio la

generación de residuos reportada fue de 0.611 kg/hab día (Ayuntamiento Tianguistenco, 2013; 2019).



Fuente: Adaptado de Google Earth, 2021

Figura 3.43 Afectación por Residuos Sólidos en la ETY de Tianguistenco, EdoMéx, el 15 de febrero del 2014

Durante el año 2015, el municipio generó en promedio 47 t/día de RSU. El Reglamento de limpia solo contempla su depósito en la ETY, quedando prohibida la pepena o selección en el lugar. En la Figura 3.44, se observa la zona establecida para la recepción de residuos, una plataforma habilitada para la carga y transporte, además del control para prevenir su dispersión, lo que sugiere mejora en su manejo. (Ayuntamiento Tianguistenco, 2013; 2016).



Fuente: Adaptado de Google Earth, 2021

Figura 3.44 Afectación por Residuos Sólidos en la ETY de Tianguistenco, EdoMéx, durante el año 2015; 14 de agosto (izquierda) y 18 de octubre (derecha).

La PROPAEM de 2016, ordenó el cierre de la ETY y que los RSU se depositaran en el RESA de Xonacatlán. En la Figura 3.45, se puede observar el deterioro de la ETY. A pesar de lo anterior se siguió operando el lugar, incrementando la afectación a la zona por la ETY, como se observó en la Figura 3.46.



Fuente: Adaptado de Google Earth, 2021

Figura 3.45 Afectación por Residuos Sólidos en el SNC de Tlanguistenco, EdoMéx, el 02 de enero del 2016.



Fuente: Adaptado de Google Earth, 2021

Figura 3.46 Afectación por Residuos Sólidos en el SNC de Tlanguistenco, EdoMéx, en enero (izquierda) y abril (derecha) del 2017

Para el año 2019 se tiene registro de una recolección entre 110 y 130 t/día de RSU los martes y de 80 a 100 t/día el resto de la semana; los cuales se almacenaban en la ETY, donde se separaban y valorizaban con participación de segregadores primarios, para posteriormente llevar los residuos al RESA de San Antonio la Isla (Tianguistenco, 2019). En la Figura 3.47, se muestra la ETY fotografiada por medio del Dron DJI Phantom 4, donde puede apreciarse recolectores primarios y la operación de un equipo mecanizado, para acomodo de RSU y llenado de transfer para su traslado.



Figura 3.47 Vista aérea de la ETY de Tianguistenco, EdoMéx, septiembre 2019

Para el 13 de enero del 2020 (Figura 3.48), la ETY se encontró con inmovilización de residuos sólidos en el área de recepción, además se visualizó acumulación de RSU en el acceso, posiblemente por la falta de control en el sitio.

Durante la visita del 17 de marzo del 2022, se observó inmovilización de RSU, las imágenes satelitales de Google Earth confirman su almacenamiento desde noviembre del 2021. Esta acumulación se incrementó por falta de recursos y maquinaria para su desalojo, pues con la que se contaba se descompuso. La

recepción de RSU ascendió a 120 t/día, lo que representó un incremento del 20 % respecto a 2019 (Tianguistenco, 2022). En la visita realizada el 18 de marzo de 2022, fue posible observar que la ETY carece de control en el ingreso de RS y se detectaron varios puntos con afloramiento y escurrimiento de lixiviados (Figura 3.49).



Fuente: Adaptado de Google Earth, 2021

Figura 3.48 Afectación por Residuos Sólidos Urbanos en la Estación de Transferencia de Tianguistenco el 13 de enero del 2020



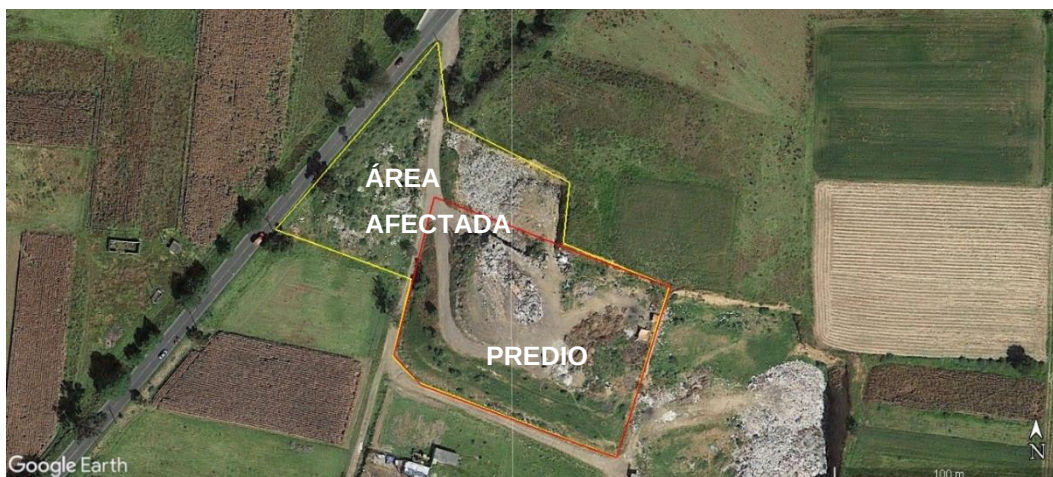
Figura 3.49 ETY fotografiada el 05 de abril del 2022

De acuerdo con el análisis histórico de la cronología fotográfica satelital de Google Earth Proo (Google Earth, 2022), en la Tabla 3.15 se enlistan las áreas utilizadas para la disposición, almacenamiento y traslado de RSU, donde la ETY comprenden un área de afectación de 13,828 m² (1.38 ha). En la Figura 3.50 se muestra el área afectada fuera del predio por el almacenamiento y la disposición de RSU, delimitada por una línea roja.

Tabla 3.15 Áreas afectadas por Residuos Sólidos en la Estación de Transferencia del Municipio de Tianguistenco, EdoMéx.

AÑO ANALIZADO POR FOTOGRAFÍA SATELITAL	ÁREA OCUPADA POR RSU (m ²)	ÁREA PARA VALORIZACIÓN O COMPOSTA (m ²)	ÁREA TOTAL IMPACTADA (m ²)
2002	---	---	6,146
2009	5,36	---	536
2012	5,638	---	5,638
2013	4,600	---	5,638
2014	1,630	---	5,638
2015	2,670	---	5,638
2016	6,518	---	12,302
2017	2,166	804	12,292
2018	3,445	727	9,715
2020	5,979	463	1,0301
2021	7,328	---	9,717
2022	8,816	---	13,828

Fuente: Google, 2022.



Fuente: Adaptado de Google Earth, 2022.

Figura 3.50 Área afectada por almacenamiento y disposición de RSU en la ETY, Tianguistenco, EdoMéx, 23 de noviembre 2022

c) Caracterización de la Estación de Transferencia. La caracterización de la ETY se realizó por medio del muestreo y evaluación de parámetros fisicoquímicos en agua, lixiviados y suelo. Las muestras fueron recolectadas durante las visitas realizadas el año 2022.

- Muestreo y caracterización de agua. Se tomaron muestras de los pozos 55-A (P55), 56(P56) y 57(P57) del Sistema Lerma perteneciente a la SACMEX, que es un sistema de abastecimiento de agua para la Ciudad de Mexico, los cuales son los recursos hídricos más cercanos a la ETY. Estas muestras fueron sometidas a análisis bacteriológicos y fisicoquímicos.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.16, donde se aprecian los parámetros analizados dentro de los LMP de la NOM-127-SSA-1994, lo cual indica que el agua extraída de los pozos cumple con las especificaciones de potabilidad, por lo que no hay presencia de contaminantes debido a la infiltración de lixiviados provenientes de la ETY.

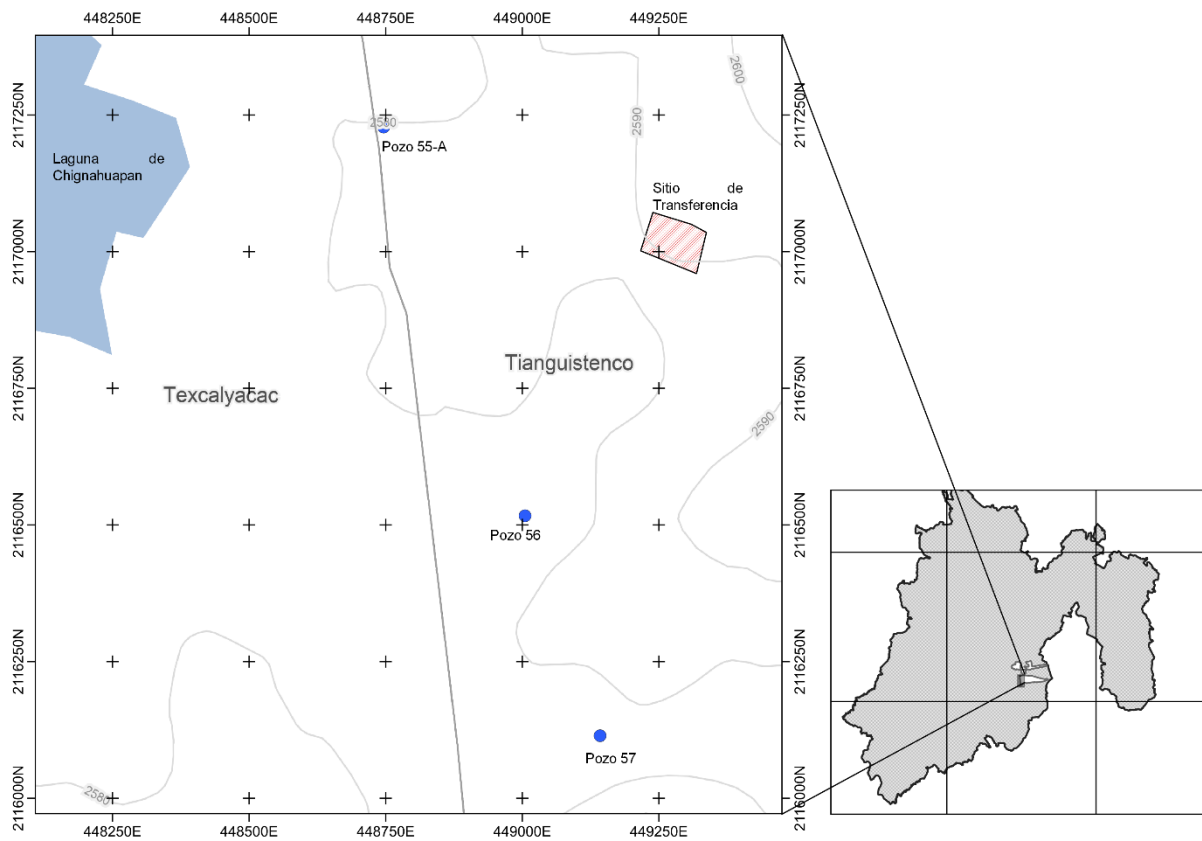


Figura 3.51 Localización de los puntos de muestreo de agua



Figura 3.52 Muestreo de agua en pozos

Tabla 3.16 Resultados de la caracterización de agua en Tianguistenco Estado de México

PARÁMETRO	FECHA DE ANÁLISIS	CONDICION AMBIENTAL (°C)	UNIDADES	P55	P56	P57	NOM-127-SSA1-1994	PROY NOM-127-SSA1-2021
T “ <i>in situ</i> ”	2021/10/11	20.00	°C	20.00	18.32	20.00	NR	NR
pH “ <i>in situ</i> ”	2021/10/11	20.00	NA	6.97	6.86	6.51	6.50 - 8.50	6.50 - 8.50
Ƴ “ <i>in situ</i> ”	2021/10/11	20.00	mS/cm	0.60	0.96	0.54	NR	NR
SVT	2021/10/15	20.00	mg/L	58.33	20.28	57.17	NR	NR
DQO	2021/10/14	18.00	mg/L	88.00	NQ	NQ	NR	NR
N-NH ₄	2021/10/14	18.00	mg/L	3.98	NQ	0.15	NR	NR
SO ₄ ⁻²	2021/10/14	18.00	mg/L	0.17	0.30	0.15	400.00	400.00
Cu	2022/11/04	21.00	mg/L	ND	ND	ND	2.00	2.00
Cd	2022/11/04	21.00	mg/L	ND	ND	ND	0.005	0.005
Pb	2022/11/04	21.00	mg/L	ND	ND	ND	0.010	0.010
Fe	2022/11/04	21.00	mg/L	0.067	ND	0.122	NR	0.300
Ni	2022/11/04	21.00	mg/L	ND	ND	ND	NR	0.070
Mn	2022/11/04	21.00	mg/L	ND	ND	ND	NR	0.150
Zn	2022/11/04	21.00	mg/L	ND	ND	ND	5.000	NR

CPR: Códigos de peligrosidad de los residuos, LMP: Límite máximo permisible, NA: No aplica, ND: No Detectado, NQ: No cuantificable, NR: No reportado, P.D.: Promedio diario, P.M.: Promedio Mensual, R: Reactividad, Th: Toxicidad aguda. Se reporta NQ, porque la concentración en la muestra se encuentra por debajo de la concentración del primer estándar preparado para la curva de calibración que es: Para Cu 0.20 mg/L; Cd 0.10 mg/L; Pb 0.20 mg/L; Ni 0.20 mg/L; Zn 0.10 mg/.

Los valores de pH en las muestras 55A y 56 fueron neutros, mientras que para el pozo 57 fue ligeramente ácido. La O se mostró baja en los tres pozos, lo que representa bajos niveles de sales.

Las cargas orgánicas reportadas como SVT tuvieron valores bajos en los tres pozos, lo que no representa afectaciones. La DQO solo fue cuantificable en el pozo 55A, lo que significa que la presencia de materia orgánica es muy baja en los pozos 56 y 57. Este parámetro no se puede comparar con la normatividad, debido a que ésta no reporta LMP (DOF, 1996).

En cuanto N-NH_4 , los valores determinados para los tres pozos se consideran de bajo impacto, aunque no se puede comparar con la normatividad, debido a que ésta no reporta LMP. Las concentraciones de SO_4^{2-} en las muestras, estuvieron por debajo de los LMP de ambas normas (Tabla 3.16), por lo que no representan riesgo a la salud por consumo.

Los MP analizados como Cu, Cd, Pb, Mn, Ni y Zn, no fueron detectados, por lo que se cumple con la NOM-127-SSA-1994 y con el proyecto de Norma NOM-027-SSA-2021. Con referencia al Fe, este metal fue detectado en los pozos 55A y 57, en concentraciones por debajo de los LMP de las normas mencionadas.

Los valores obtenidos para CT se presentan en la Tabla 3.17, observándose que se encuentran por debajo del LMP de la NOM-127-SSA-1994 y el PROY-NOM-027-SSA-2021, lo que indica que estos microorganismos no se encuentran en el acuífero, ya que estos pozos no reciben tratamiento previo para el uso como agua potable. La determinación de CT no se realizó en el pozo 56, debido a que no fue posible muestrear, porque se encontraba en mantenimiento.

Al comparar los resultados obtenidos del pozo 56 con los de Torres (2012), se encontró que la calidad del agua no ha sufrido grandes cambios y cumple con los LMP de la NOM-127-SSA1-2021 (Tabla 3.18), por lo que la migración de contaminantes provenientes de la ETY de Tianguistenco y del SDF de Almoloya del Río (clausurado), no ha alcanzado el nivel freático, que se encuentra entre los 40 m

de profundidad en la zona estudiada, descartando la contaminación de aguas subterráneas a gran velocidad, sin embargo los niveles de Fe obtenidos sugieren el monitoreo anual de este elemento (Tabla 3.16).

Tabla 3.17 Resultados de la determinación de Coliformes Totales en las muestras de agua

PARÁMETRO	UNIDADES	P55	P57	LMP DE LA NOM-127-SSA1-1994	LMP DE LA NOM-127-SSA1-2021
Coliformes Totales	UFC/100 ml	3<	3<	3	<1

LMP: Límite Máximo Permisible.

Tabla 3.18. Comparación de resultados obtenidos del pozo 56 en 2012 y 2022.

PARÁMETRO	UNIDADES	P56 2022	P56 2012	LMP DE LA NOM-127-SSA1-1994	LMP DE LA NOM-127-SSA1-2021
T <i>"in situ"</i>	°C	18.32	16.00	NR	NR
pH <i>"in situ"</i>	NA	6.86	6.95	6.50 - 8.50	6.50 - 8.50
DQO	mg/L	NQ	68.00	NR	NR
N-NH ₄	mg/L	NQ	NQ	NR	NR
SO ₄ ⁻²	mg/L	0.30	22.25	400.00	400.00

LMP: Límite máximo permisible, NA: No aplica, NQ: No cuantificable, NR: No reportado. Se reporta NQ, porque la concentración en la muestra se encuentra por debajo de la concentración del primer estándar preparado para la curva de calibración.

- Muestreo y caracterización de Lixiviados. En la visita del 17 de marzo del 2022, correspondiente a época de secas, se realizó un recorrido por la ETY para ubicar los puntos de muestreo. Debido al difícil acceso a dos de los tres puntos encontrados (Figura 3.53), se tomó una muestra de un escurrimiento en el talud de acceso (LT1). Mientras que, para la visita del 27 septiembre del 2022, correspondiente a la época de lluvias, los lixiviados se encontraban dispersos en el camino de acceso, por lo que se tomó una muestra (LT2) en la zona de almacenamiento (Figura 3.54).



Figura 3.53 Puntos de escurrimiento de lixiviados en la ETY

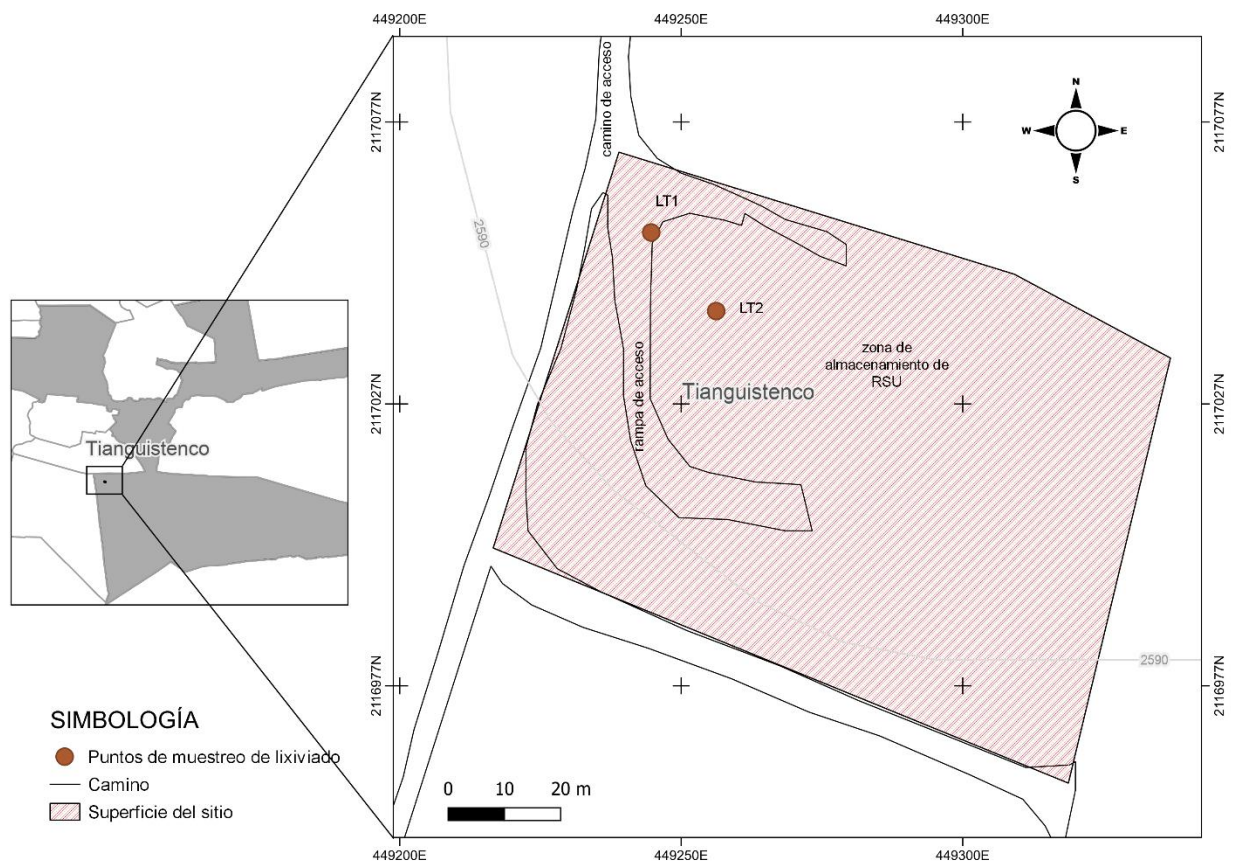


Figura 3.54 Puntos de recolección de muestras de lixiviado

Los valores obtenidos de las determinaciones fisicoquímicas en los lixiviados (Tabla 3.19), no representan en lo general un riesgo ambiental, debido a que se encontraron dentro de los LMP de la NOM-001-SEMARNAT-2021. El pH de las muestras en ambas épocas fue neutro, mientras que la O fue baja.

Los valores de las cargas orgánicas (SVT y DQO) en los lixiviados fueron altos y exceden el LMP para DQO, lo cual puede atribuirse a los residuos orgánicos dispuestos en la ETY. Los valores determinados de SVT, DQO, N-NH_3 y SO_4^{2-} fueron mayores en época de lluvias que de secas, lo cual puede atribuirse al arrastre y dilución de estos componentes por la lluvia que se infiltra a través de los RSU.

Conforme a la Tabla 1.3, las características de los lixiviados analizados corresponden al tipo II intermedio, que se presenta en SDF con edad de entre 5 y 10 años (Bagchi, 1990), lo cual no corresponde con la edad de la ETY, que data del 2002. Aunado a ello, los valores determinados se pueden atribuir a que se mezclan lixiviados viejos con nuevos, debido a que diariamente se almacenan RS.

Los resultados de MP se encuentran por debajo de los establecido por la ambas Normas, sin embargo, para Pb en época de secas (LT1), su valor fue cercano al LMP V.I. para infiltración en suelo establecido por la NOM-001-SEMARNAT-2021, por lo que recomienda realizar periódicamente el monitoreo de este metal (DOF, 2006; 2022).

Tabla 3.19 Resultados de la caracterización fisicoquímica de lixiviado en la Estación de Transferencia de Tianguistenco EdoMéx.

PARÁMETRO	FECHA DE ANÁLISIS	CONDICIONES AMBIENTALES (°C)	UNIDADES	LT1 (Secas)	LT2 (Lluvias)	LMP/CPR NOM-052-SEMARNAT-2005	LMP V.I. Suelo; Infiltración NOM-001-SEMARNAT-2021
Temperatura "in situ"	2022/04/09 2022/09/27	20.0	°C	24.20	25.90	NA	35.00
pH "in situ"	2022/04/09 2022/09/27	20.0	NA	8.00	8.40	NA	6.00-9.00
Ɔ "in situ"	2022/04/09 2022/09/27	20.0	mS/cm	82.80	56.70	NA	NR
SVT	2022/04/09 2022/09/27	20.0	mg/L	4,066.70	10,875.56	NA	NR
DQO	2022/04/09 2022/09/27	18.0		7,500.00	45,970.00	NA	210.00
N-NH ₃	2022/04/09 2022/09/27	18.0		125.40	568.14	NA	NR
SO ₄ ⁻²	2022/04/09 2022/09/27	18.0		11.00	86.43	NA	NR
Cd	2022/11/04	21.0	mg/L	ND	--	1.000	0.200
Cu	2022/11/04	21.1	mg/L	0.060	--	NR/Th	6.000
Fe	2022/11/04	21.9	mg/L	25.228	--	NR	NA
Mn	2022/11/04	21.5	mg/L	0.939	--	NA	NA
Ni	2022/11/04	20.1	mg/L	0.026	--	NR/Th	4.000
Pb	2022/11/04	20.1	mg/L	0.310	--	5.000	0.400
Zn	2022/11/04	20.1	mg/L	2.510	--	NA	20.000

LMP: Límite máximo permisible, NA: No aplica, ND: No Detectado, NQ: No cuantificable, NR: No reportado, P.D.: Promedio diario, P.M.: Promedio Mensual, R: Reactividad, Th: Toxicidad aguda. Se reporta NQ, porque la concentración en la muestra se encuentra por debajo de la concentración del primer estándar preparado para la curva de calibración que es: Para Cu 0.20 mg/L; Cd 0.10 mg/L; Pb 0.20 mg/L; Ni 0.20 mg/L; Zn 0.10 mg/L; Cr 0.15 mg/L; Al 1.00 mg/L; As 0.50 mg/L.

