



SEP

SES

TecNM

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

**Evaluación para clausura o rehabilitación de dos sitios
de disposición final de residuos sólidos urbanos
en el Estado de México.**

TESIS

**PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA AMBIENTAL**

P r e s e n t a:

SALVADOR FLORES REYES

NO. De Control: MM28210007

DIRECTORA DE TESIS

DRA. MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ BERRIEL

CODIRECTOR DE TESIS

DR. OTONIEL BUENROSTRO DELGADO

METEPEC, ESTADO DE MÉXICO, AGOSTO DE 2023



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Toluca
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Metepec, Edo. de México, 15/agosto/2023
DEPI-3200-MCIAM-96/2023

**SALVADOR FLORES REYES
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL
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 **"Evaluación para clausura o rehabilitación de dos sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en el Estado de México"**, 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, Col. 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. tecnm.mx | toluca.tecnm.mx



2023
**Francisco
VILLA**



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Toluca
Calle 30 de Septiembre 144, Col. Centro, Toluca, Edo. de Méx.
C.P. 50100

Metepec, Edo. de México, 15/agosto/2023

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 "EVALUACIÓN PARA CLAUSURA O REHABILITACIÓN DE DOS SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN EL ESTADO DE MÉXICO", que como parte de los requisitos para obtener el grado académico de Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental presenta el C. Salvador Flores Reyes con número de control M21280007 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 del Consuelo Hernández Berriel
DIRECTOR DE TESIS

Dr. Otoniel Buenrostro Delgado
CODIRECTOR DE TESIS

Dr. Isaias de la Rosa Gómez
REVISOR DE TESIS

Dra. María del Consuelo Manón Salas
REVISOR DE TESIS

ccp. Archivo
JLGR/RCR



Av. Tecnológico S/N. Col. Agrícola Bellavista, Metepec, Edo. de México, C.P. 52169. Toluca División
722 208 72 05. Subd. Académica: 722 208 7207. Subd. de Planeación: 722 208 7206. Subd. Administrativa
722 208 7208. Correo: 722 208 72 00. e-mail: info@toluca.tecnm.mx, tecnm.mx | toluca.tecnm.mx



2023
Francisco
VILLA

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Tecnológico de Toluca por el apoyo otorgado para llevar a cabo esta investigación y permitirme usar sus instalaciones.

Agradezco al CONACYT por brindarme el apoyo necesario para lograr los objetivos planteados en este proyecto.

A mi mamá Francisca por todo el amor que me ha brindado a lo largo de mi vida por ser mi compañera, por todos los buenos y malos momentos, por todas las veces que me alentaste a seguir adelante, pero sobre todo por ser la parte fundamental en mi vida porque gracias a ti he logrado mis objetivos.

A mi papá Roberto, por estar conmigo siempre ante todas las adversidades, porque sé que siempre puedo contar contigo, gracias por todas las risas y palabras de aliento.

A mis hermanos Laura y Jesús por estar conmigo siempre que los necesitaba, los consejos que me fueron dando a lo largo de esta etapa y saber que siempre puedo contar con ellos.

A mi directora de tesis, Dra. María del Consuelo Hernández Berriel, por toda la paciencia, confianza, apoyo y enseñanzas que me dio a lo largo de estos años.

Al Dr. Otoniel y a la Dra. Mañón por los conocimientos y apoyo otorgado durante el desarrollo de este proyecto, por su tolerancia y su completa disposición.

A la empresa “Constructora y Operadora de Rellenos Sanitarios S.A. de C.V.”, por brindarme el apoyo, tanto en la recopilación de la información como en el ingreso a sus instalaciones.

RESUMEN

En México, la disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU) debe efectuarse de acuerdo con los criterios de la norma oficial mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003; sin embargo, se ha estimado que solo el 3.7% de los Sitios de Disposición Final (SDF) de RSU en el país cumple con todas las características básicas de infraestructura y de operación. Lo anterior presenta un problema, pues a mayor número de SDF sin características básicas de infraestructura y operación, se incrementan las posibilidades de contaminar el suelo, el agua y la atmósfera, así como los riesgos a la salud. Se han creado distintas herramientas para evaluar los efectos negativos y una de ellas es “La Evaluación de Impacto Ambiental”, la cual permite identificar áreas susceptibles a ser impactadas de forma negativa por mala disposición, en los componentes biofísicos y socioeconómicos. El objetivo de este trabajo fue la evaluación para la clausura o la rehabilitación de dos sitios de disposición final de RSU en el Estado de México (EdoMéx), considerando aspectos técnicos, ambientales, sociales y económicos. Se seleccionaron los SDF de Polotitlán y Aculco del Estado de México aplicando el método AHP (por sus siglas en inglés Analytic Hierarchy Process), a los cuales se les determinó la idoneidad de su ubicación conforme a las restricciones de la NOM-083-SEMARNAT-2003, mediante el Sistema de Información Geográfica para el Manejo Integral de Residuos Sólidos Urbanos (SIGMIRSU); se realizaron caracterizaciones de lixiviado, suelo y biogás en campo y en laboratorio conforme a la normatividad vigente; se les evaluó técnicamente aplicando la Tabla de Verificación y para evaluar los aspectos ambientales y socioeconómicos, se empleó la Matriz de Leopold. En el caso del SDF de Polotitlán, las autoridades realizaron trabajos de mantenimiento y operación para reducir los impactos negativos evidenciados en la primera evaluación. Los resultados de las evaluaciones se entregaron a las autoridades de cada municipio, calificándoles como SDF susceptibles de ser rehabilitados para continuar dando servicio.

ABSTRACT

In Mexico, the final disposal of urban solid waste (MSW) must be carried out in accordance with the criteria of the official Mexican standard NOM-083-SEMARNAT-2003; however, it has been estimated that only 3.7% of the MSW Final Disposal Sites (SDF) in the country meet all the basic infrastructure and operation characteristics. This presents a problem, since the greater the number of SDFs without basic infrastructure and operation characteristics, the possibilities of contaminating the soil, water and atmosphere, as well as health risks, increase. Different tools have been created to evaluate the negative effects and one of them is "Environmental Impact Assessment", which allows identifying areas susceptible to being negatively impacted by poor disposal, in the biophysical and socioeconomic components. The objective of this work was the evaluation for the closure or rehabilitation of two MSW final disposal sites in the State of Mexico (EdoMéx), considering technical, environmental, social and economic aspects. The SDFs of Polotitlán and Aculco in the State of Mexico were selected applying the AHP (Analytic Hierarchy Process) method, to which the suitability of their location was determined in accordance with the restrictions of NOM-083-SEMARNAT- 2003, through the Geographic Information System for the Integral Management of Solid Urban Waste (SIGMIRSU); characterizations of leachate, soil and biogas were carried out in the field and in the laboratory in accordance with current regulations; they were technically evaluated by applying the Verification Table and to evaluate the environmental and socioeconomic aspects, the Leopold Matrix was used. In the case of the Polotitlán SDF, the authorities carried out maintenance and operation work to reduce the negative impacts evidenced in the first evaluation. The results of the evaluations were delivered to the authorities of each municipality, qualifying them as SDF susceptible to being rehabilitated to continue providing service.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN..	v
ABSTRACT	vi
CONTENIDO.....	vii
RELACIÓN DE TABLAS	ix
RELACIÓN FIGURAS	x
INTRODUCCIÓN	1
1. FUNDAMENTOS	3
1.1 LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	3
1.2 GESTIÓN Y MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	7
1.3 SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	12
1.4 IMPACTOS NEGATIVOS POR INADECUADA DISPOSICIÓN FINAL	15
1.5 DAÑOS A LA SALUD POR RESIDUOS SOLIDOS	20
1.6 CLAUSURA O REHABILITACIÓN DE SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL	22
1.7 PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO.....	29
1.8 EVALUACIÓN DE RIESGO	31
1.9 ESTUDIO DEL ARTE.....	32
2. MÉTODO	34
2.1 SELECCIÓN DE LOS MUNICIPIOS A ESTUDIAR.....	34
2.2 ANÁLISIS DE LA UBICACIÓN DE LOS SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL ELEGIDOS.....	35
2.3 DIAGNÓSTICO DE IMPACTOS PARA LA REHABILITACIÓN VERSUS LA CLAUSURA	36

2.3.1 Evaluación técnica	36
2.3.2 Evaluación ambiental y socioeconómica.....	37
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	39
3.1 SELECCIÓN DE LOS MUNICIPIOS A ESTUDIAR.....	39
3.1.1 Selección de los municipios con sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos.....	39
3.1.2 Eliminación de valores extremos.....	40
3.1.3 Análisis de las variables sostenibles	40
3.2 ANÁLISIS DE LA UBICACIÓN DE LOS SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL ELEGIDOS.....	43
3.2.1 Ubicación de los dos sitios de disposición final elegidos	43
3.2.2 Análisis de la ubicación mediante el SIGMIRSU	47
3.3 DIAGNÓSTICO DE IMPACTOS PARA LA REHABILITACIÓN VERSUS LA CLAUSURA	55
3.3.1 Evaluación técnica	55
3.3.2 Aplicación de tabla de verificación	63
3.3.3 Evaluación ambiental y socioeconómica.....	66
CONCLUSIONES.....	75
REFERENCIAS.....	77

RELACIÓN DE TABLAS

Tabla 1.1 Generación estimada de RSU por entidad federativa para 2015	4
Tabla 1.2 Composición porcentual promedio de los RSU en México.....	6
Tabla 1.3 Escala de saaty	30
Tabla 1.4. Relación de consistencias.....	30
Tabla 2.1. Técnicas utilizadas para suelo, lixiviado y agua	37
Tabla 3.1 Municipios con sitios de disposición final	40
Tabla 3.2. Ponderaciones de los subcriterios.....	42
Tabla 3.3. Ponderación global.....	42
Tabla 3.4. Análisis de lixiviados del sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos de Aculco, EdoMex.	56
Tabla 3.5 Análisis fisicoquímicos de suelo	57
Tabla 3.6. Análisis de lixiviados del sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos de Polotitlán, EdoMex.	60
Tabla 3.6 Concentrado de Tabla de Verificación y áreas de oportunidad del SDF de Aculco, EdoMex	64
Tabla 3.7 Concentrado de Tabla de Verificación y áreas de oportunidad del SDF de Polotitlán, EdoMex.	65
Tabla 3.8. Rendimiento de CAT 826C	71
Tabla 3.9. Costos de mantenimiento de CAT 826C	72

RELACIÓN FIGURAS

Figura 1.1 Generación calculada de RSU por Región de México en 2015	5
Figura 1.2 Generación anual de RSU por tamaño de localidad	5
_____del 2001 al 2012.....	5
Figura 1.3 Generación de RSU por tipo de residuo en México.	7
Figura 1.4 Etapas del Manejo Integral de Residuos Sólidos Urbanos.	10
Figura 1.5 Sitio no controlado	13
Figura 1.6 Sitio de tierra controlado	13
Figura 1.7 Relleno sanitario	14
Figura 1.8 inundación por Residuos sólidos urbanos.....	18
Figura 1.9 Condiciones estéticas y de imagen	19
Figura 1.10. Aves en un sitio de disposición final.....	19
Figura 1.11 Quema de residuos.....	20
Figura 2.1 Diagrama de las etapas de la investigación	34
Figura 3.1 Municipios de la periferia del Estado de México	39
Figura 3.2. Diagrama de árbol.....	41
Figura 3.3 Ubicación del municipio de Aculco, EdoMéx y su sitio de disposición final	44
Figura 3.4. Fotografía aérea del SDF de Aculco, EdoMex., 08/10/2021	44
Figura 3.5 Ubicación del municipio de Polotitlán, EdoMéx.....	46
Figura 3.6. Fotografía aérea del SDF de Polotitlán, EdoMex.,11/10/2021	46
Figura 3.7 Restricción por área natural protegida	47
Figura 3.8 Restricción por cuerpos de agua.....	48
Figura 3.9 Restricción por localidades mayores a 500 habitantes	48

Figura 3.10 Restricción a aeropuertos	49
Figura 3.11 Restricción por Ríos	49
Figura 3.12 Restricción por fallas y/o fracturas	50
Figura 3.13 Restricción por zonas arqueológicas	50
Figura 3.14 Restricción por manchas urbana.....	51
Figura 3.15 Restricción por área natural protegida	51
Figura 3.16 Restricción por cuerpos de agua.....	52
Figura 3.17 Restricción por localidades mayores a 500 habitantes	52
Figura 3.18 Restricción a aeropuertos	53
Figura 3.19 Restricción por Ríos	53
Figura 3.20 Restricción por fallas y/o fracturas	54
Figura 3.21 Restricción por manchas urbana.....	54
Figura 3.22 Puntos de muestreo de suelos en el Sitio de disposición final del municipio de Aculco, EdoMéx.....	58
Figura 3.23 Pozo de captación de biogás del sitio de disposición final de Polotitlán, EdoMéx.	61
Figura 3.24 Puntos de muestreo de suelo en el sitio de disposición final de Polotitlán, EdoMéx	61
Figura 3.25 Muestreo de suelo en el sitio de disposición final de Polotitlán, EdoMéx.	62
Figura 3.26 Prueba granulométrica de suelo sano del sitio de disposición final de Polotitlán, EdoMéx.....	63
Figura 3.27 Comparación de los componentes biofísicos	68
Figura 3.28 Grafica de comparación de los componentes socioeconómicos.....	69
Figura 3.29 Maquinaria compactadora CAT 826C	71

INTRODUCCIÓN

Para el año 2020 se generaron 120 mil 128 toneladas de RSU al día en México. Aunque la mayoría de los desechos podrían aprovecharse, señala la dependencia, sólo el 5 por ciento se recolectan de manera separada en orgánicos e inorgánicos (SEMARNAT, 2020). El Estado de México (EdoMéx.) y la Ciudad de México (Cd. Méx) son las entidades que más residuos sólidos urbanos (RSU) producen al día. Juntas producen una de cada cinco toneladas en el País. Para el Estado de México se estima una generación de 16,739 t/día de RSU (SEMARNAT, 2020), de la cual el 68% de los RSU fueron recolectados, se depositaron en 28 rellenos sanitarios (RESA), 29% en 18 sitios de tierra controlados (STC) y 3% en 42 sitios no controlados, mejor conocidos como tiraderos a cielo abierto (TCA) (INEGI, 2014). Sin embargo, es posible que la disposición en TCA sea mayor, especialmente en los municipios donde se generan menos de 10 t/día de RSU, debido a que no es rentable la construcción y operación de un RESA (Olay-Romero et al., 2020; SEMARNAT, 2012).

Lo anterior evidencia un gran problema, pues a mayor número de TCA o SDF que no tienen las características básicas de infraestructura y de operación, se incrementan las posibilidades de contaminar el suelo, el agua y la atmósfera, así como los riesgos a la salud. En México se han realizado esfuerzos para mejorar los sistemas de manejo de RSU (SHCP, 2017; SHCP, 2020), sin embargo, la disposición final continua siendo la principal debilidad, debido al escaso número de SDF que cumplen con lo indicado en la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004) y a la proliferación de SDF pequeños en las entidades federativas, cuyos municipios tienen escasa población y recursos limitados, de manera que carecen de control en cuanto a la generación de biogás y lixiviados, así como de fauna nociva y patógenos (Buenrostro-Delgado et al., 2019; Olay-Romero et al., 2020; SEMARNAT, 2020).

El objetivo de este trabajo es la evaluación para la clausura o la rehabilitación de dos sitios de disposición final de RSU en el EdoMéx, considerando aspectos técnicos, ambientales, sociales y económicos una metodología ágil (menores costos y tiempo) para la evaluación de los impactos, coadyuvará a que el financiamiento sea aplicado a un mayor número de SDF que requieran ser clausurados o rehabilitados. Además, se entregarán a los municipios de los SDF elegidos, los documentos de las manifestaciones desarrolladas, con los que podrán gestionar financiamiento para atenderles y, se verá beneficiado el ambiente y la salud de las poblaciones cercanas.

1. FUNDAMENTOS

En el mundo el problema de los residuos sólidos se torna cada vez más crítico, pues aumentan las ciudades y campos afectados por su generación e inadecuada disposición; en algunos de los países en vías de desarrollo son cada vez más las afecciones socioambientales que provoca su acumulación, concentrándose principalmente en barrancas, lagos, ríos, cerros y montañas (Saenz & Urdaneta, 2014).

La generación de residuos está implícita en todas las actividades humanas y en las de todos los organismos en la Tierra. El problema de los residuos inicia cuando no es posible su reincorporación en los ciclos naturales y, es posible que este sea el caso de más del 50% de los residuos generados de manera antropogénica. Entre los residuos destacan los catalogados como RSU, para los cuales, en México, su manejo tiene áreas de oportunidad, especialmente en la disposición adecuada, con el fin de que no impacte al ambiente y a la salud humana.

1.1 LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Los RSU son generados en casa-habitación y son comúnmente denominados “basura”. Para el año 2016 a nivel mundial se generaron 2.01 billones de toneladas y el Banco Mundial estima que para los años 2030 y 2050 se alcanzarán cifras de 2.59 billones y 3.40 billones de toneladas respectivamente. Los países de Asia y Europa fueron los que aportaron el mayor porcentaje (43%), América Latina y el Caribe (AL y C) contribuyó con 11% y México tuvo el puesto número 12 (Hernández-Berriel et al., 2016; Kaza et al., 2018).

Debido a que existen diferencias entre las cifras de generación reportadas oficialmente (INEGI, 2016; SEMARNAT, 2012, 2016, 2017a), para este trabajo se considerarán como punto de partida las estimaciones del Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos 2020, en el cual reporta una generación per cápita promedio 0.944

kg/hab/día, con la que, junto con el total de la población de 2015, se estimó una generación de residuos en el país de 120,128 t/día (SEMARNAT, 2020). En la tabla 1.1 se presenta la generación estimada de RSU por tamaño de población para cada entidad federativa, donde el Estado de México ocupa el primer lugar, seguido de la Ciudad de México, Jalisco y Veracruz.

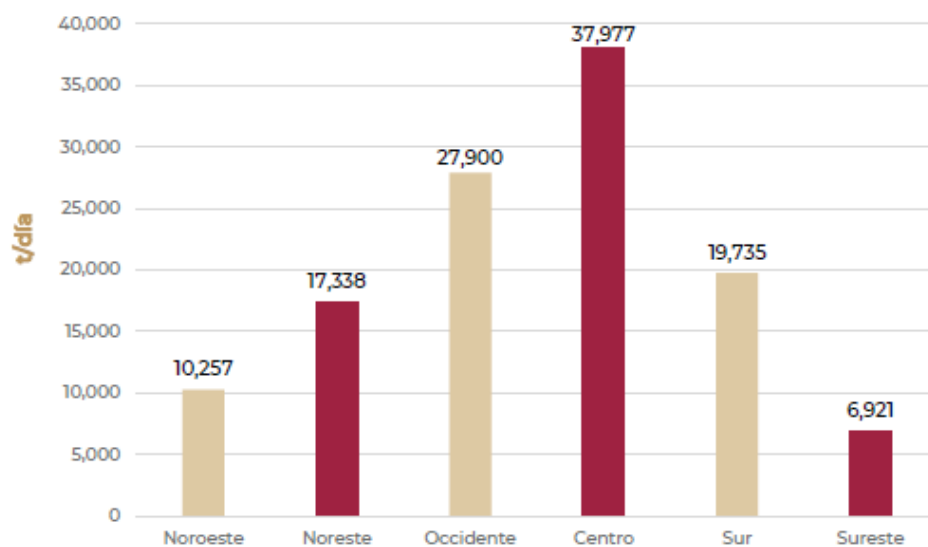
Tabla 1.1 Generación estimada de RSU por entidad federativa para 2015

ENTIDAD FEDERATIVA	TONELADAS POR DÍA	ENTIDAD FEDERATIVA	TONELADAS POR DÍA
Aguascalientes	1,330	Morelos	1,878
Baja California	3,535	Nayarit	1,146
Baja California Sur	737	Nuevo León	5,310
Campeche	888	Oaxaca	3,538
Chiapas	4,964	Puebla	5,991
Chihuahua	3,638	Querétaro	2,085
Ciudad de México	9,552	Quintana Roo	1,546
Coahuila de Zaragoza	3,032	San Luis Potosí	2,640
Colima	743	Sinaloa	3,068
Durango	1,767	Sonora	2,916
Estado de México	16,739	Tabasco	2,471
Guanajuato	6,031	Tamaulipas	3,591
Guerrero	3,421	Tlaxcala	1,123
Hidalgo	2,694	Veracruz	7,813
Jalisco	7,961	Yucatán	2,016
Michoacán	4,459	Zacatecas	1,505
Nacional	120,128 t/día		

Fuente: SEMARNAT, 2020

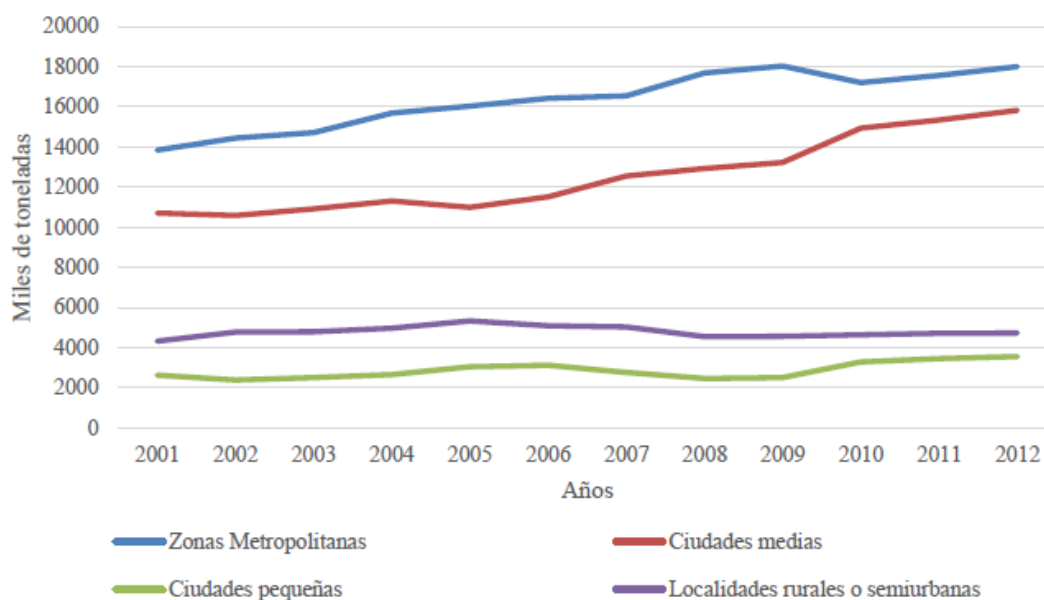
En la figura 1.1 se muestra la generación de RSU por Región, donde se observa que la mayor generación corresponde a las regiones Centro y Occidente; mientras que en la figura 1.2 tienen las dinámicas de la generación anual de RSU por tamaño de localidad entre 2001 y 2012, donde el mayor crecimiento se tuvo en las ciudades medias y en las zonas metropolitanas, lo cual corrobora la relación que existe entre las grandes ciudades y una mayor producción de residuos en comparación con las ciudades pequeñas y, en este caso, las localidades rurales y urbanas prácticamente

no tuvieron crecimiento.



