



SEP

SES

TecNM

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

“Propuesta de Ubicación y Prediseño de un Relleno Sanitario Sustentable Intermunicipal, Entre Morelos y el Estado de México”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN
Ciencias en Ingeniería Ambientales

P r e s e n t a:

SERGIO OMAR LÓPEZ GASCA
No. CONTROL: 1128M1022

DIRECTORA DE TESIS:
DRA. MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ BERRIEL

CODIRECTORA DE TESIS:
DRA. MARÍA DEL CONSUELO MAÑÓN SALAS

METEPEC, ESTADO DE MÉXICO, ENERO DE 2020

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Metepec, Edo. de México., 24/enero/2020
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN
DEPI-3200-121/2020

C. SERGIO OMAR LÓPEZ GASCA
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL
P R E S E N T E

De acuerdo con el Reglamento de Titulación del Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica dependiente de la Subsecretaría de Educación Superior de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su trabajo de Tesis titulado "Propuesta de Ubicación y Prediseño de un Relleno Sanitario Sustentable Intermunicipal, entre el Estado de México y Morelos", la División de Estudios de Posgrado e Investigación concede autorización para que proceda a la impresión del mismo

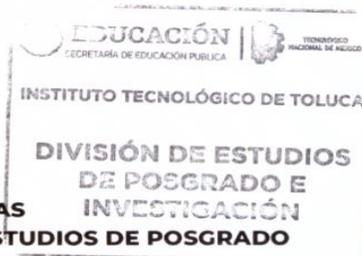
Sin más por el momento, quedo de usted.

ATENTAMENTE

"Educación, integridad y ciencia"



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



JLGR/IMAB



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Toluca

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Metepac, Edo. de México, 22/enero/2020
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN
DEPI-3200-107/2020

DR. JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E

Por este medio comunicamos a usted que la comisión Revisora designada para analizar la tesis denominada "Propuesta de Ubicación y Prediseño de un Relleno Sanitario Sustentable Intermunicipal, entre el Estado de México y Morelos", que como parte de los requisitos para obtener el grado académico de Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental presenta el C. Sergio Omar López Gasca con número de control 1128M1022 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



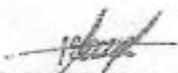
DRA. MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ BÉRRIEL
DIRECTORA DE TESIS



DRA. MARÍA DEL CONSUELO MAÑÓN SALAS
CO-DIRECTORA DE TESIS



DR. ISAÍAS DE LA ROSA GÓMEZ
REVISOR DE TESIS



DRA. MARÍA DEL CARMEN CARREÑO DE LEÓN
REVISORA DE TESIS



DR. MIGUEL CUARTAS HERNÁNDEZ
REVISOR DE TESIS



Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149
Metepac, Estado de México. Tels. Dirección (01722) 208 7205, Subd. Académica 208 7207,
Subd. de Planeación 208 7208, Subd. Administrativa 208 7209, Conmut. 208 72 00
e-mail: info@toluca.tecnm.mx, www.toluca.tecnm.mx



AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Instituto Tecnológico de Toluca por abrirme las puertas de sus instalaciones y brindarme la oportunidad formarme profesionalmente.

Agradezco al CONACYT y a la SEMARNAT por el apoyo por brindado mediante el proyecto 263315 “UBICACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS INTERMUNICIPALES FUTUROS EN EL ESTADO DE MÉXICO Y ESTADOS ALEDAÑOS”

Al COMECYT por brindarme los apoyos necesarios para lograr los objetivos planteados en este proyecto.

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

A la Dra. Mañón, así como a mis revisores Dra. Carmen, Dr. Isaias, y Dr. Miguel Cuartas por los conocimientos adquiridos durante el desarrollo de este proyecto, por su tolerancia y su completa disposición.

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

A Diego por su tiempo y disposición para brindarme sus conocimientos y consejos.

A todas aquellas personas que me apoyaron durante el desarrollo del presente proyecto y con las que compartí experiencias, bromas, risas y laboratorio, en especial a: Isis, Elvira, Mayte, Xóchitl y Nadia.

A mi familia por aguantarme, apoyarme y no dejarme solo a lo largo de la realización de este trabajo.

A mi padre y madre por las lecciones que me dan a cada momento con su ejemplo, por sus consejos y por estar conmigo.

A mi novia por apoyarme, aguantarme en los días pesados, llenarme de ánimos y comprenderme, cuando ni yo lo hago.

A la Sra. Juanita por darme ánimos, consejos, apoyarme y confiar en mí.

A Dios por darme la bendición de seguir cumpliendo los retos que me impongo y por todas las personas que pone en mi camino.

RESUMEN

De acuerdo al manejo integral de residuos sólidos urbanos, un relleno sanitario (RESA) es la última etapa a la que llegan los residuos sólidos urbanos (RSU), el cual se debe ubicar y operar según la NOM-083-SEMARNAT-2003, que enuncia distintos factores como las distancias a aeropuertos, cuerpos de agua y zonas protegidas, entre otros. En cuanto a su operación dicha norma prevé el manejo y aprovechamiento del biogás y lixiviados.

Conforme a lo anterior, este trabajo tuvo por objetivo ubicar y prediseñar un RESA intermunicipal sostenible, denominado CIR en la normatividad actual del Estado de México (Edo.Méx.), el cual pudiera dar servicio a municipios del Edo.Méx. y Morelos (Mor). Para ello se recabo información documental y de campo mediante una Cédula de Entrevista (CE), se utilizaron análisis estadísticos y técnicas multicriterio para seleccionar municipios candidatos; y a los municipios seleccionados se les realizó un estudio espacial minucioso con Sistemas de Información Geográfico (SIG) de INEGI y ArcGis, tomando como base la NOM-083-SEMARNAT-2003. Se evaluó sus sistemas de manejo de RSU y sus Sitios de Disposición Final (SDF), en estos últimos se les realizaron la caracterización física *in situ* de sus RSU y evaluó mediante una Lista de Verificación y la Matriz de Leopold. Se realizó el prediseño para un RESA Tradicional y para un CIR; a los cuales se les evaluó técnica, económica y ambientalmente.

Los municipios seleccionados fueron Xalatlaco y Ocuilan, Edo.Méx. y Huitzilac, Mor., la ubicación del SDF Xalatlaco no es adecuada, porque se encuentra a una distancia menor de 500 metros de un cuerpo de agua; Huitzilac, Mor. no puede tener un SDF debido a que la mayor parte de su territorio tiene Áreas protegidas; mientras que el municipio de Ocuilan, EdoMéx., no cuenta con SDF, por lo que envía sus residuos al RESA del municipio de Tenango del Valle, EdoMéx.

Conforme a lo anterior y considerando la Gaceta No. 68 del Poder Ejecutivo del EdoMéx (PEEM) y las distancias para transportar los RSU, se determinó el RESA de Tenango del Valle, EdoMéx para dar servicio a los municipios de Ocuilan y Xalatlaco, EdoMéx; así como a Huitzilac, Mor. que se encuentra a 64 km.

Para el prediseño se utilizaron el Modelo Mexicano de Biogas (MMB), el Método IPCC y Simulador Moduelo 4.0; las dinámicas de generación obtenidas evidenciaron que a mayor generación de CH₄ fue menor la certidumbre de los Software utilizados y que los periodos de estabilización, fueron prácticamente similares para los casos en los que se extrajo (25 y 50%) o no valorizables. De acuerdo con la evaluación técnica, económica y ambiental la operación de la Celda 2 bajo las condiciones de un CIR es viable; con un Retorno de Inversión de 73.4%, un Valor Presente Neto de \$7,833,088.89/año y una Tasa de Retorno Media de 5.8 años.

SUMMARY

According to the comprehensive management of urban solid waste, a landfill (RESA) is the last stage to which urban solid waste (RSU) arrives, which must be located and operated according to NOM-083-SEMARNAT-2003, which states different factors such as distances airports, bodies of water and protected areas, among others. As for its operation, this standard provides for the management and use of biogas and leachates.

According to the above, this work aimed to locate and predesign a sustainable intermunicipal RESA, called CIR in the current regulations of the State of Mexico (Edo.Méx.), which could serve municipalities of Edo.Méx. and Morelos (Mor). To this end, documentary and field information was collected through an Interview Code (EC), statistical analyses and multi-criteria techniques were used to select candidate municipalities; and the selected municipalities were thoroughly studied with Geographic Information Systems (GIS) of INEGI and ArcGis, based on NOM-083-SEMARNAT-2003. Its management systems of RSU and its Final Disposition Sites (SDF) were evaluated, in the latter they were performed the physical *on-site* characterization of their RSUs and evaluated through a Checklist and Leopold Matrix. Predesign was performed for a Traditional RESA and an CIR; evaluated technically, economically and environmentally.

The selected municipalities were Xalatlaco and Ocuilan, Edo.Méx. and Huitzilac, Mor., the location of the Xalatlaco SDF is not adequate, because it is at a distance less than 500 meters from a body of water; Huitzilac, Mor. you cannot have an SDF because most of its territory has Protected Areas; while the municipality of Ocuilan, EdoMéx., does not have SDF, so it sends its waste to the RESA of the municipality of Tenango del Valle, EdoMéx. In accordance with the above and considering Gazette No. 68 of the Executive Power of EdoMéx (PEEM) and the distances to transport the RSUs, the RESA of Tenango del Valle,

EdoMéx was determined to serve the municipalities of Ocuilan and Xalatlaco, EdoMéx; as well as Huitzilac, Mor. which is 64 km away.

The Mexican Biogas Model (MMB), the IPCC Method and Moduelo 4.0 Simulator were used for the predesign; generation dynamics obtained showed that the higher generation of CH₄ was less certain of the Software used and that the stabilization periods were virtually similar for cases where it was extracted (25 and 50%) or non-valueable. According to the technical, economic and environmental assessment the operation of Cell 2 under the conditions of an CIR is feasible; with a Return on Investment of 73.4%, a Net Present Value of \$7,833,088.89/year, and an Average Return Rate of 5.8 years.

INDICE

AGRADECIMIENTOS	
RESUMEN	i
SUMMARY	iii
INDICE	v
Índice de Tablas	vii
Índice de Figuras	ix
INTRODUCCIÓN	1
1 FUNDAMENTOS.....	3
1.1 LOS RESIDUOS SÓLIDOS.....	3
1.1.1 Generación y composición de residuos sólidos urbanos.....	4
1.1.2 Gestión integral de residuos sólidos urbanos.....	7
1.1.3 Manejo integral de residuos sólidos urbanos	9
1.2 INGENIERÍA SOSTENIBLE DE LA CUNA A LA CUNA.....	12
1.2.1 Pilares de la sostenibilidad	13
1.2.2 Casos de éxito de ingeniería sustentable.....	14
1.3 SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS.....	16
1.3.1 Factores de diseño	20
1.3.2 Rellenos sanitarios intermunicipales	22
1.3.3 Rellenos sanitarios sostenibles	24
1.3.4 Evaluación de Sitios de disposición final	26
1.4 ESTIMACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE SIMULADORES	39
1.4.1 Modelo Mexicano de Biogás	40
1.4.2 Método IPCC.....	43
1.4.3 Modulo 4.0.....	45
1.5 CASOS DE ESTUDIO	49
2. MÉTODO.....	54
2.1 SELECCIÓN DE LOS MUNICIPIOS A ESTUDIAR.....	54
2.2 DETERMINACIÓN DE ÁREAS POSIBLES.....	58
2.3 ANÁLISIS DEL MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS SOLIDOS URBANOS.....	58
2.4 CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	59
2.5 EVALUACIÓN DE LOS SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL ACTUALES	60
2. 6 PREDISEÑO DE RELLENO SANITARIO	62
2.6.1 Prediseño de Relleno Sanitario Tradicional.....	62
2.6.2 Prediseño de Relleno Sanitario Sostenible	63

2.7 EVALUACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL	64
3. RESULTADOS	66
3.1 SELECCIÓN DE LOS MUNICIPIOS A ESTUDIAR.....	66
3.2 DETERMINACIÓN DE ÁREAS POSIBLES.....	75
3.3 ANÁLISIS DEL MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS SOLIDOS URBANOS.	85
3.4 ESTUDIOS DE CARACTERIZACIÓN	86
3.4.1 Caracterización en Xalatlaco, EdoMéx.....	87
3.4.2 Caracterización en Huitzilac, Mor.....	88
3.4.3 Caracterización en Ocuilan, EdoMéx.	89
3.5 EVALUACIÓN DE LOS SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL ACTUALES	90
3.5.1 Evaluación técnica	91
3.5.2 Evaluación ambiental y socioeconómica	92
3. 6 PREDISEÑO DE RELLENO SANITARIO	94
3.6.1 Prediseño de Relleno Sanitario Tradicional.....	96
3.6.2 Prediseño de Relleno Sanitario Sostenible	105
3.7 EVALUACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL	108
CONCLUSIONES.....	118
REFERENCIAS.....	120
ANEXO.....	135
ANEXO A.LISTA DE VERIFICACIÓN	135
ANEXO B. LISTA DE VERIFICACIÓN DE MUNICIPIOS	141
ANEXO C. MATRIZ DE LEOPOLD DEL MUNICIPIO DE XALATLACO, EDOMEX	148
ANEXO D. MATRIZ DE LEOPOLD DEL MUNICIPIO DE HUITZILAC, MOR.....	149
ANEXO E. PROYECCIÓN DE POBLACIÓN (2015-2025)	150
ANEXO F. PROYECCIÓN DE RSU EN TONELADAS POR AÑO (2018-2025)..	151
ANEXO G. PROYECCIÓN DE RSU EN TONELADAS POR AÑO (2018-2025).	152
ANEXO H. INGRESOS POR RSU POTENCIALMENTE VALORIZABLES	153
ANEXO I. COSTOS DE INVERSIÓN PARA SISTEMAS QUEMA DE BIOGÁS EN RESA	154
ANEXO J. COSTOS DE INVERSIÓN PARA SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS EN RESA.....	155
ANEXO K. CO ₂ emitido	156
ANEXO L. INGRESOS POR VENTA DE BIOGÁS Y BONOS DE CARBONO ...	157

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Clasificación de los residuos según la LGPGIR	4
Tabla 1.2 Clasificación de RESA.....	18
Tabla 1.3 Criterios para estimación de potencia de metano.....	29
Tabla 1.4 Costos de pozos y tubería de conducción de biogás	31
Tabla 1.5 Costos de inversión para la planta generadora y conexión a la red eléctrica.....	31
Tabla 1.6 Inversiones y costos adicionales para la Puesta en Marcha	31
Tabla 1.7 Impactos ambientales de los RSU.....	34
Tabla 1.8 Metodologías de EIA	35
Tabla 1.9 Criterios de evaluación de impacto ambiental	37
Tabla 1.10 Rangos de valor del Nivel de significancia	38
Tabla 1.11 Valores del Índice de Generación de Metano (k)	43
Tabla 1.12: Valores de la Generación Potencial de Metano (L0)	43
Tabla 1.13 Valores típicos de la tasa de generación de metano	45
Tabla 1.14 Zonas climáticas consideradas para asignar la tasa de degradación ..	45
Tabla 1.15 Antecedentes del proyecto	51
Tabla 2.1 Criterios y variables consideradas.....	55
Tabla 2.2 Puntaje para valores de variables.	57
Tabla 2.3 Valor de cada variable.....	57
Tabla 2.4 Técnicas analíticas de RSU	60
Tabla 2.5 Escenarios simulados.....	65
Tabla 3.1 Correlación de variables.....	67
Tabla 3.2 Variables a eliminar	67
Tabla 3.3 Datos Atípicos por variable.....	69
Tabla 3.4 Municipios de estudio divididos por conglomerados	70
Tabla 3.5 Datos descriptivos de las variables	71
Tabla 3.6 Puntaje para las variables en los municipios.....	72
Tabla 3.7 Puntaje por valor de variables	73
Tabla 3.8 Puntaje resultante.....	74
Tabla 3.9 Puntaje de municipios por Cluster	74
Tabla 3.10 Significado de los símbolos de la figura 3.8	78
Tabla 3.11 Área, distancia, costo y tiempo de posibles ubicaciones a cabeceras municipales	83