- Muestreo y caracterización de Suelo. En un inicio el ETY, fue una mina denominada de San Lorenzo, de donde se extrajo material pétreo, entre ellos laja. Con posterioridad a su abandono se utilizó como SNC para disponer residuos de la población aledaña debido a su cercanía al SDF de Almoloya del Río (E3, 2022).

Se visitó la ETY el 27 de septiembre del 2022, con la intención de muestrear suelo, sin embargo, al observar el corte de suelo en la celda saneada que se muestra en la Figura 3.55, donde se marcan tres etapas de operación, se consideró que no se obtendría una muestra representativa. Esta celda ha sido saneada en varios periodos administrativos con capas de cobertura, para ser utilizada como ET, pero actualmente se almacenan RS.

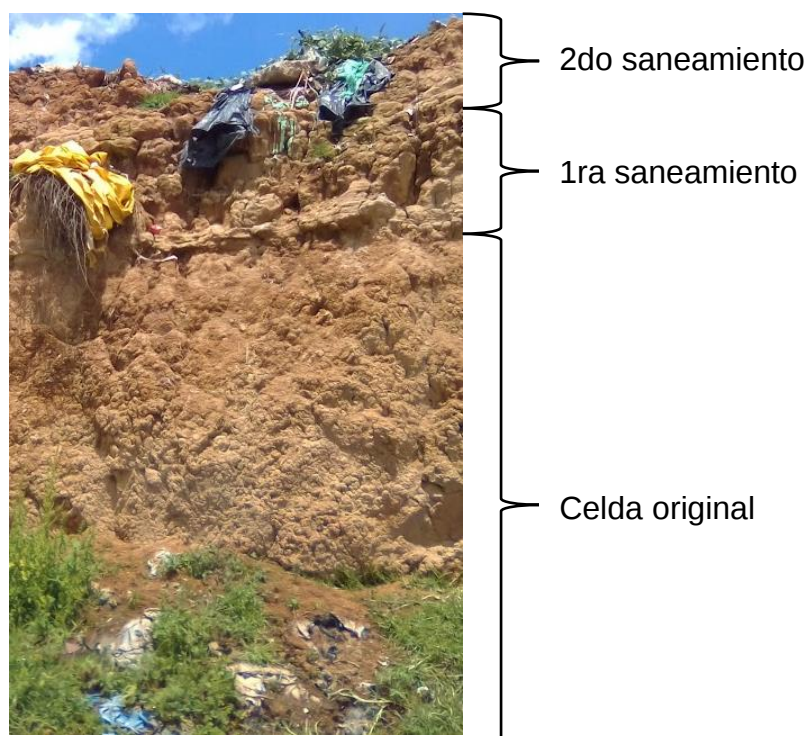


Figura 3.55 Perfil de suelo de la celda de disposición

Debido a lo anterior, para las características del suelo de la ETY, se tomaron los valores reportados por Torres Corral (2012), según los cuales el tipo de suelo a 5.0 m en la zona aledaña a la ETY, corresponde a arenas mal graduadas, con grava, con poco o nada de finos hasta una profundidad de 5.2 m; lo que favorece la infiltración

hacia otros estratos e incrementa la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación. Además, los suelos arenosos presentan porosidad y alta permeabilidad, lo que facilita el movimiento del agua. Los valores de pH fueron neutros y la σ presentó niveles máximos de 0.3 dS /m, presuntamente por la dilución de la concentración salina a causa de la precipitación. La conductividad hidráulica en la zona adyacente tiene valores altos entre 584 y 1,168 m/día, considerados altos para profundidades de 7.2 a 13.0 m.

El valor promedio de pH de las muestras obtenidas del material de cobertura de la celda en septiembre de 2022 fue 6.48, lo que no representa un gran cambio respecto al obtenido por Torres Corral (2012); mientras que el pH de una muestra donde escurren lixiviados fue de 8.13 (pH básico). Cabe mencionar que en esta zona se encontró mayor número de arcillas, lo que influye en una menor perfusión de lixiviados, pues a mayor porcentaje de arcilla, el efecto del lixiviado se considera de menor impacto (Musso, 2017).

3.3 EVALUACIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO

La evaluación de los sitios bajo estudio (SDF “Rancho del Municipio” y ETY), se llevó a cabo por medio de valoraciones técnica, ambiental y socioeconómica.

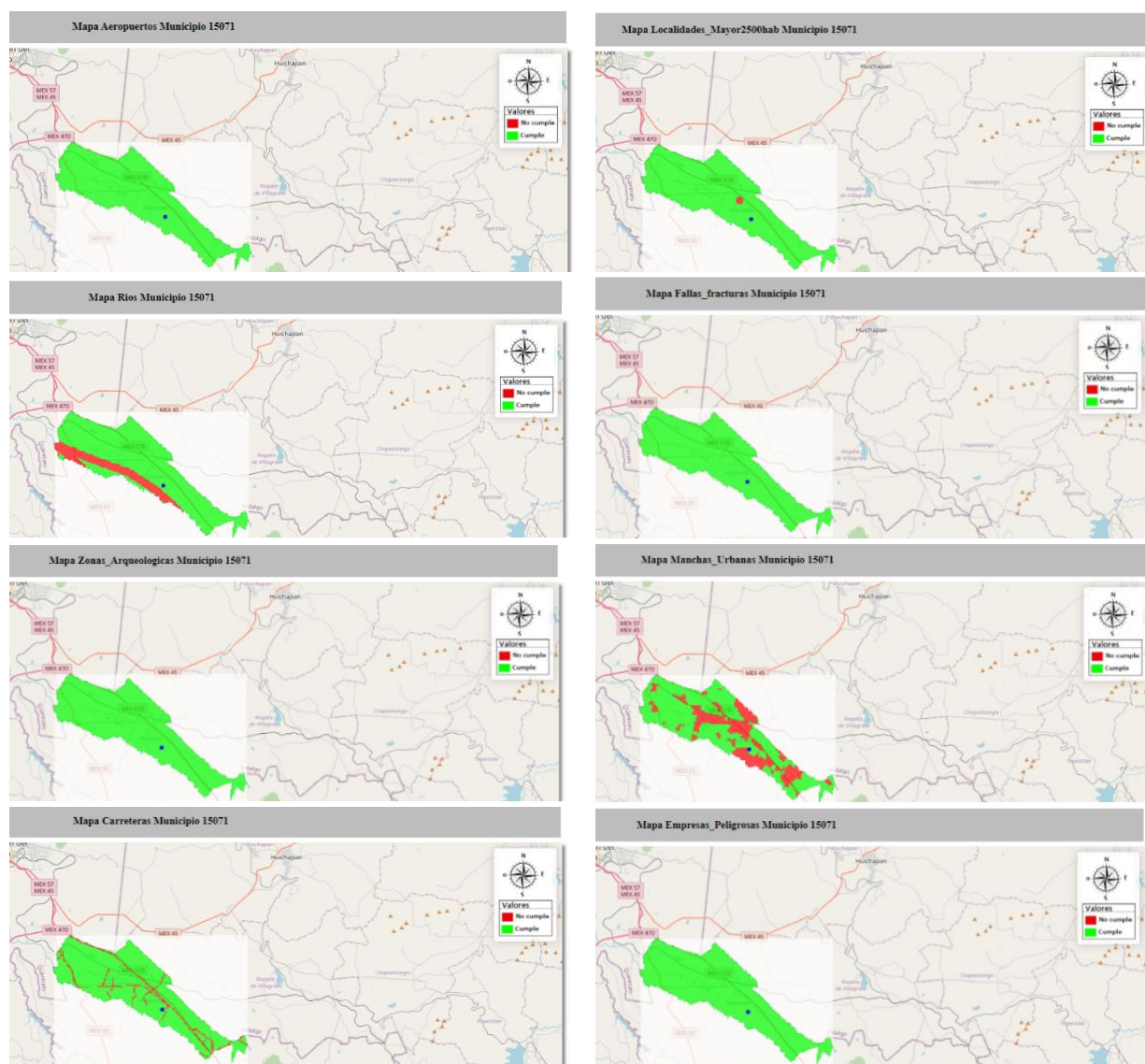
3.3.1 Evaluación técnica

La presentación de resultados de la evaluación técnica se realiza primero para el SDF “Rancho del municipio” y posteriormente para la ETY:

a) SDF “Rancho del municipio”. La evaluación técnica se describe considerando primero la ubicación del sitio, seguido de la aplicación en campo de la TV.

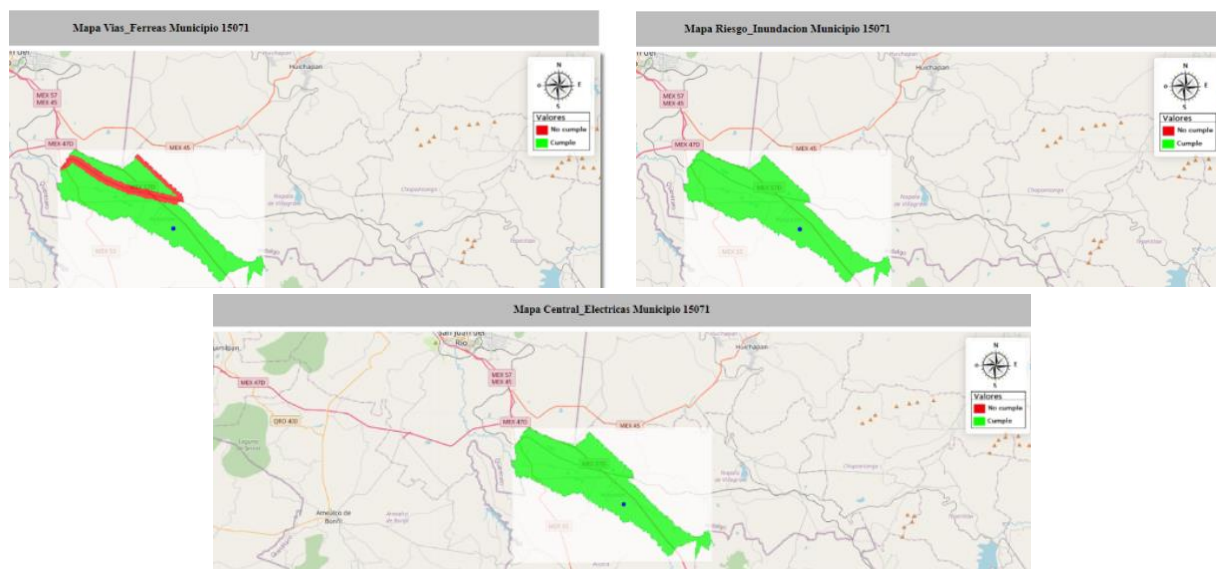
- Análisis de la ubicación del sitio de disposición final. Con el uso del SIGMIRSU se obtuvieron mapas con las restricciones de la ubicación del sitio conforme a la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004; Mañón-Salas & Hernández-Berriel, 2021), en los

que el SDF de Polotitlán se representa con un punto en color azul, de color verde las áreas idóneas y las restricciones están de rojo. En la Figura 3.56, se puede observar que el SDF del Municipio de Polotitlán cumple con las restricciones de: Aeropuertos, Población, Ríos, Fallas y/o fracturas, Zonas arqueológicas, Mancha urbana (aunque existen viviendas a 180 y 600 m en la periferia del sitio, sin embargo, se desconoce si se establecieron antes o después que el SDF), Carreteras, Empresas peligrosas, Vías férreas, Riesgo de inundación (CGPCEM, 2020) y Central eléctrica.



Fuente: Mañón-Salas & Hernández-Berriel, 2021

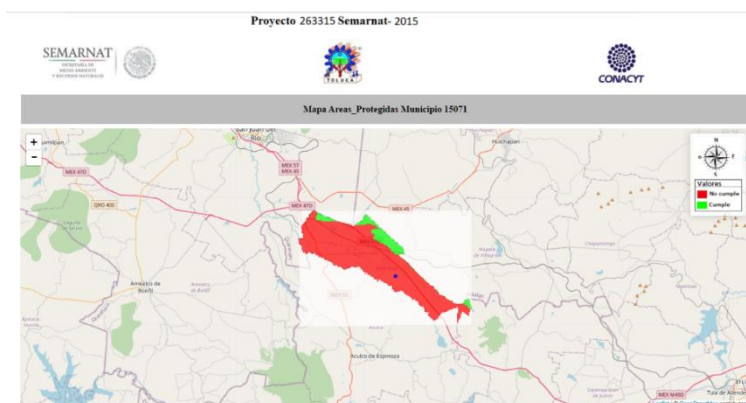
Figura 3.56 Mapas de restricción obtenidos con el SIGMIRSU



Fuente: Mañón-Salas & Hernández-Berriel, 2021

Figura 3.57 Mapas de restricción obtenidos con el SIGMIRSU (continuación)

El SDF “Rancho del municipio” incumple las restricciones: Ubicarse dentro de un Área Natural Protegida (ANP) y encontrarse a menos de 500 m de un cuerpo de agua. Respecto a la ubicación dentro de ANP, se incumple porque la mayor parte del territorio del Municipio de Polotitlán, pertenece al “Santuario del Agua Sistema Hidrológico Presa Huapango” (Figura 3.58)(DOF, 2004).

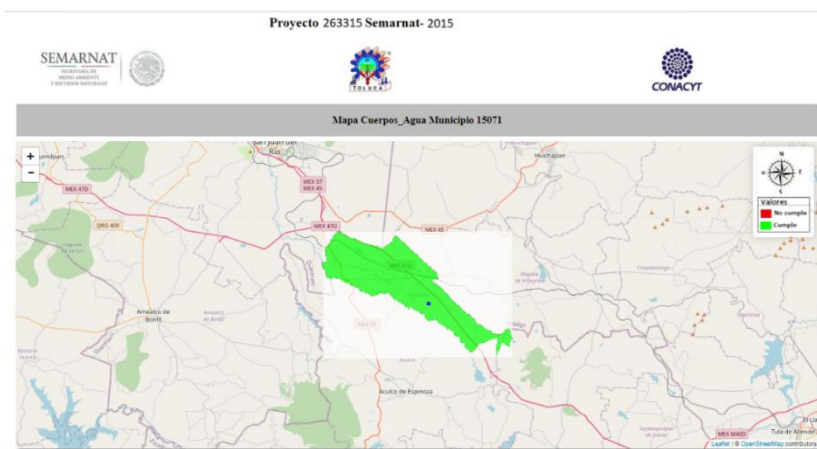


Fuente: Mañón-Salas & Hernández-Berriel, 2021

Figura 3.58 Restricciones por áreas naturales protegidas

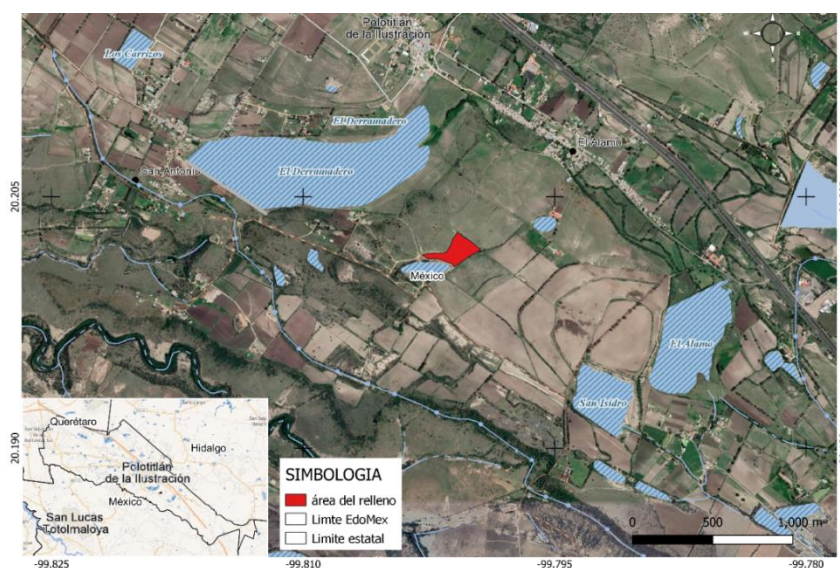
En cuanto a cuerpos de agua, el análisis con SIGMIRSU muestra que el SDF del Municipio de Polotitlán no se encuentra cerca de estos, por lo que cumple con esta

restricción (Figura 3.59); sin embargo, el SDF se encuentra dentro del acuífero 1503 Polotitlán, que presenta una sobreexplotación y cuenta con una disponibilidad de -1,629 hm³ (SINA, 2021). La infraestructura hidráulica del acuífero consta de varias pequeñas presas, así como una gran cantidad de bordos y algunos acueductos que conducen agua de manantiales para uso doméstico. Del análisis espacial con QGIS se determinó que la distancia a bordos es menor a 500 m y a la Presa “El Derramadero” es 525 m desde la Z1 y de 200 m desde el Z2 (Figura 3.60).



Fuente: Mañón-Salas & Hernández-Berriel, 2021

Figura 3.59 Restricción por cuerpos de agua.



Fuente: INEGI 2021, QGIS, 2021

Figura 3.60 Mapa hidrológico del Sitio de Disposición Final de Polotitlán

- Evaluación con la TV. El llenado de la TV se efectuó con base a información proporcionada por el Ing. Roberto Ruiz Sánchez, Director de Medio Ambiente durante la Administración 2019-2021, quien se encargaba del MIRSU en el Municipio de Polotitlán, con la inspección visual realizada durante la visita de campo del 11 de octubre del 2021, y los mapas generados con el SIGMIRSU (Mañón-Salas & Hernández-Berriel, 2021). La TV se presenta en el Anexo B.

La Tabla 3.20 muestra el resumen de la TV con el puntaje de cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003 y las áreas de oportunidad del SDF “Rancho del municipio”. En el apartado 6.1 se incumplen dos criterios: estar ubicado en una ANP como ya se mencionó y por la existen cuerpos de agua adyacentes. Debido a que este SDF es de tipo D, los apartados 6.2, 6.3, 6.4 y 7, no se consideraron. El apartado 8 solo cumple con el control de ingresos de RP y se obtuvo incumplimiento total en el apartado 9.

El nivel de cumplimiento general de la TV fue del 28.6 %, por lo que se recomienda atender de inmediato las áreas de oportunidad detectadas, para mejorar la operación del SDF y cumplir con un mayor nivel los criterios de la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004).

Conforme a la NOM-083-SEMARNAT-2003, a los SDF tipo D se les demandan requisitos mínimos para su operación; entre ellos debe contar con la impermeabilización del sitio mediante barreras naturales o artificiales. En la visita de campo se observó que el sitio cuenta con geomembrana para la disposición de RSU y lixiviados, pero debido al mal manejo y la falta de mantenimiento, se encuentra en mal estado, además que no fue posible checar la zona que abarca la geomembrana mediante planos, por lo que no se garantizar que los lixiviados sean retenidos dentro del predio del SDF (Figura 3.9).

Tabla 3.20 Cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003 y áreas de oportunidad según la Tabla de Verificación

SITIO	PUNTUAJE MÁXIMO	PUNTUAJE OBTENIDO	EVALUACIÓN	ÁREAS DE OPORTUNIDAD
Categoría			D	Puede recibir hasta 10 t/día
6.1 Restricción para ubicación del sitio	7	5	71.4%	El sitio se encuentra ubicado dentro de un área natural protegida y a cuerpos de agua adyacentes, requiriéndose la instalación de barreras naturales o artificiales para impedir la percolación de lixiviados. Gestionar un plan de manejo de RSU.
6.2-6.4 Estudios y análisis previos	0	0	0%	No aplica
7. Características constructivas y operativas del SDF	0	0	0%	No aplica
8. Requisitos mínimos que debe cumplir.	6	1	17.0%	Realizar compactación y cobertura de RSU. La implementación de control de acceso e instalación de cerca perimetral controlara la fauna nociva.
9. Clausura del sitio	8	0	0%	No cuenta con un sistema de captación de biogás y lixiviado. No cuenta con programa de monitoreo de biogás y lixiviados posclausura, no cuenta con programa posclausura.
Evaluación del cumplimiento	21	6	28.6%	

- b) Estación de Transferencia “Yolotzingo”. Debido a que no se trata de un SDF, sino que es un centro de almacenamiento temporal no se realizó el análisis de la ubicación del sitio con el SIGMIRSU. Para que la ETY sea una instalación eficiente en su operación, se requiere conseguir una distancia de amortiguamiento respecto a zonas de colindancia, contar con pendientes adecuadas para el acceso a las instalaciones, continuo mantenimiento de los accesos viales y mantener una superficie de recepción disponible (Gaceta, 2009).

A partir de la información descrita en apartado 3.2.2, puede decirse que la ETY ayuda a reducir los costos de traslado al SDF de San Antonio la Isla y al mismo tiempo puede apoyar la recuperación de residuos valorizables. En consecuencia, se puede proyectar el emplazamiento de un centro para acopio de reciclables, aprovechando el transbordo de los residuos para realizar su separación.

Durante las visitas al sitio para su evaluación, pudo observarse la salida diaria de cuatro góndolas de 50 m³; también se constató que el acceso es libre para el servicio municipal de limpia y particulares que depositan RSU y RME (llantas y cartón). En el sitio trabajan 12 recicladores primarios y cuatro separadores o acomodadores de residuos, los cuales realizan la venta semanal a una empresa particular, que ingresa con camiones de 4.0 t con los que realiza entre ocho y 10 viajes para llevarse el material valorizable. De estas actividades el municipio no recibe ninguna retribución.

3.3.2 Evaluación ambiental y socioeconómica

Mediante la Matriz de Leopold se evaluaron componentes biofísicos, socioeconómicos y actividades de disposición o almacenamiento, así como las afectaciones al entorno de los sitios de estudio. Se complementó la evaluación social con un estudio de la situación social actual del SDF “Rancho del municipio” y de la ETY.

a) Sitio de Disposición Final “Rancho del Municipio”. Esta evaluación se realizó mediante la Matriz de Leopold en dos momentos; la primera en octubre del 2021 (Figura 3.61), que se denomina “Evaluación inicial” y la segunda en marzo del 2022, que se llama “Evaluación con recomendaciones”. Después de la primera evaluación de su SDF, se entregó al municipio el “Informe Técnico de Evaluación de Impacto Ambiental del Sitio de Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos de Polotitlán, Estado de México” (Anexo C), que además de la evaluación contiene recomendaciones para mejorarlo.

- Evaluación inicial. Al aplicar la Matriz de Leopold se identificaron 58 interacciones entre las actividades y los componentes del entorno del SDF, mostrando niveles de significancia Crítico, Severo, Moderado y Bajo (Figura 3.61). En cuanto a *Componentes biofísicos*, los atributos que presentaron niveles de significancia Críticos fueron “Material particulado”; entre los niveles de significancia Severos estuvieron “Calidad del suelo”, “Agua subterránea”, “Calidad del agua”, “Gases”, “Olores”; entre los niveles de significancia Moderados destacaron “Estabilidad del suelo”, “Ruidos”, “Productos agrícolas”, “Remoción de cobertura vegetal”; y con nivel de significancia Bajo se tuvo “Cambio de uso de suelo”.