Fuente: SEMARNAT, 2020.

Figura 1.1 Generación calculada de RSU por Región de México en 2015



Fuente: Jiménez-Martínez, 2015.

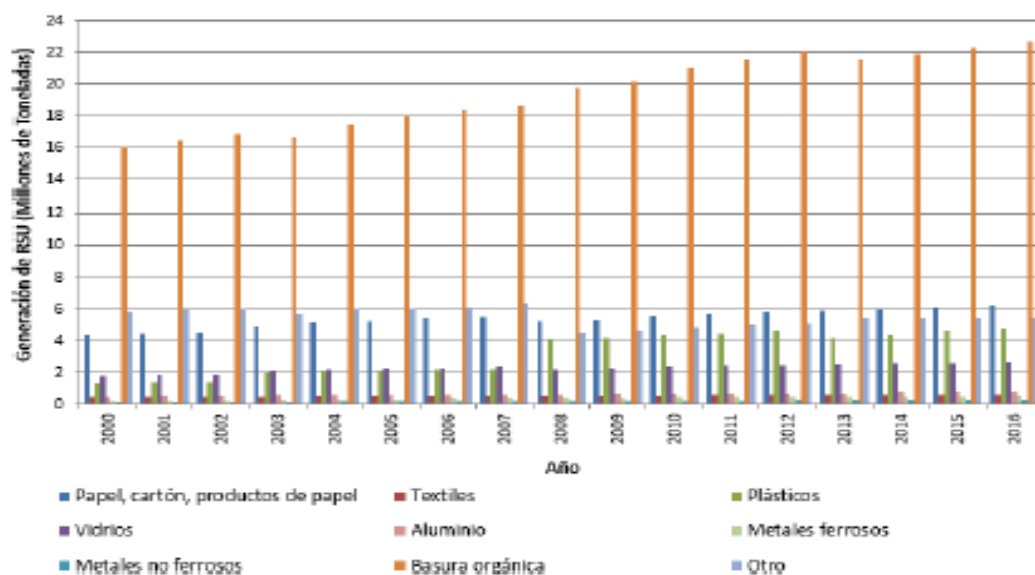
Figura 1.2 Generación anual de RSU por tamaño de localidad del 2001 al 2012

Los RSU están conformados por diversos tipos, entre los que sobresalen los residuos orgánicos, plásticos, papel, cartón, textiles y metales no ferrosos. La NMX-AA-22-1985 los clasifica en 26 subproductos (SEMARNAT, 2017). Considerando la composición promedio de los RSU estima que el 31.56% son susceptibles de aprovechamiento, el 46.42% son residuos orgánicos y el 22.03% son otros residuos (Tabla 1.2). En la figura 1.3 se puede apreciar que los residuos orgánicos han aumentado a lo largo de los años, pasando de 16,104,100 t a 22,664,400 t, lo que significa un incremento del 40.73% del 2000 al 2016 (INEGI, 2016; SEMARNAT, 2020).

Tabla 1.2 Composición porcentual promedio de los RSU en México

CATEGORÍA*	SUBPRODUCTOS	PORCENTAJE
Susceptibles de aprovechamiento: 31.55%	Cartón	4.55
	Envase de cartón encerado	1.51
	Fibras sintéticas	0.34
	Hule	0.54
	Lata	0.98
	Material ferroso	0.88
	Material no ferroso	0.57
	Papel	5.07
	PET	2.63
	Plástico rígido y de película	7.66
	Poliestireno expandido	1.55
	Poliuretano	0.55
	Vidrio de color	1.60
	Vidrio transparente	3.13
Orgánicos: 46.42%	Cuero	0.46
	Fibra dura vegetal	0.73
	Hueso	0.52
	Madera	0.79
	Residuos alimentarios	33.07
	Residuos de jardinería	10.84
	Algodón	0.15
Otros: 22.03%	Loza y cerámica	0.46
	Material de construcción	0.70
	Pañal desechable	6.75
	Residuo fino	2.25
	Trapo	2.82
	Otros	8.90
Total		100

Fuente: SEMARNAT, 2020.



Fuente: INEGI, 2016.

Figura 1.3 Generación de RSU por tipo de residuo en México.

1.2 GESTIÓN Y MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

En México la problemática de los residuos se ha tratado de resolver por medio de la legislación, implementando instrumentos desde la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, hasta reglamentos y normas específicas sobre residuos. La ley que se encarga de establecer qué y cómo se deben de gestionar los residuos que se generan en el país, es la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR); la cual los clasifica en residuos peligrosos (RP), residuos de manejo especial (RME) y RSU; entre éstos últimos se encuentran los residuos domiciliarios (RD). En el año 2003, con la primera publicación de la LGPGIR, los residuos sólidos municipales (RSM) cambiaron su denominación a la de RSU (DOF, 2015; DOF, 2003a).

El término de Gestión Integral de Residuos (GIR) se define con todos sus componentes en la LGPGIR como “Conjunto articulado e interrelacionado de acciones normativas, operativas, financieras, de planeación, administrativas, sociales, educativas, de monitoreo, supervisión y evaluación, para el manejo de residuos, desde su generación hasta la disposición final, a fin de lograr beneficios ambientales, la optimización

económica de su manejo y su aceptación social, respondiendo a las necesidades y circunstancias de cada localidad o región”. La LGPGIR tiene por objeto la GIRS a través de la minimización en la generación, la valorización, la prevención de la contaminación y la remediación de sitios en donde se depositan los residuos y es de responsabilidad federal, estatal y municipal llevar las acciones necesarias para su cumplimiento. Dentro de los Artículos relevantes se consideran el 7, 9 y 10, los cuales indican que los tres niveles de gobierno deberán promover la creación de infraestructura para el manejo integral de residuos, promover la educación ambiental para la población en general, establecer niveles de mejoramiento ambiental e integrar los resultados (DOF, 2003).

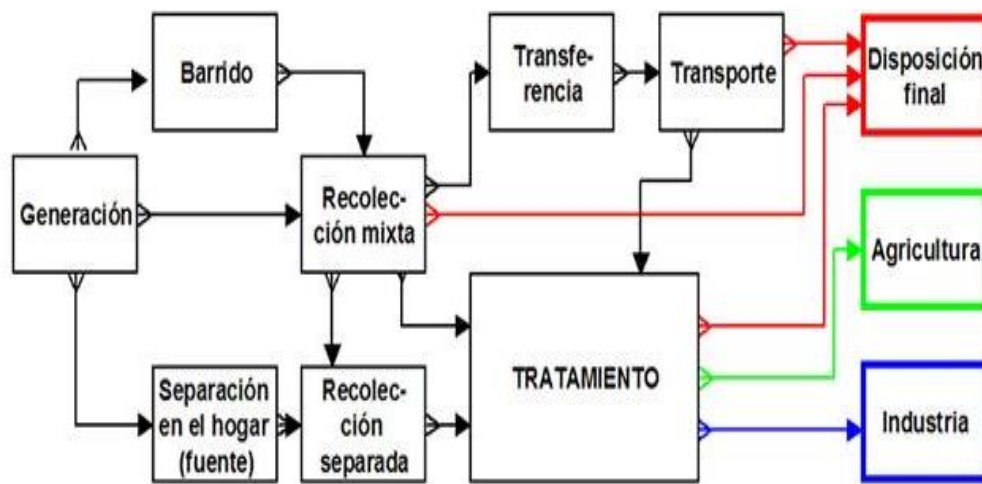
La LGPGIR establece para los instrumentos económicos, fiscales, financieros y de mercado, y para la reducción, la reutilización y el reciclaje de los residuos, diferentes atribuciones y tareas para cada uno de los tres niveles de gobierno en el país:

- a) Gobierno Federal; Promoverlos y aplicarlos para que incentiven el desarrollo, adopción y despliegue de tecnología. Este nivel es el responsable de expedir reglamentos, normas oficiales mexicanas y demás disposiciones jurídicas para regular el manejo integral de los RP, así como celebrar convenios.
- b) Gobierno del Estado; Diseñarlos, promoverlos y aplicarlos. Este nivel tiene la responsabilidad de promover los programas municipales para la prevención y gestión integral de residuos, prevenir la contaminación de sitios, y remediar aquellos con presencia de residuos; especialmente los RME y RSU.
- c) Gobierno Municipios; Aplicarlos para el desarrollo, adopción y despliegue de tecnología, que favorezca el manejo integral de los RSU. En este nivel se tiene la responsabilidad de proporcionar el sistema de aseo urbano y contar con sus Programa Municipal para la Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (PMPGIRSU), con base en el Programa Estatal para la Prevención y

Gestión Integral de Residuos (PEPGIR), y un registro de los grandes generadores de RSU, o sea, de los RME.

Tomando como base la GIR definida en la LGPGIR, entonces la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU) comprende además del Manejo Integral de los RSU (MIRSU), funciones legales, financieras, administrativas, de planificación y de ingeniería, enfocadas en los RSU; lo cual rebasa las actividades que se realizan en la mayoría de los municipios de México (AIDIS, 2018; DOF, 2003; Jiménez-Martínez, 2015). Para llevar a cabo la GIRSU, se debe de tener en cuenta aspectos de gobernanza y técnicos.

El MIRSU se enfoca en las cuestiones técnicas de la GIRSU y puede definirse como el conjunto de las actividades de reducción en la fuente, generación, separación, reutilización, reciclaje, co-procesamiento, tratamiento (biológico, químico, físico o térmico), acopio, almacenamiento, barrido, recolección, transporte, transferencia y disposición final de RSU, individualmente realizadas o combinadas de manera apropiada, para adaptarse a las condiciones y necesidades de cada lugar, cumpliendo objetivos de valorización, eficiencia sanitaria, ambiental, tecnológica, económica y social (DOF, 2003; Wilson *et. al.*, 2015). Las anteriores actividades se reducen a recolectar y disponer en la mayoría de los municipios del país (Jiménez-Martínez, 2015; SEMARNAT, 2020). En la figura 1.4 se muestra a manera de diagrama de bloques, las etapas que conforman el MIRSU y a continuación se definen las principales (SEMARNAT, 2008, Tchobanoglous *et al.*, 1994; Wehenpohl & Hernández-Barrios, 2006):



Fuente: SEMARNAT, 2008.

Figura 1.4 Etapas del Manejo Integral de Residuos Sólidos Urbanos.

- a) **Generación.** La generación de RSU se refiere a su producción originada en la fuente, o sea, las generadas en casa habitación y pequeños comercios que no producen las cantidades estipuladas en la LGPGIR para ser RME. Para poder planear y diseñar un MIRSU es fundamental conocer qué y cuánto se genera en una localidad. Para ello se realizan estudios de composición y generación de residuos.
- b) **Barrido.** Es la limpieza de los RSU vertidos en la vía pública y es responsabilidad del municipio a menos que el “Reglamento de Limpia” indique que son los habitantes son los que deben barrer el frente de sus hogares. El Barrido tiene como propósitos cuidar la salud, que la basura no dañe los servicios públicos como el drenaje de calles de la localidad y la imagen misma del municipio. Existen el Barrido manual y el Barrido mecánico.
- c) **Separación desde la fuente.** Consiste en clasificar los RSU desde el lugar donde son originados para aprovecharlos y lograr que una menor cantidad de ellos lleguen a los SDF. Una estrategia es utilizando el principio de las “Tres R’s”: Reducir la cantidad de productos usados que necesiten tratamiento o disposición final, Reusar repetidamente un producto o parte de él y, Reciclar los componentes del producto

como materia prima.

- d) **Recolección y transporte.** Son las actividades que realiza la persona prestadora del servicio público de aseo consistente en recoger y transportar los residuos no aprovechables hasta el sitio de disposición final o estación de transferencia. Esta etapa es la más costosa del MIRSU (entre \$130.00 y \$250.00 por tonelada de RSU). Para establecer un sistema de recolección se deben considerar: el método de recolección, la frecuencia y horario de recolección, el tipo de vehículos de recolección y cantidad de RSU y, el diseño de rutas. Se distingue entre la Recolección mixta y la diferenciada, donde la primera consiste en recolectar todos los subproductos de los RSU mezclados; mientras que la Recolección diferenciada implica recoger los residuos orgánicos de manera separada de los inorgánicos, bien en días diferentes o en los mismos días, pero con vehículos distintos o con en un mismo vehículo, pero con adaptaciones de separación.
- f) **Transferencia.** se define como el conjunto de equipos e instalaciones donde se lleva a cabo el trasbordo de dichos residuos, de los vehículos recolectores a vehículos de carga de gran tonelaje, para transportarlos hasta los sitios de destino final. Existen tres tipos de estaciones de transferencia: Carga directa, Carga indirecta (almacenamiento y carga) y Mixta.
- g) **Tratamiento.** El tratamiento de residuos sólidos tiene como fin recuperar sustancias y materiales valorizables, facilitar la utilización de estos residuos como fuente de energía y preparar los residuos para su tratamiento final. Los tratamientos se pueden clasificar de acuerdo con el tipo que requieren: físico, químico y biológico.
- h) **Disposición final.** Es la última etapa en el manejo de RSU y comprende al conjunto de operaciones destinadas a lograr el depósito permanente de los residuos sólidos urbanos, producto de las fracciones de rechazo inevitables resultantes de los métodos de valorización adoptados.

Es importante mencionar que en promedio el costo por tonelada recolectada se estima en \$434.00 y por tonelada dispuesta en \$122.00. Estos costos sólo incluyen la operación de los servicios y pero no la depreciación de los vehículos, equipos o maquinaria, ni las provisiones financieras para la reposición de éstos o para la clausura tecnificada de los SDF al final de su vida útil (SEMARNAT, 2020).

1.3 SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Los RSU son un problema para los municipios, debido a la ausencia de un sistema de MIRSU, donde la disposición constituye la última etapa del ciclo de vida de los RSU. La aplicación de todas las medidas de reúso y reciclaje permiten depositar solo los restos económicamente no reaprovéchaes. La cuestión entonces no es evitar la etapa de disposición en el ciclo de manejo de RSU, sino disminuir su cantidad y depositarlos de manera que se minimice su impacto al ambiente. Los distintos tipos de SDF que existen se presentan enseguida (Cortinas de Nava, 2018; Kaza *et al.*, 2018; Lobo-García *et al.*, 2015; Turcott-Cervantes, 2018):

- a) Tiradero a cielo abierto (TCA) o Sitio no Controlado (SNC). Sitio utilizado para el depósito de residuos sólidos, el cual se ha seleccionado sin estudio alguno y opera sin ningún tipo de control, contaminando el agua, el suelo y el aire. Los SNC se ubican comúnmente en barrancas, cerca de ríos y orillas de carreteras (Figura 1.5).



Fuente: GM, 2019

Figura 1.5 Sitio no controlado

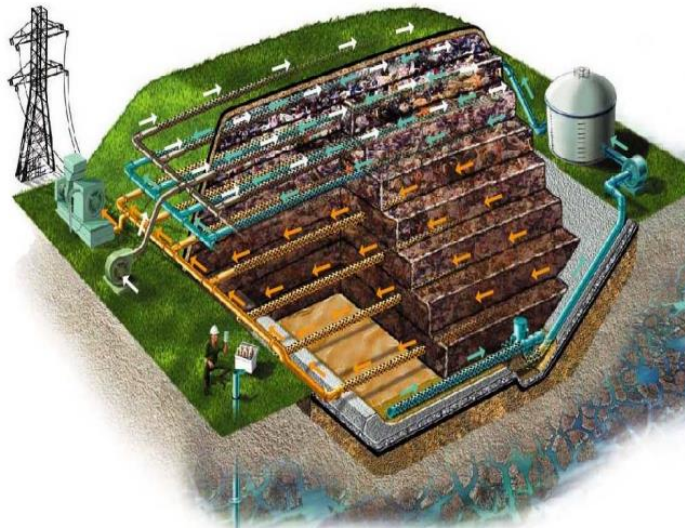
b) Sitio de tierra controlado (STC). Sitio que cumple con ciertas especificaciones de un RESA, pero no cumple con las especificaciones de impermeabilización del suelo, por lo que puede generar problemas de contaminación al suelo y al agua subterránea (Figura 1.6).



Fuente: Sol de Cuernavaca, 2019

Figura 1.6 Sitio de tierra controlado

c) Relleno sanitario (RESA). Sitio con infraestructura que aplica métodos de ingeniería para la disposición final de los RSU sobre el suelo, el cual ha sido previamente preparado con arcilla o geomembrana para prácticamente ser impermeable. Los RSU son esparcidos y compactados al menor volumen posible, para cubrirlos con material natural y/o sintético; además cuenta con sistemas para el control y tratamiento de lixiviados y biogás (Figura 1.7).



Fuente: Jaramillo, 2002

Figura 1.7 Relleno sanitario

d) Biorrelleno (Bio-RESA). La Solid Waste Association of North America (SWANA, 2002) define al Bio-RESA como un RESA controlado o una celda de RESA donde las condiciones de líquido y gas son manejadas con el fin de acelerar o mejorar la bioestabilización de los residuos. Los tipos de Bio-RESA se clasifican conforme al proceso de biodegradación utilizado en: Anaerobio, Semiaerobio, Aerobio e Híbrido.

En México la disposición final correcta de los RSU debe ser en SDF tipo RESA, pues se da cumplimiento a todo lo estipulado en la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004). El INEGI reportó que, durante el año 2013, el 68% de los RSU generados en el país se dispusieron en RESA, 8% en STC, 20% en TCA, y únicamente 5% fueron reciclados (INEGI, 2016). Para ese mismo año, en el Estado de México el 68% de los

RSU recolectados se depositaron en 28 RESA, el 29% en 18 STC y el 3% en 42 TCA (INEGI, 2014). Sin embargo, se estima que el número de TCA es mayor, especialmente en los municipios donde se generan menos de 10 t/día de RSU, debido a que no es rentable la construcción y operación de un RESA (Olay-Romero *et al.*, 2020; SEMARNAT, 2012).

De acuerdo con el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos 2020, de la totalidad de SDF que existen en México (2,203), 162 son de Tipo A porque reciben 100 o más t/día, 109 son de Tipo B pues reciben entre 50 a 100 t/día, 457 son de Tipo C porque reciben entre 10 y 50 t/día y, 1,475 son sitios Tipo D ya que reciben menos de 10 t/día.

En este diagnóstico se menciona que no fue posible determinar que SDF eran RESA, pero si reporta que el 40.21% del total de residuos generados se depositaron en 82 SDF que cumplen todas las características básicas de infraestructura y de operación consideradas en la CRDCNGMD 2017 del INEGI, que el 34.18% de los SDF tiene control de acceso y que solo el 18.93% tiene control de los residuos que ingresan en ellos. Para el Estado de México, de los 71 SDF existentes, 38 carecían de todas las características básicas de infraestructura y de operación consideradas en la CRDCNGMD 2017 del INEGI, 48 SDF tenían control de acceso, pero solo 32 contaban con control de los residuos que ingresaban en ellos (INEGI, 2017; SEMARNAT, 2020), lo cual es preocupante, pues pudieron haber ingresado RP.

1.4 IMPACTOS NEGATIVOS POR INADECUADA DISPOSICIÓN FINAL

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), define el término Impacto Ambiental como la modificación al ambiente, ocasionado por la acción del hombre o de la naturaleza. El término impacto se aplica a la alteración (positiva o negativa) que introduce una actividad humana en su entorno, identifica la parte ambiental afectada por la actividad, o más ampliamente, que interacciona con

ella (DOF, 1988 y 2000). Enseguida se describen las afectaciones negativas que ocasiona la inadecuada disposición final de RSU (Cortinas de Nava, 2018; SEMARNAT, 2008):

- a) Contaminación de suelos y cuerpos de agua. Este impacto se debe a la infiltración de lixiviados, los cuales son los líquidos que producen los residuos orgánicos, que, al mezclarse con residuos peligrosos, se convierten en una sustancia sumamente toxica. La contaminación de las aguas superficiales se manifiesta en forma directa con la presencia de residuos sobre los cuerpos de agua, incrementando de esta forma la carga orgánica con la consiguiente disminución de oxígeno disuelto, incorporación de nutrientes y la presencia de elementos físicos que imposibilitan usos ulteriores del recurso hídrico y comprometen severamente su aspecto estético. En forma indirecta, la escorrentía y lixiviados provenientes de los SDF de residuos sin tratamiento, incorporan tanto a las aguas superficiales como a los acuíferos, los principales contaminantes caracterizados por altas concentraciones de materia orgánica y sustancias toxicas, especialmente metales pesados.

Bernache- Pérez (2011). En su trabajo “riesgo de contaminación por disposición final de residuos. Un estudio de la región centro occidente de México” menciona que el problema de los lixiviados “es grave durante la estación de lluvias donde 46 % de los sitios pierde el control y se escapan los lixiviados. Esto es además del 15 % de los casos en que los lixiviados escapan a diario y del 10 % de los casos que a veces tienen escapes”. Es decir, el lixiviado escapa del sitio de manera constante, pero con periodos irregulares. Se puede afirmar que 7 de cada 10 sitios de disposición final tiene un problema de escape de lixiviados. Se tiene que tomar en cuenta que aproximadamente 80 % de la producción anual de lixiviados se genera de manera concentrada en los meses de la temporada de lluvias en cada localidad. El escape de lixiviados provoca un riesgo de contaminación del agua que, por lo general, contienen residuos considerados como peligrosos de acuerdo con la normatividad mexicana. El lixiviado entra en contacto con fuentes de agua de manera cotidiana

en el 5 % que reporta que sucede a diario, también el 10 % que reporta que sucede a veces. Así mismo, una tercera parte de los casos reporta que los lixiviados contaminan fuentes de agua durante la temporada de lluvias.