Tabla 3.12 Información del MIRSU de los municipios	86
Tabla 3.13 Caracterización de residuos del SC de Xalatlaco, EdoMéz.....	87
Tabla 3.14 Caracterización de residuos del SC de Huitzilac, Mor.....	89
Tabla 3.15 Caracterización de residuos para de Ocuilan, EdoMéz.....	90
Tabla 3.16 Evaluación técnica.....	92
Tabla 3.17 Municipios que disponen RSU en el RESA de Tenango del Valle, Edo Mex	95
Tabla 3.18 Capacidad de la celda	98
Tabla 3.19 Vida útil del SDF	99
Tabla 3.20 Composición y análisis elemental de subproductos	99
Tabla 3.21 Características de las celdas en los modelos morfológicos	100
Tabla 3.22 Constantes utilizadas en los distintos escenarios de simulación.....	101
Tabla 3.23 Comparación de la generación de CH ₄ con los tres modelos	107
Tabla 3.24 Vida útil del SDF sin y con recuperación de RSU potencialmente valorizables	109
Tabla 3.25 Costo de Inversión de Excavación de Vasos, pozos de venteo y drenado de lixiviados.....	110
Tabla 3.26 Costo por recolección y disposición final de RSU en RESA Tradicional	111
Tabla 3.27 Costo por Separación, Recolección y Disposición final de RSU en RESA Sostenible.....	111
Tabla 3.28 Ingresos por disposición al RESA Tradicional.....	111
Tabla 3.29 Ingresos por disposición al CIR.....	112
Tabla 3.30 Gastos para recirculación de lixiviados en 2020	113
Tabla 3.31 Costos e ingresos resumidos para RESA Tradicional.....	114
Tabla 3.32 Costos e ingresos resumidos para el CIR	114

Índice de Figuras

Figura 1.1 Generación Total de RSU en México	4
Figura 1.2 Generación Per-Cápita de RSU	5
Figura 1.3 Composición de RSU 2016	5
Figura 1.4 Generación de RSU por tipo de residuo.....	6
Figura 1.5 Generación de RSU por Entidad Federativa	6
Figura 1.6 Principales Entidades Federativas generadoras de RSU 2012.....	7
Figura 1.7 Instrumentos legales para la GIRSU	8
Figura 1.8 Programas de Gestión Integral de RSU 2014	9
Figura 1.9 Manejo Integral de RSU	9
Figura 1.10 Jerarquía del MIRSU.....	10
Figura 1.11 Sistema secuencial desde la industria insostenible hacia C2C.....	13
Figura 1.12 Estructura fractal de la sostenibilidad en C2C.....	14
Figura 1.13 Ciclo de vida planteado por el paradigma C2C	14
Figura 1.14 Tiradero a cielo abierto.....	16
Figura 1.15 Sitio de Tierra Controlado	17
Figura 1.16 Relleno Sanitario	17
Figura 1.17 Disposición Final de RSU 2013.....	19
Figura 1.18 Rellenos sanitarios por entidad federativa, 2012	20
Figura 1.19 Diseño de una celda diaria	22
Figura 1.20 RESA Sostenible.....	25
Figura 1.21 Recuperación de emisiones de CH ₄ en rangos bajo y medio	29
Figura 1.22 Regiones climáticas de México	42
Figura 2.1 Esquema de actividades del estudio propuesto	54
Figura 3.1 Municipios delimitados al Este del EdoMéx	66
Figura 3.2 Situación de los municipios con respecto a las variables seleccionadas	68
Figura 3.3 Datos típicos	69
Figura 3.4 Dendograma de análisis de conglomerados.	70
Figura 3.5 Mapa con conglomerados (clúster)	71
Figura 3.6 Restricción por aeropuertos	75
Figura 3.7 Restricción por áreas naturales protegidas	76
Figura 3.8 Restricción por habitantes.....	77
Figura 3.9 Fallas que corresponden al área de estudio	77

Figura 3.10. Restricción por cuerpos de agua en el municipio de Xalatlaco, EdoMéx.	79
Figura 3.11. Restricción por Cuerpos de agua en el municipio de Huitzilac, Mor..	80
Figura 3.12. Restricción por cuerpos de agua en el municipio de Ocuilan, EdoMéx.	80
Figura 3.13. Localización de posibles ubicaciones de RESA y su actual SDF en Xalatlaco, EdoMéx.	81
Figura 3.14. Localización de posibles ubicaciones de RESA en Ocuilan, EdoMéx.	82
Figura 3.15 Región Ambiental “Río Lerma: Subcuenca la Laguna”	84
Figura 3.16 SDF de Xalatlaco, EdoMéx.	87
Figura 3.17. Caracterización de residuos del SC de Xalatlaco, EdoMéx.	88
Figura 3.18. SDF de Huitzilac, Mor.	88
Figura 3.19. Caracterización de residuos del SC de Huitzilac, Mor.....	89
Figura 3.20. Caracterización de residuos del SC de Ocuilan	90
Figura 3.21 Área para Celda 2 de estudio de RESA de Tenango del Valle	95
Figura 3.22 Creación del Modelo morfológico	97
Figura 3.23 Prediseño y llenado con RSU	98
Figura 3.24 Hoja de alimentación del MMB.....	103
Figura 3.25 Modelo IPCC	104
Figura 3.26 Generación de Biogás.....	104
Figura 3.27 Generación de Biogás de Modulo 4.0.	105
Figura 3.28 Generación de Biogás de MMB.....	106
Figura 3.29 Generación de Biogás del Método IPCC.....	106
Figura 3.30 Recuperación de CH ₄ para escenarios medio y bajo	108

INTRODUCCIÓN

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son aquellos provenientes de diversos núcleos poblacionales, surgen de actividades animales y humanas, normalmente se encuentran en estado sólido y son desechados debido a que ya no son de utilidad. El impacto ambiental negativo de los RSU se presenta en el siguiente orden de riesgo: sitios de disposición final; sitios de almacenamiento temporal; estaciones de transferencia, plantas de tratamiento y recuperación; y en el proceso de recolección y transporte (Acurio *et al.*, 1997).

El promedio regional de generación per cápita de RSU en América Latina es de 0,95 kg/hab-día (The World Bank Group, 2019). El promedio regional de cobertura de recolección de RSU es de 89,9% que comparado con el promedio mundial de 73,6% refleja la prioridad que se le ha dado a este servicio. La cobertura de disposición final adecuada (en rellenos sanitarios) de RSU es aproximadamente del 55%, lo cual implica que aún existe una alta proporción de que no se trata de manera adecuada (45%) (BID, 2015). Tan sólo en México se generan 41 millones de RSU, de los cuales se colecta un 86%, pero el 14% restante se desecha de manera clandestina (Martínez, 2015; SEMARNAT, 2014).

Aunado al problema de la acumulación se tiene el problema de la disposición de los residuos, el cual tiene dos vertientes principales: la falta de planeación de los sitios de disposición final y la falta de infraestructura de los mismos. En México según la SEMARNAT en el 2011 el 61% de los RSU generados son depositados en rellenos sanitarios, un 8% en sitios controlados y un 31% en sitios no controlados o tiraderos a cielo abierto. Conforme a lo anterior, el objetivo de este trabajo es desarrollar una propuesta de ubicación y diseño preliminar de un relleno sanitario sustentable intermunicipal entre Morelos y el Estado de México (EdoMéx).

La primera parte de esta investigación trata sobre los fundamentos, en donde se define a los RSU, su generación y caracterización fisicoquímica, los pasos que conforman una adecuada gestión integral de residuos sólidos (GIRSU), los tipos de sitios de disposición final de residuos sólidos, así como el enfoque de una ingeniería sostenible de la cuna a la cuna.

En la segunda parte se describen las 8 etapas de la metodología seguida para alcanzar los objetivos planteados. La tercera parte comprende los resultados parciales obtenidos en cada una de las actividades realizadas, ilustrándolos con tablas y figuras; y se culmina con conclusiones parciales y las fuentes consultadas.

1 FUNDAMENTOS

Comúnmente el término residuo hace referencia a todo lo que es desechado producto de una actividad y ya no es de utilidad, ya sea por la acción directa del hombre o por la actividad de otros organismos vivos, formando una mezcla heterogénea que, en muchos casos, es difícil de reincorporar a los ciclos naturales. Los residuos han existido siempre sobre la Tierra, desde el mismo momento en que comienzan a acumularse en el medio ambiente ya sea por la velocidad con la que se generan, como por la naturaleza química de estos; haciendo que se dificulte su descomposición e incorporación a los ciclos naturales, entonces comienzan a ser un problema ambiental (Fernández & Sánchez, 2007). Aunado al problema de la acumulación se tiene el problema de la disposición de los residuos, el cual tiene dos vertientes principales: la falta de planeación de los sitios de disposición final y la falta de infraestructura de los mismos. En este apartado se dan a conocer los temas de importancia para la ubicación y el prediseño de un relleno sanitario intermunicipal.

1.1 LOS RESIDUOS SÓLIDOS

Los residuos sólidos son aquellos provenientes de diversos núcleos poblacionales, surgen de actividades animales y humanas, normalmente se encuentran en estado sólido o semisólidos y, son desechados debido a que ya no son de utilidad. Existen diversas maneras de clasificar los residuos sólidos:

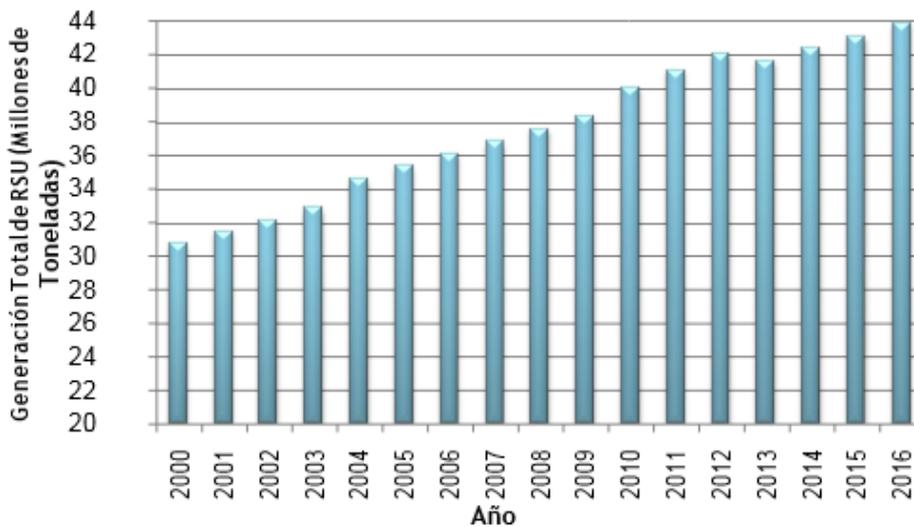
- a) Según el tipo: orgánicos e inorgánicos.
- b) Según su origen: domésticos, comerciales, provenientes de espacios públicos, institucionales, hospitalarios e industriales.
- c) Según la LGPGIR (Tabla 1.1): residuos sólidos urbanos (RSU), residuos de manejo especial (RME) y residuos peligrosos (RP).

Tabla 1.1 Clasificación de los residuos según la LGPGIR

RESIDUOS SÓLIDO URBANOS (RSU)	RESIDUOS DE MANEJO ESPECIAL (RME)	RESIDUOS PELIGROSOS (RP)
Residuos generados en las casas habitación como resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas; son también los residuos que provienen de establecimientos o de la vía pública, o los que resultan de la limpieza de las vías y lugares públicos y que tienen características como los domiciliarios.	Residuos generados en procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos ni como residuos sólidos urbanos.	Poseen algunas de las características identificadas de peligrosidad y que son: corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad o que contienen agentes infecciosos. Así como también los envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados por residuos peligrosos.

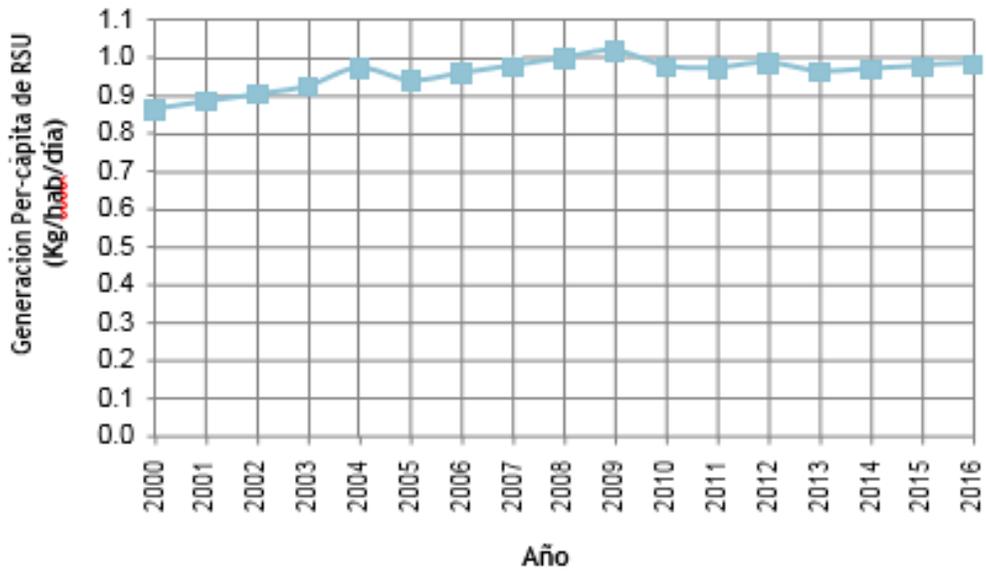
1.1.1 Generación y composición de residuos sólidos urbanos

En México la generación de RSU ha pasado de 30,733,000 t a 43,898,800 t por año del 2000 al 2016 (Figura 1.1), esto representa un incremento del 42.84%, además se estimó que en el año 2016 la generación de RSU por habitante en un día fue de aproximadamente 1.0 kg como se muestra en la figura 1.2.



Fuente: INEGI, 2016.

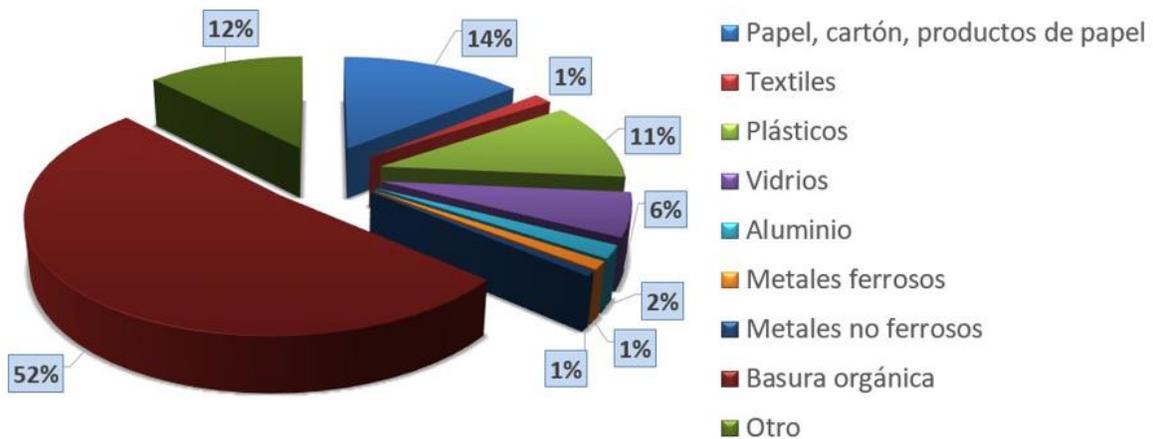
Figura 1.1 Generación Total de RSU en México



Fuente: INEGI, 2016.

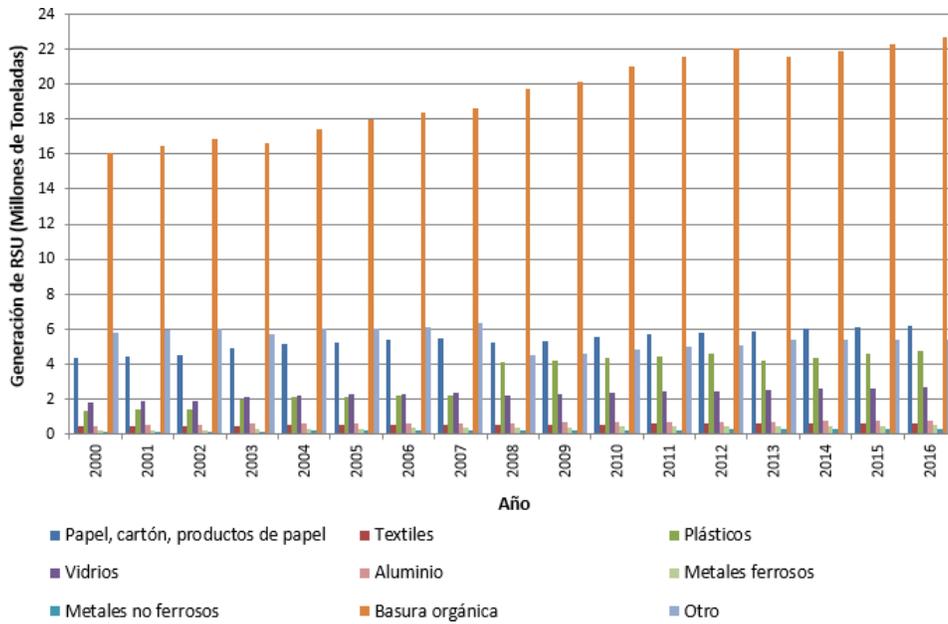
Figura 1.2 Generación Per-Cápita de RSU

La basura orgánica representó el 52% de la composición total de los RSU durante el año 2016 (Figura 1.3) y es el residuo que se genera en mayor cantidad, del año 2000 al 2016 aumentó de 16,104,100t a 22,664,400 t por año (Figura 1.4), es decir incrementó 40.73%.