De los *Componentes Socioeconómicos*, el atributo con mayor nivel de significancia (Severo) fue “Sitios de interés arqueológico cultural”, seguido de la “Calidad de espacio abierto”. Con nivel de significancia Moderada se tuvieron: “Vistas escénicas y panorámicas”, “Ingresos económicos adicionales” y “Emprendimientos productivos”. Otros niveles de significancia que deben atenderse para disminuir su impacto; aunque se consideren Moderados son la “Salud poblacional” y la “Calidad de vida”. El atributo con menor valor de nivel de significancia (Bajo) fue “Cambio de uso de suelo”. El sitio donde se encuentra el SDF es propiedad del municipio y con base a la CE, no tiene cambio de uso de suelo.

Entre las actividades de disposición de RSU, las que tuvieron mayor impacto negativo fueron “Manejo del biogás generado” y “Manejo de lixiviados”; el primero tuvo un nivel de significancia de 6.5 (Severo), debido a que no existe un plan de manejo ni infraestructura para controlar su impacto, además, los pozos de venteo se

encontraron tapados. Para el manejo de lixiviados se obtuvo un nivel de significancia también Severo (6.2), atribuible a que se carece de un sistema para captación, control y tratamiento para ellos, sin mencionar la rotura y exposición de la membrana.

MATRIZ DE LEOPOLD			ACTIVIDADES DE LA DISPOSICION DE RSU EN SDF														AFECTACIONES				NIV. DE SIG.			
Leyenda	MAGNITUD IMPORTANCIA		1. Transporte y descarga	2. Disposición de RSU y RME	3. Disposición de RP	4. Compactación y cobertura	5. Manejo del biogás generado	6. Manejo de lixiviados	7. Contratación de maquinaria, personas y servicios	AFECTACIONES POSITIVAS	AFECTACIONES NEGATIVAS	NUMERO DE INTERACCIONES	AGREGACIÓN DE IMPACTOS	BAJO	MODERADO	SEVERO	CRITICO							
Magnitud: Intensidad del impacto que se puede ocasionar, siendo su valor máximo de 10 y mínimo de 1 Impacto positivo (+) /Impacto negativo (-) Importancia: Escala del impacto (local, regional, etc.), siendo su valor máximo de 10 y mínimo de 1 No tiene signo																								
Agregación de impactos determinado conforme a seccion 2.5.2 y nivel de significado respecto a la seccion 2.5.3 y tabla 1.4																								
	CATEGORIA	ATRIBUTO																						
COMPONENTES BIOFISICOS	SUELO	Calidad del suelo	-5	5	-5	5				-9	7	-9	7			0	4	4	-176		6.6			
		Cambio de uso de suelo								-1	4	-8	1			0	2	2	-12	2.4				
		Estabilidad del suelo	7	2	-5	8				-9	3	-9	3			1	3	4	-80		4.5			
	AGUA	Subteranea	-5	5	-8	2					-8	9				0	3	3	-113		6.1			
		Calidad de agua	-8	7	-8	7					-8	7				0	3	3	-168		7.5			
	ATMOSFERA	Material particulado	-8	7	-8	7				-10	9	-5	7			0	4	4	-237		7.7			
		Ruidos	-5	4	-5	4										0	2	2	-40		4.5			
		Gases	-5	7	-5	7				-8	8	-5	8			0	4	4	-174		6.6			
		Olores	-5	5	-5	5				-8	8	-5	8			0	4	4	-154		6.2			
	FLORA	Productos agricolas (Maiz)	-3	4	-3	4				-5	7	-5	5			0	4	4	-84		4.6			
		Remocion de cobertura vegetal	-3	2	-5	5				-5	5	-7	4			0	4	4	-84		4.6			
FAUNA	Ahuyentamiento de especies nativas														0	0	0	0						
	Proliferacion de nuevas especies														0	0	0	0						
COMPONENTES SOCIOECONOMICOS	ESTETICA	Vistas escenicas y panoramicas	-7	2	-7	2					-8	8				0	3	3	-92		5.5			
		Calidad de espacio abierto	-1	4	-5	5				-7	7	-7	7			0	4	4	-127		5.6			
		Parques y reservas forestales														0	0	0	0					
	SOCIAL	Salud poblacional y laboral	-5	5	-5	5				-7	7	-4	3			0	4	4	-111		5.3			
		Seguridad laboral														0	0	0	0					
	ECONOMICO	Calidad de vida			-5	7				-5	3	-5	3			0	3	3	-65		4.7			
		Ingresos economicos adicionales			-10	3				-10	3					0	2	2	-60		5.5			
		Sitios de interes arqueologico cultural	-7	7	-5	3										0	2	2	-64		5.7			
		Uso potencial del suelo														0	0	0	0					
		Emprendimiento productivos			-10	3				-10	3					0	2	2	-60		5.5			
AFECTACIONES	AFECTACIONES POSITIVAS		1	0	0	0	0	0	0	1														
	AFECTACIONES NEFATIVAS		13	17	0	0	13	14	0		57													
	NUMERO DE INTERACCIONES		14	17	0	0	13	14	0			58												
	AGREGACION DE IMPACTOS		-338	-484	0	0	-545	-534	0				-1901											
NIV. DE SIG.	BAJO																							
	MODERADO		4.9	5.3																				
	SEVERO						6.5	6.2																
	CRITICO																							

Figura 3.61 Evaluación de la Matriz de Leopold sin recomendaciones

La actividad “Disposición de RP” no fue evaluada, debido a que no se encontró evidencia de su disposición entre los RSU, sin embargo, al no contar con control de acceso riguroso, no se tienen certeza de ello. El nivel de significancia considerado para esta actividad fue negativo.

La Ca resultó con un valor de 5.7 (severo), por lo que se recomienda tomar acciones para disminuir las afectaciones, sobre todo en las categorías de Suelo y Agua, que pertenecen a los componentes biofísicos y por la cercanía de bordos y la presa “El Derramadero”; debido a que el agua que contienen se utiliza para riego agrícola.

- Evaluación con recomendaciones. En la segunda ocasión se evaluaron 89 interacciones con la Matriz de Leopold, entre actividades y componentes del entorno del SDF (Figura 3.62). En cuanto a *Componentes biofísicos*, los atributos que presentaron niveles de significancia Severos fueron “Calidad de agua”; “Material particulado”, “Gases”, “Olores”, “Productos agrícolas” y “Remoción de cobertura vegetal”, entre los niveles de significancia Moderado se tienen “Calidad del suelo”, “Cambio de uso de suelo”, “Estabilidad del suelo”, “Agua subterránea” y “Ruidos”; en nivel de significancia Bajo resultó “Proliferación de nuevas especies”.

De los *Componentes Socioeconómicos*, los atributos con mayor nivel de significancia correspondieron a niveles Moderados, estos fueron: “Vistas escénicas y panorámicas”, “Calidad de espacio abierto”, “Salud poblacional”, “Seguridad laboral”, “Calidad de vida” y “Sitios de interés arqueológico cultural”; además de “Emprendimientos productivos”, de estos el de mayor valor fue “Calidad de vida”. Los “Ingresos económicos adicionales” obtuvieron un nivel de significancia Bajo.

En general, el atributo con Bajo nivel de significancia fue “Proliferación de nuevas especies”, debido que no se ha manifestado proliferación de fauna. En cuanto a los niveles Moderados, el valor menor lo presentó el atributo “Cambio de uso de suelo”, debido a que el lugar donde se encuentra SDF, es propiedad del municipio y de acuerdo con la CE, no tiene cambio de uso de suelo.

Entre las actividades de disposición de RSU, las que tuvieron mayor impacto negativo fueron “Manejo del biogás generado” y “Manejo de lixiviados”; el primero tuvo un nivel de significancia de 6.5 (Severo), debido a que los pozos de venteo siguen sin funcionar. El manejo de lixiviados permaneció en un nivel de significancia Severo (6.2), atribuible a que el sistema de captación, control y tratamiento no se encuentra en operación, la membrana geotextil sigue expuesta y con roturas.

MATRIZ DE LEOPOLD			ACTIVIDADES DE LA DISPOSICION DE RSU EN SDF											AFECTACIONES			NIV. DE SIG.				
Leyenda	MAGNITUD	IMPORTANCIA	1. Transporte y descarga	2. Disposición de RSU y RME	3. Disposición de RP	4. Compactación y cobertura	5. Manejo del biogás generado	6. Manejo de lixiviados	7. Contratación de maquinaria, personas y servicios	AFECTACIONES POSITIVAS	AFECTACIONES NEGATIVAS	NÚMERO DE INTERACCIONES	AGREGACIÓN DE IMPACTOS	BAJO	MODERADO	SEVERO	CRITICO				
Magnitud: Intensidad del impacto que se puede ocasionar, siendo su valor máximo de 10 y mínimo de 1 Impacto positivo (+) /Impacto negativo (-)																					
Importancia: Escala del impacto (local, regional, etc.), siendo su valor máximo de 10 y mínimo de 1 No tiene signo																					
Agregación de impactos determinado conforme a seccion 2,5,2 y nivel de significado respecto a la seccion 2,5,3 y tabla 1.4																					
COMPONENTES BIOFISICOS	CATEGORIA	ATRIBUTO																			
	SUELO	Calidad del suelo	-3	3	-5	5	-2	2	-2	2	-9	7	-9	5	0	6	6	-150	5.0		
		Cambio de uso de suelo					-8	2			-1	4	-8	1	0	3	3	-28	3.1		
		Estabilidad del suelo	7	3	-5	8	-6	2	1	2	-9	3	-9	3	2	4	6	-83	3.7		
	AGUA	Subterránea	-5	5	-8	2		-5	2		-8	5			0	4	4	-91	4.8		
		Calidad de agua	-7	7	-8	7	-2	2	-5	4		-8	5		0	5	5	-169		5.8	
	ATMOSFERA	Material particulado	-8	4	-8	7	-2	2	-8	7	-10	8			0	5	5	-228		6.8	
		Ruidos	-5	4	-5	4		-2	2						0	3	3	-44	3.8		
		Gases	-8	7	-5	7	-4	3			-8	8	-5	8	0	5	5	-207		6.4	
		Olores	-5	5	-5	5	-4	3			-8	8	-5	8	0	5	5	-166		5.8	
	FLORA	Productos agrícolas (Maiz)	-3	4	-3	4			-5	7					0	3	3	-59		4.4	
		Remocion de cobertura vegetal	-3	2	-5	5			-5	5					0	3	3	-56		4.3	
	FAUNA	Ahuyentamiento de especies nativas													0	0	0	0			
Proliferación de nuevas especies						-1	2	1	2	-3	2			1	2	3	-6	1.4			
COMPONENTES SOCIOECONOMICOS	ESTETICA	Vistas escénicas y panorámicas	-7	4	-7	2	-5	2			1	5			1	3	4	-47	3.4		
		Calidad de espacio abierto	-4	4	-5	5	-4	2	1	2	-7	7	-5	4	1	4	5	-116	4.8		
		Parques y reservas forestales													0	0	0	0			
	SOCIAL	Salud poblacional y laboral	-5	5	-5	5	-3	5	-3	5	-7	7	-4	3	1	2	1	6	7	-139	4.5
		Seguridad laboral	-3	1	-7	2	-10	2	-3	5		-4	3	1	2	1	5	6	-62	3.2	
	ECONOMICO	Calidad de vida	-3	2	-5	7	-9	7	-9	7	-5	3	-5	3	1	2	1	6	7	-195	5.3
		Ingresos economicos adicionales			2	2	1	2	1	2	-10	3			3	1	4	-22	2.3		
		Sitios de interes arqueologico cultural	-7	7	-5	3	-5	3							0	3	3	-79	5.1		
		Uso potencial del suelo													0	0	0	0			
Emprendimiento productivos			2	2					-10	3			1	1	2	-26		3.6			
AFECTACIONES	AFECTACIONES POSITIVAS		1	2	1	4		0	1	3	12										
	AFECTACIONES NEFATIVAS		15	16	14	8		13	11	0		77									
	NUMERO DE INTERACCIONES		16	18	15	12		13	12	3			89								
	AGREGACION DE IMPACTOS		-340	-430	-195	-179		-541	-294	6				-1973							
NIV. DE SIG.	BAJO																				
	MODERADO		4.9	5.3																	
	SEVERO							6.5	6.2										4.7		
	CRITICO																				

Figura 3.62 Resultados de la matriz de Leopold con Recomendaciones

Las actividades “Disposición de RP” y “Compactación y cobertura” no fueron evaluadas, debido a que no se realizan en el sitio; sin embargo, en la visita realizada, se encontraron RP (jeringas). La actividad con menor nivel de significancia fue “Transporte y descarga”, debido a que, al momento de la descarga de los RSU en el frente de tiro, se llevó el control, aprovechamiento y separación de residuos.

La Ca resulto moderado (4.7), por lo que se recomienda seguir trabajando en acciones, como el mejoramiento del sistema de manejo de lixiviado y biogás, para reducir la afectación en componentes biofísicos.

- **Comparación de Resultados.** Con los resultados obtenidos de ambos escenarios, se identificaron las áreas de oportunidad de algunos componentes, sin embargo, en las actividades de la disposición de RSU no presentaron cambios, a pesar de que se ha realizado limpieza y mejoras en el SDF, como el implemento de cercas de protección con llantas, para impedir la dispersión de los residuos y la regulación de la disposición de residuos cárnicos. Los aspectos generales se presentan en la Tabla 3.21.

Tabla 3.21 Tabla comparativa de resultados de la aplicación de la Matriz de Leopold en el Sitio de Disposición Final de la Polotitlán EdoMéx

	SIN RECOMENDACIONES	CON RECOMENDACIONES
Nivel de significancia	5.7 (Severo)	4.7 (Moderado)
Numero de interacciones	58	89
Componente biofísico más afectado evaluado	Material particulado (7.7 Severo)	Material particulado (6.8 Moderado)
Componente socioeconómico más afectado evaluado	Sitio de interés de arqueológico (5.7 Moderado)	Calidad de vida (5.3 Moderada)
Actividad con mayor nivel de significancia	Manejo de biogás generado (6.5 Severo)	Manejo de biogás generado (6.5 Severo)

Para complementar el análisis social del funcionamiento del SDF, se realizaron análisis de la situación actual y futura, pues la generación de RSU y de RME juega un rol determinante en la configuración de la problemática que representa el cambio climático y su disposición, en SNC tiene el agravante de afectar aire, suelo, agua, salud y paisaje de los lugares en que se verifica.

- Estudio de la situación actual en el Sitio de Disposición Final “Rancho del Municipio”. La economía del municipio se constituye principalmente de actividades agrícolas y derivados ganaderos, por lo que la generación de residuos es en general de RSU y RME. Los RSU en el sitio son principalmente plástico, papel, vidrio, textiles y Tetrapak; los RME se constituyen principalmente por cárnicos y autopartes. Ambos tipos de residuos se depositan en un SDF con una superficie de 5 ha, con vida útil de 21 años (apartado 3.2.1), que no cumple en lo general con las normas y restricciones en materia ambiental, lo que provoca contaminación de suelo y aire.

La problemática que prevalece en este espacio se relaciona con su clasificación (ya desde 2012 se incluyó en la lista de SNC) como Región de Emergencia Sanitaria y Ambiental (RESAM) en 2016, lo que le permite una consideración particular a partir del convenio del 2 de septiembre de 2021, suscrito por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) con la SEMARNAT y la Secretaría de Salud (SSA) (CONACYT, 2021), organismos que buscarán la regeneración de ese tipo de espacios.

La clasificación RESAM significa que los SDF han alcanzado niveles de toxicidad y fetidez intolerables, para el adecuado desarrollo de la convivencia social y productiva de las áreas aledañas, configurando lo que autores como Azamar Alonso & Téllez Ramírez (2021) han denominado “infiernos ambientales”, que reclaman intervenciones severas que corrijan o al menos reduzcan sensiblemente esas condiciones de insalubridad, al tenor de una política de salud pública que coordine la actuación de las autoridades ambientales, sanitarias y científicas con la participación de la comunidad a intervenir.

Esta situación es resultado de la deposición incontrolada de todo tipo de residuos en espacios no acondicionados, ni planeados para la recepción de desechos. La problemática concreta del SDF de Polotitlán fue la debilidad institucional de su ayuntamiento, pues es pequeño y con escasa capacidad económica: según el censo 2020, contaba entonces con 14,985 hab (INEGI), asentados en un área de 132.7 km² (Ayuntamiento de Polotitlán 2022-2024, 2022), notablemente afectada por el tramo de aproximadamente 6.3 km de autopista entre la Ciudad de México y Querétaro, que parte su territorio a lo largo de Noroeste a Sureste.

Es precisamente esta vecindad con una vialidad de primer orden, lo que originó la generación de RME (cárnicos y automotrices), en volúmenes que perturbaron el ambiente de esta comunidad, que en la actualidad genera 0.6 kg/hab día. El desorden de este SDF se ha traducido en expansiones sucesivas no controladas, para dar cabida a crecientes “aportaciones” relacionadas con desechos automotrices, llantas, otras autopartes y refacciones de plástico, los que se dejaron de recibir con la llegada de la administración 2022-2024 a Polotitlán, pero que siguen depositándose ahí, sólo que, ahora, “clandestinamente”.

Este panorama ha obligado a la proyección de un programa de reordenación espacial y reacondicionamiento del SDF, a efecto de avanzar en la optimización del aprovechamiento del espacio, mejorar su funcionamiento y avanzar en la satisfacción de las disposiciones legales y normativas (cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2021), al amparo del ya citado convenio tripartita CONACYT-SSA-SEMARNAT, para permitir un mejor manejo del espacio en el SDF de Polotitlán durante los siguientes 19 años de vida útil que le restan.

Respecto a la oferta actual de servicios de recolección, traslado, reciclaje y disposición final de RSU, en la Tabla 3.22 se presenta un resumen de la infraestructura y equipamiento con que cuenta el ayuntamiento de Polotitlán para brindar los servicios de limpia y disposición de RSU y RME.

Tabla 3.22 Oferta actual de recolección, traslado, reciclaje y disposición final de RSU del Municipio de Polotitlán, Estado de México

CONCEPTO	EQUIPO E INFRAESTRUCTURA EN OPERACIÓN
Recolección y traslado	3 camiones públicos y 1 privado de recolección
Personal de recolección	6 personas de ayuntamiento, sin datos privados
Áreas de separación de residuos reciclables	No existen
Áreas de transferencia	No existen
Áreas de disposición final (t/m ³)	Una de 1.1 millones de m ³
Condiciones de los caminos de acceso	De regular a malas por las condiciones climáticas

Fuente: Datos proporcionados por el Ayuntamiento Polotitlán, 2022.

En la actualidad, Polotitlán cuenta con un SDF a cielo abierto no controlado que ha afectado una superficie total de 22.7 ha (Tabla 3.4), por lo que es viable el reordenamiento propuesto a partir de este proyecto, que permita aprovechar adecuadamente las 5 ha que se han destinado para su ejecución.

La capacidad disponible para este espacio se estima de 1.1 millones de m³, considerando una compactación de 400 kg/m³, calificada de baja densidad según los criterios oficiales (DOF, 2021b).

La recolección de los RSU en todo el municipio depende de tres camiones de 3 t de capacidad, con sistema de arrastre con pala y sistema de descarga por placa expulsora, propiedad del Sistema de Limpia Municipal, además de una unidad privada de la que se desconocen sus características. Estas cuatro unidades sólo transportan y disponen 5 t/día, en jornadas de seis horas, durante seis días a la semana, lo que es una subutilización del equipamiento disponible. Cada unidad recolectora cuenta con un chofer y un ayudante.

- Demanda por servicios de recolección, traslado, reciclaje y disposición final de RSU. Considerando que en 2012 Polotitlán tenía una población 13,336 hab (según proyección propia a partir de una población censal 2010 de 13,002 hab), con una generación *per cápita* de 0.45 kg/hab día de RSU (5.7 t/día) y atendiendo la información expuesta en el apartado 3.2, donde se calculó para el año 2020 una generación de 8.57 t/día, se obtuvo una tasa de crecimiento anual de 3.04% para la generación de los RSU y RME; adicionalmente, se tiene un crecimiento del 1.47% para la población, durante el periodo 2012 a 2020, cuando el censo del INEGI reportó 14,985 hab, por lo que la población estimada para Polotitlán en 2022 fue 15,428 hab. Así pues, la tasa estimada de crecimiento de la generación de RSU y RME totaliza 4.51%, que se aplicó a la proyección de la demanda para el periodo 2020-2041.

Con estos datos y suponiendo la separación de materiales para reciclaje del 3%, se determinó los volúmenes a disponer. La demanda proyectada en la situación actual del SDF se presenta en la Tabla 3.23.

Tabla 3.23 Proyección de la demanda de servicios de recolección de RSU, Polotitlán, EdoMéx.

AÑO	GENERACIÓN PER CÁPITA A DISPONER (kg/hab día)	POBLACIÓN	GENERACIÓN DIARIA PARA DISPONER (t/día)	GENERACIÓN ANUAL PARA DISPONER (t/año)	GENERACIÓN DIARIA (t/día)	GENERACIÓN ANUAL (t/día)
2020	0.55	14,985	8.31	3,034.21	8.57	3,128.05
2021	0.58	15,205	8.69	3,171.05	8.96	3,269.12
2022	0.61	15,428	9.08	3,314.06	9.36	3,416.55
2023	0.63	15,655	9.49	3,463.52	9.78	3,570.64
2024	0.66	15,884	9.92	3,619.72	10.22	3,731.67
2025	0.69	16,118	10.36	3,782.96	10.68	3,899.96
2026	0.72	16,354	10.83	3,953.57	11.17	4,075.84
2027	0.76	16,594	11.32	4,131.87	11.67	4,259.66
2028	0.79	16,838	11.83	4,318.21	12.20	4,451.77
2029	0.83	17,085	12.36	4,512.96	12.75	4,652.53
2030	0.86	17,336	12.92	4,716.49	13.32	4,862.36
2031	0.90	17,590	13.50	4,929.19	13.92	5,081.64

AÑO	GENERACIÓN PER CÁPITA A DISPONER (kg/hab día)	POBLACIÓN	GENERACIÓN DIARIA PARA DISPONER (t/día)	GENERACIÓN ANUAL PARA DISPONER (t/año)	GENERACIÓN DIARIA (t/día)	GENERACIÓN ANUAL (t/año)
2032	0.94	17,849	14.11	5,151.49	14.55	5,310.82
2033	0.98	18,111	14.75	5,383.82	15.21	5,550.33
2034	1.03	18,376	15.42	5,626.62	15.89	5,800.64
2035	1.08	18,646	16.11	5,880.38	16.61	6,062.24
2036	1.12	18,920	16.84	6,145.57	17.36	6,335.64
2037	1.17	19,198	17.60	6,422.73	18.14	6,621.37
2038	1.23	19,479	18.39	6,712.39	18.96	6,919.99
2039	1.28	19,765	19.22	7,015.11	19.81	7,232.07
2040	1.34	20,056	20.09	7,331.48	20.71	7,558.23
2041	1.40	20,350	20.99	7,662.12	21.64	7,899.10

- Interacción oferta-demanda actual de servicios de recolección, traslado, reciclaje y disposición final de RSU. En 2022 la demanda diaria generada por los hogares fue de 9.36 t, mientras los camiones recolectores sólo alcanzan a recoger y disponer 5.0 t, lo que representa un déficit de 47 %, que se traduce en costos y otros inconvenientes para la población.

En general, hay condiciones propicias para satisfacer la demanda por servicios de limpia y disposición de RSU y RME (incluso cárnicos) durante al menos 20 años más, pero se requieren recursos que factibilicen las acciones consideradas en el proyecto donde se atiende la problemática de Polotitlán (apartado 3.4.1).

- b) Sitio de Transferencia Yolotzingo. Para evaluar el impacto en el sitio, se realizaron modificaciones a la Matriz de Leopold para considerar aspectos de almacenamiento de residuos, debido a que la matriz modificada por Mendoza Delgado (2017) fue establecida para evaluar impacto ambiental y socioeconómico en un SDF.