- b) Generación de biogás. El biogás se produce gracias a la descomposición anaeróbica de la fracción orgánica de los RSU, que en México es prácticamente la mitad (Cortinas Nava, 2018). Este biogás contiene principalmente metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), ambos gases de efecto invernadero; por lo que contribuyen al problema del cambio climático y al menoscabo de la calidad de vida de la flora y fauna del lugar. En México el sector Residuos Sólidos contribuyó 3.2% de toneladas de CO_2 equivalente en el año 2015 y se incrementó a 4.5 % en el 2017 (INECC, 2018).
- c) Inundaciones. Éstas ocurren debido al depósito de RSU en arroyos, canales, barrancas o en la vía pública, que provoca la interrupción de cauces de agua, desperfectos en el funcionamiento de drenaje y en la salida de aguas negras (Figura 1.8).



Figura 1.8 inundación por Residuos sólidos urbanos

- d) Condiciones estéticas e imagen. La biodegradación de los residuos orgánicos genera olores desagradables, mientras que la degradación (foto degradación, quimidegradación y biodegradación) produce la fragmentación de los residuos de plásticos, vidrios y papel, entre otros, los cuales son arrastrados por el viento, así como por animales, aves y animales carroñeros, que son atraídos por los residuos orgánicos. El impacto estético negativo en el paisaje alrededor de los SDF sin control adecuado afecta no sólo a la gente que vive en la zona, sino también la plusvalía socioeconómica de la región (Figura 1.9)



Fuente: Arzate, 2019

Figura 1.9 Condiciones estéticas y de imagen

e) Amenazas a la flora y fauna. Las afectaciones directas sobre la flora y fauna se encuentran a la remoción de especímenes de la flora del lugar, a la perturbación de la fauna durante la fase de construcción y a la operación inadecuada del sistema de disposición (Figura 1.10).



Fuente: NG, 2021

Figura 1.10. Aves en un sitio de disposición final

- f) Posibilidad de incendios. Los incendios de modo intencional, derivado de un descuido humano o incluso por auto incendio de los residuos, provocan el deterioro del suelo y de la vegetación, así como la contaminación del aire con humo, ceniza y gases tóxicos (Figura 1.11).



Fuente: GM, 2021

Figura 1.11 Quema de residuos

1.5 DAÑOS A LA SALUD POR RESIDUOS SOLIDOS

En México, la disposición de los residuos sólidos urbanos (RSU) está sujeta a la norma oficial mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT 2003), que clasifica a los sitios de disposición final (SDF) en: Rellenos sanitarios (RESA), sitios controlados y sitios no controlados o tiraderos a cielo abierto, de acuerdo con la infraestructura y condiciones de manejo y operación del sitio. El impacto producido por la generación, manejo y disposición de los RSU en los SDF ha recibido mayor atención en las últimas dos décadas, debido a las posibles enfermedades, el deterioro ambiental y paisajístico, alta afluencia vehicular, ruido, polvo y emisiones de olores relacionados con la operación de SDF. Actualmente, en el 95 % de los municipios y delegaciones de nuestro país, los RSU se recolectan y disponen en SDF, sin embargo, sólo al 5 % de

los residuos se les da algún tratamiento (INEGI 2012). Algunos de estos sitios se encuentran ubicados cerca de las cabeceras municipales; en algunos casos se tiene control sobre ellos, mientras que la mayoría de éstos opera de manera deficiente e insegura. Así mismo, éste sector representa una fuente de trabajo para miles de personas que laboraran en estos sitios de manera formal primordialmente en los RESAs, como de manera informal en los Sitios No Controlados.

El biogás y lixiviados, generados en los SDF como principales productos de la biodegradación de los RSU, pueden contener cantidades variables de compuestos dañinos al ambiente y la salud. El grupo poblacional más afectado por las emanaciones de los SDF son los miles de personas que viven en las cercanías y/o trabajan en los SDF. La mayor parte de los problemas de salud humana provienen del biogás, a partir de sus compuestos orgánicos volátiles (COV) no metánicos y de las emisiones de contaminantes peligrosos del aire, además varios olores se liberan durante las operaciones de disposición de RSU (Palmiotto *et al.* 2014).

Además, algunos procesos que se emplean en el tratamiento de RSU pueden generar compuestos tóxicos que afectan a los seres vivos, un ejemplo es la incineración inadecuada o quema incontrolada, donde se pueden liberar compuestos como dioxinas y furanos, entre otros, que son altamente tóxicos. A continuación, se presentan las afectaciones producidas por el biogás, lixiviado y los RSU en la salud producidos por la inadecuada disposición final.

- a) Biogás. Dolor de cabeza, mareos, nerviosismo, parestesia; disnea (dificultad para respirar); sudoración, malestar general (sensación vaga de malestar); aumento de la frecuencia cardíaca, gasto cardíaco, la presión arterial; estado de coma, asfixia, convulsiones, Irrita los pulmones, los ojos, la piel y es extremadamente inflamable (NIOSH, 2012).
- b) Lixiviados. El lixiviado es el líquido que resulta de la percolación del agua a través de los residuos, cargándose a su paso de contaminantes como microorganismos y sustancias químicas minerales, orgánicas disueltas y en suspensión. Todos estos contaminantes representan un posible riesgo a la salud humana y a los

ecosistemas. Por su origen y su composición tan compleja, los lixiviados de los SDF requieren de un manejo y tratamiento adecuados. Los principales factores que contribuyen a las características y la cantidad de lixiviados producidos en un SDF son la entrada de agua, incluyendo lluvia efectiva (precipitación menos evapotranspiración), la infiltración de las aguas subterráneas y superficiales (Aziz *et al.* 2012) lo que presenta un ya que puede estar siendo utilizada por la población aledaña como agua potable llegándole a provocar Irritación de ojos, piel, fibrosis pulmonar (histológico), fiebre de los humos metálicos: escalofríos, dolor muscular, náuseas, fiebre, sequedad de garganta, tos, lasitud (debilidad, agotamiento); sabor metálico o dulce; decoloración de la piel y cabello (OSHA 2012).

1.6 CLAUSURA O REHABILITACIÓN DE SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL

La inadecuada disposición de los RSU provoca daños al ambiente y a la salud, por ello es importante establecer escenarios a corto, mediano y largo plazo de acuerdo con los recursos disponibles de los ayuntamientos. La SEDESOL desde 2004 estableció criterios y lineamientos para la rehabilitación o clausura de los TCA, de tal manera que las autoridades municipales encargadas del Sistema de Aseo Urbano, contaran con elementos técnicos para mejorar las condiciones ecológicas de los medios circundantes a estos SDF. A continuación, se describen las principales actividades que se deben realizar, con el fin de prevenir y controlar los impactos negativos que pueden afectar al ambiente y a la salud de la población (SEDESOL, 2004).

Para poder definir si un SDF no controlado será clausurado o rehabilitado, se requieren de estudios geológicos, hidrogeológicos, topográficos, geotécnicos, de impacto ambiental y socioeconómico, entre otros. El conjunto de estos estudios implica una alta inversión, la cual es prácticamente imposible costear para la mayoría de los municipios en México; consecuentemente solo en algunos TCA se realiza la Evaluación de Impacto Ambiental, el Diagnóstico, la Propuesta de Clausura o Rehabilitación y, en menor número, la ejecución. Durante el periodo 2013-2018 se

destinaron recursos públicos federales por un monto de \$2,373'100,784.00, para financiar 346 proyectos en apoyo a la gestión integral de los residuos; de este monto el 3.76 % se destinó a Rehabilitación de SDF (\$89,285,193.22), y el 6.77% se asignó a la Clausura y Saneamiento (\$160,741,869.91) (SEMARNAT, 2020). A continuación, se describen algunas de las herramientas requeridas:

a) Evaluación de Impacto Ambiental. La LGEEPA define el termino impacto ambiental como la modificación al ambiente ocasionado por la acción del hombre o de la naturaleza (DOF, 1988). El término impacto se aplica a la alteración (positiva o negativa) que introduce una actividad humana en su entorno, identifica la parte ambiental afectada por la actividad, o más ampliamente, que interacciona con ella. El procedimiento para la Evaluación de Impacto Ambiental comprende: Calificación de impactos, Cálculo de magnitud e importancia y Evaluación de impactos. Entre las metodologías comúnmente utilizadas para la Evaluación de Impacto Ambiental destacan las siguientes (Arroyo & Cotán, 2007; Cossu *et al.*, 2018; Ortiz-Huerta, 2013; Valizadeh & Hakimian, 2019):

- Lista de chequeo. Consiste en elaborar una lista de verificación tanto de los componentes o factores ambientales como de las actividades del proyecto. La principal función de la lista de chequeo es la de servir en las primeras etapas para identificar los impactos ambientales, su contenido cambia según el tipo de proyecto y el medio de actuación, por lo que no son inmutables.
- Método Battelle-Columbus. Se basa en una lista de indicadores de impacto con 78 parámetros o factores ambientales, que representan una unidad o aspecto del medio ambiente que merece considerarse por separado y cuya evaluación es representativa del impacto ambiental derivado de las acciones o proyectos.
- Método de transparencias. El procedimiento comprende la elaboración de un inventario, que se representa en mapas con los siguientes factores de forma

aislada: clima, geología, fisiografía, hidrología, suelos, flora, fauna y uso actual del suelo. La distribución de la vegetación es el resultado de la interacción entre los factores citados, y la fauna está íntimamente ligado a ella. Los usos del suelo han estado estrechamente relacionados con las características del medio.

- Matriz de Lepold. Consiste en una matriz para establecer relaciones causa-efecto de acuerdo con las características particulares de cada proyecto, a partir de dos listas de chequeo que pueden contener 100 posibles acciones proyectadas y 88 factores ambientales susceptibles de verse modificados por el proyecto. Este método consiste en un cuadro de doble entrada, en la que se disponen como filas los Factores ambientales que pueden ser afectados y como columnas, las Acciones que vayan a tener lugar los posibles impactos. Este método utiliza los criterios de evaluación ambiental previamente definidos. El trabajo de Mendoza-Delgado (2017) emplea este método a detalle para TCA, utilizando para identificar los impactos y riesgos de los TCA seleccionados, la Lista de Verificación de Díaz-Archundia (2016) y una técnica basada en la diferencia cualitativa y cuantitativa de las causas que originan o preceden los impactos ambientales, basado en las guías reportadas por la SEMARNAT (2002 y 2012); para cuantificar los impactos identificados consideró los aspectos de magnitud (m) e importancia(i) de cada impacto, con una escala de valoración de 1 a 10 (Tabla 1.4), calculó la Calificación Ambiental (Ca) mediante una ecuación que incluye el Índice Global de Impacto Ambiental e identificó la Ca dentro de los cuatro niveles de significancia de impacto: Irrelevante o compatible ($0 \leq Ca < 2.5$), Moderado ($2.5 \leq Ca < 5.0$), Severo ($5.0 \leq Ca < 7.5$) o Crítico ($7.5 \leq Ca$).
- b) Clausura y Saneamiento. El sanear y clausurar SDF no controlados, o bien rehabilitarlos, implica que al observar la NOM-083-SEMARNAT-2003 se requieren realizar estudios geológicos, hidrogeológicos, topográficos, geotécnicos, así como de generación y composición de RSU, lixiviados y biogás, a fin de determinar si la ubicación de un SDF es adecuada; además de estudios de impacto ambiental y

socioeconómicos para evaluar la viabilidad de rehabilitarlos (DOF, 2004; SEMARNAT & GTZ, 2005; TAAF Consultoría Integral S.C., 2012). Los estudios mencionados requieren de una alta inversión, que para la mayoría de los municipios en México es imposible costear; consecuentemente solo en algunos SDF se realiza la evaluación de impacto ambiental, el diagnóstico, la propuesta y en menor número, finalmente la ejecución.

La Clausura de un SDF es la suspensión definitiva de las actividades de depósito y tratamiento de residuos sólidos y, por ende, la restricción de su ingreso; para el caso de un TCA, dependiendo de los recursos disponibles y su dimensión, se pueden establecer dos alternativas para la clausura: la clausura inmediata del sitio (Clausura definitiva) o la adaptación de la operación como RESA (rehabilitación) y posteriormente la clausura (clausura transitoria). Mientras que el Saneamiento es un método que utiliza principios de ingeniería para la conformación, compactación y sellado de los RSU que se encuentran a cielo abierto, así como para la construcción de sistemas de control, necesarios para minimizar los impactos al ambiente y a la salud de la población, durante la estabilización de estos. Los controles que se consideran en el saneamiento ambiental tienen la función de minimizar aspectos como: Infiltración de agua pluvial a través de la cubierta final, Esguimientos hacia el interior del sitio, Erosión y agrietamiento de la cubierta final, Migración de biogás y lixiviados, Emisión de compuestos orgánicos volátiles, Contaminación de las aguas subterráneas y Asegurar la estabilidad mecánica de los residuos sólidos (SEDESOL, 2004).

La Clausura de cualquier SDF (TAC, STC o RESA) es necesaria cuando se tiene algunas de las siguientes condiciones: Agotamiento de su vida útil, debido a que alcanzó su capacidad volumétrica disponible (características topográficas, facilidad de operación, estabilidad de los residuos depositados); Representa un serio problema para el ambiente y la salud de la población, ya sea por la falta de control o por las características inadecuadas del área en donde éste se encuentre; Causa

molestias importantes a los vecinos y se tiene una queja pública; o bien por la Implementación de un programa de reordenamiento del sistema de aseo urbano a nivel local o regional. Si se tiene la decisión de Clausurar un SDF se debe elaborar un Plan de Clausura, que deberá ser consistente con el uso del suelo de la zona en que se encuentre y que el área recuperada se integre adecuadamente a su entorno o ser utilizadas para fines recreativos y áreas verdes. Para la Clausura de un TCA se deben considerar las siguientes etapas (SEDESOL, 2004; SEMARNAT & GTZ, 2005):

- Etapa preliminar a la Clausura. Esta fase considera el desarrollo de estudios básicos que servirán de fundamento para definir los criterios y lineamientos que gobernarán el diseño ejecutivo de la Clausura y Saneamiento del sitio. Los estudios básicos comprenden: Mecánica de suelos, Geofísica, Topografía, Geohidrología, Climatología y Meteorología.
- Etapa de clausura. En ésta se realiza principalmente el movimiento, compactación y sellado de los residuos sólidos.
- Etapa de postclausura. Esta etapa prácticamente está orientada a la construcción de sistemas de control ambiental, e iniciará una vez que los RSU hayan sido cubiertos en su totalidad. Las obras de control que se construirán durante esta etapa son: Sistemas de control de escurrimientos; Sistemas de control de biogás y lixiviados; Sistemas de monitoreo de agua subterránea, biogás, lixiviados, asentamientos diferenciales y estabilidad de taludes; Colocación de suelo orgánico (tierra orgánica) sobre la cubierta del sitio saneado; Colocación de cubierta vegetal (pasto y especies vegetales); Colocación de barrera vegetal; e Instalaciones para mantenimiento y control (caseta de control, cercado perimetral, oficinas, etc.).
- Etapa a largo plazo. Una vez Clausurado el SDF, éste sufrirá cambios con respecto al espacio y tiempo, debido a la degradación de los RSU; a la movilidad de los productos de esta degradación (biogás, orgánicos volátiles y lixiviados); a los efectos climáticos; alteraciones geológicas; sismos, etc., siendo indispensable

vigilar y dar un seguimiento a estos sitios en un largo plazo (30 años). Para esta etapa, se recomiendan dos actividades básicas: la primera, consiste en dar mantenimiento a la cubierta final del sitio y a las instalaciones construidas para el control ambiental del sitio; de tal forma que se minimice el efecto hacia el ambiente. La segunda se refiere a la identificación de los posibles problemas de contaminación ocasionados por el sitio clausurado, así como asegurar el funcionamiento de los sistemas de control ambiental, mediante el monitoreo de diferentes componentes relacionados con la disposición de residuos sólidos (biogás, lixiviados, aguas subterráneas e inestabilidad de taludes).

- c) Rehabilitación. La Rehabilitación de los TCA y STC o incluso, algún RESA que deje de cumplir la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004), tiene la finalidad de disminuir los efectos de contaminación al medio ambiente y mejorar la imagen del SDF, manteniendo la operación del mismo, pero de manera controlada. La filosofía de la Rehabilitación es efectuar el menor movimiento de residuos y aprovechar el máximo volumen disponible del sitio, sin menoscabo de la seguridad, la estética y el control de la contaminación ambiental del mismo.

La rehabilitación de TCA requiere de cierto número de estudios previos, de manera que se cuente con la información básica necesaria para proceder a la elaboración del proyecto correspondiente; estos estudios son similares a aquellos que se requieren para el diseño de un RESA. Asimismo, como algunas de las características del SDF, se encuentran determinadas por el sistema de manejo de RSU de la localidad (generación, almacenamiento, recolección, etc.), así como por las particularidades de los residuos que se disponen en el sitio (composición, características fisicoquímicas, etc.), es necesario contemplar el diagnóstico de estos elementos, aun cuando parezcan ser independientes del sistema de disposición final. Los estudios básicos mínimos que se deberán considerar comprenden: Análisis de residuos sólidos; Geofísica y Geohidrología; Topografía; Análisis de lixiviados, biogás y agua subterránea; Climatología y meteorología; y Mecánica de

suelos. A continuación, se describen brevemente los métodos más usuales para realizar el movimiento, conformación y cobertura de los residuos sólidos; los cuales pueden sufrir algunas variaciones, dependiendo de las condiciones y características particulares de cada sitio (SEDESOL, 2004; SEMARNAT & GTZ, 2005):

- Método de Trinchera. Este método consiste en realizar una excavación o zanja de dimensiones tales que se puedan depositar todos o una gran parte de los residuos sólidos dentro de esta, para posteriormente ser cubiertos con material inerte, producto de la excavación de la trinchera.
- Método de Área. Se emplea generalmente cuando los residuos sólidos se encuentran esparcidos sobre un terreno sensiblemente plano y, el nivel freático se encuentra relativamente cercano a la superficie. Este método consiste en mover y conformar los residuos sólidos en celdas que ocupen la menor área posible, siempre y cuando sus taludes y altura cumplan con los requerimientos de seguridad establecidos en el proyecto. Una vez realizada esta operación, se cubren los residuos sólidos con material inerte importado de un banco de material cercano.
- Método de Rampa. Este método es una variación del Método de Área y se emplea generalmente en terrenos ondulados; consiste básicamente en mover, conformar y compactar los residuos sobre el talud del terreno, para posteriormente ser cubierto con material inerte.
- Método de Terrazas. Este sistema se emplea principalmente cuando los residuos sólidos han sido depositados en cañadas o barrancas. Es también una variante del método de área y consiste primordialmente en dividir el talud original de los residuos en dos o más secciones, dependiendo de la altura y longitud del talud; esta división se marca dejando una superficie horizontal, de manera que entre talud y talud existe un ancho de corona. En este método también es necesario

mover, conformar y cubrir los residuos.

- Método del Terraplén. Este método es empleado en lugares donde el tipo de terreno es pantanoso, por lo que es necesario realizar un terraplén sobre el nivel del terreno, con material seco, donde puedan ser colocados, conformados y cubiertos los residuos sólidos.

1.7 PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO

El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) es un método matemático creado para evaluar alternativas cuando se tienen en consideración varios criterios y está basado en el principio de que la experiencia y el conocimiento de los actores son tan importantes como los datos utilizados en el proceso (Osorio & Orejuela, 2008), el resultado de un AHP es la jerarquización de prioridades que muestran preferencia global para cada una de las alternativas de decisión, este proceso consta de tres principios:

- a) Construcción de las jerarquías: Se debe comenzar por un foco u objetivo que se quiere analizar con el proceso, con esto se establecen los criterios, que son los elementos que permiten conocer los ámbitos involucrados en la consecución del objetivo. Diferentes alternativas pueden aportar algo al objetivo, por esta razón deben ser evaluadas, según los criterios definidos con anterioridad (Pacheco & Contreras, 2008; Saaty & Vargas, 2001).
- b) Establecimiento de prioridades: El cálculo de la prioridad se realiza en función de comparaciones a pares con respecto a un criterio dado. Para comparar los elementos se forma una matriz y se pregunta: ¿Cuánto supera este elemento (o actividad) al elemento con el cual se está comparando (en la medida en que posee la propiedad, contribuye a ella, la domina, influye sobre ella, la satisface, o la beneficia) ?, dando una ponderación, auxiliándose con la Escala de Saaty (Tabla 1.3) (Pacheco & Contreras, 2008; Saaty & Vargas, 2001).

Tabla 1.3 Escala de Saaty

VALOR	DEFINICION	COMENTARIOS
1	Igual importancia	El criterio A es igual de importante que el criterio B
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente al criterio A sobre el B
5	Importancia grande	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente al criterio A sobre el B
7	Importancia muy grande	El criterio A es mucho más importante que el B
9	importancia extrema	La mayor importancia del criterio A sobre el B esta fuera de toda duda
2,4,6 Y 8	Valores intermedios entre los anteriores, cuando es necesario matizar	

Fuente: Saaty & Vargas, 2001

c) Consistencia lógica. El AHP mide la inconsistencia global de los juicios mediante la *Proporción de Consistencia*, donde el *Índice de Consistencia* se estima para cada *Criterio* con los datos de la matriz de ponderación normalizada, el índice de relación de consistencia (Tabla 1.4) y las ecuaciones 13 y 14. La *Proporción de Consistencia* debe ser menor a 0.1 (10%), para asegurar que las ponderaciones hayan sido hechas de manera adecuada. En caso de que la *Proporción de Consistencia* sea mayor, se deben de reevaluar las ponderaciones de la matriz pareada (Pacheco & Contreras, 2008; Saaty & Vargas, 2001).

Tabla 1.4. Relación de consistencias

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>índice de relación de consistencia (RI)</i>	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	0.52	1.45	1.49

Fuente: Saaty,1990

$$CI = \frac{n_{max} - n}{n - 1} \quad (\text{Ec. 13})$$

$$I = \frac{CI}{RI} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

CI: Índice de Consistencia

RI: Índice de relación de Consistencia

nmax: Producto de Matriz Normalizada (MN) y Vector Ponderación (VP)

n: número de criterios

I: Proporción de Consistencia.

1.8 EVALUACIÓN DE RIESGO

La evaluación de riesgo ER es un procedimiento esencial en la priorización a la salud humana y a la protección al ambiente. Sin embargo, los evaluadores deben comparar la gama completa de los riesgos, sobre una base sólida y consistente, considerando el mayor número posible de factores involucrados, (Butt *et al.* 2013). En su estudio Butt *et al.* (2008a) reportaron una serie de trabajos de ER en SDF, señalando ciertas limitaciones metodológicas, pues los estudios realizados hasta ese momento se enfocaban principalmente en el impacto de los lixiviados. En un estudio más reciente, Butt *et al.* (2013) señalan que pocas investigaciones se han realizado tomando en cuenta la necesidad, parámetros, requisitos y componentes del sitio a evaluar, en comparación con un sitio de referencia, sobre todo en el contexto de cómo, por qué y qué información debe ser cotejada con el fin de hacer evaluaciones de riesgo más adecuadamente integradas y completas.