Fuente: INEGI, 2016.

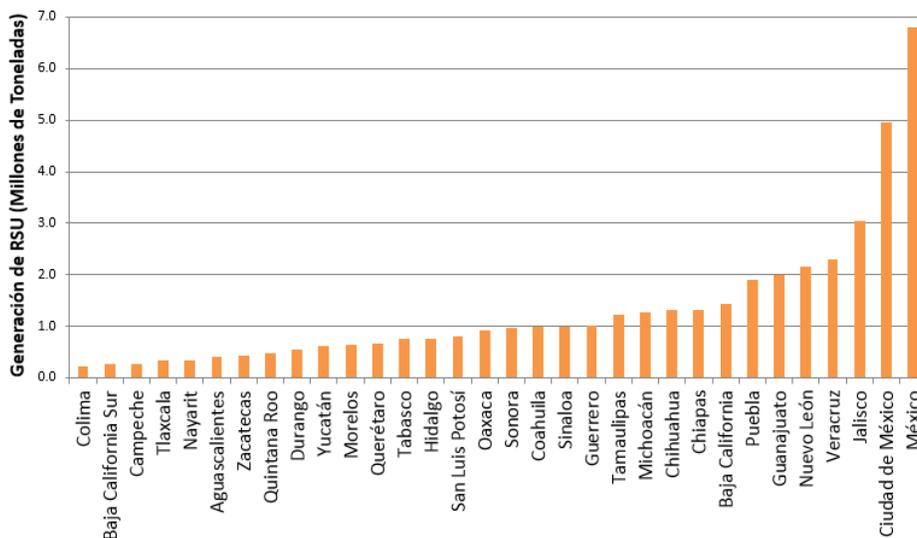
Figura 1.3 Composición de RSU 2016



Fuente: INEGI, 2016.

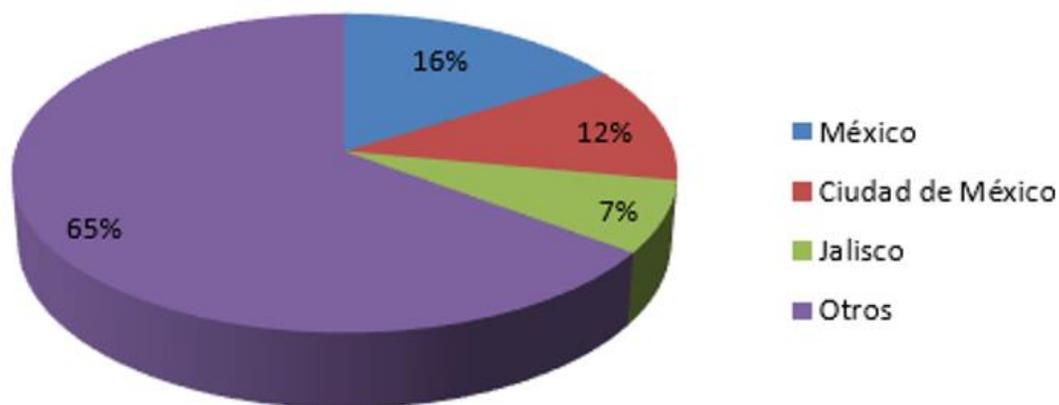
Figura 1.4 Generación de RSU por tipo de residuo

En la figura 1.5 se muestra la distribución de la generación de RSU de cada entidad federativa durante el año 2012, de acuerdo con datos de INEGI los estados que generaron una mayor cantidad de RSU en el periodo 2001 - 2012 fueron: el EdoMéx y la Ciudad de México; su porcentaje de generación respecto al total de RSU generados en el país se muestra en la figura 1.6.



Fuente: INEGI, 2016.

Figura 1.5 Generación de RSU por Entidad Federativa



Fuente: INEGI, 2016.

Figura 1.6 Principales Entidades Federativas generadoras de RSU 2012

1.1.2 Gestión integral de residuos sólidos urbanos

Para regular la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU) se debe contar con instrumentos legales, es decir leyes, reglas y normas que poseen cierta jerarquía y especificidad (Figura 1.7). En México, existen distintos instrumentos legales para atender el tema de los residuos, en ellos se hace mención de la importancia de contar con un ambiente saludable y limpio, algunos son:

- a) Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)
- b) Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)
- c) NOM-083-SEMARNAT, NOM-098-SEMARNAT y NOM-161-SEMARNAT



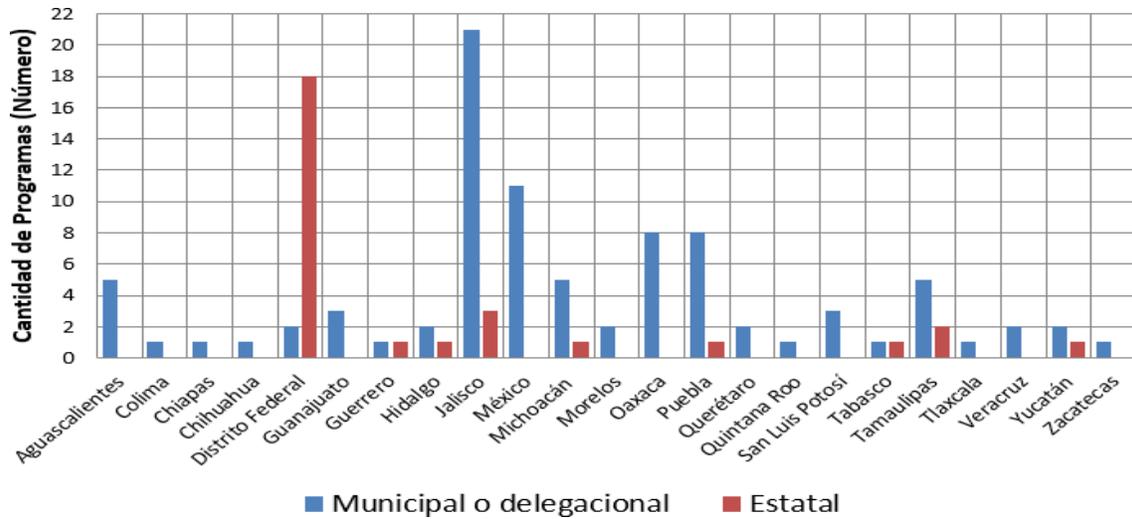
Fuente: SEMARNAT, 2008.

Figura 1.7 Instrumentos legales para la GIRSU

La GIRSU es la manera que plantea la LGPGIR bajo la cual todos los municipios del país deben aprovechar y manejar sus RSU, considerando que es muy importante que desarrollen acciones tales como:

- a) Manejo Integral de RSU.
- b) Desarrollo y aplicación de la normatividad.
- c) Educación y capacitación.
- d) Planeación, desarrollo y administración de acciones para aprovechar y valorar lo residuos.
- e) Construcción de infraestructura como rellenos sanitarios o plantas de tratamiento, entre otros.
- f) Monitoreo, supervisión y evaluación de las distintas acciones que se realizan.

De acuerdo con datos de INEGI, durante el año 2014 en México se aplicaron 118 programas orientados a la GIRSU, los cuales se distribuyeron como se muestra en la figura 1.8.

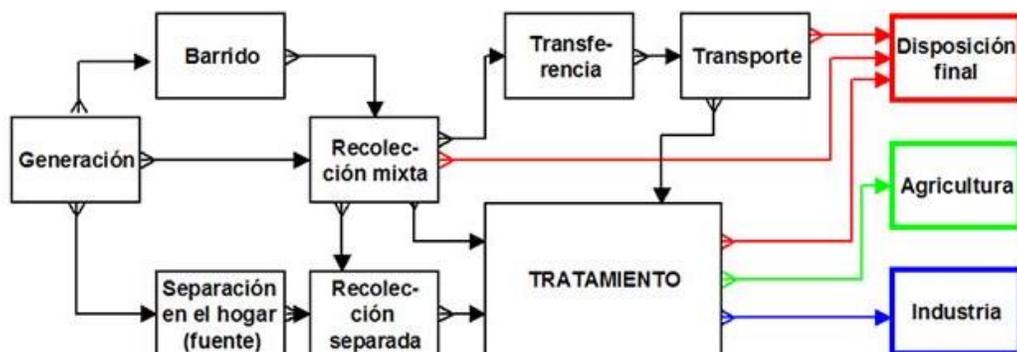


Fuente: INEGI, 2016.

Figura 1.8 Programas de Gestión Integral de RSU 2014

1.1.3 Manejo integral de residuos sólidos urbanos

El Manejo Integral de Residuos Sólidos Urbanos (MIRSU) (Figura 1.9) forma parte de la GIRSU, es un conjunto de etapas o subsistemas, que tienen como propósito principal manejar los residuos cumpliendo con objetivos de valorización, eficiencia sanitaria, ambiental, tecnológica, económica y social, lo cual se traduce en la protección de la salud de la población y del medio ambiente; se conforma por los siguientes subsistemas: generación, barrido, separación desde la fuente, recolección separada, transporte, transferencia, valorización, aprovechamiento y tratamiento y disposición final (DOF, 2015).



Fuente: SEMARNAT, 2008.

Figura 1.9 Manejo Integral de RSU

- a) Generación. Es la acción de producir residuos a través del desarrollo de procesos productivos o de consumo. 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 residuos sólidos depositados en la vía pública, responsabilidad del municipio, a menos que el Reglamento de Limpia indique que son los habitantes los que deben barrer el frente de sus casas, tiene como propósitos cuidar la salud humana, cuidar que la basura no dañe los servicios públicos de la localidad y cuidar su imagen. Existen dos tipos: manual y 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 lleguen a los sitios de disposición final (SDF) (Figura 1.10), mediante 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.
- Reciclar los componentes del producto como materia prima.

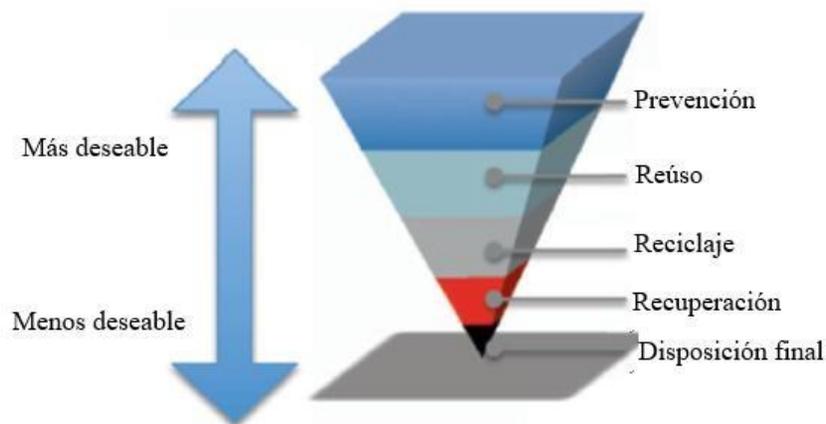


Fig. 1. Waste management hierarchy [22].

Fuente: Idiano, 2016.

Figura 1.10 Jerarquía del MIRSU

- d) Recolección y transporte. Consiste en la colecta de los residuos en las casas y comercios y su transporte a las estaciones de transferencia, plantas de tratamiento o SDF, según sea el caso, es la parte más costosa del MIRSU, su costo varía entre \$130.00 y \$250.00 por tonelada de residuos. Para establecer un sistema de recolección se deben considerar los aspectos como el método de recolección, frecuencia y horario de recolección, tipo de vehículos de recolección y cantidad y diseño de rutas.
- e) Recolección separada. Las posibilidades para hacer la recolección en estas condiciones son:
- Recoger residuos orgánicos e inorgánicos en días diferentes
 - Recoger ambos residuos en los mismos días, pero con vehículos distintos
 - Recoger residuos diferenciados el mismo día, en un mismo vehículo, pero con adaptaciones de separación

Todo programa de recolección separada debe incluir un programa de capacitación y educación ambiental para la ciudadanía de la localidad donde se aplicará. Es conveniente aclarar que no se da una separación al 100% en prácticamente ningún lugar. También vale la pena considerar que es importante separar sólo lo que se va a vender o aprovechar, de otra manera, sólo se agregan costos económicos y sociales al MIRSU.

- f) Transferencia. Cuando la generación de residuos es mucha, como en las grandes ciudades, o los sitios de tratamiento o SDF están muy lejos, los costos de transporte pueden ser muy altos. Esto obliga a establecer estaciones de transferencia que acortan las distancias para los vehículos de recolección. Existen tres tipos de estaciones de transferencia: carga directa, carga indirecta (almacenamiento y carga) y mixta.
- g) Valorización, aprovechamiento y tratamiento. El tratamiento de los RSU son los

procedimientos que pueden aplicárseles para cambiar sus características o reducir su volumen, esto permite reducir daños al ambiente, aumentar el tiempo de vida de los SDF y también ofrece la posibilidad de aprovecharlos para obtener un beneficio. Los tratamientos se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de proceso que requieren: físico, biológico, térmico o termoquímico.

- h) Disposición final. Es la última etapa del MIRSU y debe hacerse de manera que el impacto negativo de los residuos concentrados en un sitio sea el menor posible, la forma ideal de disponerlos es en un RESA.

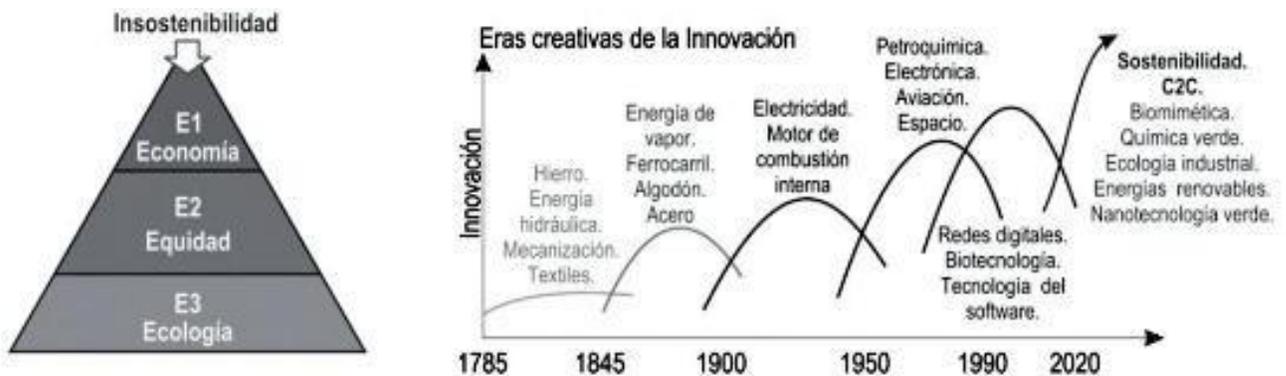
1.2 INGENIERÍA SOSTENIBLE DE LA CUNA A LA CUNA

El término Sustentable surge por primera vez en el informe Brundtland, titulado “Nuestro futuro común”, elaborado en 1982 y publicado en 1984; este informe fue elaborado por la comisión mundial sobre medio ambiente y desarrollo, creada por las naciones unidas y presidida por Gro Brundtland, primer ministro de Noruega, en el cual se hizo un llamado de alerta a los países del mundo, respecto de la posesión y ocupación de sus recursos naturales y humanos, de la perseveración y protección de estos, para asegurar su existencia y presencia en el futuro, la cual quedó explícita en la siguiente declaración: “Satisfacer las necesidades del presente, sin comprometer la habilidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades”.

En la actualidad existe una gran confusión con el término sustentabilidad y sostenibilidad, ya que se tiene idea que son términos distintos, sin embargo según el diccionario de la real lengua española, los dos términos pertenecen a los llamados “adjetivos verbales”, ya que se derivan de los verbos: “sustentar y sostener”. Ambos presentan similitud conceptual ya que su significado es “mantener, sostener o defender”. En la interpretación de Heredia (2003) significa “asegurar continuidad” (Cruz *et al*, 2018)

1.2.1 Pilares de la sostenibilidad

La sostenibilidad abarca tres grandes pilares que definen la estrategia 3E: economía, equidad y ecología inicialmente desplegados linealmente en la pirámide empresarial, donde la prioridad recae en la economía y una vez garantizada esta, se acude al diseño de productos y procesos con criterios sociales y ambientales; sin embargo, esta estructura se ha ido modificando (Figura 1.11) (McDonough & Braungart, 2002).



Fuente: Peralta, 2011.