La evaluación mediante la Matriz de Leopold se elaboró con la información recopilada durante las visitas realizadas del 24 de marzo al 27 de septiembre del 2022.

Se identificaron 124 interacciones, 121 negativas y 3 positivas (Figura 3.63). Las actividades que generaron mayor impacto ambiental son: “Manejo del lixiviado” y el

”Acopio temporal de RSU y RME”. El Manejo de lixiviado en la ETY obtuvo un nivel de significancia Severo, debido a que no se manejan apropiadamente ni controlan y se observaron escurrimientos que fluyen hasta 500 m fuera del sitio en época de lluvias, afectando al camino de acceso de la población cercana, debido a que se producen lodos, se generan malos olores y son un riesgo para la salud de quienes transitan por este camino. El “Acopio temporal de RSU y RME” provoca contaminación visual, que puede apreciarse hasta la distancia de un kilómetro y afecta la calidad del suelo por la perfusión de lixiviados.

MATRIZ DE LEOPOLD			ACTIVIDADES DEL TRANSITO DE RSU A SDF										AFECTACIONES				NIV. DE SIG.								
Legenda	MAGNITUD	IMPORTANCIA	1. Carga y descarga	2. Acopio temporal de RSU y RME	3. Acomodo de RSU y RME	4. Manejo de lixiviados	5. Manejo de biogas	6. Infraestructura y equipamiento	7. Contratación de maquinaria, personas y servicios	8. Aprovechamiento de RSU	AFECTACIONES POSITIVAS	AFECTACIONES NEGATIVAS	NUMERO DE INTERACCIONES	AGREGACION DE IMPACTOS	BAJO	MODERADO	SEVERO	CRITICO							
Magnitud:	Intensidad del impacto que se puede ocasionar, siendo su valor máximo de 10 y mínimo de 1																								
Importancia	Impacto positivo (+) /Impacto negativo (-)																								
	Escala del impacto (local, regional, etc.), siendo su valor No tiene signo																								
	CATEGORIA	ATRIBUTO																							
COMPONENTES BIOFISICOS	SUELO	Calidad del suelo	-5	2	-9	2	-6	2	-9	6	-9	3	-1	3	-1	2	-5	3	0	8	8	-126	4.0		
		Cambio de uso de suelo	-9	3	-10	2	-9	3	-9	6	-5	3	-4	3	-4	1	-5	2	0	8	8	-159	4.5		
		Estabilidad del suelo	-4	3	-2	2	-5	1	-8	4	-5	3	1	2	-4	1	-1	1	1	7	8	-70	3.0		
	AGUA	Contaminación subterránea	-6	1	-9	2	-6	3	-9	6	-5	3	-10	2	-1	1	1	1	1	7	8	-132	4.1		
		Contaminación superficial	-8	1	-8	4	-1	5	-9	6	-1	4	-9	1	-1	1	4	1	1	7	8	-113	3.8		
	AIRE	Material particulado	-5	4	-4	5	-4	3				-4	3	-2	1	-1	1	0	6	6	-66	3.3			
		Ruidos	-5	4	-1	1	-6	3				-3	1	-1	3	0	5	5	-42			2.9			
		Gases	-9	5	-9	4	-5	2	-3	1	-9	7			-5	1		0	6	6	-162	5.2			
		Olores	-2	5	-9	1	-4	1	-9	4	-1	5			-2	1		0	6	6	-66	3.3			
	FLORA	Productos agrícolas							-6	5	-1	4	-1	1	-1	1		0	4	4	-36	3.0			
		Afectación Vegetación aledaña							-2	5	-1	4	-1	1	-1	1	-9	2	0	5	5	-16	1.8		
	FAUNA	Ahuyentamiento de especies nativas	-1	3	-1	3	-4	3	-2	4	-1	1			-1	1	-9	3	0	7	7	-28	2.0		
		Proliferación de nuevas especies			-6	2	-5	3	-9	1					-1	1	-9	2	0	5	5	-37	2.7		
COMPONENTES SOCIOECONOMICOS	ESTETICA	Vistas escénicas y panorámicas	-5	1	-10	8	-5	3	-9	8			-9	4	-4	4	-9	4	0	7	7	-224		5.7	
		Salud poblacional y laboral	-2	2	-8	4	-6	3	-10	2	-10	2	-9	4	-10	1	-9	2	0	8	8	-140	4.2		
	SOCIAL	Seguridad laboral	-9	1	-9	3	-9	3	-10	2	-10	2	-10	3	-9	1	-10	2	0	8	8	-142	4.2		
		Calidad de vida	-2	1	-2	1	-2	1	-2	3	-2	4	-10	3			-10	2	0	7	7	-50	2.7		
	ECONOMICO	Ingresos economicos adicionales	-10	3	-10	3				-10	1	-10	3			-10	2	0	5	5	-100	4.5			
		Emprendimiento productivo			-10	3			-10	1	-10	1	-10	3		-10	2	0	5	5	-80	4.0			
AFECTACIONES	AFECTACIONES POSITIVAS		0	0	0	0	0	0	1	0	1	3													
	AFECTACIONES NEGATIVAS		15	17	15	16	15	13	16	15		121													
	NUMERO DE INTERACCIONES		15	17	15	16	15	14	16	16		124	124												
	AGREGACION DE IMPACTOS		-211	-374	-200	-472	-221	-248	-63	-222					-1789										
NIV. DE SIG.	BAJO										2.0														
	MODERADO		3.8	4.7	3.7			3.9	4.3		3.8														
	SEVERO					5.5																			
	CRITICO																								

3.8

Figura 3.63 Resultados de la evaluación de actividades y componentes del entorno en la Matriz de Leopold

La actividad que menor impacto generó fue la “Contratación de maquinaria, personas y servicios”, debido a que las afectaciones son calificadas como Bajas, porque solo

influyen en el área de trabajo y ya es un sitio impactado, el cual ha sido utilizado para disposición o almacenamiento de residuos sólidos durante al menos 15 años. Dentro de las actividades restantes, consideradas con afectaciones Moderadas, destaca el “Aprovechamiento de RSU” con afectaciones positivas, debido a que se realiza la separación de residuos reciclables como cartón, PET y lata, por medio de segregadores primarios (pepenadores) que laboran para una empresa privada.

Como atributos con impacto Severo se detectaron “Gases” y “Vistas escénicas y panorámicas”. El atributo “Gases” es Severo debido a la generación no controlada de partículas y gases de efecto invernadero, especialmente metano, porque la falta de supervisión de los cuatro pozos de venteo contribuyó a que fueran tapados, por lo que ahora se desconoce su ubicación y no se tiene control de emisiones difusas superficiales de gases (Díaz Archundia, 2016). El atributo “Vistas escénicas y panorámicas”, corresponde a componentes socioeconómicos y tuvo un nivel de significancia Severo, ya que la ETY genera mal aspecto a las localidades a distancia cercana y lejana.

Los atributos “Cambio de uso de suelo” e “Ingresos económicos adicionales”, presentaron impactos Moderados. El primer atributo fue por la inadecuada disposición temporal de los RSU y RME. Mientras que el valor de “Ingresos económicos adicionales” se atribuye a que la alcaldía está desaprovechando la generación de empleo, el cobro de ingreso de residuos a particulares y la venta de reciclables; ingresos que permitirían contar con recursos para mejorar la infraestructura y operación de la ETY.

En la categoría Social, los atributos “Salud poblacional y laboral” y “Seguridad laboral”, se calificaron como impactos Moderados altos (4.2), debido a que el personal que labora en el sitio no cuenta con equipo de protección ni condiciones de higiene, por lo que se encuentra en riesgo de contraer infecciones respiratorias y cutáneas; mientras que la población cercana también se puede ver afectada, porque la ETY no tiene control de emisiones de biogás, partículas ni lixiviados. Aunado a lo anterior, el atributo

Calidad de vida también es Moderado alto (2.7), debido a que se afecta directamente a los trabajadores del sitio, quienes se encuentran en condiciones insalubres.

Para las categorías suelo y agua, los atributos “Calidad de suelo” y “Contaminación subterránea” son impactados de forma Moderada, ya que se consideran un riesgo por la falta de control en lixiviados y gases. En la categoría económica, el atributo “Emprendimiento productivo” se consideró de impacto Moderado alto, porque está relacionado con la falta de aprovechamiento de las actividades 2, 4, 5 y 8 de la Matriz de Leopold.

La “Afectación de vegetación aledaña” y el “Ahuyentamiento de especies nativas” fueron los atributos con afectación Baja, debido a que antes de la instalación de la ETY, el lugar ya había sido impactado en Flora y Fauna por la extracción de materiales térreos (E3, 2022).

La Ca (3.8) indica un nivel de significancia Moderado, influida por presentarse de manera Local. Con este resultado se evidenció que las afectaciones en componentes como suelo y aire deben ser atendidas de manera urgente, puesto que los impactos en éstos pueden ser irremediables.

- Estudio de la situación actual “Estación de Transferencia” de Yolotzingo, Tianguistenco, EdoMéx. Tianguistenco, no cuenta con un SDF municipal, por lo que la ETY, es la instalación más importante para el manejo de residuos. Debido al manejo inadecuado de esta última tiene llovizno de lixiviados y migración hacia predios aledaños. Los RSU que llegan a la ETY, desde 2019, son segregados por recicladores primarios y los no valorizados son trasladados para su disposición al RESA de San Antonio la Isla.

Conforme al apartado 3.2 se presume una creciente contaminación por un acelerado crecimiento de la demanda del servicio de recolección y su disposición. Adicionalmente, se cuenta con una prolongada historia de indolencia ante el problema, pues desde 2002 se declaró SNC, situación que lejos de resolverse se ha acrecentado, porque las autoridades municipales en turno solo han hecho trabajos

paliativos de corto impacto. Con este marco de referencia, es fácil deducir la irregular situación normativo-legal en que se encuentra la ETY.

- Oferta actual de servicios de recolección, traslado, reciclaje y disposición final de RSU. La Tabla 3.24 presenta un resumen de la infraestructura y equipamiento con que cuenta el ayuntamiento de Tianguistenco para brindar los servicios de limpia, transferencia y traslado para disposición de RSU.

Tabla 3.24 Oferta actual de recolección, traslado, reciclaje y disposición final de RSU en el Municipio de Tianguistenco, Estado de México

CONCEPTO	EQUIPO E INFRAESTRUCTURA PARA OPERACIÓN
Recolección y traslado	Al parecer, cualquier vehículo puede ingresar y descargar sus RSU en la ET
Personal de recolección	S/d
Áreas de separación de residuos reciclables	1, segregadores que manualmente separan reciclables y los venden a una empresa privada, propietaria de camiones de 4 t, que realizan entre ocho y 10 viajes el viernes para llevarse el material valorizable
Áreas de transferencia	1
Áreas de disposición final (en t/m ³)	No existe
Condiciones de los caminos de acceso	De regular a malas por las condiciones climáticas

Fuente: Ayuntamiento de Tianguistenco, 2022.

En 2012 y 2013 se recolectaron en promedio 40 t/día, se desconoce la cantidad real que ingresó a la ETY; y la autoridad municipal informa que entre 20,000 y 23,000 t/año de RSU fueron dispuestos en los RESA de Tenango del Valle y San Antonio la Isla. Se reporta la existencia de nueve SNC en diversas ubicaciones del municipio de Tianguistenco, de las cuales no se tienen datos sobre cantidades de RSU.

La disponibilidad de datos del funcionamiento de la ETY no es continúa ni producto de registros oficiales, pero se dice que en Yolotzingo se reciben RSU y RME privados y municipales de todo Tianguistenco.

- Demanda actual por servicios de recolección, traslado, reciclaje y disposición final de RSU en el Municipio de Tianguistenco, EdoMéx. Antes de presentar la proyección de la demanda por servicios de limpia y sanidad en Tianguistenco, se debe advertir que el problema de registro y presentación de datos e información representa una circunstancia de opacidad que revela la indiscutible necesidad de procurar una atención inmediata que permita reordenar el tema de limpia, transporte, transferencia, disposición y comercialización de RSU y RME en Tianguistenco, pues la persistencia de la situación amenaza con generar perjuicios irreparables e irreversibles al sistema social, productivo y ambiental de la zona de influencia.

En 2022 se recibieron en promedio 120 t/día de RSU y RME (20% más que los captados en 2019) que se tomarán como base para generar la proyección de la demanda, los cuales son almacenados temporalmente de dos a siete días y de acuerdo con la información verbal de quienes lo operan; se trasladan 50 t/día aproximadamente al RESA de San Antonio la Isla. En la Tabla 3.25 se presenta la proyección sobre la demanda por servicios de recolección, traslado, separación para reciclaje y disposición final de RSU en Tianguistenco, EdoMéx.

Tabla 3.25 Proyección de la demanda por servicios de recolección de RSU, de Tianguistenco, EdoMéx.

AÑO	GENERACIÓN PER CÁPITA A DISPONER (KG/HAB/DÍA)	POBLACIÓN	GENERACIÓN DIARIA PARA DISPONER (TON/DÍA)	GENERACIÓN ANUAL PARA DISPONER (TON/AÑO)	GENERACIÓN DIARIA (TON/DÍA)	GENERACIÓN ANUAL (TON/AÑO)
2020	1.28	84,259	107.81	39,349.12	111.14	40,566
2021	1.30	85,753	109.72	39,690.95	113.11	41,285
2022	1.33	87,273	111.66	40,035.76	115.11	42,017
2023	1.35	88,820	113.64	40,383.56	117.16	42,762
2024	1.37	90,394	115.66	40,734.39	119.23	43,520
2025	1.40	91,996	117.71	41,088.26	121.35	44,291
2026	1.42	93,627	119.79	41,445.21	123.50	45,076
2027	1.45	95,287	121.92	41,805.25	125.69	45,875
2028	1.47	96,976	124.08	42,168.43	127.91	46,688

AÑO	GENERACIÓN PER CÁPITA A DISPONER (KG/HAB/DÍA)	POBLACIÓN	GENERACIÓN DIARIA PARA DISPONER (TON/DÍA)	GENERACIÓN ANUAL PARA DISPONER (TON/AÑO)	GENERACIÓN DIARIA (TON/DÍA)	GENERACIÓN ANUAL (TON/AÑO)
2029	1.50	98,695	126.28	42,534.76	130.18	47,516
2030	1.53	100,444	128.51	42,904.27	132.49	48,358
2031	1.55	102,224	130.79	43,276.99	134.84	49,215
2032	1.58	104,036	133.11	43,652.95	137.23	50,088
2033	1.61	105,881	135.47	44,032.18	139.66	50,976
2034	1.64	107,757	137.87	44,414.70	142.13	51,879
2035	1.67	109,667	140.31	44,800.54	144.65	52,799
2036	1.69	111,611	142.80	45,189.74	147.22	53,735
2037	1.72	113,590	145.33	45,582.31	149.83	54,687
2038	1.76	115,603	147.91	45,978.30	152.48	55,657
2039	1.79	117,652	150.53	46,377.73	155.19	56,643
2040	1.82	119,738	153.20	46,780.62	157.94	57,647
2041	1.85	121,860	155.91	47,187.02	160.74	58,669

Para la generación de la tabla anterior, se recurrió al dato más reciente disponible proporcionado por la autoridad en la materia, operando en el actual ayuntamiento de Tianguistenco, a saber, en el municipio se generaron 100 t de RSU y RME en 2019, cifra que se incrementó un 20% para 2022. A partir de esta certeza, se dedujo una generación de RSU por habitante equivalente a 1.21 y a 1.26 kg/hab día en 2019 y 2020, respectivamente.

En consecuencia, se habla de un total de 40,566 t de RSU generados en 2020, que sirven de punto de partida para el análisis presente, sobre los que se asume un reciclaje de 3% para la operación del modelo, aunque el volumen real en la práctica no ha sido cuantificado, pero se sabe que una empresa privada tiene emplazado personal en la ETY y desaloja con apoyo de cuatro vehículos una buena cantidad de material reciclable, a cambio de los cuales, declara la autoridad, el ayuntamiento no recibe ingreso alguno, lo cual es otro motivo de suspicacias respecto al funcionamiento y administración de un bien público como es la ETY.

- Interacción oferta-demanda actual de servicios de recolección, traslado, reciclaje y disposición final de RSU en el Municipio de Tianguistenco, Estado de México. Derivado de la deficiencia informativa prevaleciente en materia del funcionamiento del ETY, se aprecia la inminente e impostergable necesidad de intervención del sistema de limpia municipal, toda vez que pese a existir el espacio y la factibilidad de generar recursos de la explotación y aprovechamiento de los RSU depositados en esta propiedad pública, su operación representa más un problema que un promotor del bienestar de la comunidad.

En 2022, la demanda diaria generada por los hogares asciende a 115.11 t, de los cuales sólo 50 t son motivo de disposición en los RESA de San Antonio la Isla y de Tenango del Valle; mientras se admite la operación de camiones que forman parte de un aprovechamiento privado de un bien público, lo que representa un inconveniente para la población de Tianguistenco que no ve satisfecha su necesidad de servicios de limpia y sanidad, ni conoce provecho de su explotación.

Pese a lo anterior, en general puede decirse que hay condiciones propicias para brindar adecuados servicios de recolección, traslado, reciclaje y disposición final de RSU, pero se requieren acciones administrativas que propicien la transparencia que le permitan a la autoridad recuperar la soberanía sobre un bien público, que actualmente está en control de un agente privado y, sobre todo, otorgar un servicio digno y de calidad para beneficio de la población a la que representa.

3.3.3 Análisis de vulnerabilidad

El tema ambiental ha cobrado notoriedad en tiempos recientes, ante la amenaza que el cambio climático representa para la economía, la convivencia del ser humano con la ecología y, en general, para la vida en el planeta Tierra.

El análisis de vulnerabilidad ayudó a determinar el grado de impacto hídrico que tiene el acuífero, a causa de la inadecuada disposición de RSU en la zona estudiada.

a) Sitio de Disposición “Rancho del Municipio” de Polotitlán. Debido a la falta de información geográfica en la zona, se utilizó el método GOD, en el cual se analizaron los parámetros de Ocurrencia del agua subterránea, Sustrato litológico y Distancia al agua.

- Ocurrencia del agua subterránea. El SDF de Polotitlán se encuentran dentro del acuífero Polotitlán que es un acuífero libre capaz de producir gastos importantes, superiores a los 50 L, con flujos de agua hacia el noroeste; coincidiendo el sentido de flujo del agua subterránea con la dirección de los escurrimientos superficiales que son los que drenan a través del arroyo denominado Arroyo Zarco, que es el que descarga al río San Juan (CONAGUA, 2015 b), por lo que se le asigna un valor de 1.0.
- Sustrato litológico. Considerando las características del suelo descritas en el diagnostico (apartado 3.2.1), el valor que se utilizó para el sustrato litológico fue de 0.6.
- Distancia al agua. Debido a que en la zona de estudio no se tiene información acerca de las profundidades del nivel del agua, se consideró para el cálculo de la distancia, los datos piezométricos en la zona aledaña a la presa Huapango, donde las profundidades van en rangos de 6 a 50 m, por lo que se trabajó con el promedio de 22 m de profundidad, que corresponde a elevaciones de niveles estáticos aguas abajo de la cortina de la presa Huapango, hasta el norte y oriente de Aculco, con elevaciones del orden de los 2 310 msnm, lo que equivale a un valor de 0.5 para esta metodología.

Por medio de imágenes satelitales de Google Earth, se obtuvo la distancia de las dos zonas de disposición al cuerpo de agua principal que es la Presa “El Derramadero”, como se muestra en la Figura 3.64, donde A es igual a 525 m y B es de 200 m, por lo que de acuerdo con el sistema GOD, le corresponde un valor de 0.3.



Fuente: Modificado de Google, 2022.

Figura 3.64 Distancias del SDF y SNC de Polotitlán, EdoMéx a cuerpo de agua superficial.

Con el producto de los componentes se obtuvo un valor de 0.3, lo que indicó que el acuífero tiene una vulnerabilidad de Baja a Moderada.

Cuando se aplicó esta metodología a aguas superficiales, se obtuvo una vulnerabilidad Baja. Esto no quiere decir que la contaminación que se produce en el SDF es despreciable, sino que está impactando con mayor fuerza en la superficie.

b) Sitio de Transferencia Yotzingo. Para cuantificar el posible daño en el acuífero donde se encuentra ubicada la ETY, se utilizó la metodología DRASTIC, con el cual se calificaron siete parámetros.

- Profundidad del agua. Se consideró el nivel estático de los pozos más cercanos a la ETY (55A, 56 y 57), con lo que se determinó un promedio de 30 m de profundidad, lo cual coincide con el nivel más crítico observado por Sala-García *et al.* (2011) en el Monte de las Cruces. Conforme a la Tabla 2.8, se asignó un valor de 2.

- Recarga de acuíferos. Para el cálculo de la recarga del acuífero se utilizó el método empírico de Turc (Sánchez Martínez & Carvacho Bart, 2011) que utiliza los parámetros de precipitación media anual y evaporación por medio de la ecuación 3.1.

$$RN = P - ER \quad (\text{Ec 3.1})$$

Donde:

RN = Recarga neta

P = Precipitación media anual

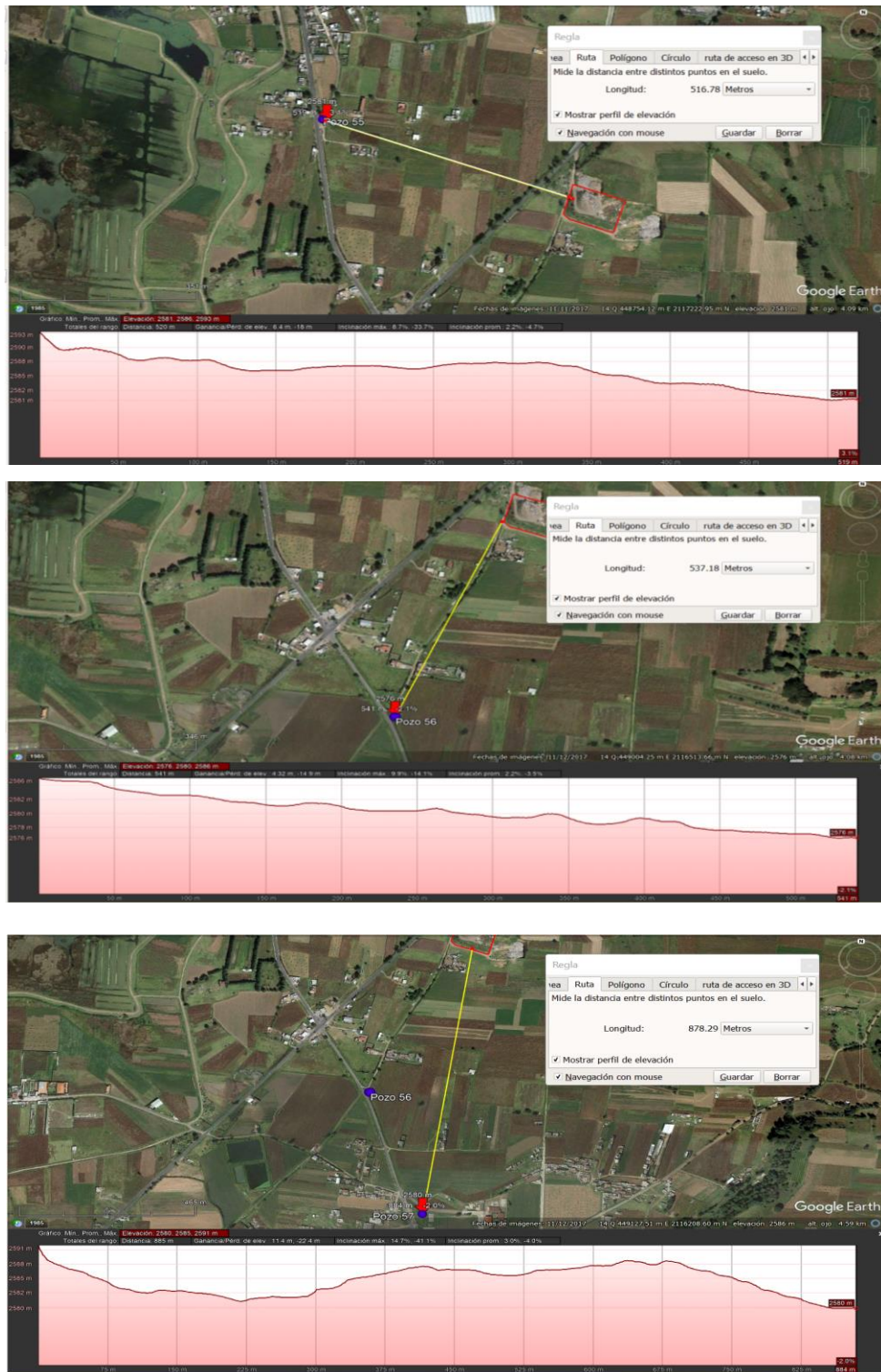
ER = Evaporación

La precipitación media anual y la evaporación se calcularon con los datos de las estaciones meteorológicas 15004, 15113 y 15176 del SMA, que son las estaciones más cercanas al sitio de estudio (CONAGUA, 2022). El promedio de la precipitación media anual corresponde a 609.00 mm/año, este es un factor que afecta directamente a la generación de lixiviados y su posible contacto con aguas subterráneas por medio de su infiltración, por ello se agrega el valor de la lixiviación para obtener un resultado más confiable.