La OMS expone que la evaluación del riesgo por la exposición a sustancias peligrosas liberadas por un SDF también puede ser necesaria debido a una serie de razones, como la de evidenciar el grado de cumplimiento con lo dispuesto en la normatividad del país, atender las preocupaciones de la comunidad y desarrollar investigaciones epidemiológicas (OMS 2001). El uso de métodos normalizados para la evaluación de la exposición permitiría la comparación entre los diferentes sitios de estudio, así como entre las exposiciones evaluadas por distintas investigaciones in situ. También puede

facilitar el análisis combinado de resultados de estudios epidemiológicos y ayudar a la identificación de características específicas de los residuos sólidos que podrían estar asociadas con los resultados adversos para la salud. Es importante tener conciencia de que la presencia de una fuente contaminante no es suficiente para causar un riesgo para la salud, tiene que existir una ruta de exposición completa; es decir, una fuente, mecanismos de transporte y medios ambientales, un punto de exposición, una vía de exposición y una población receptora (OMS 2001).

1.9 ESTUDIO DEL ARTE

El Gobierno Federal es consciente de que los SDF que no cumplen con la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004) deben ser saneados y clausurados o bien saneados y rehabilitados; por lo que a través de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), estableció desde 2004 criterios y lineamientos para la rehabilitación o clausura de los TCA, de tal manera que las autoridades municipales encargadas del Sistema de Aseo Urbano, contarán con los elementos técnicos para mejorar las condiciones ecológicas de los medios circundantes a estos SDF , para prevenir y controlar los impactos negativos que afectan al ambiente y a la salud de la población (SEDESOL, 2004). Aunado a ello, existen acciones concretas, como los subsidios para 346 proyectos asociados a la gestión integral de RSU, que se otorgaron durante el periodo 2013 a 2018 con el fin de mejorar los sistemas de manejo de los RSU en el país (SEMARNAT, 2020). A continuación, se presentan algunos trabajos realizados sobre clausura o rehabilitación de SDF:

López *et al.* (2006) presenta una propuesta de saneamiento para el tiradero de la ciudad de Oaxaca de Juárez. Este trabajo parte de estudios de topografía, geofísica, mecánica de suelos, aforo de corrientes y análisis de laboratorio realizados exprofeso con este fin; establece los criterios y define las características de la infraestructura necesaria para sanear el sitio y en su caso incrementar su vida útil.

Lobo *et al.* (2016) en su trabajo titulado “Cierre, sellado y reinserción de antiguos vertederos. Experiencias en Iberoamérica”, con base en la experiencia y recopilación de información técnica, propone una metodología y presenta varios ejemplos de clausura y reinserción de vertederos o SDF en Iberoamérica.

Bolívar (2019) reporta la evaluación del impacto ambiental del botadero o SNC municipal del Cantón Arenillas, Ecuador. En su metodología empleó una matriz de evaluación de impactos ambientales con base a la magnitud e importancia de cada impacto identificado. Como resultados muestra que entre las alteraciones negativas más significativas se encuentran: la alteración de la calidad del suelo por la generación de lixiviados, alteración a las aguas subterráneas por lixiviados y conflictividad por la generación de enfermedades. También se identificó impactos positivos, como la generación de empleo y compensación social por mejoras en las áreas circundantes al botadero.

López Gasca (2020) en su investigación analizó las prioridades de SDF y el MIRSU de municipios colindantes del sureste del Estado de México y Morelos y las áreas factibles con respecto a la NOM-083-SEMARNAT-2004 para la ubicación de un RESA intermunicipal, utilizando Mapa Digital y de Escritorio del INEGI. Una vez definidas las ubicaciones, desarrolló el prediseño de dos SDF, un Bio-RESA con recirculación y un RESA sin recirculación con el simulador MODUELO, realizó una comparación técnica, ambiental y económica; determinando la mejor opción.

2. MÉTODO

Las etapas requeridas para llevar a cabo esta investigación se muestran en la figura 2.1 y posteriormente se describen cada una de las actividades que se realizaron.



Figura 2.1 Diagrama de las etapas de la investigación

2.1 SELECCIÓN DE LOS MUNICIPIOS A ESTUDIAR

Se recopilaron datos actuales de Variables Ambientales (Áreas protegidas, Vulnerabilidad ecológica, Número de SDF y Tipo de SDF), Sociales (Población total por municipio, Densidad poblacional, Edad Media, Índice de Salud, Índice de Educación e Índice de desarrollo humano) y Económicas (PIB, Ingreso municipal, Unidades económicas y Población en pobreza) de los 60 municipios de la periferia del Estado de México, los cuales forman parte del área de estudio del proyecto SEMARNAT-2015-1-263315. Los datos actuales fueron recopilados de informes de la SEDESOL, del Consejo Nacional de Población (CONAPO), INEGI, del Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) y de la SEMARNAT; así como de la información obtenida de la investigación en campo

realizada mediante la Cédula de Entrevista y el Diagnóstico del proyecto SEMARNAT-2015-1-263315.

A la información recopilada de las Variables Ambientales, Sociales y Económicas se les aplicó un Análisis Estadístico Univariado con el software estadístico StatGraphics 18 ® (Statgraphics Technologies Inc., 2020). Se empleó el Método AHP (Saaty, 1980), que es una técnica usada para la toma de decisiones, la cual permite ordenar criterios y subcriterios en un Modelo Jerárquico, para realizar comparaciones binarias, emplear los valores de la Ponderación por expertos de criterios y subcriterios (Domínguez-Vargas, 2021) y sintetizar agregando las soluciones parciales en una sola solución. Con el empleo de esta metodología se priorizaron los SDF de los 60 municipios, se concertaron citas con los responsables de los 10 municipios cuyos SDF obtuvieron los mayores puntajes en el método AHP.

2.2 ANÁLISIS DE LA UBICACIÓN DE LOS SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL ELEGIDOS

Para el análisis de la ubicación de los SDF elegidos se utilizó el SIGMIRSU, desarrollado en la Etapa 4 del proyecto SEMARNAT-2015-1-263315; el cual proporcionó una serie de mapas binarios de los municipios conteniendo los criterios evaluados de la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004), que al sobreponerse facilitó la visualización de la ubicación de las áreas idóneas y no idóneas donde se encuentran dichos SDF. El uso del SIGMIRSU brindó información sobre la geología (fallas y fracturas, tipos de suelos), la hidrología (ríos y cuencas), las condiciones climatológicas (clima, precipitación y temperatura), la topografía (curvas de nivel y pendientes), zonas urbanas y arqueológicas, áreas protegidas, plantas generadoras de energía renovable y vías de comunicación (aeropuertos, vías férreas y carreteras).

Las áreas recomendadas por el SIGMIRSU y las detectadas no adecuadas para los SDF seleccionados, se verificaron mediante trabajo de campo y de manera satelital

con herramientas como Mapa Digital V.6.3.0 (INEGI, 2020), Google Earth y Google Maps (Google, 2020 a; Google, 2020b). Durante el trabajo de campo, siguiendo las técnicas implementadas respectivas se tomaron muestras de suelo (DOF, 2003b; DOF, 2017), lixiviados y cuerpos de agua cercanos (SCFI, 1980).

2.3 DIAGNÓSTICO DE IMPACTOS PARA LA REHABILITACIÓN VERSUS LA CLAUSURA

Para llevar a cabo el diagnóstico de los impactos de cada uno de los SDF seleccionados, se tomaron en cuenta las actividades que enseguida se describen:

2.3.1 Evaluación técnica

Esta evaluación se realizó en campo, aplicando en cada SDF la Tabla de Verificación (TV), elaborada con base en la Guía de la NOM-083-SEMARNAT-2003 (Anexo A) (SEMARNAT-GTZ, 2004). La TV consta de ocho apartados: a) Proyecto Ejecutivo y Evaluación, b) Restricción para ubicación del sitio, c) Estudios y análisis previos para la selección del sitio, d) Estudios y análisis previos en el sitio, e) Estudios de generación y composición, f) Características constructivas y operativas del sitio y g) Clausura del sitio, donde cada uno de ellos tiene diferente número de condicionantes; dependiendo del cumplimiento del SDF, a cada condicionante se le asignó un valor: 1.0 cuando “Cumple”, 0.5 cuando “Cumple parcialmente” y 0.0 cuando “No Cumple”. El cumplimiento del total de las condicionantes equivale al 100 % de cumplimiento. Dependiendo del tipo de SDF se detectaron las condicionantes que no requerían cumplir y se identificarán con las siglas NA. Entre las condicionantes se tiene distancias a zonas urbanas y aeropuertos, zonas protegidas, identificación de fallas y fracturas, captación y tratamiento de lixiviados y biogás, compactación y cubrimiento de RSU, control de acceso, obras complementarias, etc.

2.3.2 Evaluación ambiental y socioeconómica

Aplicando las técnicas que se listan en la tabla 2.1, se caracterizaron las muestras colectadas en el trabajo de campo de suelo, lixiviados y cuerpos de agua cercanos a cada SDF, así como la caracterización de biogás en pozos mediante el analizador de campo GEM-2000 de la compañía LanTech®.

Tabla 2.1. Técnicas utilizadas para suelo, lixiviado y agua

PARÁMETRO	NORMA MEXICANA O MÉTODO
Contenido de humedad	NMX-AA-016-1984 ¹
pH	NMX-AA-025-1984 ²
Sólidos Volátiles Totales (SVT)	Método 2540G ³
Materia Orgánica	NMX-AA-021-1985 ⁴
Recolección de Muestra	NMX-AA-003-1985 ⁵
pH	NMX-AA-008-SCFI-2016 ⁷
SVT	NMX-AA-034-SCFI-2015 ⁸
DQO	Método dicromato, aprobado por la USEPA ⁹
Temperatura	NMX-AA-008-SCFI-2011 ¹⁰
Conductividad	NMX-AA-093-SCFI-2000 ¹¹
Metales Pesados	NMX-AA-051-SCFI-2016 ¹²
N-NH ₃	NMX-AA-026-SCFI-2010 ¹³
SO ₄ ⁻²	NMX-AA-074-SCFI-2014 ¹⁴
Estructuras Terreas	NMX-CC-416-ONCCE-2003 ¹⁵

Fuente: ¹ DOF, 1992a; ² DOF, 1992b; ³ APHA 2005; ⁴ DOF, ⁵ SCFI, 1980; 1992c; ⁷ SE, 2016a; ⁸ SE, 2015; ⁹ FNS, 2013; ¹⁰ SE, 2013; ¹¹ SCFI, 2000; ¹² SE, 2016b; ¹³ SE, 2010; ¹⁴ SE, 2014; ¹⁵ DOF, 2003b.

Durante las visitas a los SDF se aplicó la Matriz de Leopold adaptada para un SDF, la cual considera como actividades de la disposición de residuos: Transporte y descarga, Disposición de RSU y RME, Disposición de RP, Compactación y cobertura, Manejo de biogás generado, Manejo de lixiviados y, Contratación de maquinaria, personal y servicios (Mendoza-Delgado, 2017). Para complementar la evaluación económica, se realizó una estancia en el RESA de Tenango del Valle, en la cual se recopiló información y estimaron costos relacionados con operación, rehabilitación y clausura

de celdas de RSU. Entre la información recabada se obtuvo: ubicación geográfica, cantidad dispuesta por año de RSU, cobertura utilizada, inicio de disposición, vida de operación, entre otros.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante las actividades realizadas en la metodología y las comparaciones correspondientes.

3.1 SELECCIÓN DE LOS MUNICIPIOS A ESTUDIAR

En la figura 3.1 se presentan los 60 municipios de la periferia del Estado de México, contemplados en esta etapa.



Fuente: adaptado de INEGI, 2021

Figura 3.1 Municipios de la periferia del Estado de México

3.1.1 Selección de los municipios con sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos

Tomando como base DBGIR 2020, de los 60 municipios se seleccionaron aquellos que cuentan con SDF, descartándose los que se reportan que tienen estaciones de

transferencia o que depositan sus residuos en otro municipio (SEMARNAT, 2020). Se seleccionaron los 30 municipios que se listan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Municipios con sitios de disposición final

Número de SDF	MUNICIPIO	Número de SDF	MUNICIPIO	Número de SDF	MUNICIPIO
1	Acambay	11	Xalatlaco	21	Temascalapa
2	Aculco	12	Jilotepec	22	Tepetlaoxtoc
3	Amatepec	13	Nopaltepec	23	Tepetlixpa
4	Amecameca	14	Otumba	24	Tequixquiac
5	Apaxco	15	Otzoloapan	25	Tlalmanalco
6	Axapusco	16	Ozumba	26	Tlatlaya
7	Chapa de Mota	17	Polotitlán	27	Villa del Carbón
8	Ecatepec	18	Santo Tomás	28	Zacualpan
9	Ecatzingo	19	Soyaniquilpán de Juárez	29	Zumpango
10	Huehuetoca	20	Tejupilco	30	Luvianos

SDF, Sitios de Disposición Final

Fuente: SEMARNAT, 2020

3.1.2 Eliminación de valores extremos

Con la información recabada de informes de la SEDESOL (2013), el INEGI (2020) y la SEMARNAT (2020); así como con la información de la investigación en campo obtenida mediante la CE de los municipios. Se realizó un análisis estadístico de promedio y rango, para eliminar valores extremos en las variables social, económica y ambiental. Los valores del municipio de Ecatepec de Morelos, estuvieron fuera de los rangos de los demás municipios, por lo que se tomó la decisión de no considerarlo, quedándose con 29 municipios.

3.1.3 Análisis de las variables sostenibles

Se analizaron las variables sociales, ambientales y económicas con el método AHP, otorgando conforme al grado de importancia: 54% al criterio ambiental, 30% al social y 16% al económico (Figura 3.2). El mayor porcentaje se dio a la variable ambiental porque, se consideró con mayor importancia a los impactos generados por la

inadecuada disposición de los residuos, infraestructura y operación de los SDF.

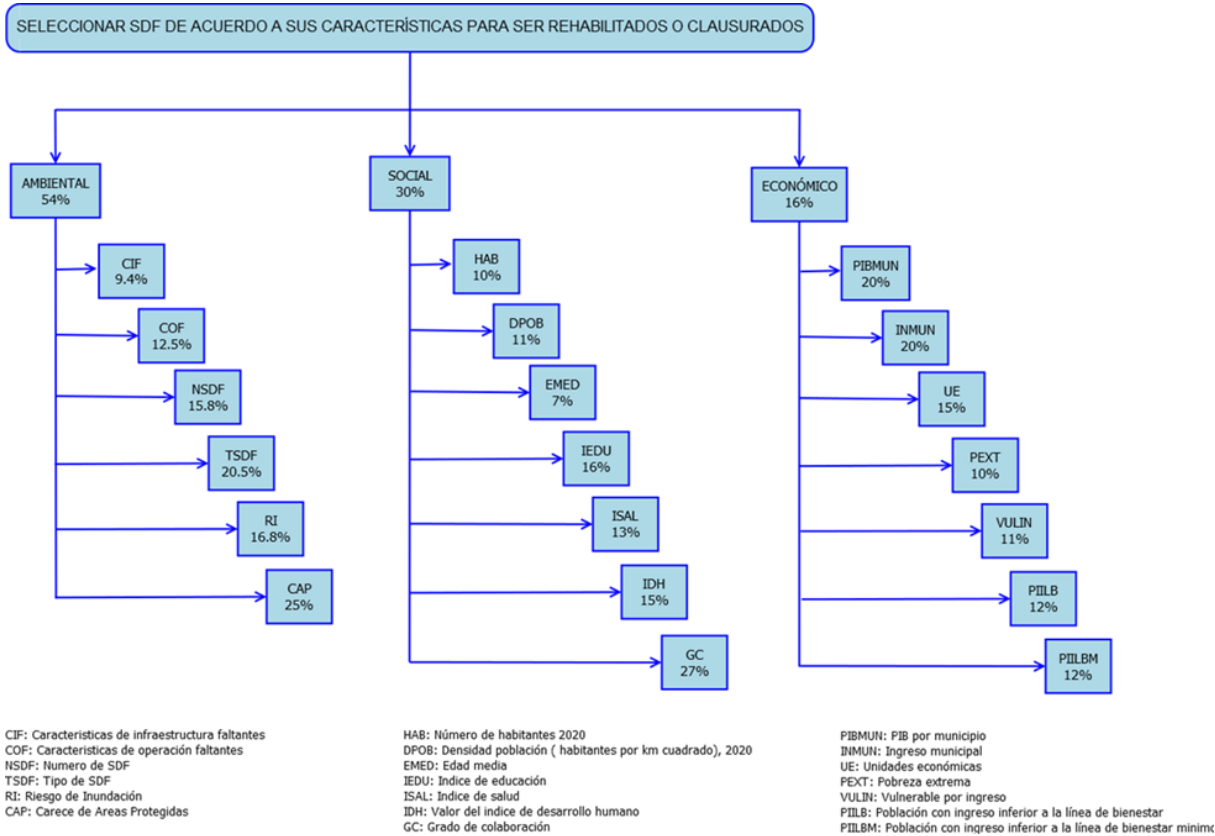


Figura 3.2. Diagrama de árbol

Con los 29 municipios restantes se aplicó el método AHP, iniciando con el criterio social, posteriormente el ambiental y el económico. Se tomaron los primeros 10 municipios con una ponderación de mayor a menor, quedando en orden de prioridad como se listan en la tabla 3.2.

Posteriormente se realizó un análisis global en el método AHP, con una relación de suma producto de las ponderaciones finales de los Criterios y sus Subcriterios correspondientes, dando como resultado en orden de prioridad los municipios listados en tabla 3.3.

Tabla 3.2. Ponderaciones de los subcriterios

SOCIAL		AMBIENTAL		ECONÓMICO		
	MUNICIPIO	PONDERACIÓN	MUNICIPIO	PONDERACIÓN	MUNICIPIO	PONDERACIÓN
1	Nezahualcóyotl	0.041	Amecameca	0.045	Amecameca	0.042
2	Tlanepantla de Baz	0.027	Aculco	0.42	Polotitlán	0.039
3	Naucalpan de Juárez	0.024	Villa del Carbón	0.041	Santo Tomas	0.039
4	Tultitlan	0.024	Amatepec	0.04	Tepetlaoxtoc	0.039
5	Coacalco	0.022	Tejupilco	0.04	Ozumba	0.037
6	Valle de Chalco	0.022	Ozumba	0.04	Zumpango	0.037
7	La paz	0.021	Ecatzingo	0.04	Tlalmanalco	0.036
8	Tecámac	0.019	Luvianos	0.038	Nopaltepec	0.036
9	Ixtapaluca	0.016	Tepetlixpa	0.036	Otumba	0.036
10	Acambay	0.015	Axapusco	0.036	Soyaniquilpán de Juárez	0.036

Estos municipios presentaron las mejores condiciones ambientales, económicas y sociales para realizar estudios en su SDF y minimizar los impactos generados por la mala disposición de RSU, así como para invertir en mejorar sus características básicas de infraestructura y operación.

Tabla 3.3. Ponderación global

ORDEN	ALTERNATIVA	PONDERACIÓN
1	Amecameca	0.040
2	Villa del Carbón	0.039
3	Ozumba	0.037
4	Aculco	0.037
5	Polotitlán	0.036
6	Axapusco	0.036
7	Tejupilco	0.036
8	Jilotepec	0.036
9	Amatepec	0.035
10	Tlalmanalco	0.035

Posteriormente se gestionaron visitas a los SDF con los responsables municipales del manejo de los RSU; donde solo Aculco y Polotitlán permitieron el acceso a sus SDF para realizar trabajo de campo y tomar muestras de suelo, lixiviados y cuerpos de agua aledaños.

3.2 ANÁLISIS DE LA UBICACIÓN DE LOS SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL ELEGIDOS

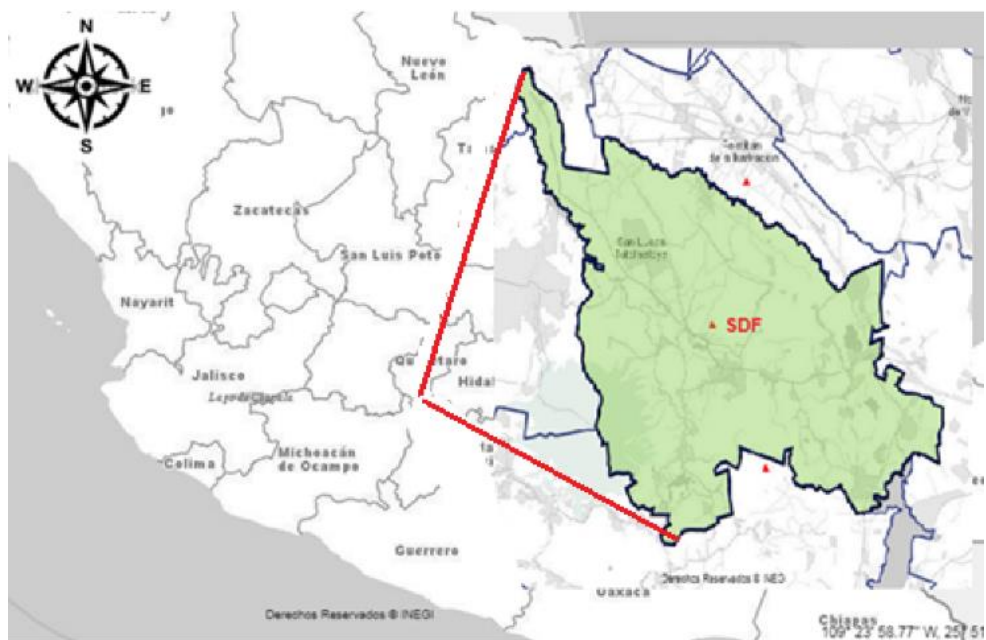
En los siguientes subapartados se describe el análisis realizado para cada uno de SDF de los municipios de Aculco y Polotitlán del EdoMèx.

3.2.1 Ubicación de los dos sitios de disposición final elegidos

A continuación se detalla la ubicación y algunas características de cada uno de SDF seleccionados:

a) SDF de Aculco. La cabecera municipal de Aculco, EdoMéx, se encuentra a 20°05'58.29" de latitud norte, 99°49'40.52" de longitud oeste (20.099525, -99.8279222) y a una altura sobre el nivel del mar que va desde los 2,400 m (Figura 3.3). Se ubica a 136.3 km al oeste de la Ciudad de México (CdMéx), a 109.5 km al norte de la ciudad de Toluca, capital del EdoMex. y a 40 km al este del municipio de Amealco, Querétaro.