Figura 1.11 Sistema secuencial desde la industria insostenible hacia C2C

Recientemente, el paradigma sostenible de la cuna a la cuna (C2C) ha introducido sinérgicamente las tres dimensiones de la sostenibilidad bajo una concepción fractal. Así, la sostenibilidad se transforma en el concepto 3E introducida en un dominio triangular (Figura 1.12) que crea valor a través del Ecodiseño (McDonough & Braungart, 2004).

responsablemente los recursos y materiales, e incorporan tecnologías amigables con el planeta.

- a) Torre del Bank of America, Nueva York. Está ubicada en el centro de Nueva York. Basándose en el concepto de biofilia. Desde su inicio, buscó la forma de maximizar la luz natural, el aire fresco al interior de la torre y el acceso a áreas verdes. Su avanzada tecnología en eficiencia energética, como un sistema de combustión limpia, una planta de cogeneración de energía y un proceso de almacenamiento térmico, le valió convertirse en el primer edificio comercial en conseguir la certificación platino LEED (Leadership in Energy and Environmental Design). Tiene implementado un sistema de captación de agua pluvial que luego reúsa como aguas negras para los sanitarios. Con esta y otras estrategias de consumo hídrico, logra ahorrar cerca de 7.7 millones de galones de agua potable al año.
- b) CH2, Melbourne. El nombre completo es Council House 2, mayormente reconocido como CH2, el primer edificio en la región en recibir las seis estrellas que otorga Green Building Council of Australia. Este proyecto fue desarrollado por DesignInc junto con la ciudad de Melbourne. En su estructura tiene instaladas celdas fotovoltaicas, cubiertas reguladoras de temperatura, sistema de autoreciclaje de aguas contaminadas, por nombrar algunas tecnologías.
- c) One Angel Square, Manchester. Debido a que tiene una de las calificaciones más altas dadas por BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), el One Angel Square es considerado uno de los edificios más sustentables de Europa. Entre las características que lo hacen sustentable se encuentran: una reducción del 50% en su consumo de energía y del 80% en carbono, el hormigón de la estructura actúa como una esponja térmica que minimiza la cantidad de energía necesaria para enfriar el edificio, sistemas de reciclaje hídrico y recolección de agua de lluvia, así como una planta de cogeneración de biodiesel que usa aceite de colza para proveer energía y calor. Por si fuera poco, el One Angel Square fue diseñado para ser

resiliente ante el aumento de las temperaturas promedio que enfrentamos anualmente.

1.3 SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS

De acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004), un SDF es un lugar donde se depositan los residuos sólidos urbanos y de manejo especial en forma definitiva. Los distintos tipos de sitios de disposición final que existen se presentan a continuación:

- a) Tiradero a cielo abierto (TCA). Es un sitio seleccionado sin estudio alguno para el depósito de residuos sólidos sin ningún tipo de control, por lo que contaminan el aire, el agua y el suelo. Son comúnmente barrancas, ríos y orillas de carreteras (Figura 1.14) (Rojas & Sahagún, 2012).



Figura 1.14 Tiradero a cielo abierto

- b) Sitio de tierra controlado (STC). Es un sitio que cumple con las especificaciones de un relleno sanitario en lo que se refiere a obras de infraestructura y operación, pero no cumple con las especificaciones de impermeabilización del suelo, por lo que también genera problemas de contaminación del suelo y del agua subterránea (Figura 1.15) (Rojas & Sahagún, 2012).



Figura 1.15 Sitio de Tierra Controlado

c) Relleno sanitario (RESA). Es obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de RSU y RME, con el fin de controlar, a través de la compactación en infraestructuras adicionales, los impactos ambientales (Figura 1.16) (Rojas & Sahagún, 2012).



Fuente: Rodríguez, 2016.

Figura 1.16 Relleno Sanitario

Dependiendo del tratamiento previo que se le realice a los RSU, los RESA se clasifican como se muestra en la tabla 1.2

Tabla 1.2 Clasificación de RESA

Sin pretratamiento	Tradicional	Se coloca la basura en celdas utilizando maquinaria pesada para la distribución, homogeneización y compactación.
	Manual	No es necesario adquirir maquinaria pesada para la operación del relleno
Con pretratamiento	Seco	Se acelera y facilita el control del RESA a través de la reducción del volumen RSU por su alta compactación con una prensa embaladora.
	Mecánico – Biológico	Se reduce el volumen de RSU utilizando dos etapas: compactación mecánica y el tratamiento biológico mediante fermentación controlada o digestión aerobia.

Fuente: SEGEM, 2002.

De acuerdo al tipo de administración y al servicio prestado los RESA pueden ser:

- RESA municipales. Solo un municipio se encarga de la construcción y operación del RESA y el servicio está limitado a su población.
- RESA intermunicipales. Los municipios se asocian e invierten para construir y operar un RESA y su servicio es destinado a la población de dichos municipios.

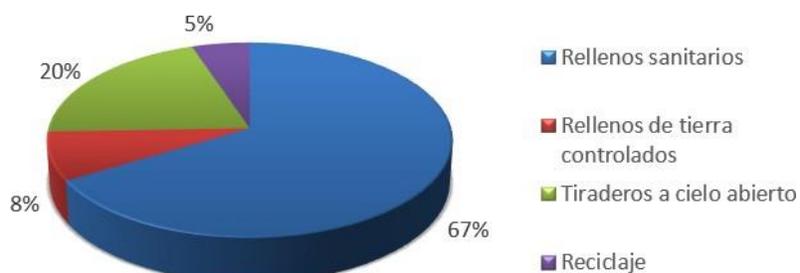
d) Biorrelleno (Bio-RESA). The Solid Waste Association of North America (SWANA, 2002) define al Bio-RESA como un RESA controlado o una celda de RESA donde las condiciones de líquido y gas son manejadas con el fin de acelerar o mejorar la bioestabilización de los residuos. El biorelleno incrementa significativamente el grado de descomposición de desechos orgánicos, las velocidades de conversión y la eficacia del proceso sobre la forma en la que ocurriría normalmente en un RESA y se pueden clasificar como se muestra a continuación (Lobo-García *et al.*, 2015; Machado *et al.*, 2009, Tchobanoglous *et al.*, 1994, Marshall, 2007; Reinhart *et al.*, 2002):

- Anaerobio. Consiste en alcanzar los niveles óptimos de humedad de los RSU, principalmente por la recirculación de los lixiviados, para su degradación

biológica, ésta ocurre en ausencia de oxígeno y da lugar al biogás, que es una mezcla de gases, donde sus componentes principales son el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂) y, pequeñas cantidades de varios compuestos trazas.

- Semiaerobio. En esta técnica se acelera la degradación de los RSU en condiciones aeróbicas favoreciendo la aireación natural de la celda y se extraen los lixiviados.
- Aerobio. Consiste en la adición de líquido, habitualmente por recirculación de lixiviado y se inyecta aire al interior de la celda para suministrar oxígeno y la degradación de RSU se lleva a cabo de forma aeróbica.
- Híbrido. Surge de la combinación de las técnicas de anaerobio y aerobio. Los RSU de las zonas superiores se airean intermitentemente para acelerar la degradación de la fracción orgánica y se intenta aprovechar también de la formación de biogás en condiciones anaeróbicas en los RSU más enterrados.

En México, de acuerdo con datos de INEGI, el 67% de los residuos generados tuvieron una disposición final en RESA, 20% en TCA, 8% en STC y únicamente 5% fueron reciclados durante el año 2013 (Figura 1.17).



Fuente: INEGI, 2016.

Figura 1.17 Disposición Final de RSU 2013

La cantidad de RESA en el país ha crecido de manera significativa, entre 1995 y 2012 se incrementó de 30 a 260, con lo cual la capacidad estimada de almacenamiento total creció de 5.95 a 27.98 millones de toneladas. En el año 2012, todas las entidades federativas, a excepción de la Cd. De México, contaron

El material de cobertura evita la proliferación de fauna nociva, reduce la generación de olores y evita la dispersión de los RSU, los espesores y tiempos de exposición recomendados son los siguientes:

- Cubierta diaria: 15 cm de espesor mínimo por 7 días
- Cubierta intermedia: 30 cm de espesor mínimo de 7-365 días
- Cubierta final: 60 cm de espesor mínimo, mayor a 365 días

Para efectos de diseño respecto a la altura, puede ser hasta 3 m, incluyendo el espesor de los RSU a disponer y el material de cobertura requerido (DOF, 2004).

El ancho de la celda deberá estar determinado por la longitud necesaria para el funcionamiento adecuado y la ejecución de maniobras del equipo, tanto de compactación como de transporte. Para poblaciones mayores de 250 000 habitantes, el ancho mínimo se calcula mediante la ecuación 1.1.

$$F = \sum_{i=1}^n (x_i)^2 \quad (\text{Ec. 1.1})$$

Dónde:

F = Longitud del frente de tiro (m)

x_i = Ancho de la hora de las máquinas empleadas

Para el volumen de la celda se determina empleando la ecuación 1.2 (DOF, 2004):

$$V_c = \frac{D_s}{D} M_c \quad (\text{Ec. 1.2})$$

Dónde:

V_c = Volumen de la celda diaria (m³)

D_s = Cantidad media de RSU que llegan al RESA Sustentable

D = Densidad de compactación de los RSU

M_c = Factor de material de cobertura (1.2-1.25)

Por otro lado, el largo de la celda se calcula en función de la altura y el ancho de la celda previamente determinados, de acuerdo con la configuración trapezoidal de la celda diaria según la ecuación 1.3:

$$L = \frac{V_c}{WA} \quad (\text{Ec. 1.3})$$

Dónde:

L = Largo de la celda (m)

V_c =Volumen de la celda (m³)

W =Ancho de la celda (m)

A =Altura de la celda (m)

En la figura 1.19 se presenta el diseño de una celda diaria y sus componentes cuyos valores se calculan mediante las ecuaciones anteriores.

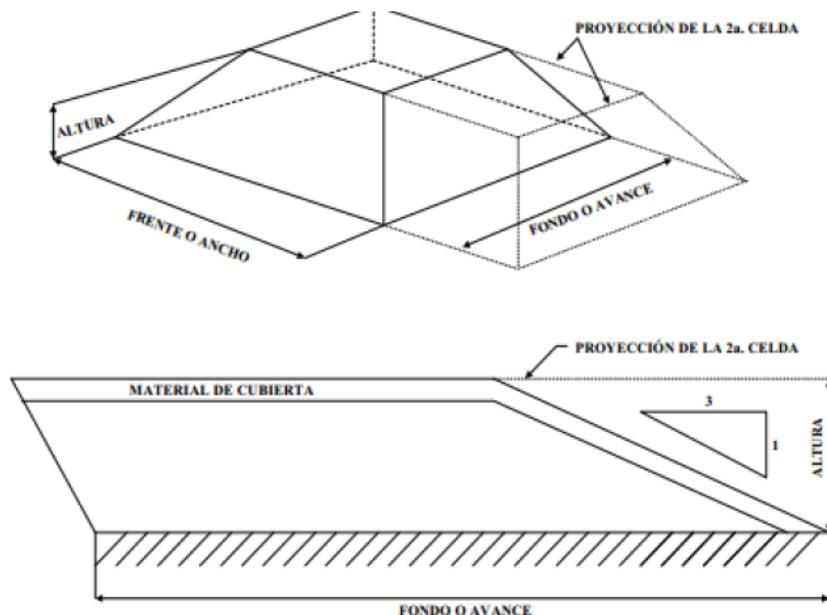


Figura 1.19 Diseño de una celda diaria

1.3.2 Rellenos sanitarios intermunicipales

En México el saneamiento es responsabilidad municipal, sin embargo, el manejo

intermunicipal de servicios públicos emerge como una respuesta a las necesidades de las regiones metropolitanas, para ofrecer un servicio de calidad a una población cada vez más exigente y creciente, (Pacheco, 2014).

El concepto de intermunicipalidad tiene cuando menos dos dimensiones fundamentales: la primera es la dimensión espacial y geográfica, donde un arreglo intermunicipal surge como resultado de la expansión urbana en ciudades con probabilidades de colindancia en periodos relativamente cortos. La segunda dimensión es la colaborativa e institucional, donde el arreglo intermunicipal deriva del establecimiento de una serie de reglas formales e informales de cooperación entre los diferentes municipios o ciudades (Pacheco, 2014). Es de hacer notar que, por definición, la intermunicipalidad establece que debe existir cooperación entre los municipios (Pacheco, 2013; Ramírez, 2012).

Los arreglos institucionales intermunicipales están asociados con las definiciones de gobernanza y de gobernanza metropolitana (Feiock, 2004; Feiock, 2008). No es posible conceptualizar una relación colaborativa entre ciudades sin tomar en cuenta que en el proceso de establecimiento de dichas colaboraciones, cada gobierno local tendrá que ceder cierto grado de control y establecer una serie de reglas formales e informales que establezcan de manera explícita los mecanismos de interacción entre los agentes gubernamentales, los políticos, los burócratas y el personal de cada agencia que tenga por objetivo una relación de colaboración con sus contrapartes en otros municipios y/o ciudades (Digaetano & Lawless, 1999; Hughes, 2012; Pacheco & Vega, 2008).

De acuerdo con Lefevre (1998), existen dos modalidades de arreglos institucionales en la gobernanza metropolitana: los supramunicipales y los intermunicipales. La supra municipalidad constituye un modelo de gobernanza urbana de tipo jerárquico con múltiples poderes y con legitimidad política directa. La intermunicipalidad, por el contrario, tiene diversos elementos que son más maleables y fluidos, por ejemplo, en España la estructura de cooperación

intermunicipal en la gestión pública del servicio de recolección y disposición de RSU tiene un grado mayor de independencia financiera que si cada municipio tuviera que hacerse responsable de la colección, tratamiento y disposición final de sus RSU (Bel & Mur, 2009; Warner & Bel, 2008). La ventaja de los arreglos intermunicipales por encima de la supra municipalidad es que hay un grado substancial de legitimidad que proviene del establecimiento de relaciones cooperativas entre los diferentes niveles de gobierno y entre los mismos gobiernos locales.

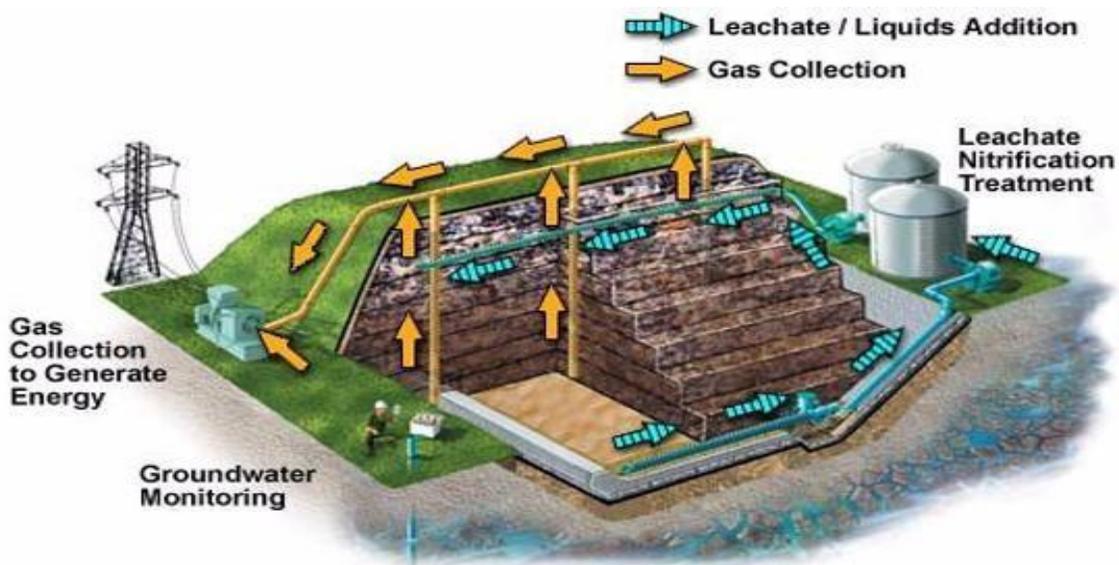
Los arreglos de cooperación intermunicipal pueden ser una de las posibles soluciones para reducir costos de la gestión de RSU evitando la privatización. Dado que la evidencia empírica apunta a que los supuestos ahorros que se obtienen mediante concesiones en la gestión urbana de RSU son pequeños, los gobiernos locales han comenzado a buscar otras alternativas para minimizar el impacto financiero sobre sus comunidades. En España se ha examinado la cooperación intermunicipal, encontrando que, en el caso de la gestión urbana de RSU en la Región Autónoma de Aragón, la cooperación intermunicipal reduce costos en municipalidades con poblaciones más pequeñas (Bel & Mur, 2009; Bel & Warner, 2008).