El promedio de la generación de lixiviado más el promedio de precipitación media anual corresponde a 859.60 mm/año, en condiciones del año de inspección 2022.

El valor de la evaporación en la zona se estimó de 741.0 mm/año, por lo tanto, la recarga en esta zona del acuífero, calculada mediante la ecuación 3.1, fue de 118.6 mm/año y, de acuerdo con la Tabla 2.8, el valor asignado es de 6. Este valor no considera que en términos naturales la evaporación registrada es mayor a la precipitación anual.

- Tipo de Acuífero. La zona donde se encuentran localizados los pozos cercanos al SDF, de acuerdo con Torres Corral (2012) tiene un tipo de suelo arenas mal graduadas con grava, sin embargo, el corte litológico sugiere una composición de tres capas (arcilla–basalto– arena), por lo que se le asignó el valor típico promedio entre arena y grava (8) y basalto (9), dando un valor de 8.5.
- Suelo. El suelo en la zona es de tipo Phaeozem (PH) con profundidades variables, su uso es agrícola de temporal de granos como el maíz, por lo que se considera de rendimiento alto. Este tipo de suelo al ser secado en el laboratorio presentó agrietamientos, que es una característica de las arcillas expansivas (Peralta Tingal, 2021), material que se obtuvo de la muestra de la celda rehabilitada, por lo que se asigna un valor de 7.
- Topografía. En cuanto a la topografía, el dato se obtuvo de la pendiente entre el ETY en dirección a los pozos 55, 56 y 57 determinada para cada pozo con la herramienta “perfil de elevación” de Google Earth (Figura 3.56), la inclinación se promedió obteniendo el resultado de 3.36, por lo que se asignó un valor de 9.0.
- Impacto de la zona vadosa. Conforme al tipo de suelo PH de la zona y al determinado en el SDF de RSU y RME; suelo arenas mal graduadas con grava, se consideró un valor típico de 6.0, para el impacto de la zona vadosa.
- Conductividad hidráulica. Para determinar el valor de la conductividad hidráulica se utilizó la tabla de valores propuesta por Iturbe (2014), para un material con grava-arena-arcilla, el cual corresponde a 3.19, este valor se encuentra en un intervalo menor a 4.0, lo que equivale a 1.0.



Fuente: Modificado de Google, 2022.

Figura 3.65 Perfiles topográficos de la ETY a los pozos más cercanos

Los valores obtenidos se sustituyeron en la (Ec 2.2, con lo que se obtuvo un índice de vulnerabilidad de 113.5, lo que indica una vulnerabilidad muy baja (Tabla 3.26), por lo que a pesar de que la ETY se encuentra en una zona de recarga de acuífero y colindante a un área de concentración de pozos, estas no registran vulnerabilidad alta debido al tipo de suelo que no permite que el lixiviado se perfunda.

Tabla 3.26 Intervalos para la clasificación de la vulnerabilidad con el método DRASTIC

VALOR ÍNDICE	CLASIFICACIÓN
< 100	Despreciable
101-119	Muy baja
120-139	Baja
140-159	Moderada
160-179	Alta
180-199	Muy alta
>200	Extrema

Fuente: Modificado de Iturbe, 2014.

El agua subterránea es menos vulnerable a la contaminación que la superficial, porque el subsuelo funciona como una “planta de tratamiento natural”. Si consideramos el riesgo de contaminación del SDF de Almoloya del Río, la contaminación aumenta debido a que la filtración de lixiviados descritos por Torres (2012), se infiltran hacia el pozo 56.

3.4 PROPUESTAS SUSTENTABLES

Los requerimientos establecidos en el reglamento del libro segundo del código para la biodiversidad del EdoMéx, que autoriza la operación de los sitios de disposición de residuos y almacenamiento, establecen contar con una evaluación de impacto ambiental, las cuales se generaron sin proyecto en esta propuesta. Razón de todos los análisis

anteriores, se proponen obras de infraestructura para la reducción del impacto ocasionado por la inadecuada disposición de RSU en los sitios estudiados.

El costo de implementar una tecnología de reducción de algún contaminante puede ser variable, por lo que al considerar que los municipios no cuentan con recursos propios para la recuperación ambiental de los SDF, para resolver las problemáticas que generan los parámetros que se encontraron fuera de la Norma, se propone para cada sitio estudiado un TT para disminuir el costo.

3.4.1 Sitio de Disposición Final “Rancho del Municipio”

El SDF es de tipo D, el cual requiere de una rehabilitación, un plan de manejo y de operaciones de forma inmediata. El sitio cuenta con infraestructura que se puede reacondicionar y mejorar, e incluir un TT para las zonas contaminadas y así prevenir su propagación. Es por ello que la propuesta se divide en dos rubros: a) Rehabilitación del SDF y b) Tren de tratamiento.

a) Rehabilitación del SDF “Rancho del municipio”. Para la propuesta de rehabilitación del SDF se consideró apoyar en el cumplimiento de los requisitos mínimos de la NOM-083-SEMARNAT-2021. Las recomendaciones para su aprovechamiento se explican a continuación.

- Caminos de acceso: el sitio cumple con este requisito.
- Caminos interiores: el sitio cumple con este requisito.
- Cerca perimetral; debido a que el SDF no cuenta con cerca perimetral, se debe instalar una con alambre de púas, sostenidas en una zapata aislada y postes de material reciclado, se consideran estos materiales debido a que son menos propensos a robo.
- Caseta de vigilancia y control de acceso; el SDF cuenta con una caseta de control en malas condiciones la cual se debe acondicionar con la aplicación de pintura, instalación de vidrios y equipamiento básico.

- Control del ingreso de los RSU y RME: el sitio cuenta con registro del acceso de RSU proveniente de la recolección del municipio en camiones recolectores. Para el depósito de RME se realiza un permiso de disposición en la dependencia municipal, en el cual se paga por el derecho al entierro de cárnicos. Se debe delimitar la zona de disposición de RME, la zona propuesta se observa en la Figura 3.67.
- Franja de amortiguamiento de al menos 10 m de ancho: en el proyecto propuesto se visualiza la franja de amortiguamiento contigua a la celda de disposición.
- Instalaciones y sistemas para el control de biogás y control de lixiviados y su monitoreo, incluyendo acuíferos: el SDF cuenta con sistemas de biogás que deben ser rehabilitados debido a que los materiales y capuchas externas no son las adecuadas. En la visita al sitio, se identificó un sistema de captación de lixiviados el cual debe ser rehabilitado para conducirlos a un sistema de almacenamiento. Se debe instalar un sistema de control de lixiviados y de monitoreo de acuíferos. En cuanto a la formación de lagunas de lixiviados, se recomienda construir una laguna o presa de lixiviado con todas las especificaciones, entre ellas la impermeabilización del suelo para evitar la percolación del contaminante al subsuelo y así evitar daño permanente a los sistemas hídricos subterráneos. El sistema de control de lixiviados se debe completar con canales en la celda de disposición y el SNC.
- Almacén para combustibles y lubricantes, según la normatividad aplicable: Se propone sea construida con materiales de la región. También se recomienda la construcción de una zona de acopio de RME principalmente, llantas y electrónicos. El lugar debe contar con cubierta para minimizar el riesgo de lixiviación de MP en el suelo, y la generación de mosquitos; así como los fragmentos de plásticos y microplásticos que son perjudiciales para la fauna silvestre.
- Instalaciones y servicios sanitarios para el personal: Se debe construir un baño seco con especificaciones sanitarias y materiales de la región, se puede considerar el Manual de Construcción de baños secos (EECO, 2022).

- Equipos para la operación del relleno sanitario; El municipio deberá considerar el recubrimiento diario de los RSU en el SDF, debido al viento de la zona y la contratación de maquinaria para la compactación de estos, así mismo para la formación de la celda de disposición y compactación de residuos, la cual debe ser de baja densidad de 400 kg/m³ (SEMARNAT, 2009). Si bien la literatura indica diferentes alturas para la capa de cubrimiento de residuos en este caso como los vientos en la zona son constantes, se recomienda el cubrimiento a un 20% del ancho de residuos.
- Pararrayos o apartarrayos: se deberán instalar.
- Almacén de residuos valorizables y RME: actualmente no se cuenta con almacenamiento de residuos, sin embargo, si se realiza por el municipio, por lo que se deberá instalar una zona para esta actividad, la que se propone se observa en el mapa del proyecto.
- El desarrollo del proyecto se recomienda realizar en ocho etapas: 1) Construcción de la laguna de lixiviados, 2) Rehabilitación de las fosas de lixiviados y su conexión a la laguna, 3) Conformación de la celda de disposición de RSU, 4) Instalación de la tecnología de tratamiento, 5) Conformación de caminos y zona de amortiguamiento, 6) Delimitación de la zona de disposición de RME, 7) Construcción de almacenes.

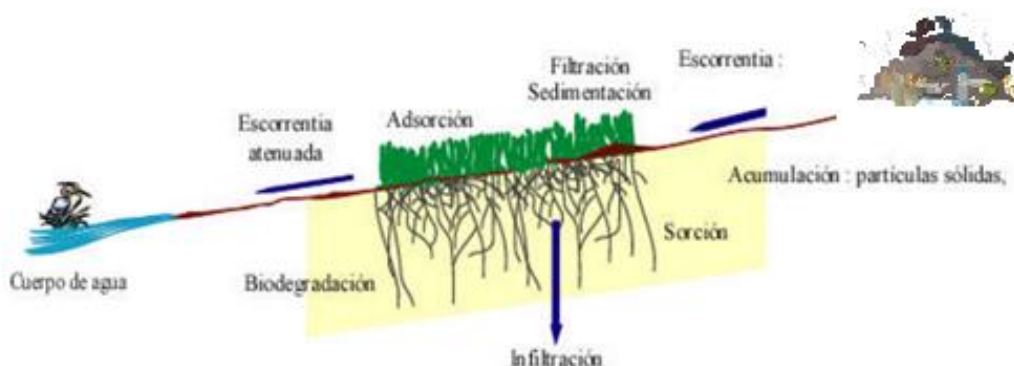
Cabe mencionar que en estas etapas no se incluyen los trabajos preliminares donde se pueden considerar la instalación de cerca perimetral y de baños.

b) Tren de Tratamiento. El TT propuesto para el sitio se compone de una técnica de confinamiento, que actuará para reducir la movilidad del contaminante y una técnica de descontaminación, enfocada a la disminución del lixiviado en la zona afectada.

Para el confinamiento del contaminante, se consideró como opción el método de solidificación/estabilización(S/E), en este proceso *in situ*, se debe mezclar suelo de la zona con un cemento portland o cal como aditivo para inmovilizar el contaminante

y colocarlo en una zanja de 50 cm de ancho por 100 cm de profundidad, rodeando la zona afectada como se muestra en la Figura 3.67, de manera que el material peligroso se pueda quedar inmóvil. Este método fue elegido debido a que usualmente es útil para tratar suelos y lodos contaminados con metales, los tiempos de remediación son de corto a mediano plazo con un costo de 220 dólares/t (FCH, 2015; Volke Sepúlveda & Antonio Velasco, 2002).

Para la reducción de la contaminación en la zona afectada, se debe instalar una Barrera de hierba, para generar la adsorción de los metales en los suelos contaminados con lixiviados y, así prevenir la infiltración (Figura 3.66).



Fuente: modificado de (Madrigal Monárrez et al., 2007)

Figura 3.66 Proceso de reducción de contaminación por incidencia de una Barra de hierba

Para el diseño de la propuesta se consideró una población de 14,895 habitantes y una disposición en el SDF de 8.57 t/día, seis días a la semana (apartado 3.2.1), las instalaciones proyectadas propuestas, se muestran en la Figura 3.67.

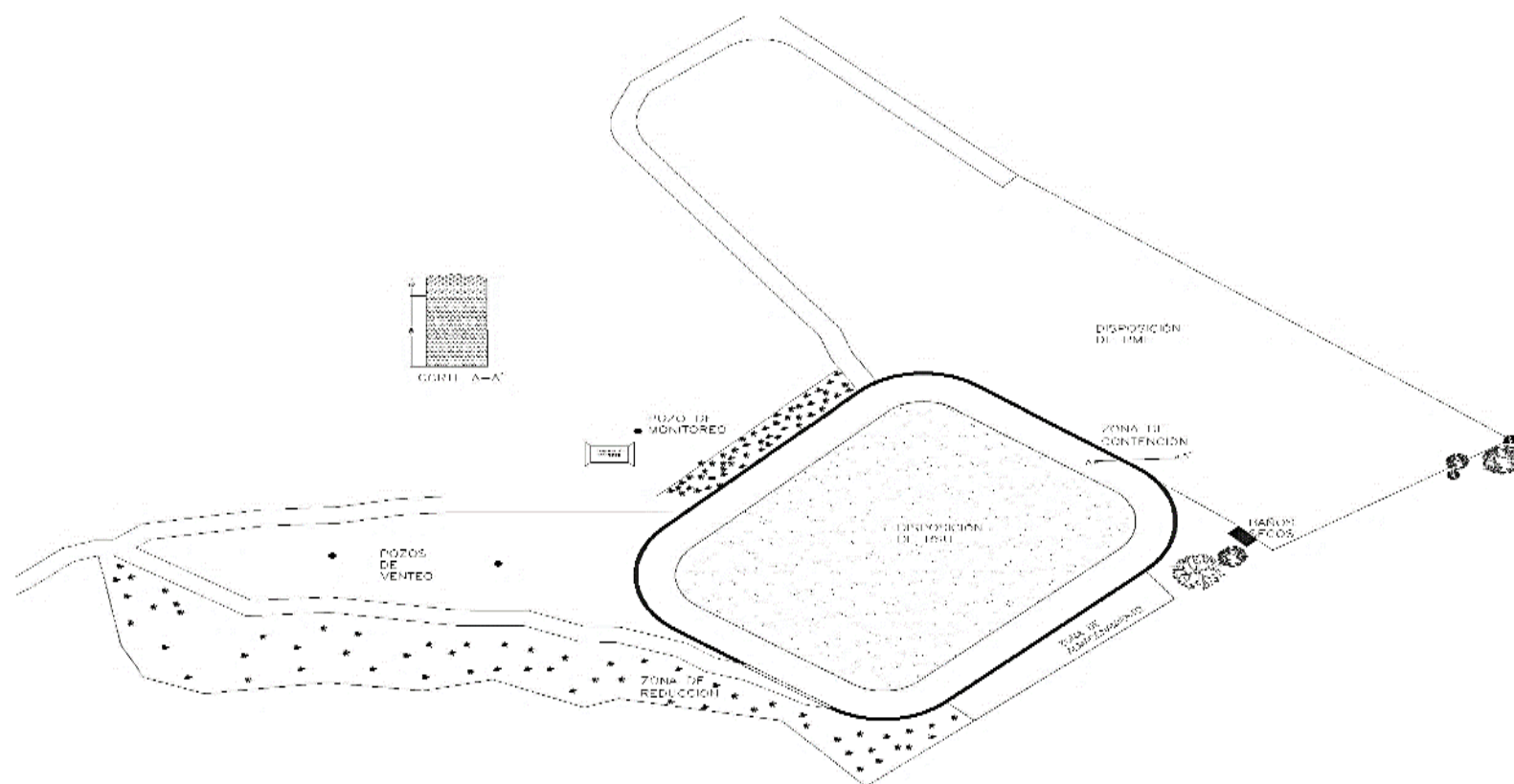


Figura 3.67 Propuesta de mejora para la reducción de contaminación por el SDF de Polotitlán, EdoMéx.

3.4.2 Estación de transferencia “Yolotzingo”

El mayor riesgo se presenta en el suelo, por lo que la propuesta pretende mitigar el escurrimiento de lixiviados en la zona aledaña al sitio, principalmente a la población cercana.

Como primera acción de recuperación ambiental en la ETY, se debe realizar la rehabilitación del sitio como ET, las condiciones del sitio deben trabajar en una etapa de transición con el almacenamiento. Los requisitos mínimos para cumplir son los que se presentan en la Tabla 3.27

Tabla 3.27 Especificaciones para Estaciones de Transferencia

REQUISITOS	CUMPLIMIENTO	OBSERVACIONES
Encontrarse a una distancia mínima de 300 m de escuelas, mercados públicos, hospitales, iglesias y terminales de transporte público	Cumple	
Ubicarse en vialidades con un ancho mínimo de 14 m, que permita el ingreso y salida de los vehículos sin entorpecer el tránsito vehicular	No cumple	El uso del sitio permitió un camino de acceso de 10 m en la propuesta.
Contar al menos las siguientes áreas: Barda Perimetral Control de acceso Rampa Área de descarga (superior) Tolva o ranuras para la descarga Área de carga (inferior) Trampas de sólidos en las descargas de aguas residuales.	No cumple No cumple Cumple Cumple No aplica Cumple No aplica	Las instalaciones requeridas se proponen en la Figura 3.68.

Fuente: SMA, 2008

El cumplimiento de la instalación faltante apelara a la sección 5.6 de la NTEA- 010-SMA-RS-2008, las obras de ingeniería y tecnologías propuestas obtienen efectos equivalentes a los del cumplimiento de la norma.

La operación del sitio en cuanto a la descarga de residuos se deberá realizar en la zona de descarga por gravedad, la cual debe contar con un tope de concreto armado de 0.25 m de alto para prevenir la caída de algún vehículo. El ingreso debe ser por la rampa de acceso de concreto armado y ranurado de doble circulación con ancho de 8.00 m y un carril de descarga de 6.00 m.

La ETY debe contar con zona de almacenamiento de residuos valorizados techado con una superficie de 950 m², en donde se ubicarán baños y almacenamiento de agua.

Cuando ocurre una contaminación de suelo-agua se debe controlar primero la entrada del contaminante, en este caso los lixiviados, para iniciar con la limpieza o control (Gutierrez & Becerra, 2014). Los lixiviados producidos por los residuos en la ETY, se escurren fuera del sitio en época de lluvias principalmente, por lo que deben ser recolectados, controlados y tratados para no permitir su contacto al acuífero. Por lo que se debe construir un tanque de captación de lixiviados en el punto de fuga (establecido en la sección 3.2.2), ya que el sitio es ambientalmente afectado. Esta estructura conducirá a los lixiviados por medio de un dren subterráneo a una fosa para su tratamiento, de ser posible la fosa deberá ser techada. Para lograr este objetivo, el municipio deberá invertir en la compra del terreno adyacente, el cual esta impactado, para instalar la fosa de lixiviados. Se deberá instalar un drenaje pluvial en la zona baja del sitio para prevenir la combinación de agua pluvial con lixiviado, por lo que el nivel de piso del sitio debe tener una pendiente del 2 %. La instalación de un área para compostaje también debe de considerarse.

La ETY debe contar con un programa de control y acceso vehicular. Tener una bitácora de acceso de residuos, control de fauna nociva, fechas de fumigación, áreas atendidas y productos valorizados. En la Figura 3.68, se muestra la zonificación propuesta para la ETY.

Como complemento del trabajo en la zona de estudio, se propone instalar una zona de fitorremediación en el talud de acceso, como medio de reducción de contaminantes. Los costos para este tipo de tecnología varían entre \$600.00 a \$1,000.00 en pesos mexicanos

(FCH, 2015). Este proceso utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar y/o destruir contaminantes como lo muestra la Figura 3.69.

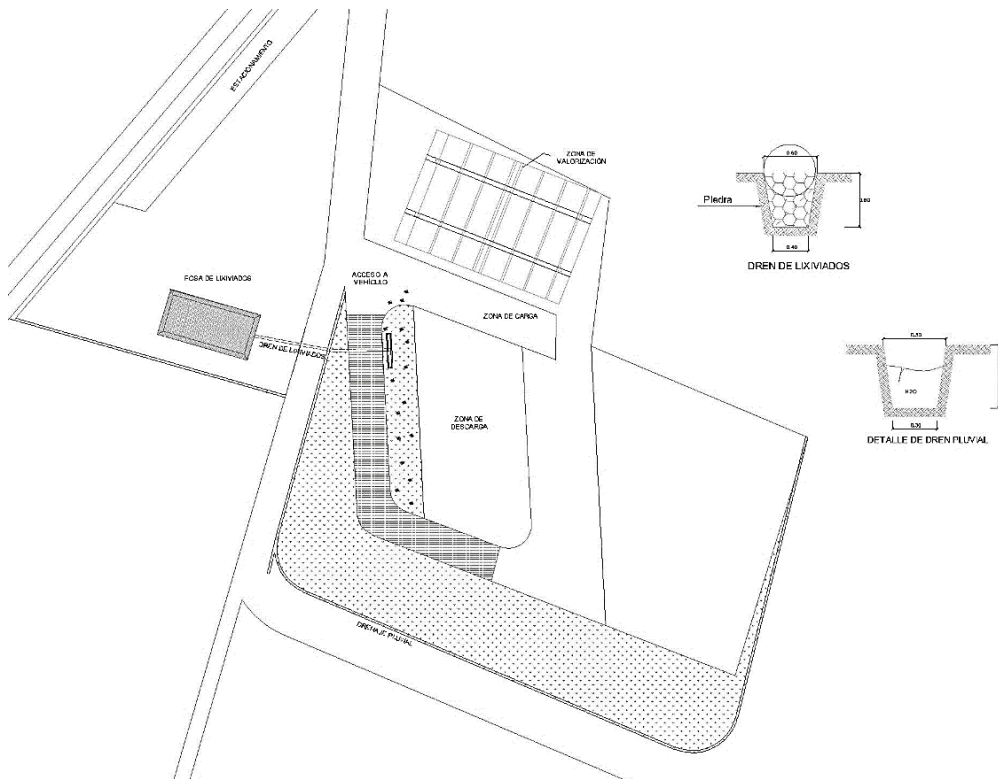


Figura 3.68. Propuesta de mejora de la ET, Tianguistenco, EdoMéz.

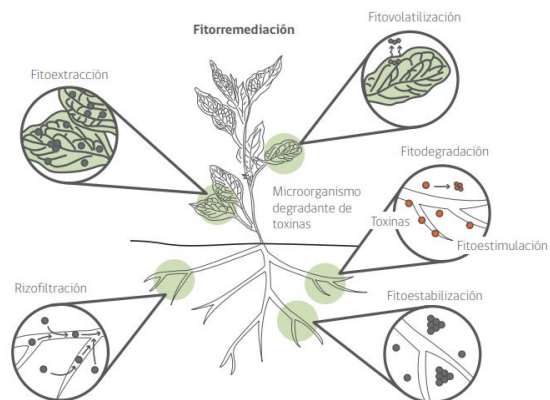


Figura 3.69 Esquema del proceso de fitorremediación

El cumplimiento de los requerimientos por parte de los municipios y las autorizaciones de la SMA no son responsabilidad de la propuesta.