El SDF del municipio de Aculco, EdoMex, se encuentra ubicado en el Ejido de Gunyo poniente, EdoMéx, con coordenadas: 20.137747, -99.840556 (20°08'15.9" N, 99°50'26" O) (Google Maps, 2021). El terreno donde se encuentra ubicado el SDF no es propio del municipio de Aculco, cuenta con una superficie de terreno de 37,621 m² para disponer alrededor de 24 t RSU/día. En la figura 3.4 se muestra una fotografía aérea tomada con el Dron DJI PHANTOM 4 durante los trabajos de campo realizados el 8 de octubre 2021.



Fuente: Adaptado de INEGI 2021

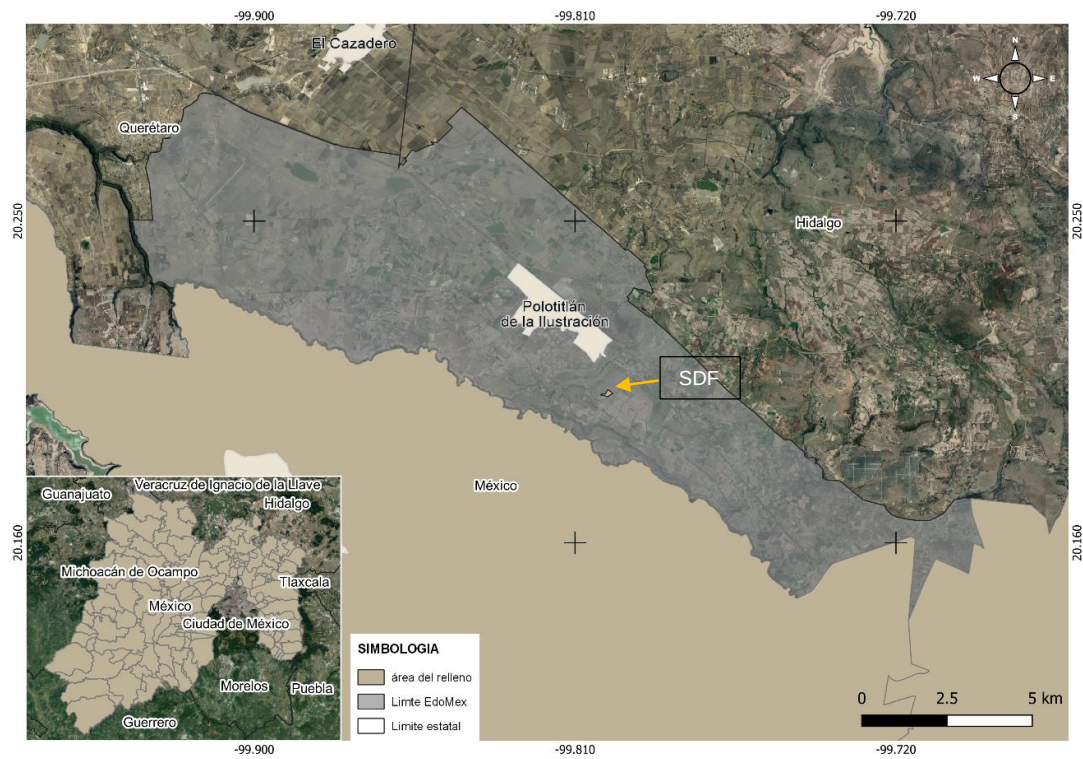
Figura 3.3 Ubicación del municipio de Aculco, EdoMéx y su sitio de disposición final



Figura 3.4. Fotografía aérea con Dron DJI PHANTOM 4 del SDF de Aculco, EdoMex., 08/10/2021

Dentro de la información existente, el Plan de Desarrollo Municipal (PDM) publicado por las autoridades del H. Ayuntamiento de Aculco (2021), reporta al SDF de Aculco, EdoMéx como Relleno Sanitario; con infraestructura que incluye maquinaria de tractores tipo oruga para realizar la compactación y cubierta de residuos; en cuanto a operación reporta que tiene tres personas a cargo del sitio, para dar continuo mantenimiento con labores de selección de vidrio, PET, papel y metal para su reciclaje. En la visita de campo realizada el 8 de octubre 2021 se observó que el SDF cuenta con caseta de vigilancia, cerca perimetral y un frente de tiro para RSU que no había sido cubierto, porque las maquinas estaban descompuestas.

- b) SDF de Polotitlán. La cabecera municipal de Polotitlán, EdoMéx, se encuentra 20°12'06.1"de latitud norte, 99°48'06.9" de longitud oeste (20.202560052031647, -99.80212577701828) y a una altura sobre el nivel del mar que va desde los 2,300 m (Figura 3.5). Polotitlán se localiza a 12,5 km al norte de Toluca por la carretera federal No. 55. Saliendo de la Ciudad de México se llega por la autopista a Querétaro con un recorrido de 121 km. El SDF de Polotitlán inició en 2017, situándose en un predio público del municipio con un área de 45 ha² aproximadamente. De acuerdo con la cantidad de toneladas de RSU que ingresan, que son 10 t/día, este sitio se ubica en la categoría tipo "D". Para la prestación del servicio el municipio cuenta con cuatro unidades recolectoras, cada unidad tiene un operador y dos auxiliares. El servicio de recolección, transporte y disposición final se realiza de lunes a sábado, iniciando a las 09:00 a.m. y terminando entre 15:00 y 16:00 horas (H. Ayuntamiento de Polotitlán, 2021). El DBGIR 2020 reporta que en infraestructura el SDF cuenta con geomembrana y captación de lixiviados; en cuanto operación tiene cubrimiento con tierra y control de acceso (SEMARNAT, 2020). Cabe mencionar que en la visita al SDF se encontraron vestigios de geomembrana, pero no sistema de captación de lixiviados, tampoco se observó control de acceso ni cubrimiento periódico de RSU con tierra. En la Figura 3.6 se muestra una fotografía aérea tomada con el Dron DJI PHANTOM 4 durante los trabajos de campo realizados el 11 de octubre 2021.



Fuente: INEGI, 2021; QGIS, 2021.

Figura 3.5 Ubicación del municipio de Polotitlán, EdoMéx



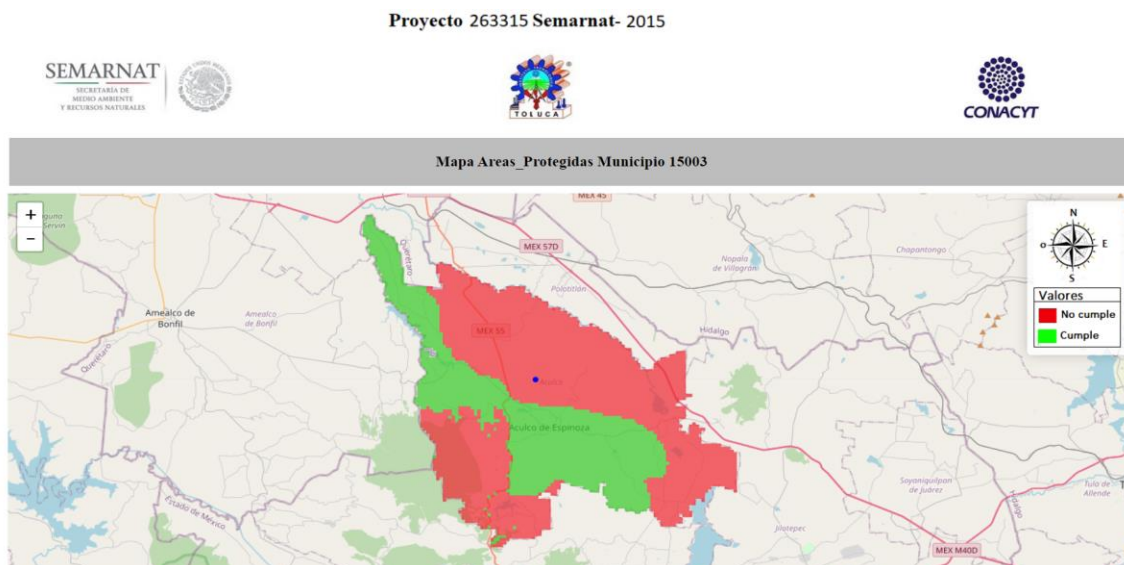
Figura 3.6. Fotografía aérea del SDF de Polotitlán, EdoMéx., con Dron DJI PHANTOM 4 11/10/2021

3.2.2 Análisis de la ubicación mediante el SIGMIRSU

Con el uso del SIGMIRSU (Mañón-Salas & Hernández-Berriel, 2021), se obtuvieron mapas con las restricciones de la ubicación del sitio conforme a la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004). Como se muestra a continuación, el SDF en el municipio de Aculco y Polotitlán, EdoMex, se representa como un punto color azul, de color verde las áreas idóneas y las restricciones de color rojo:

a) Análisis de la ubicación del SDF de Aculco, EdoMéx.

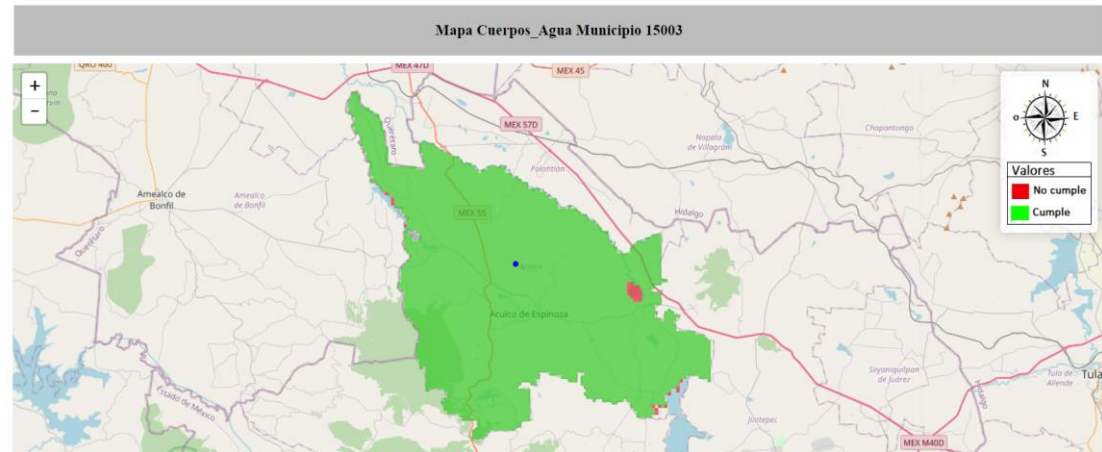
- Áreas protegidas. Este sitio se encuentra cerca del área protegida “Parque Estatal Oso Bueno”, decretado como reserva natural, por lo que su ubicación no cumple con esta restricción, la cual puede observarse en color rojo (Figura 3.7).



Fuente: adaptado de Mañón-Salas & Hernández-Berriel, 2021

Figura 3.7 Restricción por área natural protegida

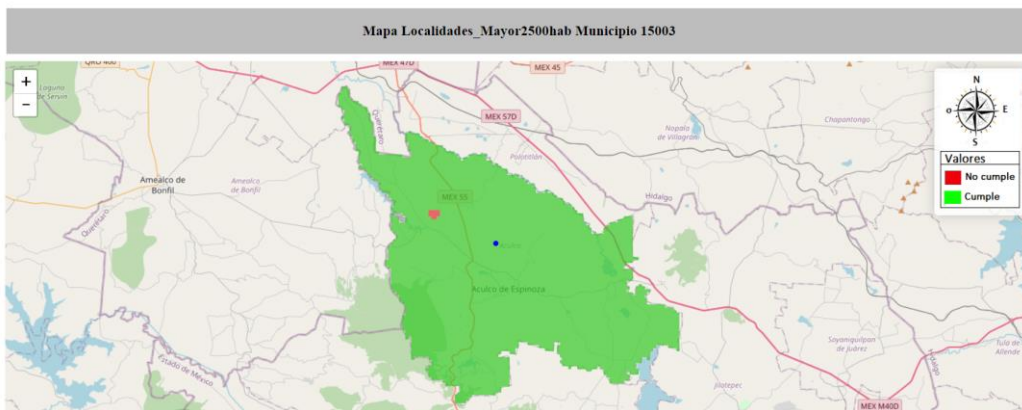
- Cuerpos de agua. El SDF del municipio de Aculco, no se encuentra cerca de cuerpos de agua, por lo que no tiene restricción de su ubicación con respecto a este criterio (Figura 3.8).



Fuente: adaptado de Mañón-Salas & Hernández-Berriel, 2021

Figura 3.8 Restricción por cuerpos de agua

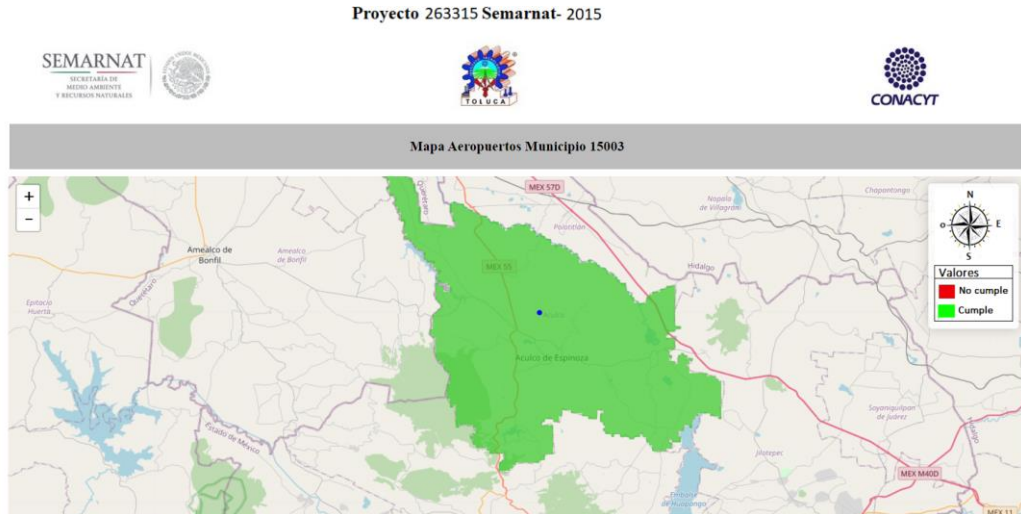
- Localidades mayores de 2500 hab. En el municipio de Aculco, EdoMex., la localidad con una población mayor a 2500 hab se encuentra al noroeste del SDF, lo suficientemente alejado con lo que cumple con esta restricción (Figura 3.9).



adaptado de Mañón-Salas & Hernández-Berriel, 2021

Figura 3.9 Restricción por localidades mayores a 500 habitantes

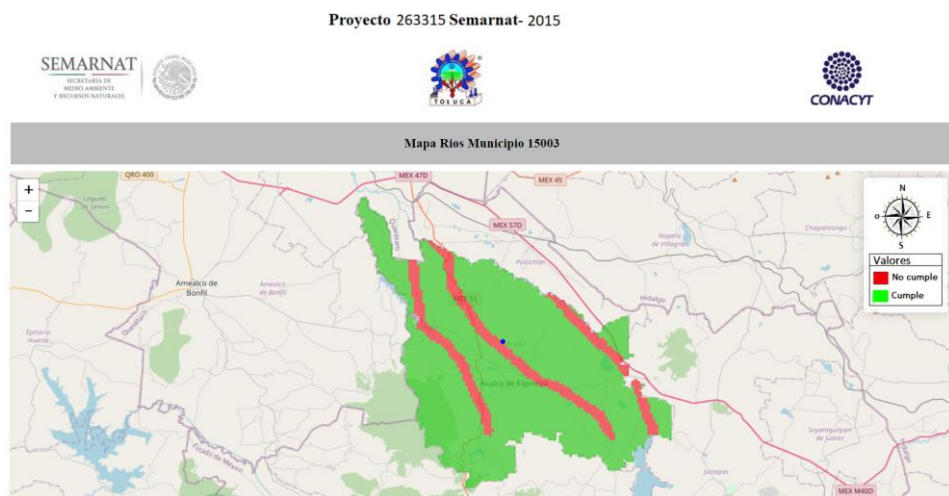
- Aeropuertos. En la figura 3.10 se puede observar que el SDF del municipio de Aculco cumple con esta restricción de 13 km de aeródromos de servicio al público o aeropuertos.



Fuente: adaptado de Mañón-Salas & Hernández-Berriel, 2021

Figura 3.10 Restricción a aeropuertos

- Ríos. Si bien en la figura 3.11, pareciera que el SDF se ubica dentro del Río Prieto, detallando con Google Maps (2021), se determinó que éste se encuentra a 675 m en su punto más cercano, por lo que se cumple con la restricción de una distancia mínima de 500 m a ríos.



Fuente: adaptado de Mañón-Salas & Hernández-Berriel, 2021

Figura 3.11 Restricción por Ríos

- Fallas y/o fracturas. El lugar donde se encuentra el SDF en el municipio de Aculco, no presenta fallas o fracturas (Figura 3.12).

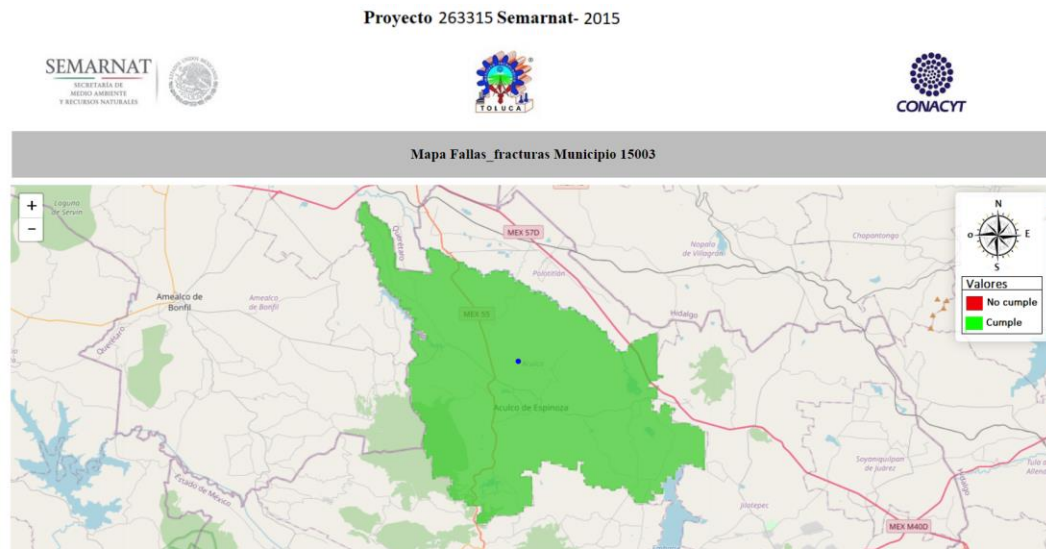


Figura 3.12 Restricción por fallas y/o fracturas

- Zonas arqueológicas. En la figura 3.13 se muestra que el SDF no se encuentran dentro de zonas arqueológicas que impidan su ubicación.

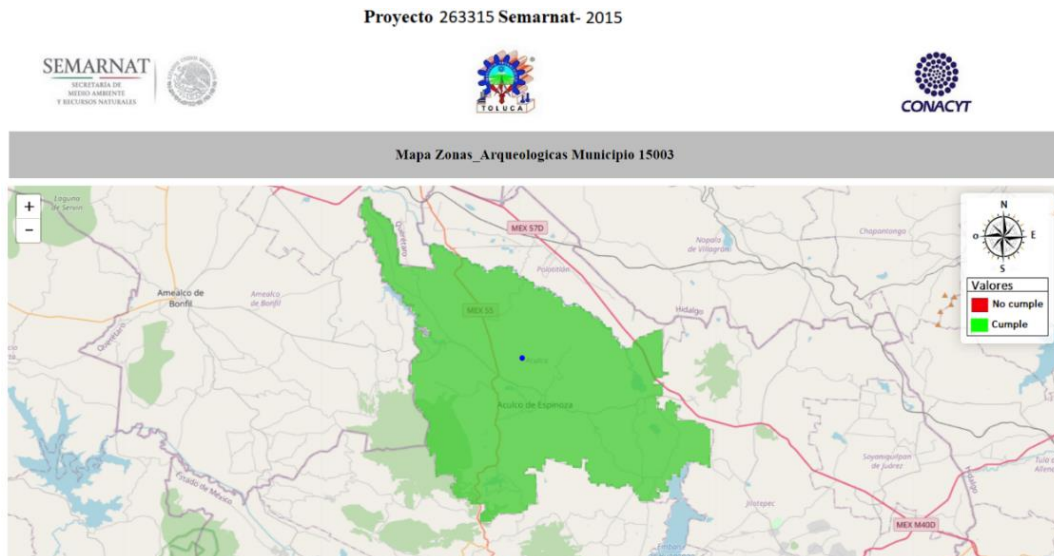
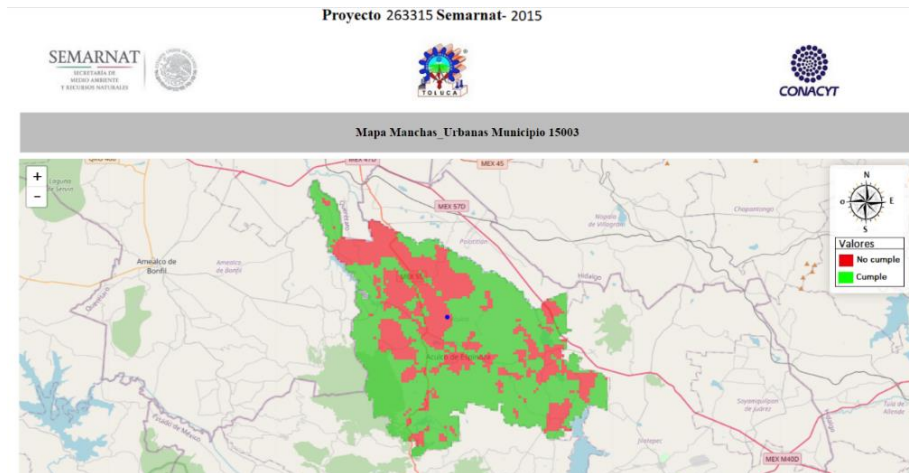


Figura 3.13 Restricción por zonas arqueológicas

- Mancha urbana. La mancha urbana del municipio se presenta en la figura 3.14 en color rojo, aunque parece que el SDF esta cerca, se encuentra a una distancia mayor a 1.0 km (Google Earth, 2020), por lo cumple con la restricción.