1.3.3 Rellenos sanitarios sostenibles

El RESA sustentable debe tener presente los tres pilares de la sustentabilidad: Social o Equidad, Ambiental o Ecológica y Económico; de ahí que los RESA sustentables si bien son biorellenos que integran tecnologías para la recuperación segura de biogás del relleno y su uso en la producción de energía y/o calor; contemplan la recuperación de reciclables tanto en la generación como antes de la disposición en las celdas, bien puede ser con un apropiado MIRSU o insertando de manera productiva a los denominados “pepenadores” (Ullca, 2006); y establecer cómo manejar mejor los rellenos después de que las operaciones de

disposición de residuos hayan cesado para proveer protección ambiental a corto y largo plazo. Luego entonces un RESA sustentable (Figura 1.20) es aquel en el que los RSU estabilizados no representan una amenaza para la salud humana y el medio ambiente en un período limitado de tiempo.

Otras prácticas que puede incluir el RESA sustentable son la minería en RESA estabilizados para recuperar algunos recursos y la incorporación de tecnologías para utilizar el espacio de RESA para fines adicionales, desde espacios recreativos hasta la recuperación de energía solar y eólica (Townsend *et al.*, 2015).



Fuente: Foth & Van Dyke, 2004

Figura 1.20 RESA Sustentable

En ese punto, a menudo llamado finalización, el cuidado posterior se puede concluir (Scharff, 2007). Para que esto sea posible los RESA incorporan las siguientes tecnologías:

- a) Control de fluidos para la estabilización de RSU. Las condiciones de líquido y gas son activamente manejadas para controlar y mejorar los procesos microbianos para estabilizar los RSU dentro de los 5 o 10 años siguientes a la clausura del RESA como en los biorellenos (Foth & Van Dyke, 2004). Sus ventajas son: descomposición y estabilización biológica en años o décadas en

tumbas secas, reducción de costos de eliminación de lixiviados, generación de nutrientes, aumento del espacio vacío debido a la rápida estabilización de los desechos y el aumento de la generación de biogás en un período más corto, que ofrece oportunidades para aumentar la eficiencia de su recolección y reduce los problemas con el cuidado y el monitoreo de la instalación a largo plazo (Townsed *et al.*, 2015).

- b) Recuperación y aprovechamiento de biogás. El biogás es un subproducto de la descomposición de RSU usualmente en condiciones anaeróbicas y debe evitarse su emisión a la atmosfera, para su recuperación se utiliza un sistema activo conformado por pozos, un soplador para aplicar succión en los pozos y un dispositivo de control (por ejemplo: quemador, motor, turbina, etc.); una vez que el biogás ha sido recuperado puede ser utilizado para producir energía, calor o ambos (Foth & Van Dyke, 2004). Las prácticas comunes incluyen la conversión de biogás a electricidad utilizando motores o turbinas y su uso directamente o como combustible de calidad gas natural después de un tratamiento apropiado (Townsed *et al.*, 2015). Este aprovechamiento ofrece beneficios ambientales y económicos como: reducir las emisiones gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global, compensar el uso de fuentes de energía no renovables, mejorar la calidad del aire local, proporcionar ingresos para los RESA sostenibles, reducir los costos de energía para los usuarios de energía de biogás, crear puestos de trabajo y promover la inversión en las empresas locales (EPA, 2016).

1.3.4 Evaluación de Sitios de disposición final

La evaluación de los SDF abarca aspectos técnicos, económicos y ambientales. A continuación se describen técnicas que han sido implementadas para evaluar estos aspectos.

- a) Evaluación técnica. Para realizar la evaluación técnica de un SDF en México es

importante observar la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004), que trata acerca de las 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 (DOF, 2004).

Una metodología rápida y fácil para realizar la evaluación técnica de un SDF es mediante la Lista de Verificación (LV) reportada por Díaz y colaboradores (2016). La LV fue elaborada tomando como base la Guía de cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004; SEMARNAT & GTZ, 2004); y consta de una serie de preguntas divididas en siete apartados: Proyecto ejecutivo y evaluación, Restricción para ubicación del sitio, Estudio y análisis previos para la selección del sitio, Estudio y análisis previos en el sitio, Característica constructiva y operativa del sitio y Clausura del sitio. En el anexo A se muestra completa la LV.

Para el caso de un Biorrelleno, donde se pretende aprovechar el CH₄ del biogás generado por la degradación anaeróbica de la fracción orgánica de los RSU, la evaluación técnica requiere del dimensionamiento del sistema de aprovechamiento, que se dividen en tres partes: el Sistema de captación, el Sistema de conducción y el Sistema de aprovechamiento y/o un sistema de destrucción (Bagchi, 2004; INCREMI, 2013); sin embargo debido a que la generación de biogás se ve incentivada por la recirculación de lixiviados, también es importante considerar el Sistema de recirculación como una cuarta parte (Rehinjar y tesis doctoral).

- Sistema de captación de biogás. Este Sistema requiere de pozos de extracción, donde cada uno de ellos está conformado de tubería de polietileno de alta densidad (PEAD o HDPE por sus siglas en inglés High Density Polyethylene) o bien de policloruro de vinilo (PVC por sus siglas en inglés Polyvinyl chloride), con diámetros de 2", 4" o 6" de diámetro. Para

permitir el paso del gas generado por la biodegradación de los RSU hacia el sistema de conducción, los tubos tienen tramos ranurados (orificios alrededor del 60% de su longitud, aunque dicho porcentaje puede ser menor o mayor). En México no se cuenta con criterios o regulaciones para el diseño de pozos de extracción de biogás, por lo que usualmente se consideran los criterios de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (EPA por sus siglas en inglés), y generalmente se utilizan ranuras verticales y horizontales, con áreas equivalentes que van de 8 a 16 plg²/ft (Jaramillo, 2012; SEPA, 2004; Schroeder, 1994).

- Sistema de conducción de biogás. No existe un método o normativa para el diseño de redes de conducción de biogás en RESA, por lo que se puede encontrar una gran variedad de diseños: diámetros de tubería, sistemas de control de flujo, manejo del condensado etc., por lo que el diseño de nuevos proyectos se basa en la experiencia y las observaciones en campo de proyectos en marcha. Este sistema está conformado por una red de tubería, por lo regular de PVC o HDPE; que interconectan a los pozos entre sí a una tubería principal, la cual conduce el biogás hacia el sistema de tratamiento (Eliminación de Humedad, H₂S, Siloxanos, etc.) y posteriormente hacia la dosificación del sistema de destrucción (quemado), o si existe al sistema de aprovechamiento (generación de energía) (INCREMI, 2013).
- Sistema de aprovechamiento y/o destrucción de biogás. El sistema de aprovechamiento comprende principalmente el motogenerador (SAGARPA & FIRCO, 2007). La especificación técnica del dimensionamiento de un motogenerador tiene que ver básicamente con la potencia de energía eléctrica que es capaz de generar. En la tabla 1.3 se muestran criterios que pueden utilizarse con la ecuación 1.4 para la estimación de la Potencia disponible, considerando el Rendimiento térmico de la generación eléctrica, el cual puede tomar valores de 25%, 33%, y 40% para los escenarios bajo, medio, y alto respectivamente, de acuerdo a la generación de biogás

considerada para la estimación; en la figura 1.21 se muestra un caso con escenarios bajo y medio (Blanco et al., 2017; FAO, 2011; SENER, 2014).

Tabla 1.3 Criterios para estimación de potencia de metano

PARÁMETROS	VALOR	UNIDAD
Poder calorífico inferior del biogás	5 ^a	Kwh/ m ³
Poder Calorífico de gas natural con 93% de CH ₄	41 041.00 ^b	kJ/m ³
Poder Calorífico CH ₄	44 130.11 ^b	kJ/m ³
	61 291.82 ^b	kJ/kg
Densidad CH ₄	10.00 ^c	Kwh/ m ³
	0.656 ^c	kg/m ³

Fuente: ^{a)} Blanco et al., 2017; ^{b)} SENER, 2014; ^{c)} FAO, 2011.

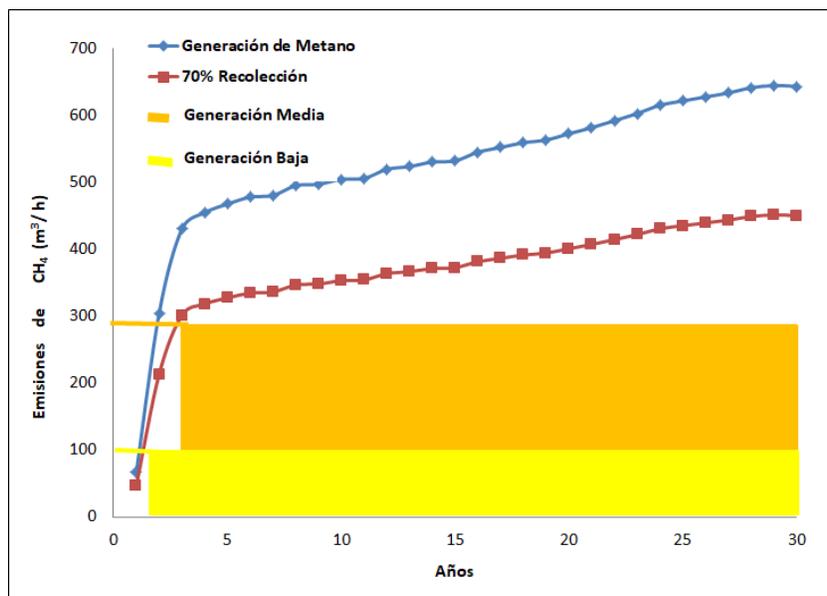
$$\text{Potencia disponible [kW]} = \eta_t * PCI \text{ biogás} * Q \text{ biogás} \quad (\text{Ec. 1.4})$$

Dónde:

η_t : Rendimiento térmico de la generación eléctrica

$PCI \text{ biogás}$: Poder calorífico inferior del biogás [kWh/m³]

$Q \text{ biogás}$: Caudal de biogás capturado [m³/h] (Escenarios bajo, medio, y alto)



Fuente: Santana Rodríguez, 2017)

Figura 1.21 Recuperación de emisiones de CH₄ en rangos bajo y medio

Para un motogenerador es importante considerar al menos un factor de sobre diseño del 20 %. Teniendo la potencia disponible y considerando un factor de disponibilidad por mantenimiento de 85 %, es posible estimar la energía eléctrica por generar mediante la ecuación 1.5 (Blanco *et al.*, 2017).

$$\text{Electricidad [kW/año]} = \text{Potencia disponible [kW]} * 0.85 * 8760 \frac{\text{h}}{\text{año}} \quad (\text{Ec. 1.5})$$

- Recirculación de lixiviados. Para favorecer la biodegradación de la fracción orgánica de los RSU en un SDF y acelerar la generación de CH₄, se puede inyectar lixiviados en los pozos de venteo con ayuda de una manguera y un equipo de bombeo desde la laguna de captación, o bien regar la superficie de la celda mediante un vehículo con un tanque y una tubería que funciona como regadera.
- b) Evaluación económica. Esta evaluación involucra la estimación de los costos de inversión y operación, así como el análisis de sensibilidad; por lo que es de suma importancia poder calcular con la mayor exactitud posible el costo de cada proyecto.
- Costos de Inversión. Es posible utilizar herramientas como la “Estimación Análoga” (Top Down) para calcular los costos de inversión, esta técnica utiliza datos de experiencias semejantes y es menos costosa, ya que requiere de menos tiempo que otras técnicas (SEPA, 2004; Ulrich, 1992) y aunque es menos precisa, es aceptable cuando se utiliza información de proyectos con similares tecnologías (Sullivan *et al.*, 2004).

La tabla 1.4 presenta costos estimados para sistemas de captación y conducción de biogás, así como los quemadores e instalaciones requeridos; y en la tabla 1.5 se muestran los costos de inversión para una planta

generadora y la conexión a la red eléctrica. Los costos adicionales para la Puesta en Marcha del proyecto realizado para el RESA de Saltillo, Coahuila se listan en la tabla 1.6 (INCREMI, 2013).

Tabla 1.4 Costos de pozos y tubería de conducción de biogás

CONCEPTO	COSTO
Construcción de 35 pozos de extracción	\$ 3,003,000
Red de conducción de Biogás de polietileno de alta densidad (1,800 m de tubería de 4" y 1,200 m de 8")	\$ 614,348
Dos sopladores con capacidad de 2100 SCFM	\$ 672,795
Dos quemadores	\$ 963,679
Cuarto de control, sala de capacitación y oficinas administrativas	\$ 385,000
Costo total estimado	\$ 5,638,822

“, pulgadas; SCFM, Pies cúbicos por minuto (siglas en inglés cubic feet per minute)
Fuente: SCS Engineers, 2013.

Tabla 1.5 Costos de inversión para la planta generadora y conexión a la red eléctrica

CONCEPTO	COSTO
Equipo de generación (2 motogeneradores de 1.06 MW)	\$14, 245, 200
Subestación transformadora de potencia (MVA)	\$ 2,120,000
Sistema de tierras físicas	\$ 495,000
Interconexión eléctrica con CFE	\$ 1,980,000
TOTAL	\$ 18,840,20

Fuente: SCS Engineers, 2013.

Tabla 1.6 Inversiones y costos adicionales para la Puesta en Marcha

CONCEPTO	COSTO
Adecuación del terreno	\$ 2, 935, 858.76
Equipo de monitoreo y verificación	\$ 550,000
Proyecto ejecutivo	\$ 1,000,000
Supervisión	\$300,000
Manuales y PDD	\$749,000
Contingencias	\$1,540,689
TOTAL	\$7,075,547.76

Fuente: SCS Engineers, 2013.

La “Estimación Análoga” es útil para aplicar la Regla de los seis décimos, que muestra la ecuación 1.6 (Jiménez, 2003; Ulrich *et al.*, 1992).

$$I_2 = I_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{0.6} \quad (\text{Ec. 1.6})$$

Dónde:

I_2 : Inversión del equipo a la capacidad deseada escalada (Q_2)

Q_2 : Capacidad deseada escalada

I_1 : Inversión del equipo a la capacidad reportada (Q_1)

Q_1 : Capacidad reportada

Para considerar la inflación en el costo que sufren los equipos al paso de los años, se puede utilizar la ecuación 1.7 con los Índices Anuales para los años 2013 y 2018, reportados en la Revista Chemical Engineering, conocidos como CEPCI por su definición en inglés Chemical Engineering Plant Cost Index (CE, 2016; CE, 2019).

$$I_{2a} = I_{1a} \left(\frac{CE_{\text{año } 2a}}{CE_{\text{año } 1a}} \right) \quad (\text{Ec. 1.7})$$

Dónde:

I_{2a} : Inversión del equipo al año actual o requerido

$CE_{\text{año } 2a}$: Índice anual al año presente o año requerido, escalado en el tiempo

I_{1a} : Inversión del equipo reportado (Q_1)

$CE_{\text{año } 1a}$: Índice anual al año en que se reporta la I_{1a}

- Costos de operación. Obtenidos los costos de inversión y tomando como base los estudios en Saltillo (INCREMI, 2013), es posible estimar los costos de operación anuales para un biorrelleno sostenible. Los gastos de operación y mantenimiento (O/M) del sistema de recolección de biogás y de expansión del sistema se pueden incrementar a una tasa anual del 2 % como lo recomienda SCS Engineers (2013). Estos costos incluyen aquéllos asociados a la O/M del

sistema de recolección existente, tales como mano de obra, repuestos y equipos de pruebas, mantenimiento de rutina y reparaciones del sistema y reemplazo limitado de los pozos y las tuberías existentes. También son importantes los costos anuales vinculados con el proceso para obtener reducciones de emisiones, incluyendo los del monitoreo, verificación e inscripción de tales reducciones. Para calcular los ingresos se puede tomar el precio por tonelada de reducciones de emisiones de CO₂e de \$20 USD para los certificados de reducción de emisiones (CER) de enero de 2013 (INECC, 2012).

- Análisis de sensibilidad. Para obtener la viabilidad económica de un proyecto, se pueden utilizar las ecuaciones 1.8 a 1.12, las cuales corresponden a Retorno de Inversión (RI), Valor Presente Neto (VPN) y Rango Costo Beneficio (RCB); así como de las ecuaciones 1.9 y 1.10 para calcular el Beneficio Extra (V) para un Beneficio Mínimo (i_{min}) de 0.4 y el Tiempo de recuperación de capital (TR) (Jiménez, 2003; SAGARPA & FIRCO, 2007).

$$RI = \frac{\textit{Utilidad Neta o Ganacia}}{\textit{Inversión}} \cdot 100 \quad (\text{Ec. 1.8})$$

$$VPN = \frac{\textit{Flujo de Efectivo}}{(1+\textit{Tasas de Interés})^{\textit{Periodo}}} \quad (\text{Ec. 1.9})$$

$$RCB = \frac{\textit{Ingresos}}{\textit{Egresos}} \quad (\text{Ec. 1.10})$$

$$V = P - i_{min} * I \quad (\text{Ec. 1.11})$$

$$TR = \frac{I}{P + eI} \quad (\text{Ec. 1.12})$$

- c) Evaluación ambiental. La evaluación ambiental identifica, califica y jerarquiza de manera objetiva los impactos negativos sobre el medio natural y social que

generan las actividades del proyecto. Tiene que analizarse cómo interactúan con el medio ambiente, actividades como la remoción de vegetación, los movimientos de tierra, la instalación y operación de construcciones temporales, la disposición de los materiales sobrantes, los acarreos de materiales, entre otros. En la tabla 1.7 se describen 5 tipos de impactos posibles por la instalación de un SDF para RSU (GADMCM, 2014).