CONCLUSIONES

La selección y evaluación de los sitios, se realizó con mayor rapidez y menor inversión económica por medio del SIG, permitiendo visualizar las posibles afectada de los recursos hídricos aledaños.

La alternancia entre las administraciones de Polotitlán y el poco conocimiento de la operación e impactos del SDF de Polotitlán, ha propiciado un servicio deficiente e insuficiente pese a que fue saneado y acondicionado como relleno sanitario en 2016, con bajo cumplimiento (28.6 %) de los criterios de a la NOM-083-SEMARNAT-2003.

La aplicación de medidas correctivas recomendadas en el SDF de Polotitlán, permitió modificar la primera evaluación ambiental y socioeconómica, de una Ca “Severo” a “Moderado”. Esto prueba que su rehabilitación se puede lograr mediante la mejora en infraestructura y operación, para hacerlo viable los 20 años que le restan de vida útil.

La propuesta de Solidificación/Estabilización para del SDF “Rancho del municipio”, ayudara a amortiguar las afectaciones generadas por la migración de lixiviados a aguas subterráneas y superficiales, así como a evitar la contaminación de la Presa con metales pesados y que estos lleguen a cultivos a través de su riego.

La falta de control en el ingreso de los RS en la ETY, así como en su egreso para su correcta disposición y aprovechamiento de reciclables, ocasiona la acumulación de residuos, que redundan en la generación no controlada de biogás y lixiviados, así como de fauna nociva y efectos negativos en la salud de las poblaciones cercanas.

Las características fisicoquímicas del suelo donde se ubica la ETY, han permitido que los lixiviados se propaguen de manera superficial hacia el acceso de una población cercana, evitado su perfusión al acuífero.

Con el TT propuesto para la ETY, se pretende controlar la dispersión de lixiviados hacia el pozo de agua 56 y viviendas localizadas en terrenos más bajos; además de contribuir a su adecuación para que sea considerado como ET, por las autoridades ambientales.

RECOMENDACIONES

Se recomienda se realice de forma diaria la compactación y cobertura de los residuos depositados en la celda. Además, el saneamiento del SNC es de gran importancia para minimizar el impacto hídrico, proliferación de fauna nociva y malos olores, así como el esparcimiento de los RSU.

La instalación de pozos de biogás en la celda de disposición es necesaria para controlar las emisiones atmosféricas de metano, evitar las emisiones difusas a los terrenos aledaños y controlar la presión del biogás en el interior del SDF.

Se deberá construir una zona de separación de residuos reciclables y otra para la producción de composta con residuos orgánicos; además, de proyectar como aprovechar la energía del biogás en algún proyecto futuro.

La actividad de disposición de RP no fue evaluada debido a que no se encontró evidencia de su disposición en el SDF, sin embargo, no se cuenta con control de acceso, por lo que se recomienda realizar la caracterización de residuos *in situ*, para determinar la composición de estos.

REFERENCIAS

- A Gómez-Cruz, H. M.-S.-S.-S.-G. (2019). Vulnerabilidad hidrogeológica en la zona costera de Jacó, Pacífico Central, Costa Rica. *Revista Geográfica de America Central*, 2(63), 123-145. Obtenido de <http://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/>
- Aller L., B. T. (1987). DRASTIC: A standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. (*EPA 600/2-87*), 622. (U. E. Report, Ed.) Tucson, Environmental Research Laboratory: Office of Research and Development.
- Arteaga-Cortez, V. M.-N.-P.-P.-V.-Z. (2019). Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 10(5), 319-342. doi:<https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-12>
- Ayuntamiento de Polotitlán 2022-2024. (2022). polotitlan.edomex.gob.mx. Obtenido de <https://polotitlan.edomex.gob.mx/sites/polotitlan.edomex.gob.mx/files/files/pdm/PLAN%20DE%20DESARROLLO%20MUNICIPAL%202022-comprimido.pdf>
- Ayuntamiento, c. d.-2. (2016 de marzo de 2016). *Gaceta municipal polotitlán de la ilustración*. (E. d. México, Ed.) Recuperado el diciembre de 2020
- Azamar Alonso, A. y. (diciembre de 2021). *Las Regiones de Emergencia Ambiental: ¿una alternativa a los extractivismos y a la industrialización salvaje?* Recuperado el enero de 2023, de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/358132090_Las_Regiones_de_Emergen cia_Ambiental_una_alternativa_a_los_extractivismos_y_a_la_industrializacion_salvaje/citation/download
- Bagchi, A. (1990). *Design, contruction and monitoring of sanitary landfill*. Wiley.
- Bausback. (2016). *Most Common Landfill Problems & Solutións*. Obtenido de <https://www.hcr-llc.com/blog/the-3-most-common-landfill-problems-solutions>

- Bernache, P. G. (2012). El confinamiento de la basura urbana y la contaminación de fuentes de agua en México. *Revista del Colegio de San Luis*, II(4), 38-42.
- Bernache, P. G. (2012). El confinamiento de la basura urbana y la contaminación de las fuentes de Agua en México. *Revista del Colegio de San Luis*, 38-42.
- Bernal, S. (2015). Generación de residuos solidos municipales en San Pedro Mixtepec, Juquila, Oaxaca: impactos ambientales y alternativas de mitigación.
- Cabrejos, D. (2019). *Contaminación del Rio Rimac por ressiduos sólidos en industria en los ultimos años*. Chiclayo, Peru: Universidad Tecnologica del Peru.
- Calixto-Romo, A. S.-M. (2014). EL PAPEL DE LA VEGETACIÓN EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES. *Periódico digital Impluvium*(3), 14-19. Recuperado el 27 de 04 de 2022, de <http://www.agua.unam.mx/assets/pdfs/impluvium/numero03.pdf>
- Cardenas-Moreno, P., Piña-Guzmán, A., Colomer-Mendoza, F., Carlos Alberola, M., & Robles-Marinez, F. (2019). Evaluation of compliance with regulatory factors of waste disposal sites by using geographical information systems, case of study: State of Mexico. *Revista Internacional de Contamianción Ambiental*, 34(4), 1025-1037.
- Ccahuana, T. A. (2005). Estudio Geológico-Geotecnico del área para el Relleno Sanitario de la ciudad de Suyo, provincia Ayabaca, Departamento de Piura. (U. N. Marcos, Ed.) *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG*, 8(15), 69-77.
- CEUPE. (2019). *Gestión de Residuos*. (Medio Ambiente y Calidad) Recuperado el Enero de 2019, de Centro Europeo de posgrado: “<https://www.ceupe.com/blog/que-es-gestion-residuos.html>
- CGPCEDOMEX. (2019). *Atlas Estatal de Riesgos del Estado de México*. Toluca, Estado de México: Cordinación general de Protección Civil del Estado de México. Obtenido de <http://cgproteccioncivil.edomex.gob.mx/atlas-riesgos>
- CGPCEM. (2018). Obtenido de Atlas de Riesgos, H. Ayuntamiento de Axapusco, Coordinación General de Protección Civil del Estado de México.:

https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo3/2018/43031/4/df68879c4fd6fe9539c288dfbfa98eab.pdf

CGPCEM. (2020). *Atlas de Riesgos municipio de Polotitlan 2019-2021*. Coordinación General de Protección Civil del Estado de México. Recuperado el 2020 de 11 de 11, de Coordinación General de Protección Civil del Estado de México: http://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/EdoMex/Atlas_Polotitlan_Ene2020_034.pdf

CGPCEM, C. G. (2021). Atlas de Riesgos del Estado de México. Recuperado el 12 de Mayo de 2021

CONABIO. (2021). Geoportal Conabio. Obtenido de [http://geoportal.conabio.gob.mx/#!=hongos,mamiferos:1,anfibios,aves,peces,reptiles,plantas@m=topo@f=punto\(-99.84803543097449,20.206397942569865\).buffer\(2500\)](http://geoportal.conabio.gob.mx/#!=hongos,mamiferos:1,anfibios,aves,peces,reptiles,plantas@m=topo@f=punto(-99.84803543097449,20.206397942569865).buffer(2500))

Conacyt. (2 de septiembre de 2021). *conacyt.mx*. Obtenido de https://conacyt.mx/wp-content/uploads/comunicados/Comunicado_239_02092021_FF.pdf

CONAGUA. (2015 b). *Actualización de la disponibilidad media anual del agua en el acuífero de Polotitlán (1503), Estado de México*. Gerencia de aguas subterráneas. Mexico: Comisión Nacional del Agua. Recuperado el 2022, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103134/DR_1503.pdf

CONAGUA. (noviembre de 2017). Obtenido de Estadísticas del Agua en México: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf

Conagua. (2017). *Organismo de Cuenca Lerma Santiago Pacífico*. Obtenido de Organismos de Cuenca y Direcciones Locales: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/organismo-de-cuenca-lerma-santiago-pacifico>

CONAGUA. (diciembre de 2018). *Atlas del Agua en Mexico 2018*. Obtenido de Comisión Nacional del Agua: https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2019/04/AAM_2018.pdf

- CONAGUA. (2018a). *Numeragua 2018*. Mexico: Conagua. Recuperado el 2019, de Numeragua México 2018: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/Numeragua_2018.pdf
- CONAGUA. (10 de abril de 2018b). Obtenido de Situación de los Recursos Hídricos: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/situacion-de-los-recursos-hidricos>
- CONAGUA. (2019). *Estadísticas del agua en México*. México: Comisión Nacional del Agua. Recuperado el 31 de agosto de 2022, de http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2019.pdf
- CONAGUA. (2019). *Estadísticas del Agua en México 2019*. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua. Recuperado el 02 de septiembre de 2022, de https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM_2019.pdf
- CONAGUA. (mayo de 2021). *Registro Público de Derechos del agua , REPDA*. Obtenido de <https://app.conagua.gob.mx/sistemasdeagua/>
- CONAGUA. (2022b). *Aguas Subterráneas/Acuíferos del Estado de México*. Recuperado el 05 de 03 de 2022, de Comisión Nacional del Agua CONAGUA: <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/edomex/edomex.html>
- CONAGUA. (s.f.). *Aguas subterráneas*.
- CONAGUAa. (19 de 09 de 2022). Obtenido de Calidad del Agua en México: <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua#:~:text=La%20Red%20Nacional%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20Calidad%20del,Molinito.%20Adem%C3%A1s%2C%20se%20cuenta%20con%209%20sitios%20subterr%C3%A1neos.>
- CPCEMEX. (Atlas de riesgos Villa del Carbón, H. ayuntamiento de Villa del Carbón, Coordinación General de Protección Civil del Estado de México, septiembre de 2022). *Atlas de Riesgos del municipio de Tianguistenco*. Atlas de riesgos municipal, H Ayuntamiento de Tianguistenco. Recuperado el 23 de mayo de 2020, de

- <https://tianguistenco.gob.mx/wp-content/uploads/2022/11/ATLAS-DE-RIESGOS-INTERACTIVO-2022.pdf>
- DGPC. (2017). Obtenido de Atlas de Riesgos Tejupilco. H. Ayuntamiento de Tejupilco, Dirección General de Protección Civil.: https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo/2017/138/5/830c7a2b7f615293b41be2057047d9d3.pdf
- DGPCEM. (2014). Obtenido de Atlas de Riesgos, H. Ayuntamiento de Atlautla, Dirección General de Protección del Estado de México: https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo3/2019/43031/5/75843acb593db88ad1eb8145bb01cb51.pdf
- DGPCEM. (2018). *Atlas Municipal de Riesgos de Polotitlán*. Dirección General de Protección Civil del Estado de México. Recuperado el mayo de 2021, de https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo3/2019/43031/7/284984867849e7134521c4c1b7eadd1c.pdf
- DGPCEM, D. G. (2015). *Tiraderos de basura y rellenos sanitarios*. Polotitlán de la Ilustración: H. Ayuntamiento de Polotitlán.
- DGPCEM, D. G. (2018). Obtenido de https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo3/2019/43031/7/284984867849e7134521c4c1b7eadd1c.pdf
- DGPCMEX. (Octubre de 2019). *Atlas de Riesgos del Estado de México 2015*. Obtenido de <http://gaceta.diputados.gob.mx/Gaceta/62/2015/feb/Atlas-20150224.pdf>
- Díaz Archundia, L. (2016). *Diagnostico de la generación de biogás en tres sitios de disposición de residuos sólidos urbanos en el Estado de México*. Metepec, Estado de México, México: Instituto Tecnológico de Toluca.
- Díaz-Delgado. (2005). *Recursos Hídricos; conceptos basicos y estudios de caso en Iberoamerica*. Uruguay: Piriguazú Ediciones. Recuperado el 2022

- Díaz-Delgado, e. a. (2005). *Recursos Hídricos; conceptos básicos y estudios de caso en Iberoamérica*. Uruguay: Piriguazú Ediciones. Recuperado el 2022
- DOF. (1917). *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos* (última modificación 28-05-2021 ed.). Cd de México: Diario Oficial de la Federación. Recuperado el 2021 de 06 de 13, de <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/CPEUM.pdf>
- DOF. (25 de 03 de 1980). NMX-AA-003-1980. *Aguas Residuales-Muestreo*. México: Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (05 de 09 de 1980). NMX-AA-014-1975. *Agua superficial - agua*. México: Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (14 de diciembre de 1989). CE-CCA-001/89. *Criterios ecológicos de calidad de agua*. México, México.
- DOF. (1994). Norma Oficial Mexicana NOM 014-SSA1-1993. *PROCEDIMIENTOS SANITARIOS PARA EL MUESTREO DE AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA PÚBLICOS Y PRIVADOS*. México, D.F.
- DOF. (1996). NOM-127-SSA1-1994. *Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. México: Gobierno de México.
- DOF. (2004). *NOM-083-SEMARNAT-2003*,. Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (23 de 06 de 2006). NORMA Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005. *Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos*. México: Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (2015). NMX-AA-042-SCFI-2015. *Análisis de agua - Enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y Escherichia Coli. Método del número más probable en tubos múltiples*. México: Gobierno de México.

- DOF. (24 de marzo de 2016). Ley de Aguas Nacionales, Diario Oficial de la Federación. Ciudad de México, México: Camara de Diputados del H. Congreso de la Unión.
- DOF. (02 de 2019). NMX-AA-102-SCFI-2006. *Calidad del agua-Detección y enumeración de organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y Escherichia coli presuntiva-Método de filtración en membrana*. Cd. México.
- DOF. (18 de 01 de 2021a). Ley General para la prevención y Gestión Integral de los Residuos. *Diario Oficial de la Federación*. Cd. México: Gobierno de México. Recuperado el 2019-2022, de http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_180121.pdf
- DOF. (2021b). *NOM-083-SEMARNAT-2021, 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*. Diario Oficial de la Federación, Gobierno de México.
- DOF. (11 de 03 de 2022). NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021. *Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación*. México: Diario Oficial de la Federación.
- DOF, D. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. *Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis*. México.
- EAM. (2018).
- Ecologia, D. d. (enero de 2023). Cuestionario de entrevista. (I. M. Palacios, Entrevistador)
- EECO. (2022). Obtenido de https://eeco.org.mx/wp-content/uploads/2020/08/Anexo-_MANUAL-DE-CONSTRUCCI%C3%93N-DE-BA%C3%91OS-SECOS_FASEII.pdf
- EPA. (2017). *EPA 815-F-00-007*. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Obtenido de <http://water.epa.gov/drink/agua/estandares.cfm>

- Escobar, J. (2002). *La contaminación de ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar*. Santiago de Chile: CEPAL.
- ETY, E. d. (septiembre de 2022). Entrevista de monitoreo. (I. M. Palacios, Entrevistador)
- FAMM. (2015). Obtenido de <https://famm.mx/wp-content/pdf/capitulo2-hidrologia-del-panuco.pdf>
- FAO. (2021). *Planosol FAO soil group*. Recuperado el mayo de 2021, de <https://www.britannica.com/science/Planosol>
- FCH. (2015). *Manual de Tecnologías de remediación de sitios contaminados*. Recuperado el Enero de 2023, de https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/10/manual-de-tecnologias-de-remediacion-de-sitios-contaminados_baja-1.pdf
- FCyEA. (enero de 2019). *Cuerpos de Agua*. Obtenido de Fondo para la comunicación y Estudio Ambiental, Agua.org.mx: <https://agua.org.mx/cuerpos-de-agua/>
- Fernández-Rodríguez, M. e. (2018). Evaluación hidroquímica de las aguas del río Cayo Guam River, Moa, Cuba. *Minería y Geología*, 265-285.
- G, P.-G., V, A.-G., & JA, R.-R. (26 de noviembre de 2021). Calidad Físicoquímica y microbiológica del agua superficial del río Grande de Tárcoles, Costa Rica: un enfoque ecológico. *UNED Research Journal / Cuadernos de Investigación UNED*, 13(1). doi:<https://doi.org/10.22458/urj.v13i1.3148>
- Gabor, e. a. (2007). Caracterización de biogas generado en trece sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en México. *Gaceta ecológica* 82, 25-35.
- Gaceta. (21 de mayo de 2009). Secretaría del Medio Ambiente, NTEA-010-SMA-RS-2008, Norma Técnica Estatal Ambiental que establece los requisitos especiales para la instalación, operación y mantenimiento de infraestructura para acopio, transferencia, separación y tratamiento. *de residuos sólidos urbanos y manejo especial, para el estado de México*. Toluca de Lerdo, Estado de México, Mexico:

- Gaceta del Gobierno del Estado de México. Recuperado el 2021 de septiembre de 12
- Garcia M., R. G. (2020). Agua no potable para consumo humano en la Horticultura de la Plata (Buenos Aires), Causas, consecuencias y alternativas. *Ciencia, Docencia y Tecnología*, 31(6), 245-265. doi:<https://doi.org/10.33255/3160/497>
- Garcia, Ferrer, & Albarran. (2008). Tratamiento de Lixiviados de vertedero de RSU por procesos de membranas. Recuperado el 27 de 04 de 2022, de <http://www.redisa.net/doc/artSim2008/agua/A12.pdf>
- García, I. (18 de julio de 2017). *El Universal*. Obtenido de Persiste tiradero a cielo abierto en Oaxaca: <https://www.eluniversal.com.mx/articulo/estados/2017/07/18/persiste-tiradero-cielo-abierto-en-rio-de-oaxaca>
- GEM, G. d. (2014). Áreas Naturales protegidas del Estado de México. Comisión Estatal de POarques Naturales y de la Fauna. Obtenido de https://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/sistema_nacional/documentos/ANPL/Mex/SUPERFICIE_PARQUES_JUNIO_2014.pdf
- GOB. (02 de 2006). NMX-AA-102-SCFI-2006. *Calidad del Agua-DETECCIÓN Y ENUMERACIÓN DE ORGANISMOS COLIFORMES, ORGANISMOS COLIFORMES TERMOTOLERANTES Y Escherichia coli PRESUNTIVA – MÉTODO DE FILTRACIÓN EN MEMBRANA (CANCELA A LA NMX-AA-102-1987)(CDU:628.163)*. Gobierno de México. Obtenido de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166804/NMX-AA-102-SCFI-2006.pdf>
- Gobierno del Estado de México. (2017). Estudio Previo Justificativo referente a la desafectación del servicio publico y desincorporación de una superficie de 2,201.67 hectareas del área natural protegida con la categoria de parque estatal denominado. "Parque Estatal Santuario del Agua Sistema Hidrologico Presa Huapango". CEPANAF.

- Gomez Espinoza, M., Jiménez Nuñez, M., Hernández Berriel, M., & Mañón Salas, M. (2020). Evaluación de Impacto Ambiental en la Estación de Trasferencia de Tianguisternco, Estado de México. *Encuentro Nacional de Expertos en Residuos Sólidos* (pág. Cartel). ENERS10.
- González-Polo, y. A. (2020). *Estado de México. com.mx*. (H. A. Polotitlán, Productor) Recuperado el 08 de Noviembre de 2020, de Polotitlán: <https://estadodemexico.com.mx/polotitlan/>
- Google. (2019). Google Earth Proo. Obtenido de https://earth.google.com/web/@19.44373876,-99.71722442,2495.47584058a,301813.67025096d,35y,0h,0t,0r?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=es-419.
- Google, E. (diciembre de 2020).
- Grajales-Mesa. (2020). Designing a permeable reactive barrier to treat TCE contaminated groundwater.
- Guadarrama-Tejas R., K.-M. J.-A.-S. (2016). Contaminación del agua. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 1(10), 2-5.
- Gutierrez & Becerra. (2014). *Estado del Arte de la Remediación de Acuíferos Contaminados*. Cordinación de Hidrología Subcoordinación de Hidrología Subterránea. Recuperado el 09 de septimebre de 2022, de https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros/remediacion_de_acuiferos_contaminados.pdf
- H Ayuntamiento de Polotitán. (16 de agosto de 2012). Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Polotitlán. Polotitlán de la Ilustración, México. Recuperado el mayo de 2021, de http://seduv.edomexico.gob.mx/planes_municipales/polotitlan/PMDUPOLO.pdf
- Huacho-Chavez, I. F. (2020). Diseño de una Celda para disposición final de residuos sólidos. *Polo del Conocimiento: Revista cientifico-profesional*, vol. 5(2), 125-136.

- Huehuitlan, D. (marzo de 2019). Entrevista a Delegada de Huehuetitlan 2019. (I. M. Palacios, Entrevistador)
- IGECEM, I. d. (2017, 2018, 2019). Producto Interno Bruto Municipal. (CE: 207/08/14/19, : 207/08/03/19, CE: S/N). (S. d. Finanzas, Ed.) Toluca, Estado de México, México: Gobierno del Estado de México. Recuperado el mayo de 2021, de http://igecem.edomex.gob.mx/sites/igecem.edomex.gob.mx/files/files/ArchivosPDF/Productos-Estadisticos/PIBMun_19.pdf
- Inaturalist. (2021). Observaciones. *Parque estatal santuario del Agua*. Obtenido de <https://www.inaturalist.org/projects/parque-estatal-santuario-del-agua-sistema-hidrologico-presa-huapango>
- INECC. (2022a). *Los Sistemas de Aseo Urbano en México*. Recuperado el 2022, de Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/133/sistemas.html#:~:text=Las%20estaciones%20de%20transferencia%20son%20instalaciones%20en%20las,los%20ORSM%20recolectados%20a%20unidades%20de%20gran%20capacidad.>
- INECC. (26 de 04 de 2022b). *Generalidades: Ciclo de los residuos sólidos*. Obtenido de Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/105/I.html>
- INEGI. (1974). Carta de Uso de Suelo y vegetación de Polotitlán. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. México, Escala 1:50000.
- INEGI. (2001, 2006, 2011 y 2021). *inegi.org*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/scitel/consultas/index#>
- INEGI. (2009). Portuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. *Polotitlán de Juárez, México*.
- INEGI. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010, Polotitlán*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

- INEGI. (2012). *SIATL*. Recuperado el 2020, de http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#
- INEGI. (2015). *Censo nacional de gobiernos municipales y delegaciones*. Censo nacional de gobiernos municipales y delegaciones. Tabulados básicos. Recuperado el 28 de febrero de 2014
- INEGI. (2016). *Guía para la interpretación de Cartografía: Edafología*. Aguascalientes, Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Geografía y Estadística. doi:ISBN 970-13-4376-X
- INEGI. (2020). *Banco de Indicadores INEGI*. Obtenido de Polotitlán (15071): <https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?t=01800020&ag=15071#divFV62001017956200101795#D018000200020>
- INEGI. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/scitel/consultas/index#>
- INEGI. (2020). *Mexico en cifras*. Obtenido de Villa Victoria, México: <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=15>
- INEGI. (2020a). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Recuperado el mayo de 2022, de Instituto Nacional de Estadística Geografía e Información: https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html#Datos_abiertos
- INEGI. (2020a). *Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informe*. Obtenido de Censo de Población y Vivienda 2020: https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html#Datos_abiertos
- INEGI. (2022). *Datos de Población*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Información: <https://www.inegi.org.mx/temas/estructura/#Tabulados>
- INEGI. (2022). Datos WMS. *Fisiografía*. Vizualización en GIS. Recuperado el septiembre de 2022

- INEGI. (2022). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Recuperado el 2022, de Banco de Indicadores: <https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?t=287&ag=15101#D287#D6200101795>
- INEGI. (2022a). *México en Cifras; Polotitlán Estado de México*. Recuperado el mayo de 2021, de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=15#collapse-Resumen>
- INEGI. (s.f.). *México en cifras*. Recuperado el 2019, de <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=15>
- INEGI, I. N. (1974). *Carta geográfica de Usos de suelo y vegetación 1:50000, Polotitlan F14C87*. Estado de México, Polotitlan: Escala 1:50 000.
- INEGI, I. N. (2009). Portuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. (*Clave geoestadística 15071*), *Polotitlán, México*. Cd. México: Inegi.
- INEGI, I. N. (2010). *Compendio de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Villa Victoria México clave geoestadística 15114* (Vol. 15114). México, Estados Unidos Mexicanos : Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI, I. N. (2020). (Inegi, Editor) Recuperado el 08 de Noviembre de 2020, de Polotitlán México (15071): <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=00#tabMCcollapse-Indicadores>
- Iturbe, A. R. (2014). *Suelos y acuíferos contaminados: evaluación y limpieza*. México: Trillas.
- Jaramillo, J. (1991). *Guía para el Diseño, construcción y operación de Rellenos sanitarios*. Washinton, D.C.: Horst Otterstetter.
- Leon-Gomèz. (2015). Impacto de Lixiviado generado en el relleno sanitario municipal de Linares (Nuevo León) sobre la calidad del agua superficial y subterránea.