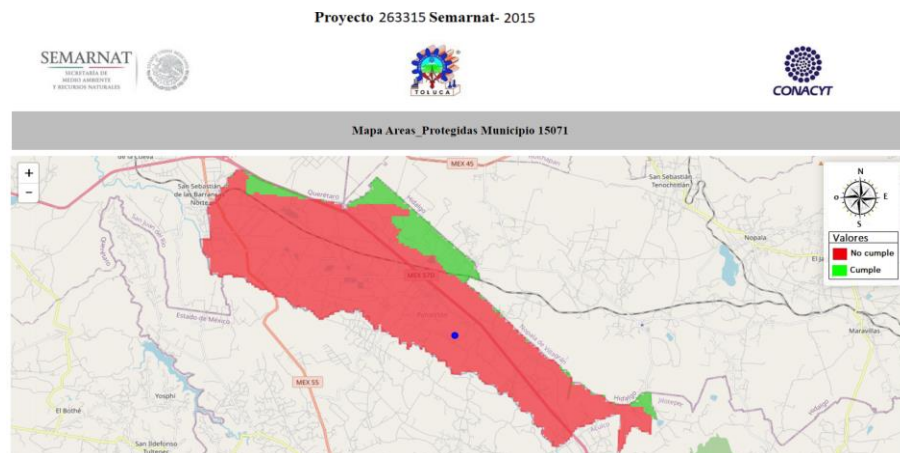


Fuente: adaptado de Mañón-Salas & Hernández-Berriel, 2021

Figura 3.14 Restricción por manchas urbana

b) Análisis de la ubicación del SDF de Polotitlán, EdoMéx.

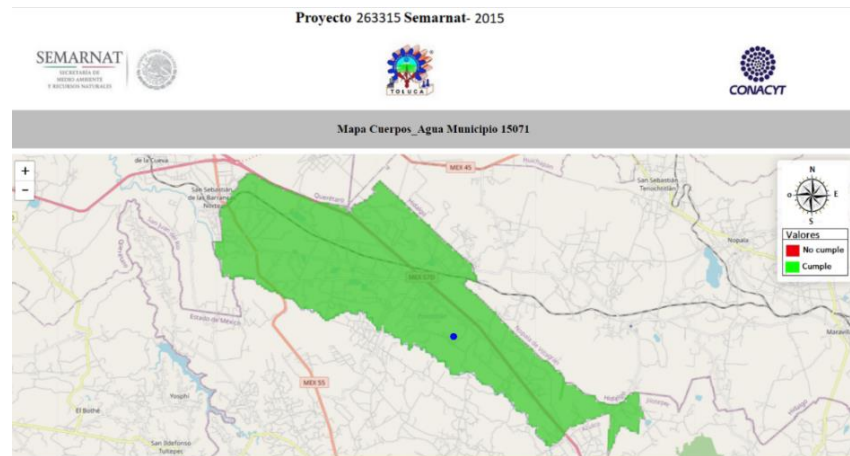
- Áreas protegidas. En el municipio de Polotitlán, EdoMex., se encuentra cerca en el área protegida denominada “Parque Estatal Santuario del Agua Sistema Hidrológico Presa Huapango”, por lo que su ubicación no cumple con esta restricción (Figura 3.15).



Fuente: adaptado de Mañón-Salas & Hernández-Berriel, 2021

Figura 3.15 Restricción por área natural protegida

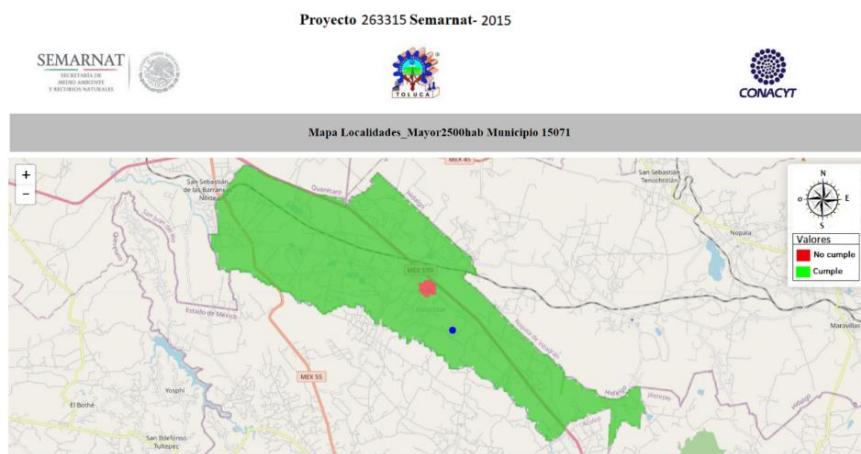
- Cuerpos de agua. El SDF del municipio de Polotitlán, EdoMex., se encuentra a una distancia de 526 m del cuerpo de agua denominado “Presa Derramadero”, por lo que cumple la restricción de estar a más de 500 m, sin embargo, se debe tener presente que está cerca (Figura 3.16).



Fuente: adaptado de Mañón-Salas & Hernández-Berriel, 2021

Figura 3.16 Restricción por cuerpos de agua

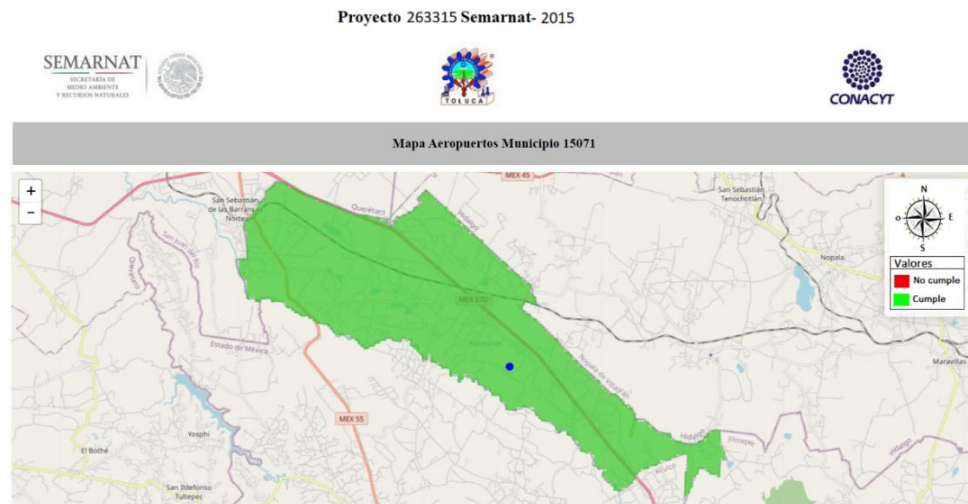
- Localidades mayores de 2500 hab. En el municipio de Polotitlán, EdoMex., la localidad con una población mayor a 2500 hab se encuentra al noroeste del SDF, lo suficientemente alejado, por lo que cumple con esta restricción (Figura 3.17).



Fuente: adaptado de Mañón-Salas & Hernández-Berriel, 2021

Figura 3.17 Restricción por localidades mayores a 500 habitantes

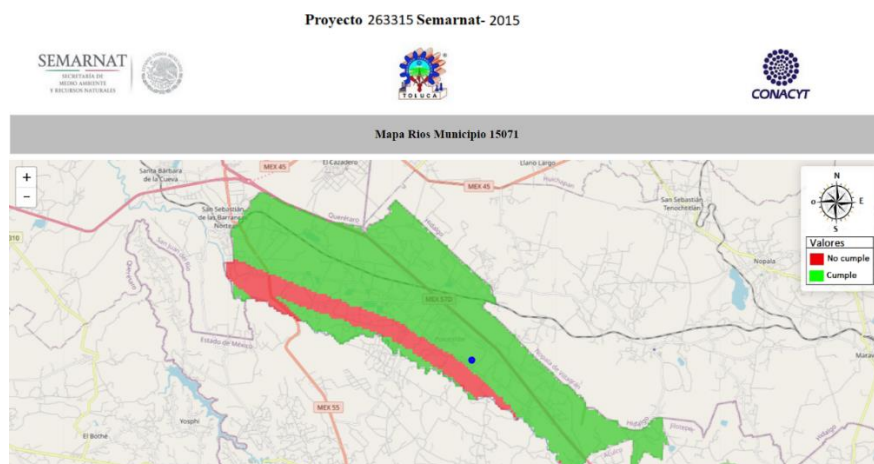
- Aeropuertos. En la figura 3.18 se puede observar que el SDF del municipio de Polotitlán cumple con esta restricción, ya que se ubica a más de 13 km de aeródromos de servicio al público o aeropuertos.



Fuente: adaptado de Mañón-Salas & Hernández-Berriel, 2021

Figura 3.18 Restricción a aeropuertos

- Ríos. Si bien en la figura 3.19 pareciera que el SDF se ubica cerca del Río el Zarco, detallando con Google Maps (2021) se determinó que éste se encuentra a 1 km en su punto más cercano, por lo que se cumple con la restricción de una distancia mínima de 500 m a ríos.



Fuente: adaptado de Mañón-Salas & Hernández-Berriel, 2021

Figura 3.19 Restricción por Ríos

- Fallas y/o fracturas. El lugar donde se ubica el SDF en el municipio de Polotitlán, no se encuentran fallas o fracturas (Figura 3.20).

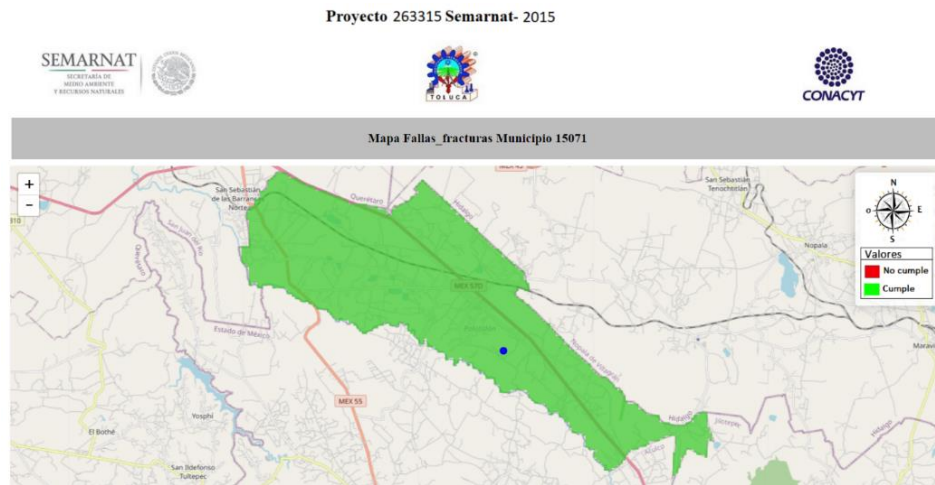


Figura 3.20 Restricción por fallas y/o fracturas

- Mancha urbana. La mancha urbana del municipio se presenta en la figura 3.21 en color rojo, a una distancia mayor a 1.0 km, por lo que el SDF cumple con esta restricción.

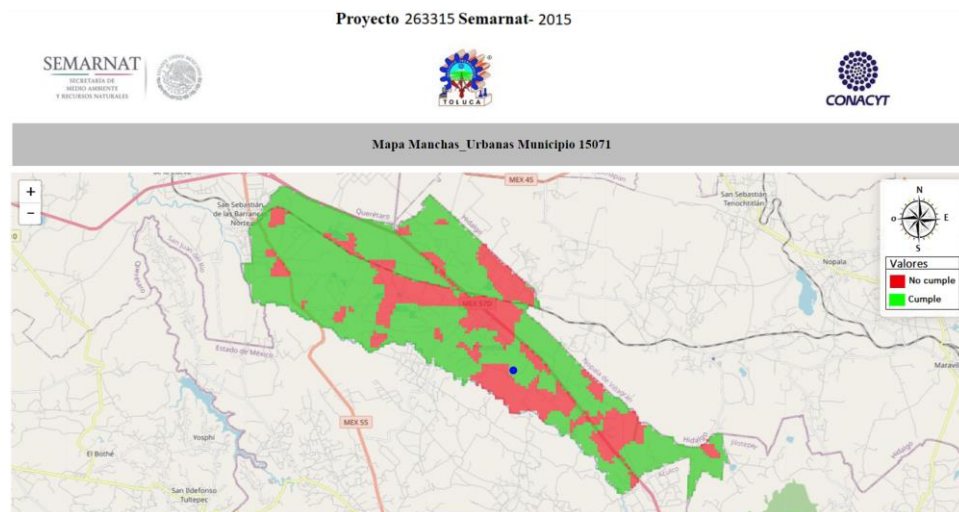


Figura 3.21 Restricción por manchas urbana

3.3 DIAGNÓSTICO DE IMPACTOS PARA LA REHABILITACIÓN VERSUS LA CLAUSURA

Para el diagnóstico, se llevaron a cabo las evaluaciones técnica, ambiental y socioeconómica de ambos sitios. La evaluación técnica comprendió la caracterización de lixiviados, biogás y suelo; y posteriormente la aplicación de la TV. La evaluación ambiental y socioeconómica se realizó con la Matriz de Leopold

3.3.1 Evaluación técnica

a) Caracterizaciones en el SDF de Aculco

- Lixiviados. Los lixiviados fueron muestreados con base a la norma de aguas residuales NMX- AA-003-1980 (SEMARNAT, 2021), debido a que en México no se cuenta con una norma para muestrear lixiviados. La caracterización fisicoquímica de los lixiviados del SDF de Aculco se listan en la tabla 3.4, los cuales se colectaron el 08 de octubre 2021 en un escurrimiento de la base de la celda en operación y en una laguna que se formó en el frente de tiro de los RSU, debido a que el SDF no contaba con una cisterna de lixiviados.

La temperatura de los lixiviados se atribuye a que el sol le daba de lleno a la celda saneada. Los valores determinados muestran que los lixiviados no representan en lo general un riesgo ambiental, debido a que se encuentran dentro de los límites máximos permisibles (LMP) de la NOM-001-SEMARNAT-2021, así como el pH que fue neutro en la laguna y ácido en el escurrimiento.

Los valores altos de las cargas orgánicas (SVT y DQO), Conductividad Eléctrica y Nitrógeno amoniacal (N-NH_4) en los lixiviados, pueden atribuirse a la presencia de residuos orgánicos en los RSU dispuestos. Los valores determinados para N-NH_4 y Sulfatos (SO_4^{-2}) no representan un riesgo para la metanogénesis, por lo que los lixiviados pueden recircularse para acelerar la biodegradación.

Tabla 3.4. Análisis de lixiviados del sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos de Aculco, EdoMex.

PARÁMETRO	FECHA DE ANÁLISIS	CONDICIONES AMBIENTALES (°C)	NORMA O MÉTODO	UNIDADES	ESCURRIMIENTO	LAGUNA	LMP en Ríos P.M-P.D NOM-001- SEMARNAT- 2021
Temperatura "in situ"	11/10/2021	19.0	NMX-AA-008-SCFI-2016	°C	21.0	21.0	35.0
pH "in situ"	11/10/2021	19.0	NMX-AA-008-SCFI-2016	NA	4.4	7.1	6.0-9.0
Conductividad Eléctrica "in situ"	11/10/2021	19.0	NMX-AA-093-SCFI-2000	mS/cm	67.2	108.2	NA
DQO	14/10/2021	19.0	Método dicromato, aprobado por la USEPA	mg/L	2550.0	1210.0	150.0-180.0
N-NH ₄	14/10/2021	19.0	NMX-AA-026-SCFI-2010	mg/L	260.0	195.0	N/A
SO ₄ ⁻²	14/10/2021	19.0	NMX-AA-074-SCFI-2014	mg/L	13.8	5.5	15.0-18.0
Cu	09/11/2021	18.6		mg/L	NQ	NQ	15.0-18.0
Cd	09/11/2021	19.8		mg/L	NQ	NQ	4.0-5.0
Pb	09/11/2021	19.0		mg/L	NQ	NQ	0.1-0.3
Ni	09/11/2021	19.3	NMX-AA-051-SCFI-2016	mg/L	NQ	NQ	0.2-0.3
Zn	09/11/2021	18.5		mg/L	0.65	1.62	2.0-3.0
Cr	09/11/2021	19.0		mg/L	NQ	1.62	10.0-15.0
Fe	09/11/2021	19.3		mg/L	77.9	7.5	1.0-1.2
Mn	09/11/2021	19.0		mg/L	6.2	0.3	NR

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.

En cuanto a metales pesados, Cu, Cd, Pb y Ni, presentan concentraciones no cuantificables (NQ). En ambas muestras de lixiviados Fe rebasó el LMP, lo cual puede atribuirse al tipo de suelo de la zona.

- Biogás

No fue posible llevar a cabo la caracterización de biogás, debido a que el “Sitio de disposición final del municipio de Aculco, EdoMéx”, carece de un sistema de pozos de venteo y tratamiento de biogás.

- Suelo

En la tabla 3.5 se muestran los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados a las muestras de suelos alteradas (previa excavación), tomadas del “Sitio de disposición final del municipio de Aculco, EdoMéx”, el día 08 de octubre de 2021. Las muestras se tomaron en tres niveles de excavación hechos con maquinaria. Se identificaron como M1 la muestra del fondo, M2 la muestra de una terraza intermedia y M3 la muestra de la superficie. La M1 tiene un pH ligeramente básico (8.43), a diferencia de las muestras M2 y M3 que se acercan al pH neutro; además presentó una mayor humedad, debido a su cercanía con una laguna de agua pluvial (Figura 3.22).

Tabla 3.5 Análisis fisicoquímicos de suelo

Muestra	pH	Humedad (%Hbh)	Color (visual)
M1	8.4	14.2	Amarilla
M2	7.6	8.3	Parda
M3	7.4	5.7	Negra

En cuanto a textura, el tipo de suelo M1 se encontró al límite de Franco Arenoso y Arena, con un mínimo de grava al 3%, lo que significa que la filtración que permite es mayor que en una arcilla o limo, por lo que no es recomendable para uso de cubierta de RSU; y de acuerdo lo reportado por la FAO (2021), se considera 2.5 cm/hr de permeabilidad media.



Figura 3.22 Puntos de muestreo de suelos en el Sitio de disposición final del municipio de Aculco, EdoMéx

La textura para los suelos M2 y M3 del “Sitio de disposición final del municipio de Aculco, EdoMéx”, fue de tipo arenoso, lo que significa que la filtración es mayor que en una arcilla o limo, por lo que tampoco son recomendables para uso de cubierta de RSU y se consideran con un valor de 2.5 cm/hr de permeabilidad media (FAO, 2021).

Cualquiera de los suelos muestreados en este SDF, puede utilizarse como base exterior de cubierta, siempre y cuando esté mejorado con algún material cementante, debido a la falta de retención de líquido y plasticidad que tienen los suelos.

b) Caracterizaciones en el SDF de Polotitlán

• Lixiviados

La caracterización fisicoquímica para las muestras de lixiviados obtenidas en el SDF de Polotitlán se listan en la tabla 3.6 los cuales fueron muestreados el 11 de octubre 2021, en un escurrimiento de la base de la celda en operación, debido a que el SDF no contaba con una cisterna de lixiviados. La temperatura de lixiviado se atribuye a que el sol le daba de lleno a la celda saneada. Los valores determinados muestran que el lixiviado no representa en lo general un riesgo ambiental, debido a que se encuentra dentro de los parámetros máximos permisibles (LMP) de la NOM-ECOL-001-1996, en estas muestras de lixiviados y muestras de cuerpos de agua cercanos no se detectaron (ND) metales pesados.

Los valores altos de las cargas orgánicas (DQO), Conductividad Eléctrica y Nitrógeno amoniacal (N-NH_4) en los lixiviados, pueden deberse a los residuos orgánicos presentes en los RSU. Los valores determinados para N-NH_4 y Sulfatos (SO_4^{-2}) no representan un riesgo para la metanogénesis, por lo que los lixiviados pueden recircularse sin riesgo.

Tabla 3.6. Análisis de lixiviados del sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos de Polotitlán, EdoMex.

PARÁMETRO	FECHA DE ANÁLISIS	CONDICIONES AMBIENTALES (°C)	NORMA O MÉTODO	UNIDADES	LTL	LN	BORDO	PRESA	M2	LMP en Ríos P.M-P.D NOM-001-SEMARNAT-2021
Temperatura "in situ"	11/10/2021	19.0	NMX-AA-008-SCFI-2016	°C	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	35
pH "in situ"	11/10/2021	19.0	NMX-AA-008-SCFI-2016	NA	8.2	7.8	4.4	7.1	7.8	6.0-9.0
Conductividad Eléctrica "in situ"	11/10/2021	19.0	NMX-AA-093-SCFI-2000	mS/cm	2.2	2.3	67.2	108.2	2.3	NA
DQO	14/10/2021	19.0	Método dicromato, aprobado por la USEPA	mg/L	5400.0	2500.0	346.0	271.0	484.0	150-180
N-NH4	14/10/2021	19.0	NMX-AA-026-SCFI-2010	mg/L	337.0	115.0	8.6	1.7	9.7	N/A
SO ⁴ -2	14/10/2021	19.	NMX-AA-074-SCFI-2014	mg/L	5.3	7.3	0.2	0.1	0.2	15-18
Cu	ND	ND		mg/L	ND	ND	ND	ND	ND	4.0-6.0
Cd	ND	ND	NMX-AA-	mg/L	ND	ND	ND	ND	ND	0.1-0.2
Pb	ND	ND	051-SCFI-	mg/L	ND	ND	ND	ND	ND	0.2-0.4
Ni	ND	ND	2016	mg/L	ND	ND	ND	ND	ND	2.0-4.0
Zn	ND	ND		mg/L	ND	ND	ND	ND	ND	NR

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. LTL=Muestra lixiviado tiradero laguna, LN= Muestra de lixiviado de laguna norte, BORDO=Muestra natural bordo, PRESA=Muestra de presa Polotitlán, M2=Muestra de agua natural, Laguna= Agua estancada

- Biogás

No fue posible realizar la caracterización de biogás del SDF de Polotitlán, debido a que el sistema de tres pozos de biogás no está funcionando (Figura 3.23).



Figura 3.23 Pozo de captación de biogás del sitio de disposición final de Polotitlán, EdoMéx.

- Suelo

En la figura 3.24 se observan los puntos en los cuales se tomaron las diferentes muestras para caracterizar los suelos del SDF de Polotitlán, EdoMéx. Las muestras fueron identificadas como alteradas superficiales (Figura 3.26), debido a que no fue posible perforar el suelo y preservar las muestras (DOF, 2003b).