Tabla 1.7 Impactos ambientales de los RSU

IMPACTO AMBIENTAL	ORIGEN
Contaminación de suelos y cuerpos de agua	<p>La infiltración de los líquidos que producen los residuos orgánicos, que al mezclarse con residuos peligrosos, se convierten en una sustancia sumamente toxica. Estos líquidos son conocidos como lixiviados.</p> <p>La contaminación de las aguas superficiales se manifiestan 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.</p>
Generación de biogás	<p>En forma indirecta, la escorrentía y lixiviados provenientes de los sitios de disposición final de residuos sin tratamiento, incorporan tanto a las aguas superficiales como a los acuíferos, los principales contaminantes caracterizados por altas concentraciones de MO y sustancias toxicas.</p>
Inundaciones	<p>La descomposición de los residuos vegetales y animales, que además de ser tóxicos y explosivos contribuyen al problema del cambio climático.</p>
Condiciones estéticas e imagen	<p>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.</p>
Amenazas a la flora y fauna	<p>Olores y residuos arrastrados por el viento, así como animales, aves y animales carroñeras atraídas por los desechos orgánicos.</p> <p>Impactos directos sobre la flora y fauna que se encuentran asociados, en general, a la remoción de especímenes de la flora, a la perturbación de la fauna nociva durante la fase de construcción y a la operación inadecuada de un sistema de disposición.</p>

Fuente: SEMARNAT, 2008

El impacto ambiental de un producto o de un proceso inicia con la extracción de las materias primas y termina cuando la vida útil del producto finaliza. La medición de las variables ambientales específicas establece el seleccionar métodos y técnicas en función del ambiente afectado, de los tipos de acción que se emprendan implementar, de los recursos disponibles y de la calidad de la información, entre otros aspectos. La mayoría de las metodologías para una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) se refieren a impactos ambientales específicos, idóneas para proyectos particulares; por lo que no hay una metodología generalizada, debido al cambio de factores afectados, de ahí que existen varios métodos para estudiar el impacto sobre un mismo factor y los vectores de acción varían de una actividad a otra. Existen diversos métodos y entre ellos, en la tabla 1.8 se describen los más usuales para la EIA (Espinoza, 2002).

Tabla 1.8 Metodologías de EIA

TIPOS DE EVALUACIÓN	DESCRIPCIÓN
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.
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.
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 comienza en 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.

Fuente: Espinoza, 2002

Entre los métodos destaca la Matriz de Leopold, que fue el primer método que se estableció para las EIA. La base del sistema es una matriz en que las entradas en columnas son acciones del hombre que pueden alterar el medio ambiente y las entradas en filas, son características del medio (factores ambientales) que pueden ser alteradas. (Contán-Pinto, 2007; Espinoza, 2002).

El primer paso para el uso de la Matriz de Leopold es la identificación de las acciones (columnas) que pueden tener lugar en el proyecto (no se cuenta con una guía para EIA de TCA), el siguiente paso es considerar para cada acción mediante filas, a todos los factores ambientales (física, biológica y socioeconómica) que pueden quedar afectados significativamente. Cada cuadrícula comprende dos valores (Mendoza Delgado, 2017):

- Magnitud: los valores se preceden de signos + y –, dependiendo si el efecto es positivo o negativo y se encuentran en escala de 1 a 10, donde el 10 corresponde a la alteración máxima provocada en el factor ambiental y 1 a la mínima.
- Importancia: es la ponderación o peso relativo que el factor ambiental tiene dentro del proyecto o la posibilidad que se presenten alteraciones.

Los criterios de valoración que se consideran para ponderar las Magnitudes e Importancia de cada impacto en la Matriz de Leopold se muestran en la tabla 1.9, la cual indica cada uno de ellos y su correspondiente definición, estos valores fueron recopilados de los trabajos de Conesa (1993) y Madrid-León (2011).

Tabla 1.9 Criterios de evaluación de impacto ambiental

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

Fuente: Conesa, 1993

Con estas entradas en filas y columnas se pueden definir las interacciones existentes. Normalmente, el número de interacciones observadas en los distintos proyectos analizados es menor de 50 (Pinto, 2007).

La agregación de impactos ambientales está determinada por la suma del producto de la Magnitud del impacto y su Intensidad; se puede estimar tanto para los factores como para las actividades y tiene por objetivo evaluar las alternativas y hacer una comparación y selección del resultado óptimo, es una

consideración conjunta de la gravedad de todos los impactos de cada alternativa.

Una vez llenas con los valores elegidos las cuadrículas de la Matriz de Leopold, se evalúan e interpretan los números colocados. La tabla 1.10 muestra los valores de los rangos utilizados para determinar la calificación ambiental (Ca) y de esta forma determinar la Magnitud de la afectación y evaluar el Nivel de significancia.

Tabla 1.10 Rangos de valor del Nivel de significancia

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

Fuente: Espinoza, 2002

Para determinar el Nivel de significancia se utiliza la Ca, la cual es una expresión numérica que se estima por cada uno de ellos y es el resultado de la interacción de cada atributo (Espinoza, 2002). La Ca está dada por la ecuación 1.13

$$Ca = \sqrt{\frac{|\sum m * i|}{n}}$$

(Ec. 1.13)

Dónde:

M = magnitud

i= intensidad

n= número de interacciones

Donde la Magnitud puede ser positiva o negativa y estará determinada por la intensidad y la afección que se produzca desde el nivel más alto (10) al más

bajo considerado (1). El resultado de cada operación con los datos asignados a la Matriz de Leopold, permite comparar los resultados respecto a la tabla 1.10 y de esta manera determinar si la afectación es Baja, Moderada, Severa o Crítica (Madrid, 2013).

1.4 ESTIMACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE SIMULADORES

El biogás generado en los RESA es una mezcla de gases que se producen como resultado de factores físicos, químicos y procesos microbianos que tienen lugar dentro de los RSU en la fracción orgánica (Machado *et al.*, 2009, Tchobanoglous *et al.*, 1994, Marshall, 2007).

La composición de los RSU es el factor más importante en la evaluación del potencial de generación de biogás de un SDF. El potencial máximo de volumen de biogás depende de la cantidad y tipo de materia orgánica dentro de la masa de residuo, ya que la descomposición de los residuos es la fuente de todo el biogás producido. Otros factores que influyen la tasa de producción de biogás son el contenido de humedad, nutrientes, contenido bacteriano, nivel de pH, y el diseño específico del lugar y los planes de operaciones (World Bank Group 2004, Machado *et al.* 2009, Kumar *et al.* 2004b, Kong 2008).

La factibilidad de proyectos para el aprovechamiento del biogás en los RESA depende de estimar, con una certidumbre razonable, tanto la producción diaria como la producción acumulativa de CH₄ a largo plazo. Tales valores son usualmente calculados con expresiones matemáticas que consideran 100% de conversión (Meraz *et al.*, 2008). Los estudios de estimación de generación de biogás han cobrado fuerza, debido al aumento en la demanda energética y a que los RSU depositados en los RESA sin un manejo apropiado, pueden producir problemas de contaminación de aire, agua y suelo, con el consecuente riesgo de la salud pública (Aguilar-Virgen *et al.*, 2009). Además la contribución al efecto invernadero del CH₄, uno de los gases presentes en el biogás que se genera en

los RESA, es 21 veces más potente respecto al CO₂ (Batool y Chuadhry, 2008). Existen distintos modelos desarrollados para llevar a cabo la estimación del biogás generado, entre ellos destacan: Modelo Mexicano de Biogás (MMB) V2.0, Método IPCC y Modulo 4.0.

1.4.1 Modelo Mexicano de Biogás

Este modelo fue inicialmente desarrollado en el 2003 por SCS Engineers bajo contrato con el programa Landfill Methane Outreach (LMOP) de la EPA. El MMB Versión 1.0 se utilizó para estimar la generación y recuperación de biogás en RESA mexicanos que contaban o planeaban tener un sistema de recolección de biogás. Posteriormente, en el 2009, se desarrolló una actualización y mejoramiento de esta versión, logrando el MMB Versión 2.0. Este modelo usa la siguiente información para estimar la generación y recuperación del biogás en un relleno sanitario:

- La cantidad de residuos depositados en el relleno sanitario anualmente.
- El año de apertura y clausura del sitio.
- El índice de generación de metano (k).
- La generación potencial de metano (L0).
- El factor de corrección de metano (MCF).
- El factor de ajuste por incendios (F).
- La eficiencia de recuperación del sistema de captura.

El MMB estima el índice de generación de biogás para cada año usando la ecuación de degradación de primer grado, la cual fue modificada por USEPA en el Modelo LandGEM versión 3.02 en el 2005 (Stege *et al*, 2009).

$$Q_{LFG} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0.1}^1 2kL_0 \left[\frac{M_i}{10} \right] (e^{-kt_{ij}}) (MCF)(F) \quad (\text{Ec. 1.14})$$

Dónde:

Q_{LFG} = Flujo de biogás máximo esperado ($m^3/año$)

i = Incremento en tiempo de 1 año

n = (año del cálculo) – (año inicial de disposición de residuos)

j = Incremento de tiempo en 0.1 años

k = Índice de generación de metano ($1/año$)

Lo = Generación potencial de metano (m^3/Mg)

Mi = Masa de residuos dispuestos en el año i (Mg)

t_{ij} = Edad de las sección j de la masa de residuos Mi dispuestas en el año i (años decimales)

MCF = Factor de corrección de metano

La ecuación 1.14 estima la generación de biogás usando cantidades de RSU dispuestos acumulados a través de un año. La función de degradación exponencial asume que la generación de biogás tiene su punto máximo un período antes que la generación de CH_4 y proporciona datos de generación seis meses después de que se empieza a colocar RSU.

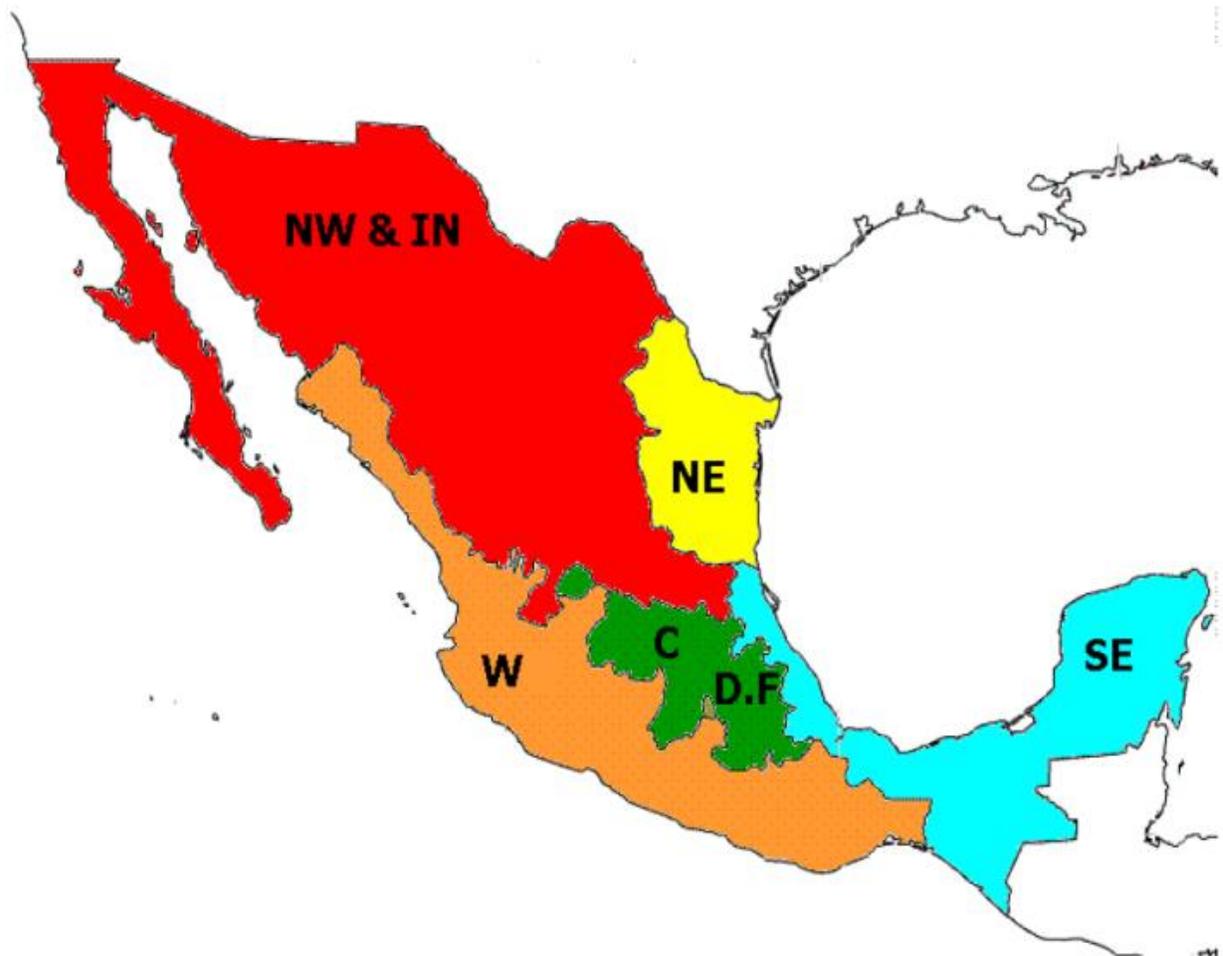
Por cada unidad de RSU, después de seis meses el MMB asume que la generación de biogás desciende exponencialmente conforme la fracción orgánica de los residuos es consumida. El año de generación máxima normalmente ocurre en el año de clausura o el año siguiente (dependiendo del índice de disposición en los años finales).

El modelo aplica ecuaciones separadas para calcular la generación de cada uno de los cuatro grupos de residuos orgánicos agrupados de acuerdo a su índice de degradación:

- a) Residuos de degradación muy rápida – residuos alimenticios, otros orgánicos, 20% de los pañales.

- b) Residuos degradación moderadamente rápida – residuos vegetales, poda de casas o parques municipales, papel higiénico.
- c) Residuos degradación moderadamente lenta – papel, cartón, textiles.
- d) Residuos degradación muy lenta – madera, caucho. piel, huesos, paja.

La generación de biogás total para todos los RSU es calculada como la suma de las cantidades de generación de biogás de cada una de las cuatro categorías de residuos. El MMB considera la precipitación promedio anual, clasificando el territorio Mexicano en cinco Regiones climáticas, como se muestra en la figura 1.22. Cada una de las categorías tiene asignados un valor de k (Tabla 1.11) y Lo (Tabla 1.12) que son usados en el cálculo.



Fuente: (Stege *et al*, 2009).

Figura 1.22 Regiones climáticas de México

Tabla 1.11 Valores del Índice de Generación de Metano (k)

Categoría de Residuos	Región 1	Región 2	Región 3	Región 4	Región 5
	Sureste	Oeste	Centro/ Interior*	Noreste	Noreste &Interior Norte
1	0.300	0.220	0.160	0.150	0.100
2	0.130	0.100	0.075	0.70	0.050
3	0.050	0.040	0.032	0.030	0.020
4	0.025	0.020	0.016	0.015	0.010

Fuente: (Stege *et al*, 2009).

Tabla 1.12: Valores de la Generación Potencial de Metano (L0)

Categoría de Residuos	Región 1	Región 2	Región 3	Región 4	Región 5
	Sureste	Oeste	Centro/ Interior*	Noreste	Noreste &Interior Norte
1	69	69	69	69	69
2	115	126	138	138	149
3	214	214	214	214	214
4	202	202	202	202	202

Fuente: (Stege *et al*, 2009).

1.4.2 Método IPCC

En este método la estimación depende de las categorías de residuos, la fracción de carbón orgánico degradable y el gas CH₄ en el SDF (Ec. 1.15). En la estimación del Potencial de emisión de CH₄, los valores establecidos para la fracción orgánica degradable y la fracción orgánica disponible para degradación se asume como 0.12 y 0.77, respectivamente. El contenido de CH₄ en el biogás total generado en el año deseado (LFG) es asumido como 0.55. La fracción de CH₄ que se oxida a las emisiones de CO₂ no se tiene en cuenta, por lo que el factor de oxidación (OX) se supone que es cero.