- LGPAGIR. (2018). *Ley de General de y gestión integral de Residuos* (Vol. XVI). México: Diario Oficial de la Federación. Recuperado el 2022
- López Ramírez, M., Aburto Gutiérrez, Y., & Ocaña Drouaillet, K. (2022). Caracterización fisicoquímica y biológica de los lixivados provenientes del sitio de disposición final no controlado en Tlapacoyan, Veracruz, México. doi:<https://doi.org/10.29019/enfoqueute.836>
- Lopez, G. S. (2017). *Propuesta para el manejo integral de los residuos sólidos urbanos de un municipio del este del Estado de México*. Metepec: Informe Técnico Residencial Profesional ITToluca.
- Machorro-Roman, A., Rosano-Ortega, G., Tavera-Cortes, M. E., Flores-Trujillo, J. G., Maimone-Celorio, M. R., Martínez-Tavera, E., . . . Rodríguez-Espinosa, P. F. (2020). Sustentabilidad y evaluación del impacto del relleno sanitario del Municipio de Carmen en Campeche, México. *La granja: Revista de ciencias de la vida*, 32(2), 72-92.
- Madrigal Monárrez, I., & Benoit, P. (enero - marzo de 2007). Retención de plaguicidas en zonas amortiguadoras. Caso del isoproturon. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, VIII,(1), 35-43.
- Madroñero, R. F., F., S., R., F., & J., N. (2022). Vulnerabilidade à Poluição Antropogênica no Sistema Aquífero Dunas/Barreira Regiao Metropolitana de Natal. *Sociedade & Naturaza*. doi:DOI: 10.14393/SN-v34-2022-63867
- Marin Calderon, V. J. (2015). *Evaluación del escalamiento a campo de la biodegradación acelerada de los residuos sólidos urbanos*. Metepec: Tecnológico Nacional de México, ITT.
- Martínez, R. L. (2016). *Diagnostico y propuesta de mejora del tiradero municipal de Villa Victoria Estado de México*. Universidad Autónoma del Estado de Mexico. Facultad de Planeación Urbana y Regional.
- Méndez R et al. (2002). Tratamiento de Lixiviados con carbón activado. *Ingeniería*, 19-27. Recuperado el 2021 de 06 de 20

- Mérida, H. A. (2018). *Mérida Sustentable*. Obtenido de Relleno Sanitario: <http://www.merida.gob.mx/municipio/sitiosphp/sustentable/contacto/relleno-sanitario.php>
- Merritt, F. S. (1994). Planeación local y regional: Recursos y calidad del ambiente. En F. S. Merritt, *Manual del Ingeniero Civil* (W. N. Lane, Trad., Vol. III, págs. 13-27). Cd. México, México: Mc Graw Hill. doi:ISBN 968-422-754-X
- Mijares, F. J. (2003). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Mexico, D.F.: Limusa, Noriega Editores.
- Moreno, A. R. (2010). *El agua: Estudio de las principales características del agua y los diferentes métodos empleados para su tratamiento*. .
- Musso, T. B. (2017). ARCILLAS ESMECTÍTICAS DE LA REGIÓN NORPATAGÓNICA ARGENTINA COMO BARRERAS HIDRÁULICAS DE RELLENOS SANITARIOS Y AGENTES DE RETENCIÓN DE METALES PESADOS. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 141-152. doi:DOI: 10.20937/RICA.2017.33.01.13
- Najera Aguilar, H. A. (2008). Lixiviados ¿Qué son y cómo se clasifican? *UNICACH-NASJAME*, 1-3.
- Niño, C. L. (junio de 2016). Physiochemical contamination of aquifers due to leachates from thw El carrasco, Bucaramanga, Landfill. *Producción mas Limpia*, 66-74.
- Novo, G. (12 de Noviembre de 2018). La cronica municipal y las regiones ambientales. *El Sol de Toluca*, págs. <https://www.pressreader.com/mexico/el-sol-de-toluca/20181112/281612421426106>.
- Olay Romero, E. (2014). *Biodegradación de Residuos sólidos urbanos con recirculación de lixiviados a dos tasas y dos frecuencias*.
- Olvera, G. (28 de 10 de 2020). Lancheros del Estado de México Navegan entre basura. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=cH0WoHNTEW8>
- Ordoñez Suárez, J. L. (2015). Procesos y tecnologías emergentes de remediación de aguas subterráneas contaminadas con disolventes clorados. *IGME*, 245-248.

- PCEDOMEX, P. C. (Octubre de 2019). *Atlas de Riesgos del municipio de San Jose del Rincon*. 2016. Obtenido de <http://www.ipomex.org.mx/ipo3/archivos/downloadAttach/378208.web>
- PCEM, P. C. (2012). Obtenido de https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo/2014/8/7/3fb8ec2acc5dcaaedf926ffe9bdc4fd6.pdf
- PCEM, P. C. (2012). *Programa de Protección Civil Para Basureros*. Obtenido de https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo/2014/8/7/3fb8ec2acc5dcaaedf926ffe9bdc4fd6.pdf
- PDM. (2016). Plan de Desarrollo Municipal 2016-2018. Recuperado el mayo de 2021, de https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo3/2018/42987/11/9363b5eeb4ccc65143a8d944eafd6790.pdf
- PDM, P. d.-2. (31 de Marzo de 2016). Recuperado el Noviembre de 2020, de https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo/2016/118/1/ae329113cad61e6b289dacd172db77c7.pdf
- Peralta Tingal, S. P. (2021). *Caracterización de arcilla expansivas y mitigación de Riesgos*. Lima: Pontificia Universidad de Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería. Recuperado el diciembre de 2022
- Plata. (2015). Percepción local del Estado Ambiental en la Cuenca Baja del Río Manzanares.
- PMD. (2012). Plan de desarrollo Municipal de Polotitlan. Obtenido de http://seduv.edomexico.gob.mx/planes_municipales/polotitlan/PMDUPOLO.pdf
- Polotitlán. (29 de Marzo de 2019). *PDM, Plan de Desarrollo Municipal 2019-2021*. H. Ayuntamiento de Polotitlán. Obtenido de http://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo3/2019/42987/11/cdec6f3b239d9b677ff8a84d8c1dac0e.pdf

- Polotitlán, D. d. (mayo de 2021). Cedula de Entrevista Telefonica. (I. M. Palacios, Entrevistador)
- Polotitlán, E. d. (24 de marzo de 2022). Cedula de Entrevista 2. (I. M. Palacios, Entrevistador)
- Polotitlán, H. A. (16 de 01 de 2015). Datos Ipomex, Solicitud de Información pública. *Info ART92_17*. (Ipomex, Ed.) Polotitlán, México, México.
- Ponce, V. M. (2022). La Matriz de Leopold para la evaluación del impacto Ambiental.
- PRADANA PÉREZ, J. Á., & GARCÍA, J. (-U. (s.f.).
- Públicos, D. d. (2011 de octubre de 2021). Director de Servicios Públicos H Ayuntamiento 2019-2021 . (I. M. Palacios, & Francisco, Entrevistadores)
- Ramirez, L. (julio de 2022). Caracterización fisicoquímica y biológica de los lixiviados procedentes del sitio de disposición final no controlado en Tlapacoyan, Veracruz, México. *Enfoque UTE*, V13((3)), 1-13. doi:<https://doi.org/10.29019/enfoqueute.836>
- Reyes Enriquez A., V. P. (25 de 04 de 2022). *Geomorfología del parque nacional Nevado de Toluca*. Obtenido de <http://www.observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal11/Procesosambientales/Geomorfologia/02.pdf>
- RNMCA, R. N. (2019). *Diagnostico de la calidad del agua en la Región Hidrológica Lerma Santiago Pácifico*. (SEMARNAT-CONAGUA, Ed.) Subdirección General Técnica/Gerencia de Calidad de Agua.
- Rodríguez Santana, D. (2017). *Diseño de un relleno sanitario intermunicipal sustentable* (Tesis de Maestria ed.). Metepec, Estado de México: Instituto Tecnológico de México/Instituto Tecnológico de Toluca.
- Rojas-Oviedo. (2020). Current status of the management of chemical waste in the sanitary landfills of the Canton. <http://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/index>, 1143-1159.

- Roman, J. C. (12 de 10 de 2022). El mar comienza en las alcantarillas. *El sol de Toluca*. Recuperado el 2022, de <https://www.elsoldetoluca.com.mx/doble-via/ecologia/el-mar-comienza-en-las-alcantarillas-9021970.html>
- Rosas-Varga, J. A., & Ramón-Valencia, J. (2020). Biodegradabilidad fde lixiviados procedentes de un relleno sanitario utilizando un sistema de lodos activados flujo pistón. *ORINOQUIA*, 24(2), 99-109. doi:10.22579/20112629.633
- Salas-Garcia. (2011). Modelo numérico 1D de la dinámica de infiltración en la zona no saturada, acuífero del valle de Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v28((1)), 147-160. Recuperado el 18 de 04 de 2022, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742011000100011&lng=es&tlng=es.
- Sanches Fernandes, L. F. (2014). DRASTIC and GOD vulnerability maps of the Cabril River Basin, Portugal. *Rem: Revista Escola de Minas*, 67(2), 133-142. Recuperado el 2023 de enero de 19, de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56431485002>
- Sánchez Martínez, M., & Carvacho Bart, L. (2011). Comparación de ecuaciones empiricas para el cálculo de la evaporación de referencia en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 171-186. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022011000300010>
- Sanchez, H. d. (2015). La congntaminación de las aguas subterráneas por vertederos y depósitos enterrados en España: visión desde la investigación . *Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas* (págs. 295-302). Valencia: AIH-GE.
- Santana, R. D. (2017). *Diseño de un relleno sanitario intermunicipal sustentable*. Metepec, Estado de México.: Instituto Tecnológico de Toluca.
- SE. (2021). NMX-AA-028-SCF1-2021. *Análisis de agua-Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO5) y residuales tratadas - Método de prueba* . México: Secretaría de Economía.

- SEGOB, S. d. (Noviembre de 2015). *Clasificación de residuos sólidos*. Recuperado el enero de 2019, de residuos_sólidos: <https://www.gob.mx/residuos-solidos/descargables/95/i>, enero 2019
- SEMARNAT. (2009). Manual de especificaciones técnicas para la construcción de rellenos sanitarios de residuos sólidos urbanos y residuos de manejo especial. SEMARNAT. Recuperado el enero de 2023
- SEMARNAT. (2010). *Criterios para la ubicación, operación y cierre de infraestructura ambiental para el acopio, transferencia, separación y tratamiento de residuos sólidos urbanos y de manejo especial*. Contrato dgrmis-dac-dgfaud-No. 012/2010, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Estudios y Contratos, México.
- SEMARNAT. (2012). *Diagnostico Ambiental*. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México: Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SEMARNAT. (2017a). *Clasificación, reciclaje y valoración de los RSU*. Recuperado el 05 de noviembre de 2021, de Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Gobierno de México: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/clasificacion-reciclaje-y-valoracion-de-los-rsu>
- SEMARNAT. (2017b). *Estaciones de transferencia de residuos sólidos urbanos y procesos reportados por entidad federativa*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Cd. México: Gobierno de México.
- SEMARNAT. (2020a). *Diagnostico basico para la gestión integral de los residuos*. Secretaría del medio ambiente y recursos naturales. Ciudad de México: Gobierno de México. Obtenido de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD003866.pdf>
- SEMARNAT. (2020a). *Diagnostico basico para la gestión integral de los residuos*, Secretaria del medio ambiente y recursos naturales. Ciudad de México: Gobierno de México. Obtenido de

- <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD003866.pdf>
- SEMARNAT. (15 de mayo de 2020b). *Diagnostico basico para la gestión de los residuos 2020*. Recuperado el Noviembre de 2020, de <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/ciga/Libros2013/cd003866.pdf>
- SEMARNAT. (2022a). *Consulta Tematica*. Recuperado el 18 de 04 de 2022, de Estaciones de Transferencia y Procesos reportados: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_RSM03_07&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=*&NOMBREANIO=*
- SEMARNAT. (2022b). *Estaciones de Tranferencia de residuos sólidos urbanos y procesos reportados por entidad federativa*. Recuperado el 02 de septiembre de 2022, de Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_RSM03_07&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=*&NOMBREANIO=*
- SEMARNAT, S. d. (2021). Subsistema de Información sobre el Ordenamiento Ecológico. Recuperado el mayo de 2021, de https://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/uga_oe2/
- Sierra Ramirez, C. (2011). *Calidad del agua: evaluación y diagnostico*. Bogota: Ediciones de la U. Recuperado el 29 de Marzo de 2022, de <https://elibro.net/es/ereader/ittoluca/70981?page=28>.
- SIGEA. (2021). Rasgos Ambientales. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRAFICA Y ESTADISTICA AMBIENTAL. Obtenido de <https://mapas.semarnat.gob.mx/sigeia/#/sigeia>
- SINA. (2021). Obtenido de <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuiferos&ver=mapa>

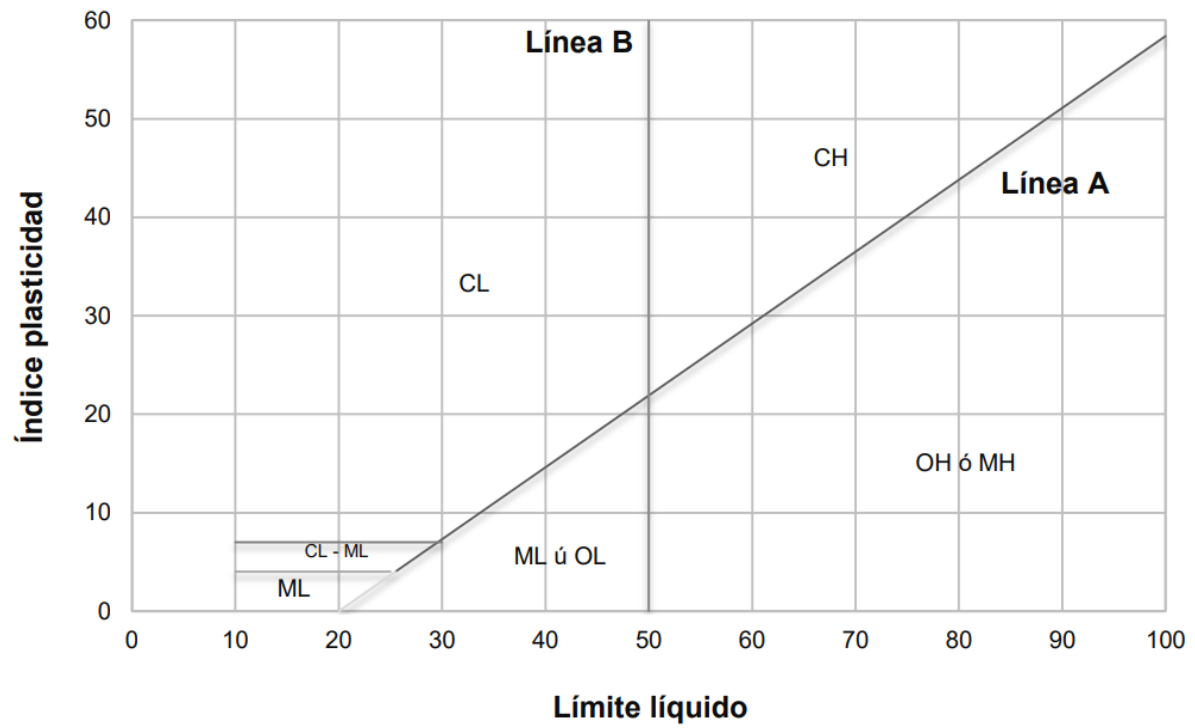
- SMAEM. (2022). *Portal de Consulta del Sistema Integral de Residuos del Estado de México*. Obtenido de Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México: <http://187.188.85.202:8095/consulta-sirem/>, 02 de septiembre del 2022.
- SNIARN. (2018). *Residuos*. Semarnat.
- Sotelo, e. a. (12 de noviembre de 2020). Actualización de la cartografía edafológica del Estado de México: una herramienta para la planeación. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, volumen 11*(número 8), 14.
- Sousa Pessoa, D. F. (2019). Avaliação de impactos ambientais em áreas de disposição final de resíduos sólidos no semiárido. *Geographos: Revista digital para estudantes de Geografia y Ciencias Sociales, 10*(121), 269-294.
- Susunaga Miranda, M. A.-G.-E. (2020). Characteristics of Silica Sand from Alvarado, Veracruz, Mexico as material for Permeable Reactive Barriers for the Remediation of Aquifers contaminated with leachates from uncontrolled landfills. *Enfoque UTE, 11*(4), 87 - 100. doi:<https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v11n4.674>
- Tianguistenco. (2019). *Plan de Desarrollo Urbano Tianguistenco 2019-2021*. Santiago Tianguistenco: H. Ayuntamiento de Tianguistenco. Recuperado el 2020, de https://gobedomex-my.sharepoint.com/personal/copladem1_edomex_gob_mx/_layouts/15/onedrive.aspx?id=%2Fpersonal%2Fcopladem1%5Fedomex%5Fgob%5Fmx%2FDocuments%2FPlanes%20de%20Desarrollo%2019%2D21%2FTianguistenco%2Epdf&parent=%2Fpersonal%2Fcopladem1%5Fedomex%5F
- Tianguistenco. (2022). *Plan de Desarrollo Urbano Tianguistenco 2022-2024*. H. Ayuntamiento de Tianguistenco. Recuperado el 22 de 11 de 2022, de <https://tianguistenco.gob.mx/wp-content/uploads/2022/06/plan-de-desarrollo-municipal.pdf>
- Tianguistenco, A. d. (2005). *Plan de Desarrollo Urbano de Tianguistenco*. México: H. Ayuntamiento de Tianguistenco. Recuperado el 10 de 03 de 2022, de

- https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo/2013/52/7/07ed7eb6e17d09ce2adbfb8b347650cdd.pdf
- Tianguistenco, A. d. (2009). *Plan de Desarrollo Municipal Tianguistenco 2009-2012*. Santiago Tianguistenco: H ayuntamianto de Tianguistenco. Obtenido de https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo/2013/8/9
- Tianguistenco, A. d. (27 de Marzo de 2013). *Plan de Desarrollo Municipal Tianguistenco 2013-2015*. Santiago Tianguistenco: H Ayuntamiento de Tianguistenco. Recuperado el Noviembre de 2020, de https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo/2014/47/2/ebfc96912df3632048319f5f4fb27db1.pdf
- Tianguistenco, A. d. (2016). *Plan de Desarrollo Urbano Municipal Tianguistenco 2015-2018*. Santiago Tianguistenco: H ayuntmaineto de Tianguistenco. Obtenido de https://gobedomex-my.sharepoint.com/personal/copladem1_edomex_gob_mx/Documents/Planes%20de%20Desarrollo%202015-2018/PDM%20Tianguistenco%202016-2018.pdf?&originalPath=aHR0cHM6Ly9nb2JlZG9tZXgtbXkuc2hhcmVwb2ludC5jb20vOml6L2cvcGVyc29uYWwwY29wbGFkZW0xX2Vkb21le
- Torres Corral, S. (2012). *Análisis ambiental geológico y geográfico del vertedero de Almoloya del Río y del riesgo potencial de afectación del suelo y agua en la zona subyacente* (Vol. Tesis de Maestría). Metepec, Estado de México, México: Instituto Tecnológico de Toluca. Recuperado el 2021
- Universal, E. (04 de 10 de 2021). Alerta de contaminación en la Presa Madín. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=FzAFc5I-j68&t=86s>
- Vales de la O, L. J. (2014). *MONOGRAFÍA POLÍTICO-ADMINISTRATIVA DEL MUNICIPIO DE POLOTITLÁN*. Texcoco, Estado de México: UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO. Recuperado el 12 de mayo de 2021, de <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/99511/Monograf%C3%ADa%20P-A%20Polotitl%C3%A1n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Velazco, M. d. (29 de 03 de 2022). Contaminación de laguna en Xico, Valle de Chalco. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=tMjNSAtIUR8&t=20s>
- Visvanathan. (2011). Sustainable landfilling in tropical conditions: Comparison between open and closed cell approach. *Waste Manag Res*, 386-396.
- Volke Sepúlveda, T., & Antonio Velasco, J. (2002). *Tecnologías de remediación para suelos contamiandos*. México: INE-SEMARNAT.
- Yepes García, J. A. (2018). Análisis de los asentamientos en los rellenos sanitarios La Pradera y Curva de Rodas. *Boletín de ciencias de la Tierra*(43), 24-33.
- Zafra-Mejia, C. R. (2019). Tendencias Tecnologicas de depuración de lixiviados en rellenos sanitarios iberoamericanos. *Revisra de Ingenierias: Universidaad de Medellín*, 18(35), 125-147.

ANEXOS

ANEXO A. CARTA DE PLASTICIDAD



ANEXO B. INFORMACIÓN GENERAL PARA VERIFICACIÓN

A) MUNICIPIO DE POLOTITLAN

Nombre del SDF: Relleno sanitario municipal de Polotitlán

Dirección del SDF: Comunidad de San Antonio el Viejo

Coordenadas geográficas: 20.201935, -99.801273

Municipio: Polotitlán Estado: México

Teléfono: 01(427) 2660683 Correo Electrónico: mpiopolotitlan@gmail.com

Nombre de la(s) persona(s) que apoyó(aron) en el llenado de la Tabla de Verificación (TV) por parte del municipio: BRT

Cargo / puesto: Directora de Ecología

Dirección: Portal Hidalgo # 7 Col. Centro, Polotitlán, EdoMéx

Teléfono 01(427) 2660683 Correo Electrónico: mpiopolotitlan@gmail.com

Nombre(s) de la(s) persona(s) evaluadora(s) que realizó(ron) el llenado de la Tabla de Verificación M. en C. Iris Margarita Pérez Palacios y el estudiante de I.Q. Francisco Jesús Alvirde Díaz

Cargo / puesto: Investigadores en formación

Responsable de la evaluación del Proyecto: Dra. María del Consuelo Hernández Berriel

Dirección: Avenida Tecnológico 100 s/n. Colonia Agrícola, Bellavista, La Virgen, 52149 Metepec, Méx.