Fuente: Adaptado de Google Earth, 2021

Figura 3.24 Puntos de muestreo de suelo en el sitio de disposición final de Polotitlán, EdoMéx

En el recorrido visual dentro del SDF se detectaron dos tipos de suelo, por lo que se tomaron dos muestras por duplicado; dos de suelo sano (M1-SS y M2-SS) para determinar textura y dos de suelo contaminado con lixiviado (Suelo 1 y Suelo 2) para determinar su afectación (Figura 3.25).

Las muestras M1-SS y M2-SS fueron sometidas a una identificación de suelos manual y visual (Tabla 5.10), donde la primera presentó un color rojizo y el segundo café blancuzco. Las consideraciones de resistencia son medianas y bajas. Con los resultados de la granulometría (Figura 3.26), para la muestra M1-SS la Textura del suelo resultó Franco-Arenosa-Gravosa: 19% grava, 72% arena y 9% limo.



Figura 3.25 Muestreo de suelo en el sitio de disposición final de Polotitlán, EdoMéx.



Figura 3.26 Prueba granulométrica de suelo sano del sitio de disposición final de Polotitlán, EdoMéx.

En cuanto a la composición de la muestra M2-SS, la granulometría fue: 1.3% grava, 95.4% arena y el 3.3% limo, resultando con el método del Triángulo Textural, como un suelo tipo arena bien graduada. En ambas muestras de suelos sanos, las partículas finas corresponden a un limo de baja plasticidad.

3.3.2 Aplicación de tabla de verificación

El llenado de la TV se realizó con base a la información proporcionada por el personal responsable de Limpia Pública del municipio de Polotitlán y Aculco, EdoMex. (Administración 2018-2021), a la inspección visual en el SDF y a los mapas generados con el SIGMIRSU.

- a) Aplicación de TV a SDF Aculco. La tabla 3.6 se muestra el puntaje de cumplimiento de la TV y las áreas de oportunidad del SDF de Aculco, EdoMex. Si bien en la subcategoría 6.1 se cumplió con todos los criterios. Se obtuvo incumpliendo total en las subcategorías 6.3 y 6.4 y en la categoría 9. Cabe aclarar que el apartado 8 denominado “Requisitos mínimos que deben cumplir los Sitios de Disposición Final de los RSU, tipo D”, no se consideró para el SDF de Aculco, ya que éste es tipo C.

El nivel de cumplimiento general de la TV fue del 12.5%, 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).

Tabla 3.6 Concentrado de Tabla de Verificación y áreas de oportunidad del SDF de Aculco, EdoMex

SITIO	PUNTUAJE REQUERIDO	PUNTUAJE OBTENIDO	EVALUA- CIÓN	ÁREAS DE OPORTUNIDAD
Categoría			C	Puede recibir hasta 50 Ton/día
6.1. Restricción para ubicación del siti	7	6	85.7%	La traza urbana se encuentra a una distancia de 522 m, requiriéndose implementar barreras naturales. No se encuentran cuerpos de aguas cernos
6.2, 6.3 y 6.4. Estudios y análisis previos	8	0	0.0%	No cuenta con ningún tipo de estudio previo para la selección del sitio, ni a la construcción y operación. Hasta antes de esta investigación, carecía de estudio de generación de biogás ni de lixiviados. Es pertinente se realicen en épocas de estiaje y lluvias.
7. Caracterís- ticas constructivas y operativas del sitio	41	2	4.9%	“Requiere coeficiente de conductividad hidráulica; extracción, captación, conducción y quemado del biogás; captación, extracción y recirculación de lixiviados, drenaje fluvial parcial; dispersión parcial de materiales ligeros, área de emergencia; compactación y cobertura diaria de RSU; control parcial de fauna nociva, registro parcial de entrada y cantidad de RSU que reciben; grado de estabilización de los residuos y manual de procedimiento de operación. No se han aplicado medidas para no recibir residuos mencionados en el punto 7.8. de la NOM-083-SEMARNAT-2003”
9. Clausura del sitio	8	0	0	Carece de sistema de captación de biogas y lixiviado. No cuenta con “programa de monitoreo de biogás y lixiviados posclausura” y carece de un “Programa de posclausura”.
Evaluación del cumplimiento	64	8	12.5%	

b) Aplicación de TV a SDF Polotitlán. La tabla 3.7 se muestra el puntaje de cumplimiento de la TV en las evaluaciones realizadas el 11 de octubre de 2021 y el 23 de marzo de 2022, así como y las áreas de oportunidad detectadas la segunda vez que se evaluó el SDF de Polotitlán, EdoMex.

Si bien en la subcategoría 6.1 se cumplió e 5 de los 6 criterios, se obtuvo incumpliendo total en las subcategorías 6.2, 6.3 y 6.4, así como de las categorías 8 y 9. Debido a que este SDF es tipo D, no aplican las subcategorías 6.2, 6.3 y 6.4 (NA) por ser un SDF tipo D, por lo que, aunque se revisaron y se detectó carencias, no afectaron a la evaluación global.

En la primera evaluación con la TV su nivel de cumplimiento general fue del 28.6% y en la segunda fue de 38.1%, debido a que sus autoridades atendieron algunas de las recomendaciones brindadas después de la primera. Sin embargo, aún tiene varias áreas de oportunidad, las cuales se recomienda atender de inmediato las áreas de oportunidad aun detectadas, para mejorar la operación del SDF y cumplir con un mayor nivel los criterios de la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004).

Tabla 3.7 Concentrado de Tabla de Verificación y áreas de oportunidad del SDF de Polotitlán, EdoMex.

SITIO	PUNTUAJE REQUERIDO	PUNTUAJE OBTENIDO		2a. EVA- LUACIÓN	ÁREAS DE OPORTUNIDAD
Categoría		1a.	2a.	D	Puede recibir hasta 10 t/día
6.1 Restricción para ubicación del sitio	7	5	5	71.4%	La traza urbana (rancherías) se encuentra a una distancia de 476 m, requiriéndose implementar barreras naturales. Se localiza a 526 m de la Represa el Derramero que es un área natural protegida. Se recomienda realizar los trabajos civiles necesarios para prevenir escurrimiento e infiltraciones de lixiviados.
6.2-6.4 Estudios y análisis previos	8 (NA)	0	0	NA	No Aplica (NA) por ser un SDF tipo D

Tabla 3.7 Concentrado de Tabla de Verificación y áreas de oportunidad del SDF de Polotitlán, EdoMex (Continuación)

7. Características constructivas y operativas del sitio	41 (NA)	0	0	NA	No Aplica (NA) por ser un SDF tipo D
8. Requisitos mínimos que debe cumplir.	6	1	3	50.0	“Realizar compactación y cobertura del total de los RSU. La implementación mayor control de acceso e instalación de cerca perimetral para controlar fauna nociva”
9. Clausura del sitio	8	0	0	0	“No cuenta con un sistema de captación de biogas y lixiviado. No cuenta con programa de monitoreo de biogás y lixiviados posclausura, no cuenta con programa posclausura”
Evaluación del cumplimiento	21	6	8	38.1 %	

3.3.3 Evaluación ambiental y socioeconómica.

Esta evaluación se realizó mediante la Matriz de Leopold, identificándose 90 interacciones entre las actividades y los componentes del entorno.

a) El SDF de Aculco, EdoMéx. La actividad de Disposición de RP no se evalúo, ya que como se registró en la CE, se tiene control del ingreso de los residuos gracias a la caseta y personal de vigilancia.

La Matriz de Leopold reportada en el Anexo C, muestra niveles de significancia Severo, Moderado y Bajo; donde las actividades que tuvieron mayor impacto negativo fueron “Manejo de lixiviados” y “Manejo del biogás generado”. Para el “Manejo de lixiviados” se obtuvo un nivel de significancia severo (7.0), atribuible a que se carece de un sistema para captación, control y tratamiento de lixiviados, los cuales se están infiltrando al suelo y afectan la vegetación del lugar. El “Manejo del biogás generado” obtuvo un nivel de significancia severo (6.2), debido a la carencia de un sistema que permita la captación y al menos la combustión del metano, el

cual es un gas de efecto invernadero.

Los Atributos de los Componentes Biofísicos con nivel de significancia Severo fueron: “Calidad de agua”, “Cambio de uso de suelo”, “Agua subterránea”, “Gases” y “Estabilidad del suelo”, por la carencia de infraestructura que permita mitigar el impacto de los RSU, lixiviados y biogases generados.

En cuanto a Componentes Socioeconómicos, los Atributos con mayor nivel de significancia fueron “Parques y reservas forestales”, “Seguridad laboral”, “Vistas escénicas”, “Uso potencial del suelo” y “Calidad de vida”; debido a que este SDF se encuentra dentro de un área natural protegida y no cuenta con algún procedimiento para evitar la contaminación a sus alrededores, ni con equipo de protección personal para los trabajadores.

Los Atributos con niveles de significancia Moderado fueron: “Calidad de suelo”, “Olores”, “Emprendimientos productivos”, “Salud poblacional y laboral”, “Remoción de cobertura vegetal”, “Calidad de espacio abierto”, “Material particulado” y “Proliferación de nuevas especies”; estos Atributos muestran áreas de oportunidad, que deben atender las autoridades de Aculco, EdoMéx, antes de que se incremente el impacto en ellos.

El nivel de significancia global resulto Severo (5.7), por lo que se recomienda tomar acciones para disminuir las afectaciones, sobre todo en las categorías de Suelo y Agua, que pertenece a los componentes biofísicos.

b) Para el sitio de Polotitlán se realizaron dos evaluaciones en diferentes épocas.

En la Figura 3.27 se muestra la comparación de octubre 2021 y marzo 2022 para los subsistemas biofísicos. En octubre 2021, los atributos que presentaron intensidad Crítica fueron “Material particulado”, “Calidad del agua” y “Gases”; entre la intensidad Severa se obtuvieron “Agua subterránea”, “Calidad del suelo”,

“Olores”, “Productos agrícolas”, “Remoción de cobertura vegetal” y “Ahuyentamiento de especies nativas”; mientras que la intensidad Moderada destacó “Ruidos”; “Estabilidad del suelo”, “Cambio de uso de suelo” y “Proliferación de nuevas especies”.

Las autoridades responsables del manejo de RSU del municipio de Polotitlán empezaron con obras de saneamiento en este sitio en enero 2022; por lo que, en la evaluación de los subsistemas biofísicos de marzo 2022, ya no se obtuvieron intensidades Críticas en los atributos y solo “Material particulado” fue Severo. Quedaron en la intensidad Moderada los atributos “Calidad del suelo”, “Agua subterránea”, “Calidad del agua”, “Gases”, “Olores”, “Estabilidad del suelo”, “Ruidos”, “Productos agrícolas”, “Remoción de cobertura vegetal” y “Ahuyentamiento de especies nativas”; mientras que el atributo “Proliferación de nuevas especies” pasó a una intensidad baja.

Los atributos biofísicos beneficiados por la atención del municipio de Polotitlán EdoMéx. en su SDF en marzo 2022 fueron: “Calidad del suelo”, “Agua Subterránea”, “Calidad de agua”, “Material particulado”, “Gases” y “Olores”, pasando de una intensidad Severa a Moderada, esto es gratificante ya que se están disminuyendo los impactos ambientales generados por el SDF.

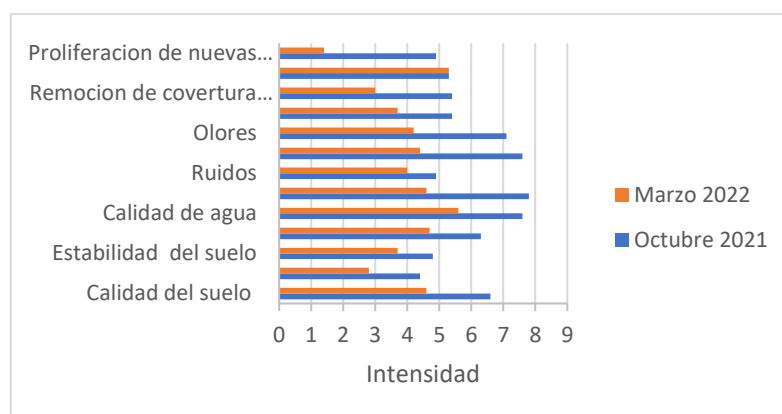


Figura 3.27 Comparación de los componentes biofísicos

En la Figura 3.28 se muestra la comparación de octubre 2021 y marzo 2022. La evaluación de los subsistemas Socioeconómicos en octubre 2021 mostró que el atributo con mayor intensidad (critico) fue “Áreas Naturales Protegidas”, en la intensidad severa resulto “Seguridad laboral”, “Calidad de espacio abierto”, “Vistas escénicas y panorámicas”, “Ingresos económicos adicionales”, “Emprendimientos productivos”. “Salud poblacional” y la “Calidad de vida”, “Sitios de interés arqueológico cultural”.

En la evaluación de marzo 2022, los subsistemas Socioeconómicos, el atributo con intensidad severa fue “Áreas Naturales Protegidas”, “Ingresos económicos adicionales” y emprendimiento productivo. En las consideraciones Moderadas se tuvieron: “Vistas escénicas y panorámicas”, “Calidad de espacio abierto”, “Salud poblacional y laboral”, “Calidad de vida”, “Sitios de interés arqueológico y cultural”.

Los atributos socioeconómicos beneficiados con el mejoramiento observado en marzo 2022 son “Vistas escénicas y panorámicas”, “Calidad de espacio abierto”, “salud poblacional y laboral”, “ingresos económicos adicionales” y “Calidad de vida”, esto se atribuye a la contratación de personal capacitado en el área ya que este puede disminuir costos en la operación y generar ganancias en el manejo correcto de residuos.

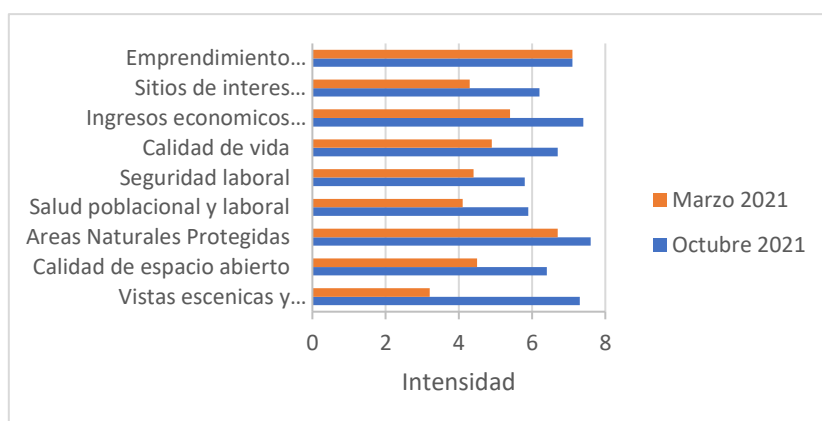


Figura 3.28 Comparación de los componentes socioeconómicos

La intensidad global en octubre 2021 resultó ser severa (6.4), para marzo 2022 resultó ser moderada (4.6), aunque el impacto ha disminuido, se recomienda tomar acciones para disminuir las afectaciones, sobre todo en las categorías de Suelo y Agua, que pertenece a los subsistemas biofísicos y por la cercanía de bordos y la Presa el Derramadero; debido a que el agua que contienen se utiliza para riego agrícola.

3.3.4 Recopilación de costos de operación

Gracias a las facilidades brindadas por la empresa Constructora y Operadora de Rellenos Sanitarios S. A. de C.V. fue posible realizar una Estancia de Investigación en uno de los SDF que operan, por lo que fue posibles recabar información de primera mano. A continuación, se describen costos más representativos:

a) Costos de operación CAT 826C Compactador

La maquinaria utilizada para compactar los RSU a una densidad de 1000 kg/m^3 , es una Caterpillar 826c del año 1991 (Figura 3.29), la cual tiene las siguientes especificaciones: transmisión planetaria con cambio de fuerza de velocidades, 4 marchas adelante, 4 marchas atrás, Velocidad máxima 32.5 km/h, ruedas con un ancho del rodillo delantero 1200 mm, Diámetro del rodillo delantero 1525 mm, Ancho del rodillo trasero 1200 mm, Diámetro del rodillo trasero 1525 mm, Potencia total 254.3 kW, Potencia efectiva 234.9 kW, Potencia medida en 2100 RPM, Cilindraje de 14.6 l, Número de cilindros 6 y Turbo alimentación (Maquqam, 2015).



Figura 3.29 Maquinaria compactadora CAT 826C

En la tabla 3.8 se muestran ejemplos de las horas trabajadas por la maquina compactadora CAT 826C en un intervalo de tiempo de 15 días, de igual forma se muestran los RSU removidos por la maquinaria y el consumo de Diesel gastado por día considerando un rendimiento de 13.2 L/h, dando como resultado un promedio de 70.5 L/ día, el cual en costos se transfiere a \$ 1663.50 (mil seiscientos sesenta y tres 50/100 MN) en un promedio de 5.6 horas trabajadas.

Tabla 3.8. Rendimiento de CAT 826C

FECHA	PATA DE CABRA HORAS TRABAJADAS	CANTIDAD DE RSU REMOVIDAS (t/h)	CONSUMO DE LTS DE DIESEL (RENDIMIENTO APROX. 13.2 L/h)
	HORÓMETRO		
01/06/2022	7.40	42.78	97.68
02/06/2022	6.40	50.08	84.48
03/06/2022	5.50	50.03	72.6

El mantenimiento de la CAT 826C se realiza cada 250 a 300 horas de trabajo, que es aproximadamente de un mes a mes y medio; el cual principalmente consta de cambios de filtros y aceite para la transmisión. En la tabla 3.9 se listan algunos de

los insumos utilizados. Cabe resaltar que el mantenimiento es realizado por el mismo personal que se encarga de la operación de la maquinaria.

Tabla 3.9 Costos de mantenimiento de CAT 826C

CANTIDAD	UNIDAD	INSUMO	COSTO UNITARIO (\$ MN)	COSTO TOTAL (\$ MN)
2	PZA	Filtro de aire	600.00	1200.00
2	PZA	Filtro hidráulico	2000.00	4000.00
1	PZA	Filtro de aceite	2300.00	2300.00
1	PZA	Filtro de Diesel	1000.00	1000.00
50	LT	Aceite de motor	170.00	8500.00
20	LT	Aceite hidráulico	170.00	3400.00
Total				\$ 20, 400.00

b) Costos de Rehabilitación y Clausura

Durante la Estadía de Investigación se contó con el apoyo del C.P. Jesús Herrera y el Ing. Ismael Martínez, los cuales brindaron información sobre los principales factores que se deben de tomar en cuenta al momento de pretender ubicar un RESA. Entre estos factores se tienen: voluntad municipal, capacidad de superficie y carencia de conflictos sociales, estudios previos requeridos por la NOM-083-SEMARNAT-2003 (para los SDF tipo A tienen un costo aproximado de \$500,000 (Quinientos mil pesos 00/100 MN, sin impuestos ni utilidad).

También mencionaron que antes de realizar una inversión, es importante contar con el informe técnico de prefactibilidad emitido por la SEMARNAT (previa solicitud de la empresa), el cual no tiene costo; así como los requisitos que solicita la Procuraduría de Protección al Ambiente del Estado de México (PROPAEM) para la remediación y clausura de un SDF son:

- Levantamiento topográfico
- Conducción, extracción y tratamiento de biogás

- Conducción, extracción y tratamiento de lixiviados
- Cerca perimetral
- Caminos internos

Cabe mencionar que no solicitan la manifestación de impacto ambiental, ni un proyecto ejecutivo. Otros tópicos importantes son los siguientes:

- El desplantado de pozos de venteo, ranurado, con piedra bola, malla electrosoldada calibre 66 de acero al carbón tiene un costo aproximado de \$50,000.00 por 6 m de altura.
- La instalación de ducto de lixiviado tiene un costo de \$1,200.00 (mil doscientos pesos 00/100 MN) el metro lineal.
- El metro lineal de cerca perimetral ya instalada tiene un costo de \$1,000.00 (mil pesos 00/100 MN).
- La renta de una excavadora con operador sin combustible tiene un costo de \$200,000.00 (doscientos mil pesos 00/100 MN) al mes.
- La renta de una Compactadora de RSU con operador, sin combustible, tiene un costo de \$250,000.00 (doscientos mil quinientos pesos 00/100 MN) al mes con turnos de 8 horas.
- Se necesita mínimo el ingreso de 120 t/día de RSU, para que un RESA sea rentable.

3.3.5 Evaluación global

Es importante mencionar que las evaluaciones técnicas, ambientales y socioeconómicas se entregaron a las autoridades de cada municipio. En la tabla 3.10 se concentran los resultados mediante los que se les puede calificar como SDF susceptibles de ser rehabilitados para continuar dando servicio a sus habitantes.

Tabla 3.10 Concentrado de resultados de evaluaciones técnicas, ambientales y socioeconómicas

EVALUACION TÉCNICA			EVALUACION AMBIENTAL Y SOCIOECONÓMICA		
Tabla de verificación			Matriz de Leopold		
	Aculco	Polotitlán		Aculco	Polotitlán
	Evaluación	Evaluación		intensidad de impacto	intensidad de impacto
Aplicación	oct-21	mar-22	Aplicación	oct-21	mar-22
Categoría	C	D	actividades en la disposición final	C	D
6.1. Restricción para ubicación del sitio	100.00%	71.40%	1. Transporte y descarga	3.3	3.2
6.2, 6.3 y 6.4. Estudios y análisis previos	0%	0%	2. Disposición de RSU y RME	5.8	4.8
7. Características constructivas y operativas del sitio	2.50%	0.00%	3. Disposición de RP	no aplica	no aplica
8. Requisitos mínimos que deben cumplir los Sitios de Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial, tipo D (menos de 10 toneladas diarias)	no aplica solo para SDF tipo D	17%	4. Compactación y cobertura	5.5	4.2
9. Clausura del sitio	0	0	5. Manejo del biogás generado	6.3	5.3
Evaluación del cumplimiento	12.50%	28.60%	6. Manejo de lixiviados	7.1	5.2
			7. Contratación de maquinaria, personas y servicios	no aplica	no aplica
			Intensidad del impacto total	5.7	4.6

Los SDF evaluados representan un riesgo al ambiente y la salud de las poblaciones aledañas; así como de sus operadores; esto debido a falta de infraestructura y operación como lo indica la nom-083-SEMARNAT-2003, siendo un gran punto de mejora ya que los sitios cuentan con una buena ubicación para el SDF, así como una vida útil proyectada a más de 10 años, siendo viable la

inversión para su sanitización y rehabilitación, ayudando de igual forma a mitigar los impactos ambientales y otorgando su servicio por más tiempo.