Los RSU disponibles para degradación anaeróbica y generación de CH₄ se asumen como la mitad (50%) del valor usado para los RESA. Esto sucede porque

las condiciones en los RESA son más anaeróbicas comparadas con los TCA, debido a la presencia de una cobertura superior que provee de condiciones favorables para la producción de CH₄ (Chiemchaisri y Visvanathan, 2008; Machado *et al.*, 2009; Ngnikam *et al.*, 2002).

$$CH_4 \cdot emisiones \left(\frac{Gg}{año} \right) = \left(\frac{MSW_T * MSW_F * MCF *}{DOC * DOC_F * F * \frac{16}{12} - R} \right) * (1 - OX) \quad (Ec. 1.15)$$

Dónde:

MSWT = Total de RSU generados (Gg/año);

MSWF = Fracción de residuo sólido dispuesto;

MCF = Factor de corrección de metano;

DOC = Carbono orgánico degradable;

DOCF = Fracción de DOC;

F = Fracción de CH₄;

R = CH₄ recuperado (Gg/año);

OX = Factor de oxidación.

Este software propone valores de k (tasa de generación de CH₄ año⁻¹) de acuerdo a la zona climática SDF y la degradabilidad de los diferentes residuos en los RSU (Tabla 1.13). Las zonas climáticas, se dividen en valores medios anuales de temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial, las cuales se presentan en la tabla 1.14.

Tabla 1.13 Valores típicos de la tasa de generación de metano

Tipo de residuo	Zona climática			
	Templada húmeda	Templada seca	Tropical húmeda	Tropical seca
Papel	0.006	0.04	0.07	0.045
Textiles	0.06	0.04	0.07	0.045
Parques y Jardines	0.1	0.05	0.17	0.065
Otros putrescibles orgánicos (no alimenticios)	0.1	0.05	0.17	0.065
Alimentos	0.185	0.06	0.4	0.085
Madera	0.03	0.02	0.035	0.025
Desechos brutos	0.09	0.05	0.17	0.065

Fuente: IPCC, 2006.

Tabla 1.14 Zonas climáticas consideradas para asignar la tasa de degradación

Zona		Temperatura media anual	[Precipitación media anual/ evapotranspiración]	Precipitación media anual
Templada	Seca	$\leq 20^{\circ}\text{C}$	<1	-
	Húmeda	$\leq 20^{\circ}\text{C}$	>1	-
Tropical	Seca	$> 20^{\circ}\text{C}$	-	<1000mm
	Húmeda	$> 20^{\circ}\text{C}$	-	$\geq 1000\text{mm}$

Fuente: IPCC, 2006.

1.4.3 Modulo 4.0

Modulo 4.0 es un software que ha logrado interrelacionar las distintas variables existentes en los SDF, cuyo propósito general es la simulación de RESA como herramienta para el diseño, diagnóstico y seguimiento. El software se basa en una representación tridimensional del RESA, formada por capas compuestas y celdas que se van activando a lo largo de la simulación según el historial/plan de explotación. Simulando los procesos hidrológicos, de biodegradación y asentamiento a lo largo del tiempo de manera simplificada, permite estimar,

diariamente, el estado de humedad y composición del vertedero, caudal y contaminación orgánica de lixiviados, flujos a través del contorno, asientos. El modelo de simulación se crea combinando cuatro submodelos de distinto tipo que el usuario define de manera independiente (López *et al.*, 2013):

- a) Modelo meteorológico
- b) Modelo de producción de residuos
- c) Modelo de almacenamiento de lixiviados
- d) Modelo morfológico del vertedero

En cada submodelo los datos están agrupados en una o más entidades, lo que permite crear simulaciones de diferentes escenarios combinando entidades y submodelos. Los datos en cada caso se definen a través de las ventanas correspondientes. Para facilitar el manejo de series temporales de datos (series meteorológicas, de lixiviados enviados a planta de tratamiento, de distintas corrientes de residuos) existe la opción de cargarlas directamente desde hojas de cálculo externas al programa (Microsoft Excel) donde pueden editarse sino se desea hacerlo directamente en el programa:

a) Modelo morfológico. Son todos aquellos aspectos referentes a la disposición geométrica del RESA (topografía del área de vertido, situación de cada celda y orden de llenado) y características de la discretización (dimensiones horizontales de las unidades elementales en que se divide el modelo de vertedero, llamadas “celdas”, espesor de las capas, tipología de las celdas, situación de los drenes, celdas sometidas a recirculación y escorrentía superficial). La operación comprende las siguientes etapas:

- Definición de los parámetros de discretización, define el tamaño de celdas del RESA, donde entre más pequeñas las celdas mayor proximidad se tiene del modelo del terreno y del orden de llenad/o de los RSU.
- Carga del fichero .dxf, corresponde al plano original en 3D por las diversas

cotas propias del terreno elaboradas y visualizadas en cualquier software de diseño asistido.

- Modificación de los datos originales en caso necesario.
- Discretización del plano original.
- Modificación de la discretización en caso necesario.
- Cálculo de las cotas de las celdas del modelo.
- Creación del fichero XML, este fichero permite crear un nuevo modelo donde se desarrollan todas las interrelaciones de los escenarios que se deseen estudiar.

b) Modelo meteorológico. Incluye las series temporales que tienen relevancia en el balance hidrológico, considera las siguientes variables meteorológicas:

- Humedad relativa media diaria (HR) (%)
- Temperatura media diaria (TP) (°C)
- Velocidad media diaria del viento (VPV) (km/h)
- Insolación (I): número de horas diarias de sol
- Precipitación horaria (PH): correspondiente a cada una de las horas del día
- Precipitación diaria (PD)
- Temperatura máxima diaria (Tmax) (°C)
- Temperatura mínima diaria (Tmin) (°C)

c) Modelo hidrológico. Para aplicar los distintos modelos hidrológicos es necesario introducir parámetros en las subcategorías que a continuación se presentan:

- Modelo de infiltración superficial. Se define la tasa de infiltración de la capa de cobertura a través de la velocidad de infiltración mínima (mm), velocidad de infiltración máxima (mm) y parámetro de Horton (m⁻¹)
- Modelo de evapotranspiración. Comprende la profundidad de evaporación (m) y el punto de marchitez (%)
- Modelo de escorrentía superficial: consiste en la máxima acumulación

superficial (m), es decir, la altura máxima de almacenamiento de agua en superficie antes de que se produzca la escorrentía.

- Modelo de flujo preferencial. Se definen parámetros del modelo de flujo a través de canales preferenciales como son, fracción volumen afectado por canales preferenciales (%) y factor de permeabilidad del material en la zona canalizada (adimensional)
- Modelo de humedad residual. Contiene los siguientes parámetros: Humedad residual mínima del residuo (%w) e influencia de la presión en la humedad residual del residuo (kg/m^2)

d) Modelo de biodegradación. Aquí se definen los parámetros necesarios para modelizar la degradación del residuo los cuales son:

- Tiempo de activación de la hidrólisis rápida (d)
- Tiempo de activación de la hidrólisis lenta (d)
- Tiempo de activación de la metanogénesis (d)
- Constante de hidrólisis rápida (d^{-1})
- Constante de la hidrólisis lenta (d^{-1})
- Constante de acetogénesis (d^{-1})
- Constante de metanogénesis acetofílica (d^{-1})
- Constante de metanogénesis hidrogenofílica (d^{-1})
- Fracción de carbono transformada en compuestos intermedios en la hidrólisis (Factor estequiométrico)
- Fracción de carbono transformada en acetato en la hidrólisis (Factor estequiométrico)
- Fracción de carbono transformada en acetato en la acetogénesis (Factor estequiométrico)

e) Vertido y operación Tradicional. El modelo morfológico del RESA se construye mediante la colocación sucesiva de celdas que representan los distintos materiales/residuos según el historial de operación que se desee simular. La

colocación sucesiva va de la mano con el orden de llenado, ya que el situar una celda con cobertura o no, puede afectar en la simulación durante el periodo que se precise.

f) Operación con recirculación. Pueden definirse sistemas de recirculación de lixiviados durante la etapa de operación del RESA y en el período de postclausura:

- Recirculación durante la operación del RESA. Existen siete tipos de sistemas de recirculación para esta etapa: Prehumectación de RSU, riego en el frente de tiro, riego mediante difusores, lagunas sobre la superficie, inyección mediante conducciones horizontales, inyección mediante pozos verticales y extracción mediante pozos verticales.
- Recirculación en la etapa de postclausura. Existen cinco tipos de recirculación de lixiviados para el periodo de postclausura: Riego mediante difusores, lagunas sobre la superficie, inyección mediante conducciones horizontales, inyección mediante pozos verticales y extracción mediante pozos verticales.

1.5 CASOS DE ESTUDIO

En sus inicios, la implementación del RESA se centró en minimizar la propagación de la enfermedad y la ocurrencia de incendios en sitios de disposición final, sin embargo, no abordó las dos emisiones de contaminantes principales asociadas con el manejo de residuos sólidos urbanos (RSU): los lixiviados y el biogás. A medida que se comenzó a monitorear el agua subterránea alrededor de los RESA se hizo evidente que el lixiviado afecta negativamente su calidad (Sawney & Kozloski, 1984; Reinhard *et al.*, 1984; Schultz & Kjeldsen, 1986). Esto llevó a la construcción de RESA que incluyeran una barrera para evitar la salida de lixiviados y sistemas de drenaje que permitieran su remoción para darle tratamiento antes de su eliminación. Las preocupaciones sobre el biogás se

centran en el control de su emisión hacia edificios adyacentes y espacios cerrados, donde el metano (CH_4) reducido por la descomposición anaeróbica de desechos podría dar lugar a condiciones explosivas, en su emisión en lugares con problemas regionales de contaminación atmosférica y otros problemas como el olor, constituyentes tóxicos y potencial de calentamiento global; dando como resultado regulaciones generalizadas de control del biogás en países desarrollados. El control típico de gas involucra la construcción de pozos dentro de las celdas del RESA que están conectados entre sí a un sistema de extracción del biogás a un lugar central donde puede ser destruido de manera segura (Townsend *et al.*, 2015).

El dilema de los RESA modernos es que las medidas tomadas para abordar las preocupaciones inmediatas de lixiviado y biogás resultan en instalaciones que requieren funcionamiento y monitoreo continuo, o resultarán en futuros problemas de emisión. Atendiendo esta problemática se ha desarrollado el (Bio-RESA), que opera estimulando la descomposición de desechos y limita la vida activa de la instalación a aquellos años en que los componentes de contención del sitio están en su mejor estado y está siendo controlado activamente (Reinhart & Townsend, 1997; Reinhart *et al.*, 2002). La diferencia más significativa entre un RESA tradicional y un Bio-RESA es la operación de un sistema húmedo mediante la adición de líquidos. (Buivid *et al.*, 1981; Leckie *et al.*, 1979; Pohland, 1980).

La evolución de los RESA de sistemas de disposición a sistemas de tratamiento a través de biorellenos cuando se integran con tecnologías de recuperación de energía y materiales representa un paso importante hacia un RESA sostenible.

El crecimiento demográfico, la modificación de las actividades productivas y el incremento en la demanda de los servicios, han rebasado la capacidad del ambiente para asimilar la cantidad de residuos que genera la sociedad; por lo que es necesario contar con sistemas de manejo integral de residuos adecuados con

la realidad de cada localidad (DOF, 2004). A continuación, se muestran ejemplos de estudios realizados para determinar la ubicación apropiada de RESA:

Tabla 1.15 Antecedentes del proyecto

AUTOR Y AÑO	ESTUDIO	DESCRIPCIÓN Y RESULTADOS
CFE & IIE (2012)	Guía de usuario: Generación de electricidad mediante residuos sólidos urbanos.	En México, Bioenergía de Nuevo León, S.A. de C.V., (BENLESA) es una asociación público privada (APP), responsable de la operación de la planta de generación de energía eléctrica a través del aprovechamiento del biogás generado en el RESA de Salinas Victoria; dicha planta es considerada como la más importante en su tipo en Latinoamérica y se inauguró en 2003 con una capacidad de 7.42 MW, con una inversión privada de 5.7 millones de dólares y un donativo del Banco Mundial de 5.1 millones de dólares, posteriormente amplió su capacidad instalada bruta de generación a 16.96 MW (neta 16.0 MW) con la que se pueden abatir 530,000 t de dióxido de carbono equivalente (CO ₂ eq) al año. La energía generada se aprovecha en el servicio de alumbrado público de los ayuntamientos asociados que conforman el Área Metropolitana de Monterrey, el sistema de transporte público colectivo más importante del área, oficinas gubernamentales y servicios municipales de drenaje.
Zapata & Zapata (2013)	Un método de gestión ambiental para evaluar rellenos sanitarios. Gestión y Ambiente	Este estudio trata sobre la aplicación de un método de evaluación ambiental en el RESA “Los Saltos” ubicado en el municipio de Marinilla en Colombia; a partir del análisis del estado actual de la zona del RESA, de sus actividades de operación y la caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lixiviados se determinaron las principales interacciones entre actividades y componentes ambientales, con esta información se elaboró una Matriz de Valoración de Importancia en la que se clasificaron los impactos ambientales en críticos, severos, moderados e irrelevantes y posteriormente mediante una valoración cualitativa se identificaron las actividades con mayor impacto y los factores más afectados. Como resultado se determinó que la construcción y operación del RESA son las actividades que tiene un mayor impacto en los componentes físico y biótico.
Jain <i>et al.</i> (2014)	Case study of landfill leachate recirculation using small-diameter vertical wells.	El relleno sanitario de New River ubicado en Raiford, FL, US ocupa aproximadamente un área total de 202 hectáreas y consta de seis celdas contiguas que ocupan un área total de 33 hectáreas. En 2001, se reacondicionaron aproximadamente cuatro hectáreas con infraestructura de RESA sostenible incluyendo recirculación de lixiviados, inyección de aire, extracción de biogás y equipo de monitoreo. Desde el 2003 se han realizado distintas investigaciones en el sitio: la determinación de permeabilidad del aire de los RSU, de la conductividad hidráulica saturada, del grado de estabilización de RSU, la revisión del sistema de pozos verticales para la adición de líquidos, entre otras.

Tabla 1.3 Antecedentes del proyecto (Continuación)

AUTOR Y AÑO	ESTUDIO	DESCRIPCIÓN Y RESULTADOS
Vera <i>et al.</i> (2014)	Potencial de generación de biogás y energía eléctrica.	En este trabajo se estimó la cantidad de biogás capturado mediante el Modelo Mexicano de Biogás versión 2.0, captando RSU durante 11 años con una vida útil del proyecto de 21 años y se realizó un análisis de generación de energía eléctrica que pueda ser consumida por la región Ciénega de Chapala, Michoacán, México, evaluando cuatro escenarios posibles: óptimo, intermedio óptimo, intermedio pesimista y pesimista variando características como manejo adecuado del RESA, presencia de incendios, cobertura, lixiviados, entre otros. Cada uno de los escenarios justifica económicamente la construcción de un relleno sanitario intermunicipal obteniendo beneficios económicos sustanciales a largo plazo (26.5×10^6 USD, 22.8×10^6 , 17.9×10^6 y 11.7×10^6 , respectivamente), al mismo tiempo que se contribuye a la mitigación del cambio climático y a la prevención de enfermedades.
CACER consultores (2009)	Proyecto ejecutivo para la construcción del relleno sanitario intermunicipal en El Grullo, Jalisco.	Se llevó a cabo el estudio de la construcción del Relleno Sanitario Intermunicipal en El Grullo, Jalisco. Que brinde servicio a los municipios de El Limón, El Grullo, Ejutla y Unión de Tula, Jalisco. Considerando desde las consideraciones del terreno antes de la construcción, hasta la clausura del mismo
Visvanathan <i>et al.</i> (2016)	Sustainable landfilling in tropical conditions: Comparison between open and closed cell approach	Se construyó una celda que operó sin ser cubierta simulando las condiciones de un RESA abierto y otra que fue cubierta para crear las condiciones de RESA cerrado, fueron monitoreadas bajo condiciones de lluvia, en seco y de humedad artificial. En la celda cerrada el asentamiento del substrato fue menor que en la celda abierta, la infiltración del agua de lluvia fue escasa, lo que retrasó la estabilización de los desechos y produjo un menor volumen de lixiviado.