Teléfono: 7222087224 correo electrónico: mhernandezb@toluca.tecnm.mx

Disposiciones Generales del SDF

¿Qué tipo de residuos reciben: residuos sólidos urbanos (RSU), de manejo especial (RME), ¿peligrosos (RP) y u otros?: RSU y RME (cárnicos, autopartes)

¿Qué cantidad diaria de residuos depositan? de 5 t/día (2022) a 9 t/día (2020) de RSU. Marcar el tipo:

¿De qué localidades reciben residuos? Localidades de Polotitlán EdoMéx.

—

¿Cuál es el área total del sitio? 2 ha ¿Cuál es el área disponible para la disposición final de residuos? sobre 2 ha

¿Cuál es el área ocupada actualmente por residuos dispuestos? 0.5 ha,
según las imágenes satelitales de Google Earth

¿En qué año se inició la disposición final? Desconocido

¿En qué año estiman terminará la disposición final? No hay estimaciones

¿Cuál es el volumen estimado disponible del sitio para disposición de residuos? Información no proporcionada m³

Tipo	TON/DÍA
A	Mayor a 100
B	50 hasta 100
C	10 menor a 50
D	Menor a 10

¿Cuál es la vida útil estimada? 22 años

¿Hay pepenadores en el SDF? Si No. mujeres 1 No. hombres 4 No. niñas 1 No. niños 0

Si el personal que labora en el SDF cuenta con equipo de protección personal, describa: guantes

B) MUNICIPIO DE TIANGUISTENCO

Nombre de la ET: "Estación de Transferencia Yolotzingo"

Dirección de la ET: Comunidad de San Antonio el Viejo

Coordenadas geográficas: 20.201935, -99.801273

Municipio: Tlanguistenco Estado: México

Teléfono: 01(427) 2660683 Correo Electrónico: sin dato

Nombre de la(s) persona(s) que apoyó(aron) en el llenado de la Tabla de Verificación (TV) por parte del municipio: _____

Cargo / puesto: Director de servicios publicos

Dirección: Edificio azul, Tlanguistenco, EdoMéx

Teléfono _____ Correo Electrónico: _____

Nombre(s) de la(s) persona(s) evaluadora(s) que realizó(ron) el llenado de la Tabla de Verificación

M. en C. Iris Margarita Pérez Palacios

Cargo / puesto: Investigador en formación

Responsable de la evaluación del Proyecto: Dra. María del Consuelo Hernández Berriel y Dra. María de la Luz Jiménez Núñez

Dirección: Avenida Tecnológico 100 s/n. Colonia Agrícola, Bellavista, La Virgen, 52149 Metepec, Méx.

Teléfono: 7222087224 correo electrónico: mhernandezb@toluca.tecnm.mx

Disposiciones Generales de la ET.

¿Qué tipo de residuos reciben: residuos sólidos urbanos (RSU), de manejo especial (RME), ¿peligrosos (RP) y u otros?: RSU

¿Qué cantidad diaria de residuos depositan? 120 t / día (2022) Marcar el tipo:

¿De qué localidades reciben residuos? Tlanguistenco, EdoMéx.

¿Cuál es el área total del sitio? 2 ha ¿Cuál es el área disponible para la disposición final de residuos? sobre 2 ha

¿Cuál es el área ocupada actualmente por residuos dispuestos? 0.5 ha, según las imágenes satelitales de Google Earth

¿En qué año se inició la disposición final? Desconocido

¿En qué año estiman terminará la disposición final? No hay estimaciones

¿Cuál es el volumen estimado disponible del sitio para disposición de residuos? Información no proporcionada m³

¿Cuál es la vida útil estimada? 20 años

¿Hay pepenadores? Si No. mujeres 3 No. hombres 4 No. Niñas: 0 No. niños 0

Si el personal que labora en la ETY cuenta con equipo de protección personal, describa:
guantes _____

ANEXO B. TABLA DE VERIFICACIÓN

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	Indicar como se da cumplimiento o no para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Puntuación (1/0)
6. Especificaciones para la selección del sitio						
6.1 Restricciones para la ubicación del sitio (Aplica para los sitios A, B, C y D)						
¿El sitio se ubica a una distancia igual o mayor a 13 km de un aeródromo o un aeropuerto?	6.1.1	X				1
¿La distancia elegida se determinó mediante un estudio de riesgo aviario? Nota: si el sitio se encuentra a 13 km o más, marcar “No aplica” y colocar 0 en puntuación				X		0
¿El sitio se ubica fuera de un área natural protegida?	6.1.2		X			0
¿El plan de manejo del área protegida contempla un SDF? Nota: si el sitio se encuentra fuera de un área protegida, marcar “No aplica” y colocar 0 en puntuación				X		0
Para localidades mayores a 2500 habitantes ¿El límite del SDF está a una distancia mínima de 500 m, contados a partir del límite de la traza urbana existente o contemplada en el plan de desarrollo urbano?	6.1.3	X				1
¿El sitio se ubica fuera de zonas de marismas, manglares, esteros, pantanos, humedales, estuarios, planicies aluviales, fluviales, recarga de acuíferos, arqueológicas; ni sobre cavernas, fracturas o fallas geológicas?	6.1.4	X				1
¿El sitio se ubica fuera de zonas de inundación con periodos de retorno de 100 años?	6.1.5	X				1
En caso de estar dentro de zonas de inundación ¿Se demuestra que no existe obstrucción del flujo en el área de inundación o posibilidad de deslaves o erosión que afecten la estabilidad física de las obras que integran el sitio? Nota: si el sitio se encuentra fuera de zonas de				X		0

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	Indicar como se da cumplimiento o no para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Puntuación (1/0)
inundación, marcar “No aplica” y colocar 0 en puntuación						
¿El sitio se ubica al menos a 500 m con respecto a cuerpos de agua superficiales con caudal continuo, lagos y lagunas?	6.1.6		X			0
¿El sitio se ubica a mínimo 100 m adicionales a la proyección horizontal de la mayor circunferencia del cono de abatimiento, con respecto a pozos de extracción de agua para uso doméstico, industrial, riego y ganadero, tanto en operación como abandonados?	6.1.7			X		0
En caso de que no se pueda determinar el cono de abatimiento ¿La distancia al pozo es mayor a 500 m? Nota: si se conoce el cono de abatimiento, marcar “No aplica” y colocar 0 en puntuación		X				1
¿Qué grado de cumplimiento se tiene para los puntos de los apartados 6.1.1 al 6.1.7?	Nota: La puntuación máxima para todo tipo de SDF es 7					5
6.2 Estudios y análisis previos requeridos para la selección del sitio (solo aplica al SDF tipo A)						
6.2.1 Estudio geológico regional						
¿El marco geológico regional comprende la descripción estratigráfica, su geometría y distribución e identificación de discontinuidades (fallas y fracturas)?	6.2.1			X		0
6.2.2 Estudio hidrogeológico regional						
¿Se cuenta con evidencias de la ubicación de agua subterránea (manantiales, pozos y norias), en la zona de influencia para conocer el gradiente hidráulico?	a) Evidencias y usos del agua subterránea			X		0
¿Se cuenta con el volumen de extracción, tendencias de la explotación y planes de desarrollo en la zona de estudio? Nota: si no se cuenta con evidencias de la ubicación de agua subterránea, marcar “No aplica” y colocar 0 en puntuación				X		0

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	Indicar como se da cumplimiento o no para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Puntuación (1/0)
¿Se tienen identificadas las unidades hidrogeológicas y la relación entre ellas que definen el sistema acuífero?	b) Identificación del tipo de acuífero			X		0
¿Se tiene identificado el tipo de acuífero (confinado o semiconfinado) de la región? Nota: si no identifican las unidades hidrogeológicas y la relación entre ellas, marcar “No aplica” y colocar 0 en puntuación				X		0
¿Se tiene determinada la dirección del flujo subterráneo regional? Nota: si no identifican las unidades hidrogeológicas y la relación entre ellas, marcar “No aplica” y colocar 0 en puntuación	c) Análisis del sistema de flujo			X		0
6.3 Estudios y análisis en el sitio, previos a la construcción y operación de un sitio de disposición final.						
¿Se cuenta con un estudio topográfico que incluya planimetría y altimetría a detalle del sitio seleccionado?	a) Estudio topográfico (aplica para tipo A, B y C)		X	X		0
b) Estudio geotécnico (aplica para tipo A, B y C)						
¿Se ha realizado la exploración y el muestreo de suelo del lugar donde se localiza el SDF?	b.1 Exploración y muestreo			X		0
¿Se cuenta con los resultados del análisis de permeabilidad de campo y peso volumétrica in situ?				X		0
¿La clasificación de muestras se realizó según el Sistema Unificado de Clasificación de suelos?	b.2 Estudios en laboratorio			X		0
¿Se tienen los resultados de: análisis granulométrico, permeabilidad, prueba Proctor, límites de Atterberg, consolidación unidimensional, análisis de resistencia al esfuerzo cortante y humedad?				X		0
¿Se cuenta con los resultados de los análisis de estabilidad de taludes de las obras de terracería correspondientes?				X		0
c) Evaluación geológica (aplica para tipo A y B)						

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	Indicar como se da cumplimiento o no para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Puntuación (1/0)
¿El marco geológico regional comprende la descripción estratigráfica, su geometría y distribución e identificación de discontinuidades (fallas y fracturas)?	c.1			X		0
¿Se cuenta con las características estratigráficas del sitio?	c.2			X		0
d) Evaluación hidrogeológica (aplica para tipo A y B)						
¿Se tienen determinados los parámetros hidráulicos, dirección del flujo subterráneo, características físicas, químicas y biológicas del agua?	d.1			X		0
¿Se tienen determinadas las unidades hidrogeológicas que componen el subsuelo y las características que las identifican (espesor y permeabilidad)?	d.2			X		0
6.4 Estudios de generación y composición						
¿Se cuenta con los estudios de generación de RSU y RME de la población por servir, con proyección para al menos la vida útil del SDF?	a) aplica para tipo A, B y C			X		0
¿Se cuenta con los estudios de composición de los RSU y RME de la población por servir?				X		0
¿Se cuenta con la estimación de la cantidad de generación esperada de biogás en el SDF?	b) aplica para tipo A y B			X		0
¿La estimación de la generación esperada de biogás comprende la composición química de los residuos dispuestos en el SDF?				X		0
¿Se tiene la cuantificación del lixiviado mediante algún balance hídrico?	c) aplica para tipo A y B			X		0
6.5 Cumplimiento de estudios y análisis previos conforme a Tabla 2 de la NOM-083-SEMARNAT-2003 que corresponde a la Tabla 3.1 en este manual.						
¿Qué grado de cumplimiento se tiene para los puntos de los apartados 6.2 a 6.5?	Nota: La puntuación máxima con respecto al tipo de SDF es: A=21, B=15 y C=8					0
7. Características constructivas y operativas del SDF (Proyecto ejecutivo para tipo A, B y C)						
¿El SDF cuenta con una barrera geológica natural o equivalente a un espesor de 1 m y un coeficiente				X		0

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	Indicar como se da cumplimiento o no para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Puntuación (1/0)
de conductividad hidráulica de al menos 1×10^{-7} cm/s sobre la zona destinada al establecimiento de las celdas de disposición final?	7.1 (Aplica para sitios tipo A, B y C)					
¿La zona destinada al establecimiento de las celdas de disposición final cuenta con un sistema de impermeabilización equivalente, que garantice un coeficiente de conductividad hidráulica de al menos 1×10^{-7} cm/s? Nota: si se cuenta con barrera geológica natural, marcar "No aplica" y colocar 0 en puntuación				X		0
¿Se garantiza la extracción, captación, conducción y control del biogás generado en el SDF?	7.2 (Aplica para sitios tipo A, B y C)			X		0
¿Se cuenta con un sistema de aprovechamiento de biogás que evite que el CH ₄ se emita a la atmosfera?				X		0
¿Se realiza el quemado del biogás generado a través de pozos individuales o mediante una red con quemadores centrales? Nota: si se cuenta con un sistema de aprovechamiento de biogás, marcar "No aplica" y colocar 0 en puntuación				X		0
¿Cuenta con un sistema que garantice la captación y extracción del lixiviado generado en el SDF?	7.3 (Aplica para sitios tipo A, B y C)			X		0
¿El lixiviado se recircula en las celdas de los RSU confinados en función de los requerimientos de humedad, es tratado o una combinación de ambos?				X		0
¿Se cuenta con el diseño de un drenaje pluvial para el desvío de escurrimientos pluviales y el desalojo del agua de lluvia?	7.4 (Aplica para sitios tipo A, B y C)			X		0
¿El SDF cuenta con un área de emergencia para la recepción de RSU y RME, cuando una eventualidad, desastre natural o emergencia de cualquier orden no permita la operación en el frente de trabajo?	7.5 (Aplica para sitios tipo A, B y C)			X		0

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003			Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	Indicar como se da cumplimiento o no para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Puntuación (1/0)					
¿El área de emergencia proporciona la misma seguridad ambiental y sanitaria que las celdas de operación ordinarias?						X		0					
De acuerdo con la Tabla No. 3 de la NOM-083, ¿se alcanzan los niveles mínimos de compactación?			7.6 (Aplica para sitios tipo A, B y C)			X		0					
TIPO DE SDF	RECEPCION DE RSU (t/día)	COMPACTACIÓN (kg/m3)											
A	> 750 (A1) 100 a 750 (A2)	> 700 > 600											
B	50 a 100	> 500											
C	10 a 50	> 400											
.													
¿Los residuos son cubiertos en forma continua y dentro de un lapso menor a 24 h posteriores a su depósito?			7.7 (Aplica para sitios tipo A, B y C)			X		0					
¿Con la cobertura de los RSU, se controla la dispersión de materiales ligeros, la fauna nociva y la infiltración pluvial?											X		0
¿Se garantiza la extracción, captación, conducción y control del biogás generado en el SDF?			7.8 (Aplica para sitios tipo A, B y C)			X		0					
¿Se cuenta con medidas para no permitir el ingreso de aceites minerales?											X		0
¿Se cuenta con medidas para no permitir el ingreso de RP de acuerdo con la normatividad vigente?											X		0
¿Los lodos deshidratados admitidos, son tratados o acondicionados, previo a su disposición final conforme a la normatividad vigente?			7.8.1 (Aplica para sitios tipo A, B y C)			X		0					
Caminos de acceso adecuados, delimitados y bien (aplica para sitios tipo A, B y C)			7.9 ¿El SDF cuenta con estas áreas complementarias?			X		0					
Caminos interiores adecuados, delimitados y bien (aplica para sitios tipo A y B)											X		0
Cerca perimetral (aplica para sitios tipo A, B y C)											X		1

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	Indicar como se da cumplimiento o no para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Puntuación (1/0)
Caseta de vigilancia y control de acceso (aplica para sitios tipo A, B y C)				X		1
Bascula (aplica para sitios tipo A y B)				X		0
Agua potable, electricidad y drenaje (aplica para sitios tipo A y B)				X		0
Vestidores y servicios sanitarios (aplica para sitios tipo A, B y C)				X		0
Franja de amortiguamiento (Mínimo 10 metros) (aplica para sitios tipo A, B y C)				X		0
Oficinas (aplica para sitios tipo A)				X		0
Servicio médico y seguridad personal (aplica para sitios tipo A)				X		0
7.10 El sitio de disposición final deberá contar con:						
Dispositivos de control de accesos para: personal, vehículos, materiales, RP (prohibición de ingreso) y radiactivos o inaceptables	a) ¿El SDF cuenta con un manual de operación y comprende todos estos puntos? (Aplica para sitios tipo A, B y C)			X		0
Método de registro de tipo y cantidad de RSU y RME ingresados				X		0
Cronogramas de operación				X		0
Programas específicos de control de calidad, mantenimiento y monitoreo ambiental de biogás, lixiviados y acuíferos				X		0
Dispositivos de seguridad y planes de contingencia para: incendios, explosiones, sismos, fenómenos meteorológicos y manejo de lixiviados, sustancias reactivas, explosivas e inflamables.				X		0
Procedimientos de operación				X		0
Perfil de puestos				X		0
Reglamento interno				X		0
Ingreso de RSU, RME, materiales, vehículos, personal y visitantes	b) ¿El SDF cuenta con Control de registros para estos puntos? (Aplica para			X		0
Secuencia de llenado del SDF				X		0
Generación y manejo de lixiviados y biogás				X		0
Contingencias				X		0

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	Indicar como se da cumplimiento o no para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Puntuación (1/0)
	sitios tipo A, B y C)					
¿El SDF cuenta con un informe mensual de actividades?	c) (Aplica para sitios tipo A, B y C)			X		0
¿Se tiene instrumentado un programa para la medición y control de los impactos ambientales?	7.11 (Aplica para sitios tipo A, B y C)			X		0
¿Se tiene instrumentado un programa de monitoreo ambiental para el SDF?				X		0
¿Se conservan y mantienen los registros correspondientes a los programas?				X		0
¿Se tiene un programa de monitoreo de biogás que contenga objetivo, grado de estabilización de los residuos, detección de migraciones fuera del predio, parámetros de composición, explosividad y flujo?	7.11.1 (Aplica para sitios tipo A, B y C)			X		0
¿Se tiene un programa de monitoreo del lixiviado que contenga: objetivo, Potencial de Hidrogeno (pH), DBO, DQO y metales pesados?	7.11.2 (Aplica para sitios tipo A, B y C)			X		0
¿Se tiene programas de monitoreo de acuíferos, con pozos de muestreo, al menos uno aguas arriba y otro aguas abajo del SDF?	7.11.3 (Aplica para sitios tipo A, B y C)			X		0
Para el diseño de pozos de muestreo se consideraron: gradientes superior y descendente hidráulico, variaciones naturales del flujo del acuífero, variaciones estacionales del flujo del acuífero, calidad del agua antes y después del establecimiento del SDF (la calidad de referencia estará definida por las características del agua nativa)				X		0
Si se realiza separación de RSU en el SDF ¿Se afecta el cumplimiento de las especificaciones de operación de esta norma, de manera que son un riesgo para las personas que la realizan?	7.12 (Aplica para sitios tipo A, B y C)			X		0

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	Indicar como se da cumplimiento o no para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Puntuación (1/0)
¿Qué grado de cumplimiento se tiene para los puntos de los apartados 7.1 al 7.12?	Nota: La puntuación máxima con respecto al tipo de SDF es: A=46, B=44 y C=41					4
8. Requisitos mínimos que deben cumplir los Sitios de Disposición Final de los RSU y RME, tipo D (menos de 10 t/día)						
¿Se garantiza un coeficiente de conductividad hidráulica de 1x10-5 cm/s, con un espesor mínimo de un metro, o su equivalente, por condiciones naturales del terreno, o bien, mediante la impermeabilización del sitio con barreras naturales o artificiales?	8.1		X			0
¿Se cuenta con una compactación mínima de los residuos dispuestos de 300 kg/m3?	8.2			X		0
¿Se realiza la cobertura de los residuos por lo menos cada semana?	8.3		X			0
¿Se evita el ingreso de los RP en general?	8.4	X				1
¿Se controla la fauna nociva y evita el ingreso de animales?	8.5		X			0
¿Se cuenta con cerca en la totalidad el SDF?	8.6		X			0
¿Qué grado de cumplimiento se tiene para los puntos de los apartados 8.1 al 8.6?	Nota: La puntuación máxima del SDF tipo D es 6					1
9. Clausura del sitio (aplica a sitio A, B, C y D)						
¿La cobertura final de clausura aísla los residuos, minimiza la infiltración de los líquidos en las celdas, controla el flujo del biogás generado, minimiza la erosión y brinda un drenaje adecuado?	9.1 Cobertura final de clausura		X			0
¿Las áreas que tienen una extensión de más de dos hectáreas, cuando alcanzan su altura final, son cubiertas conforme al avance de los trabajos y el diseño específico del SDF?			X			0
¿La conformación final del SDF contempla las restricciones relacionadas con el uso del sitio, estabilidad de taludes y límites del predio?	9.2 Conformación final del sitio		X			0
¿La conformación final del SDF contempla características de la cobertura final de clausura, los			X			0

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	Indicar como se da cumplimiento o no para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Puntuación (1/0)
drenajes superficiales y la infraestructura para el control del lixiviado y biogás?						
¿Se tiene y opera un programa de mantenimiento posclausura para todas las instalaciones del SDF, por un periodo de al menos 20 años?	9.3 Mantenimiento		X			0
¿El programa incluye el mantenimiento de la cobertura final de clausura, para reparar grietas y hundimientos provocados por la degradación de los RSU y RME, así como los daños ocasionados por erosión (escurrimientos pluviales y viento)?				X		0
¿Se tiene y opera un programa de monitoreo por un periodo de al menos 20 años, para detectar condiciones inaceptables de riesgo al ambiente, por la emisión de biogás y generación de lixiviado?	9.4 Programa de monitoreo		X			0
Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	Indicar como se da cumplimiento o no para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Puntuación (1/0)
¿El uso final del SDF es acorde con el uso del suelo aprobado por la autoridad competente, con las restricciones inherentes de baja capacidad de carga, posibilidad de hundimientos diferenciales y presencia de biogás?	9.5 Uso final del SDF			X		0
¿Qué grado de cumplimiento se tiene para los puntos de los apartados 9?1 al 9.5?	Nota: La puntuación máxima para todo tipo de SDF es 8					1

ANEXO C. MATRIZ DE LEOPOLD APLICADA PARA UN SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL

MATRIZ DE LEOPOLD TCA			ACTIVIDADES DE LA DISPOSICION DE RSU EN TCA							AFECTA- CIONES	NIV. DE SIG.						
Leyenda:			1. Transporte y descarga	2. Disposicion de RSU y RME	3. Disposición de RP	4. Compactación y cobertura	5. Manejo de biogas generado	6. Manejo de lixiviados	7. Contratacion de maquinaria, personal y servicio	AFECTACIONES POSITIVAS	AFECTACIONES NEGATIVAS	NUMERO DE INTERACCIONES	AGREGACION DE IMPACTOS	BAJO	MODERADO	SEVERO	CRITICO
MAGNITUD IMPORTANCIA																	
Magnitud: Intensidad del impacto que se puede ocasionar, siendo máxima 10 y mínimo 1. Impacto positivo () / Impacto negativo (-)																	
Importancia: Escala del impacto (local, regional, etc.), siendo máximo 10 y mínimo 1.																	
Agregación de impactos determinado conforme a sección 2.5.2 y nivel de significancia respecto a sección 2.5.3, ec. 2.1 y tabla 1.4																	
COMPONENTES BIOFISICOS	CATEGORIA	ATRIBUTO															
	SUELO	Calidad de suelo															
		Cambio de uso de suelo															
		Estabilidad de suelo															
	AGUA	Subterránea															
		Calidad del agua															
	ATMOSFERA	Material particulado															
		Ruidos															
		Gases															
		Olores															
	FLORA	Productos agrícolas (Maíz)															
		Remoción de cobertura vegetal															
	FAUNA	Ahuyentamiento de especies nativas															
		Proliferación de nuevas especies															
	COMPONENTES SOCIO- ECONOMICOS	ESTETICA	Vistas escénicas y panorámicas														
Calidad de espacio abierto																	
Parques y reservas forestales																	
SOCIAL		Salud poblacional y laboral															
		Seguridad laboral															
ECONOMICO		Calidad de vida															
		Ingresos economicos adicionales															
		Sitios de interes arqueologico/ cultural															
		Uso potencial del suelo															
		Emprendimientos productivos															
AFECTA- CIONES	AFECTACIONES POSITIVAS																
	AFECTACIONES NEGATIVAS																
	NUMERO DE INTERACCIONES																
	AGREGACION DE IMPACTOS																
NIV. DE SIG.	BAJO																
	MODERADO																
	SEVERO																
	CRITICO																