En el caso del SDF de Polotitlán, las autoridades realizaron trabajos de mantenimiento y operación para reducir los impactos negativos evidenciados en la primera evaluación. Los resultados de las evaluaciones se entregaron a las autoridades de cada municipio, calificándoles como SDF susceptibles de ser rehabilitados para continuar dando servicio.

CONCLUSIONES

Con ayuda del método AHP se priorizaron los dos municipios a estudiar considerando, la variable ambiental más importante para su selección, seguida de las variables social y económica.

Es importante el saneamiento del área impactada y la construcción de pozos, para minimizar las emisiones a la atmósfera de CH_4 y las emisiones difusas a los terrenos aledaños al SDF de Aculco. Esto último ayudará a reducir los impactos negativos a los árboles y vegetación circundante, la cual requiere ser incrementada para servir como barrera natural a las poblaciones cercanas.

El SDF de Polotitlán carece de captura de lixiviados, propiciando que el suelo tenga un impacto mayor, así como riesgo de contaminación de mantos freáticos por infiltración de éstos. Los tubos de venteo están fuera de funcionamiento, emitiendo CH_4 de manera incontrolada. Además, es importante se realice la compactación y cubrimiento de todos los RSU con tierra, para la minimización de olores y partículas que pueda arrastrar el viento a poblaciones aledañas.

El uso de herramientas tecnológicas como el SIGMIRSU fue de gran ayuda para la ubicación de un SDF bajo la NOM-083-SEMARNAT-2003; así como la aplicación de la TV a los SDF bajo estudio, lo que permitió determinar que son susceptibles de ser rehabilitados, para minimizar los impactos ambientales y así poder continuar dando servicio a las poblaciones de Aculco y Polotitlán, EdoMéx.

REFERENCIAS

- Buenrostro-Delgado O., Hernández-Berriel M.C., Hernández-Paniagua I.Y., Mañón-Salas M.C. (2019). Households as Sources Contributing the Most to Urban Solid Wastes Production: Implications for a Better Management and Disposal. *Journal of Environmental Protection*. Vol. 10, pp. 1072-1084, <http://www.scirp.org/journal/jep> ISSN Online: 2152-2219 ISSN Print: 2152-2197. <https://doi.org/10.4236/jep.2019.108063>.
- Bolívar M. (2019) Evaluación de impactos ambientales del botadero municipal del Cantón Arenillas. Tesis de licenciatura. Machala. (Documento web, ultimo acceso 17/01/2021). <http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/15022/1/TTFCS-2019-GEADE00011.pdf>
- Cuarto-Gonzaga J.M., Hernández-Berriel M.C., Díaz-Archundia L.V., Galeana-Martínez E. (2016). Estimación con el Modelo Mexicano de Biogás con y sin caracterización de Residuos Sólidos Urbanos en un Relleno Sanitario del Estado de México. XII Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia. Centro de Investigaciones en Óptica, A. C. 13 al 15 de Mayo 2015 Querétaro, Qro. ISSN 2448-5063. http://congresos.cio.mx/memorias_congreso_mujer/archivos/extensos/sesion5/S5-FMCT12.pdf
- Díaz-Archundia L.V. (2016). Diagnóstico de la generación de biogás en tres sitios de disposición de residuos sólidos urbanos en el Estado de México. Tesis de Doctorado en Ciencias Ambientales. Instituto Tecnológico de Toluca.
- Díaz-Archundia L.V., Buenrostro-Delgado O., Mañón-Salas M.C., Hernández-Berriel M.C. (2017). Emisión de Gases de Efecto Invernadero de Residuos Sólidos urbanos en dos diferentes Sitios de Disposición Final en México *Revista Ingeniería Investigación y Tecnología*. ISSN: 1405-7743. Volumen XVIII (2), abril-junio 2017. 149-159 pp. ISSN 1405-7743. FI-UNAM. <http://www.ingenieria.unam.mx/~revistafi/numeros/2017/v18n2-03.pdf>

- DOF. (2015). NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de agua - Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba. Diario Oficial de la Federación (DOF). (Documento WEB, último 22/08/2020). <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf>
- DOF. (2004). NOM-083-SEMARNAT-2003. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Diario Oficial de la Federación (DOF), Ciudad de México, México, 20 de octubre de 2004.
- DOF. (2017). NMX-AA-132-SCFI-2016 Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra. Diario Oficial de la Federación (DOF), Ciudad de México, México. (Documento WEB, último acceso: 29/11/2021) <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2010/nmx-aa-132-scfi-2016.pdf>
- DOF. (2003b). NMX-CC-416-ONCCE-2003, Especificaciones de muestreo de estructuras terreas, Diario Oficial de la Federación, 10/10/2003
- Domínguez-Vargas D.S. (2021). Evaluación de los aspectos socio-económicos para la ubicación de un Centro Integral de Residuos Regional en el Estado de México. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental. Instituto Tecnológico de Toluca. En proceso; obtención del grado en febrero 2021.
- Escalona, 2014. Daños a la salud por mala disposición de residuales sólidos y líquidos en Dili, Timor Leste. Revista Cubana de Higiene y Epidemiología. (Documento Web, último acceso 02 /Enero /2022) <http://scielo.sld.cu/pdf/hie/v52n2/hig11214.pdf>
- GM. (2018). Definición y objetivo de la evaluación del impacto ambiental. Gobierno del estado de México. (Documento Web, último acceso 02 /Enero /2022) <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/definicion-y-objetivo-de-la-evaluacion-del-impacto-ambiental>
- Google (2020a). Google Maps. (Documento Web, último acceso: 11/Enero/2021). <https://www.google.com.mx/maps/@23.625269,-102.540613,5z>

- Google (2020b). Google Eart. (Documento Web, último acceso: 11/Enero/2021).
<https://earth.google.com/web/>
- Hernández-Berriel M.C., Carreño de León M.C., Mañón-Salas M.C., de la Rosa-Gómez I., Castro-Frontana D.G., Piña-Guzmán A.B., Robles-Martínez D., Buenrostro-Delgado O., Lobo-García de Cortázar A., Colomer-Mendoza F.J., Gallardo-Izquierdo A. (2017). Ubicación de futuros rellenos sanitarios intermunicipales en el Estado de México y entidades aledañas. Primer Encuentro Científico y Técnico, Serie Avances de Investigación, Fondo Sectorial de Investigación Ambiental SEMARNAT-CONACYT, realizado el 1 y 2 de junio de 2017, páginas 243-247.
- H. Ayuntamiento de Aculco. (2016). Bando Municipal de Aculco 2016. (Documento WEB, último acceso 23/10/2021).
<https://legislacion.edomex.gob.mx/sites/legislacion.edomex.gob.mx/files/files/pdf/bdo/bdo003.pdf>
- H. Ayuntamiento de Aculco. (2021). Bando Municipal de Aculco 2021. (Documento WEB, último acceso 23/10/2021).
<https://legislacion.edomex.gob.mx/sites/legislacion.edomex.gob.mx/files/files/pdf/bdo/bdo2021/bdo003.pdf>
- H. Ayuntamiento de Polotitlán (2021). Bando Municipal de Polotitlán 2019-2021. (Documento WEB, último acceso 23/10/2021).
https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo3/2019/43041/10/3cad6c9b6ee6a0419c8dc72d527e3575.pdf
- Iglesias D. (2007). Costos económicos por la generación y manejo de residuos sólidos en el municipio de Toluca, Estado de México. Equilibrio Económico, Año VIII, Vol. 3 No. 2, pp. 131-148 Segundo Semestre de 2007.
- INECC. (2020). Panorama de la generación y manejo de residuos sólidos y médicos durante la emergencia sanitaria por COVID-19. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). Julio 2020.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/569684/Residuos_COVID.pdf

- INEGI. (2014). Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2013 (CNGMD), Módulo 6: Residuos Sólidos Urbanos. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).
- INEGI. (2016). Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos 2016. Ciudad de México, México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (Documento Web, último acceso: 10/Enero/2020). <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825087340>.
- INEGI (2020). Mapa Digital V.6.3.0. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (Documento Web, último acceso: 10/Enero/2021). <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/>
- INIFAP. (2021) Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. (Documento WEB, último acceso 24/04/2021).
- Kaza S., Yao L.C., Bhada-Tata P., Van Woerden F. (2018). What a Waste 2.0 : A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. (Los desechos 2.0: Un panorama mundial de la gestión de desechos sólidos hasta 2050). Urban Development; Washington, DC: World Bank. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317> License: CC BY 3.0 IGO.
- Mendoza-Delgado J.G. (2017). Evaluación del impacto ambiental de tiraderos a cielo abierto de municipios vecinos del Estado de México, Morelos y Guerrero. Tesis de Ingeniero Químico en el Instituto Tecnológico de Toluca. Titulación: 20 de enero 2017.
- López-Gasca S.O. (2020). Propuesta de Ubicación y Prediseño de un Relleno Sanitario Sustentable Intermunicipal, entre Morelos y el Estado de México. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental. Instituto Tecnológico de Toluca.
- Olay-Romero E., Turcott-Cervantes D.E., Hernández-Berriel M.C., Lobo-García de Cortázar A., Cuartas-Hernández M., de la Rosa-Gómez I.. (2020). Technical indicators to improve municipal solid waste management in developing countries: A case in México. *Waste Management*. Volume 107, 15 April 2020, pages 201-210. doi.org/10.1016/j.wasman.2020.03.039.

- PNUMA. 2020. Informe sobre la brecha en las emisiones del 2020. Resumen. Nairobi. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y Asociación PNUMA-DTU. (Documento Web, último acceso: 11/Enero/2021). <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34438/EGR20ESS.pdf?sequence=35>
- . New York: McGraw Hill.
- SCS E. (2009). Manual del Usuario Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0. (Documento Web, último acceso: 05/Enero/2021). https://globalmethane.org/documents/events_land_20090326_landfill-26mar09_intro_mexico_lfg_model_alex_stege.pdf
- SCFI. (2000) NMX-AA-093-SCFI-2000 Análisis de agua - determinación de la conductividad electrolítica - Método de prueba. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). (Documento WEB, último acceso: 16/11/2014). <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166800/NMX-AA-093-SCFI-2000.pdf>
- SCFI. (1980). NMX-AA-003-1980. Aguas Residuales -Muestreo. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). Documento WEB, último acceso: 16/11/2014). <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166762/NMX-AA-003-1980.pdf>
- SCFI. (1985a). NMX-AA-052-1985. Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo - Residuos Sólidos Municipales – Preparación de muestras en el laboratorio para su análisis. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). (Documento WEB, último acceso: 16/11/2021). <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFs/DO3432.pdf>
- SCFI. (1985b). NMX-AA-015-1985. Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo - Residuos Sólidos Municipales - Muestreo - Método de Cuarteo. Secretaria de Comercio secretaria de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). (Documento WEB, último acceso: 16/11/2021). <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFs/NMX-AA-015-1985.pdf>

- SE. (2016b). NMX-AA-051-SCFI-2016. Análisis de agua. -Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas- Método de prueba. (Documento WEB, último acceso 02/04/2016) <http://transparencia.japac.gob.mx/wp-content/uploads/art95/fxvi/normas/nmx-aa-051-scfi-2016.pdf>
- SE. (2016a). NMX-AA-008-SCFI-2016 Análisis de agua.- Medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.- Método de prueba. Secretaría de economía (SE). (Documento WEB, último acceso 20/04/2021) <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166767/NMX-AA-008-SCFI-2016.pdf>
- SE. (2013). NMX-AA-007-SCFI-2013 Análisis de agua – Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba secretaria de economía (SE). (Documento WEB, último 22/06/2020). http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa007-2014_01.pdf
- SEDESOL (2004) Secretaría de Desarrollo Social en México, Manual para la rehabilitación y clausura de tiraderos a cielo abierto. (Documento web, ultimo acceso: 28/diciembre/2020).
<http://www.ods.org.pe/material-de-consulta/27-manual-para-la-rehabilitacion-y-clausura-de-tiraderos-a-cielo-abierto-san-bartolo-sedesol-pdf/file>
- SEMARNAT. (2015a). Normas Mexicanas para suelos y residuos sólidos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (Documentos Web, último acceso 07/Enero /2021).
<https://www.gob.mx/busqueda?utf8=%E2%9C%93#gsc.tab=0&gsc.sort=&gsc.q=NMX%20para%20suelo>
- SEMARNAT. (2015b). Normas Mexicanas para aguas. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (Documentos Web, último acceso 07/Enero /2021).
<https://www.gob.mx/busqueda?utf8=%E2%9C%93#gsc.tab=0&gsc.sort=&gsc.q=NMX%20para%20agua>

- SEMARNAT (2016) Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde (Documento Web, último acceso 07/Enero /2021).
https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Cap7_Residuos.pdf
- SEMARNAT. (2020). Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Primera edición, mayo 2020. (Documento Web, último acceso 02/Enero /2021).
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>
- SEMARNAT & GTZ. (2005). Guía para la realización de planes de regularización conforme a la NOM-083-SEMARNAT-2003. Manual de Gestión Integral de Residuos Sólidos. (Documento Web, último acceso 16/Diciembre/2020).
http://centro.paot.org.mx/documentos/semarnat/Guia_regularizacin_NOM_083.pdf
- SHCP. (2017). Informe Anual 2016 Banobras. Secretario de Hacienda y Crédito Público (SHCP). (Documento Web, último acceso 02/Enero /2021).
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/238294/Informe_Anual_de_Actividades_2016__comprimido__07.07.2017.pdf
- SHCP. (2020). Informe Anual 2019 Banobras. Secretario de Hacienda y Crédito Público (SHCP). (Documento Web, último acceso 02/Enero /2021).
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/581850/INFORME_ANUAL_2019_Versio_n_Final_25AGOSTO_r2.pdf
- Statgraphics Technologies Inc. (2020). Software Statgraphics. (Documento Web, último acceso 05/Enero /2021). <https://www.statgraphics.com/>
- TAAF Consultoría Integral S.C. (2012) Manifestación de impacto ambiental Modalidad particular para el cambio de uso de suelo para relleno sanitario tipo "C" en el municipio de El Espinal, Estado de Oaxaca. (Documento Web, último acceso 03/Enero/2021)

<http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/oax/estudios/2012/20OA2012F0017.pdf>

Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil S. (1994). Gestión Integral de Residuos Sólidos. 1era ed., McGraw-Hill, Madrid, España.

ANEXO A. 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					
¿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						
¿El sitio se ubica fuera de un área natural protegida?	6.1.2					
¿El plan de manejo del área protegida contempla un sitio de disposición? Nota: si el sitio se encuentra fuera de un área protegida, marcar "No aplica" y colocar 0 en puntuación						
Para localidades mayores a 2500 habitantes ¿El límite del sitio de disposición final 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					
¿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					
¿El sitio se ubica fuera de zonas de inundación con periodos de retorno de 100 años?	6.1.5					
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 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					
¿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					
En caso 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						
¿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					

ANEXO A. TABLA DE VERIFICACIÓN (continuación)

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)
6.2 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					
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					
¿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						
¿Se tienen identificadas las unidades hidrogeológicas y la relación entre ellas que definen el sistema acuífero?						
¿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	b) Identificación del tipo de acuífero					
¿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					
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)					
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					
¿Se cuenta con los resultados del análisis de permeabilidad de campo y peso volumétrica <i>in situ</i> ?						
¿La clasificación de muestras se realizó según el Sistema Unificado de Clasificación de suelos?	b.2 Estudios en laboratorio					
¿Se tienen los resultados de: análisis granulométrico, permeabilidad, prueba Proctor, límites de Atterberg, consolidación unidimensional, ¿análisis de resistencia al esfuerzo cortante y humedad?						
¿Se cuenta con los resultados de los análisis de						

estabilidad de taludes de las obras de terracería?						
--	--	--	--	--	--	--

ANEXO A. TABLA DE VERIFICACIÓN (continuación)

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)
c) Evaluación geológica (aplica para tipo A y B)						
¿Se cuenta con la litología de los materiales, geometría, distribución y presencia de fracturas y fallas geológicas en el sitio?	c.1					
¿Se cuenta con las características estratigráficas del sitio?	c.2					
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					
¿Se tienen determinadas las unidades hidrogeológicas que componen el subsuelo y las características que las identifican (espesor y permeabilidad)?	d.2					
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					
¿Se cuenta con los estudios de composición de los RSU y RME de la población por servir?						
¿Se cuenta con la estimación de la cantidad de generación esperada de biogás en el SDF?	b) aplica para tipo A y B					
¿La estimación de la generación esperada de biogás comprende la composición química de los residuos dispuestos en el SDF?						
¿Se tiene la cuantificación del lixiviado mediante algún balance hídrico?	c) aplica para tipo A y B					
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 de conductividad hidráulica de al menos 1x10 ⁻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 1x10 ⁻⁷ cm/s? Nota: si se cuenta con barrera geológica natural, marcar “No aplica” y colocar 0 en puntuación						

ANEXO A. TABLA DE VERIFICACIÓN (continuación)

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 garantiza la extracción, captación, conducción y control del biogás generado en el SDF?	7.2 (Aplica para sitios tipo A, B y C)																	
¿Se cuenta con un sistema de aprovechamiento de biogás que evite que el CH ₄ se emita a la atmosfera?																		
¿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																		
¿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)																	
¿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?																		
¿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)																	
¿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)																	
¿El área de emergencia proporciona la misma seguridad ambiental y sanitaria que las celdas de operación ordinarias?	7.5 (Aplica para sitios tipo A, B y C)																	
De acuerdo a la Tabla No. 3 de la NOM-083, ¿se alcanzan los niveles mínimos de Compacción?	7.6 (Aplica para sitios tipo A, B y C)																	
<table><tr><th>TIPO DE SDF</th><th>RECEPCION DE RSU (t/día)</th><th>COMPACTACIÓN (kg/m³)</th></tr><tr><td>A</td><td>> 750 (A1) 100 a 750 (A2)</td><td>> 700 > 600</td></tr><tr><td>B</td><td>50 a 100</td><td>> 500</td></tr><tr><td>C</td><td>10 a 50</td><td>> 400</td></tr></table>		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					
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)																	

¿Con la cobertura de los RSU, se controla la dispersión de materiales ligeros, la fauna nociva y la infiltración pluvial?	C)					
---	----	--	--	--	--	--

ANEXO A. TABLA DE VERIFICACIÓN (continuación)

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 cuenta con medidas para evitar la admisión de aguas residuales, líquidos industriales de proceso y lodos con más del 85% de humedad base húmeda?	7.8 (Aplica para sitios tipo A, B y C)					
¿Se cuenta con medidas para no permitir el ingreso de aceites minerales?						
¿Se cuenta con medidas para no permitir el ingreso de RP de acuerdo a la normatividad vigente?						
¿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)					
Caminos de acceso adecuados, delimitados y bien (aplica para sitios tipo A, B y C)	7.9 ¿El SDF cuenta con estas áreas complementarias?					
Caminos interiores adecuados, delimitados y bien (aplica para sitios tipo A y B)						
Cerca perimetral (aplica para sitios tipo A, B y C)						
Caseta de vigilancia y control de acceso (aplica para sitios tipo A, B y C)						
Bascula (aplica para sitios tipo A y B)						
Agua potable, electricidad y drenaje (aplica para sitios tipo A y B)						
Vestidores y servicios sanitarios (aplica para sitios tipo A, B y C)						
Franja de amortiguamiento (Mínimo 10 metros) (aplica para sitios tipo A, B y C)						
Oficinas (aplica para sitios tipo A)						
Servicio médico y seguridad personal (aplica para sitios tipo A)						
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					
Método de registro de tipo y cantidad de RSU y RME ingresados						
Cronogramas de operación						
Programas específicos de control de calidad, mantenimiento y monitoreo ambiental de biogás, lixiviados y acuíferos						

Dispositivos de seguridad y planes de contingencia para: incendios, explosiones, sismos, fenómenos meteorológicos y manejo de lixiviados, sustancias reactivas, explosivas e inflamables.	A, B y C)					
Procedimientos de operación						

ANEXO A. TABLA DE VERIFICACIÓN (continuación)

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)
Ingreso de RSU, RME, materiales, vehículos, personal y visitantes	b) ¿El SDF cuenta con Control de registros para estos puntos? (Aplica para sitios tipo A, B y C)					
Secuencia de llenado del sitio de disposición final						
Generación y manejo de lixiviados y biogás						
Contingencias						
¿El SDF cuenta con un informe mensual de actividades?	c) (Aplica para sitios tipo A, B y C)					
¿Se tiene instrumentado un programa para la medición y control de los impactos ambientales?	7.11 (Aplica para sitios tipo A, B y C)					
¿Se tiene instrumentado un programa de monitoreo ambiental para el SDF?						
¿Se conservan y mantienen los registros correspondientes a los programas?						
¿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)					
¿Se tiene un programa de monitoreo del lixiviado que contenga: objetivo, Potencial de Hidrogeno (pH), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), ¿Demanda Química de Oxígeno (DQO) y metales pesados?	7.11.2 (Aplica para sitios tipo A, B y C)					
¿Se tiene programas de monitoreo de acuíferos, con pozos de muestreo, al menos uno aguas arriba y otras aguas abajo del SDF?	7.11.3 (Aplica para sitios tipo A, B y C)					
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 sitio de disposición final (la calidad de referencia estará definida por las características del agua nativa)						

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)					
¿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					

ANEXO A. TABLA DE VERIFICACIÓN (continuación)

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)
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					
¿Se cuenta con una compactación mínima de los residuos dispuestos de 300 kg/m ³ ?	8.2					
¿Se realiza la cobertura de los residuos por lo menos cada semana?	8.3					
¿Se evita el ingreso de los RP en general?	8.4					
¿Se controla la fauna nociva y evita el ingreso de animales?	8.5					
¿Se cuenta con cerca en la totalidad el SDF?	8.6					
¿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					
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					
¿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?						
¿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					
¿La conformación final del SDF contempla características de la cobertura final de clausura, los drenajes superficiales y la infraestructura para el control del lixiviado y biogás?						
¿Se tiene y opera un programa de mantenimiento pos-clausura para todas las instalaciones del SDF, por un periodo de al menos 20 años?	9.3 Manteni-miento					
¿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)?						
¿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 Progra-ma de monitoreo					

ANEXO A. TABLA DE VERIFICACIÓN (continuación)

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,	9.5 Uso final del SDF					

posibilidad de hundimientos diferenciales y presencia de biogás?						
¿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					

ANEXO B . ARBOL JERARQUICO