Tabla 1.3 Antecedentes del proyecto (Continuación)

AUTOR Y AÑO	ESTUDIO	DESCRIPCIÓN Y RESULTADOS
Morris <i>et al.</i> (2003)	Findings from long-term monitoring studies at MSW landfill facilities with leachate recirculation.	<p>Consistió en el llenado de dos celdas de prueba de 4,000 m² con RSU que fueron monitoreadas durante un periodo de 6 años; una celda fue operada usando recirculación de lixiviados y otra no. La degradación de desechos fue significativamente mayor en la celda con recirculación y no existieron diferencias significativas en la calidad del lixiviado entre las celdas debido a una mala distribución de la humedad dentro de la celda de recirculación del lixiviado. La producción de gas fue mayor en la celda húmeda, aunque fue mucho menor que el potencial de producción previsto.</p>
Valencia <i>et al.</i> (2010)	Metodología para la localización de un parque de tratamiento y disposición final de residuos sólidos de tipo regional desde una perspectiva multidimensional	<p>El objetivo es presentar la metodología elaborada para la determinación de las áreas potenciales para el asentamiento de un parque de tratamiento y disposición final de residuos sólidos de tipo regional, teniendo como soporte la descripción, caracterización y análisis del ambiente (abiótico, biótico y socioeconómico) en la subregión Valles de San Nicolás. Dicha propuesta se basa en un análisis matricial combinado con una herramienta SIG, que permitió evaluar diferentes sitios desde su viabilidad, ambiental, social, económica y física y entregar tanto a las Administraciones municipales como a la Corporación una estrategia metodológica que, incorporando lo planteado en el decreto 838, permita una toma de decisiones territoriales acertadas</p>
Flores <i>et al.</i> (2013)	Identificación de sitios potenciales para la disposición final de residuos sólidos en los municipios Atlacomulco, Ixtlahuaca y Jocotitlán, Estado de México	<p>En México la disposición final de residuos sólidos urbanos ha estado orientada al depósito incontrolado en lugares inadecuados, elegidos arbitrariamente, como barrancos, lagos y lagunas, zonas pantanosas, minas abandonadas, etc. Durante décadas, esto no supuso mayor problema, pues las características de composición de los residuos permitían su reintegración a la naturaleza sin daños aparentes. Al cambiar los hábitos de consumo, las cantidades de residuos generadas y la composición de éstos, esta actividad se convirtió en un problema serio. En este documento se analizan los sitios donde los residuos terminan, así como lugares potenciales para la disposición de residuos sólidos en los municipios de Atlacomulco, Ixtlahuaca y Jocotitlán.</p>

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.

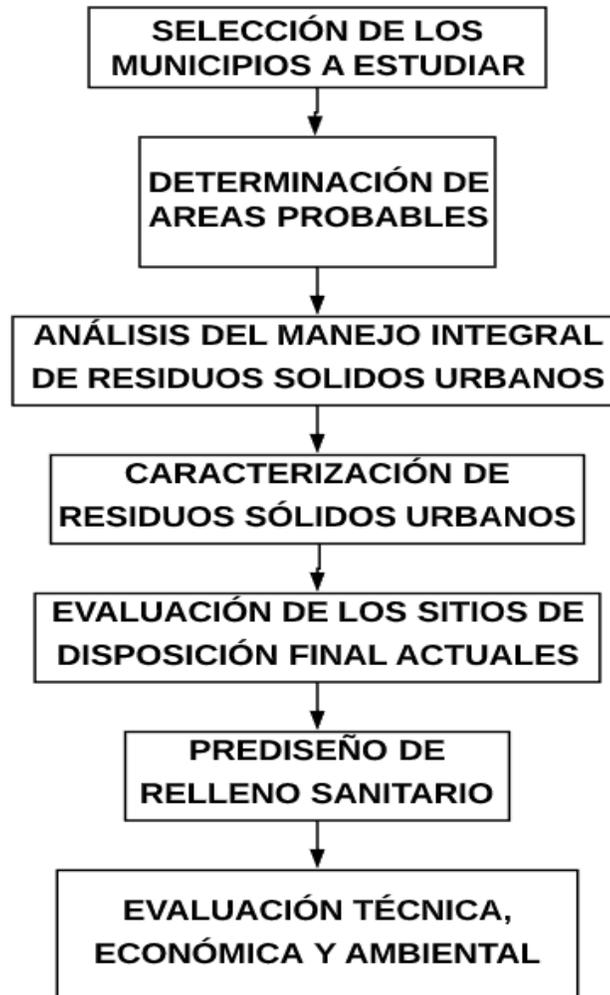


Figura 2.1 Esquema de actividades del estudio propuesto

2.1 SELECCIÓN DE LOS MUNICIPIOS A ESTUDIAR.

Para seleccionar los municipios colindantes entre el EdoMéx y Morelos a estudiar, los cuales prácticamente se localizan en la periferia sureste del EdoMéx, se

consideraron los criterios que mayormente afectan la generación de los RSU y sus componentes o variables; los cuales se listan en la tabla 2.1 y entre ellas destacan: Población, Económicas y en Materia de RSU. La información cuantitativa de las variables se recopiló de fuentes como el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y Secretaría de Desarrollo Social en México (SEDESOL) ; y se aplicó los análisis estadísticos siguientes utilizando el software Minitab®:

Tabla 2.1 Criterios y variables consideradas

POBLACIÓN	ECONÓMICA	MATERIA DE RSU
Población total por municipio	PIB	Rec RSU
Población total municipios colindantes	Ingreso municipal	Cant RESAD
Población total municipios + colindantes	Unidades económicas	Cant CSD
Densidad poblacional	Población en pobreza (%)	Cant TCAD
Proyección población 2030	Pobreza extrema (%)	Cant SDFD
		Cant RESAF
		Cant CSF
		Cant TCAF
		Cant SDFF
		Cant SDFT

Cant RESAD: Cantidad Rellenos Sanitarios Dentro del Municipio; Cant RESAF: Cantidad Rellenos Sanitarios Fuera del Municipio; Cant SCD: Cantidad Sitios Controlados Dentro del Municipio; Cant SCF: Cantidad Sitios Controlados Fuera del Municipio; Cant SDFD: Cantidad Sitios de Disposición Final Dentro del Municipio; Cant SDFF: Cantidad Sitios de Disposición Final Fuera del Municipio; Cant SDFT: Cantidad Sitios de Disposición Final Totales; Cant TCAD: Cantidad Tiraderos a Cielo Abierto Dentro del Municipio; Cant TCAF: Cantidad Tiraderos a Cielo Abierto Fuera del Municipio; PIB: Producto Interno Bruto; Rec RSU: Recolección Residuos Sólidos Urbanos.

- a) Correlación de variables; este análisis se realizó con el fin de descartar las variables altamente relacionadas (valor mayor a 0.7) antes de realizar el análisis de Conglomerados o de Clúster (Spearman, 1904), para centrar la investigación en datos relevantes.
- b) Identificación de datos atípicos; a las variables no descartadas se les realizó un análisis de cajas, con el fin de disminuir el uso de municipios con datos atípicos.
- c) Análisis de Conglomerados; se realizó un análisis de Conglomerados en el software Minitab ® con las variables correspondientes de cada municipio para

obtener un resultado por grupos que se representa mediante un dendrograma.

d) Método de ponderación lineal; por último, se realizó un análisis descriptivo para conocer los diferentes datos estadísticos de todas las variables y usar éstos para el análisis de puntaje, donde a cada dato de cada variable se le asignaron valores (Mínimo, Mediana y Máximo), construyendo con base a la ponderación de Expertos en el tema Residuos, la siguiente condición:

“Si el valor de cada dato por municipio es menor a la media”, será igual a “(valor asignado a cada variable)”, y si es menor al valor máximo de la mediana será igual a “(valor asignado a cada variable)” y, si no será igual a “(valor asignado a cada variable)”. Si un valor es menor a la media; es decir; 95% de todos los valores menores a la media se les asignara un puntaje mínimo.

Tomando en cuenta un rango del 10% de los totales de los valores a partir de la mediana; es decir; 5% valores superiores a la mediana y 5% valores inferiores a la mediana, el valor asignado será un valor intermedio. Por ultimo si un valor es mayor a la media; es decir; 95% de los valores mayores a la media, entonces se les asignara un puntaje mayor. A continuación, se muestra la condición y el valor asignado para cada rango de valores de las variables y en la tabla 2.2 se presentan los valores asignados a las variables:

- PTMC: Si su valor por cada municipio es menor a la media entonces será igual a “6”; si es menor al valor máximo de la mediana será igual a “7”; y si no será igual a “8”.
- UE: Si su valor por cada municipio es menor a la media entonces será igual a “5”, y si es menor al valor máximo de la mediana será igual a “6” y si no será igual a “7”.
- PSP: Si su valor por cada municipio es menor a la media, será igual a “3”, y si es menor al valor máximo de la mediana será igual a “4” y si no será igual a “5”.

- SC: Si su valor por cada municipio es menor a la media será igual a “6”, y si es menor al valor máximo de la mediana será igual a “7” y si no será igual a “8”.
- TCA: Si su valor por cada municipio es menor a la media será igual a “7”, y si es menor al valor máximo de la mediana será igual a “8” y si no será igual a “9”.
- CRSUR: Si su valor por cada municipio es menor a la media será igual a “6”, y si es menor al valor máximo de la mediana será igual a “7” y si no será igual a “9”.

Tabla 2.2 Puntaje para valores de variables.

Variables/Valores	PTMC	UE	PSP	SC	TCA	CRSUR
Puntaje mínimo	6	5	3	6	7	6
Puntaje medio	7	6	4	7	8	7
Puntaje máximo	8	7	5	8	9	9

PTMC: Población total municipios + colindantes; UE: Unidades económicas; PSP: Población en situación de pobreza; SC: Sitios controlados totales; TCA: Tiraderos a Cielo Abierto Totales; RSUR: Cantidad de Residuos sólidos urbanos recolectados.

Estos valores fueron asignados de acuerdo a la importancia que tienen, de modo que las variables con los puntos más altos son los de mayor impacto para el análisis que se está llevando a cabo, por ejemplo, debido a que el proyecto va encaminado a los RSU y el manejo del mismo, se le dio mayor puntaje a un RSUR y TCAT mayor a la mediana.

Posteriormente a cada variable se le asignó un valor de importancia entre el 3 y el 5 (Tabla 2.3) y cada dato de puntaje se multiplico por este para que después se sume cada puntaje de cada variable por municipio y tener un puntaje total.

Tabla 2.3 Valor de cada variable

PTMC	4
UE	3
PSP	3
SC	4
TCA	5
CRSUR	4

PTMC: Población total municipios + colindantes; UE: Unidades económicas; PSP: Población en situación de pobreza; SC: Sitios controlados totales; TCA: Tiraderos a Cielo Abierto Totales; RSUR: Cantidad de Residuos sólidos urbanos recolectados.

2.2 DETERMINACIÓN DE ÁREAS POSIBLES

Para la ubicación del SDF se utilizó cartografía sobre áreas protegidas, orografía, hidrografía y áreas pobladas, entre otras; consultándose en el Mapa Digital de México V6.3.0, en el compendio del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y en la Comisión Nacional del Agua CONAGUA; donde se visualizaron las capas requeridas y así se delimitaron, con base a las restricciones de la NOM-083-SEMARNAT-2003, las posibles zonas donde se podría establecer un SDF. Una vez localizadas las posibles zonas se estimaron distancias, tiempos y costos a las cabeceras municipales

Además se revisó la normatividad vigente en el EdoMéx y Morelos en cuanto a los requerimientos para la ubicación de un SDF que cumpla con la NOM-083-SEMARNAT-2003.

2.3 ANÁLISIS DEL MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.

Para el análisis del MIRSU de los municipios seleccionados se recabo información sobre dicho manejo, haciendo uso de información de INEGI, de Programas de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PEPGIR) de cada estado, Bandos Municipales, la LGPGIR (DOF, 2004) y mediante la aplicación de la Cedula de Entrevista (CE) presencial a los responsables del MIRSU de cada municipalidad (Figura 2.2).

La CE fue elaborada con la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento (LGAC) de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental “Tratamiento de Contaminantes y Gestión Ambiental”, clave LGAC-2017-TOLU-DAMB-26 del Instituto Tecnológico de Toluca, tomando como base la Guía para la elaboración de Programas para el Manejo y Prevención de la Gestión Integral de RSU (SEMARNAT-GTZ, 2004); y fue sometida a revisión por miembros de la Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología aplicada a Residuos Sólidos (SOMERS) y la Red Iberoamericana en Gestión y Aprovechamiento de Residuos (REDIS). La

CE está dividida en 5 módulos: Marco legal e Institucional, Económico y Financiero, Barrido, Recolección y Disposición Final; con el fin de cubrir la información básica de cada etapa del MIRSU.

Con la información recabada se realizó una comparación entre lo reportado en Fuentes Oficiales (FOfi), como Bandos Municipales e INEGI y, lo recabado mediante la CE en cuanto: Plan de Manejo Integral de Residuos Sólidos Urbanos (PMIRSU); Reglamento sobre RSU (REG); Estudios de Generación de RSU (GEN); Recolección (REC); Tratamiento (TRAT); Transferencia (TRANF) y Sitio de Disposición Final (SDF).



CÉDULA DE ENTREVISTA PARA APLICACIÓN A AYUNTAMIENTOS

Plan para el manejo, aprovechamiento y valorización de los Residuos Sólidos Urbanos del Estado de México

INDICE

- [a\) Color de las celdas](#)
- [b\) Unidades de Medida](#)
- [c\) Abreviaturas utilizadas](#)
- [d\) Glosario](#)

En la Cédula de Entrevista se deberá registrar la información real relacionada con la gestión de sus residuos sólidos. Los tipos de datos que se capturan principalmente en la Cédula de Entrevista son números, texto y lista desplegable. En las listas, solo debe seleccionar la opción que responda la pregunta (celda verde). En los campos numéricos (color azul), si no tiene información dejar en blanco y desplazarse con la tecla tabular, para que no le muestre el mensaje de error de captura, preferentemente evite colocar cero.

Tenga presente la siguiente nomenclatura :

- a) Color de las celdas**

Colocar datos de tipo numérico	
Colocar texto	
Seleccionar dato de una lista	
Valor capturado por el entrevistador	
Título de las celdas	

Figura 2.2 Cedula de entrevista

2.4 CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Se realizó con un muestreo *in situ* en el SDF de los municipios seleccionados; para ello se elegirán cinco puntos de la celda, recolectándose al menos 50 kg.

Con base a la NMX-015-SEMARNAT-1985 se efectuó el método del cuarteo. De este muestreo se clasificó los subproductos conforme a la norma NMX-AA-22-1985 y una vez clasificados se pesaron por separado en bolsas previamente identificadas, para estimar la composición porcentual (SEMARNAT, 2013). Para la caracterización fisicoquímica de RSU se utilizaron las técnicas de análisis reportadas en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Técnicas analíticas de RSU

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
Nitrógeno	NMX-AA-024-1984 ⁵
Relación Carbono / Nitrógeno (C/N)	NMX-AA-67-1985 ⁶

Fuente: ¹DOF, 1992a; ²DOF, 1992b; ³APHA 2005; ⁴DOF, 1992c; ⁵DOF, 1992d; ⁶DOF, 1992e.

2.5 EVALUACIÓN DE LOS SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL ACTUALES

Para llevar a cabo la evaluación de los SDF que tienen los municipios seleccionados se tomaron en cuenta dos criterios: Evaluación técnica y Evaluación ambiental y socioeconómica.

a) Evaluación técnica. Para realizar la evaluación técnica se aplicó la LV reportada por Díaz-Archundia, (2016) elaborada con base en la Guía de la NOM-083-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT-GTZ, 2004). En el Anexo A se presenta la LV completa, la cual consta de ocho apartados, donde cada uno de ellos tiene diferente número de condicionantes; dependiendo del cumplimiento del SDF, a cada condicionante se le asignó un valor: uno cuando “Cumple”, 0.5 cuando “Cumple parcialmente” y cero cuando “No Cumple”. El cumplimiento del total de las condicionantes en un apartado, equivale a 100 puntos de cumplimiento parcial. Dependiendo del tipo de SDF se detectaron condicionantes que no

requerían cumplir, en estos casos se escribió las siglas NA y no se consideraron como condicionantes a evaluar. Finalmente se sumaron todos los puntos y se estimó el porcentaje de cumplimiento total considerando la suma de puntos de los apartados requeridos.

b) Evaluación ambiental y socioeconómica. Para esta evaluación se utilizó la Matriz de Leopold modificada por Mendoza Delgado (2017) (Figura 2.3) y, se utilizaron los criterios mencionados en el subapartados 1.3.4 de este trabajo.

MATRIZ DE LEOPOLD TCA			ACTIVIDADES DE LA DISPOSICION DE RSU EN TCA							AFECTA- CIONES			NIV. DE SIG.				
COMPONENTES BIOFISICOS	CATEGORIA	ATRIBUTO	1. Transporte y descarga	2. Disposición de RSU y RME	3. Disposición de RP	4. Compactación y cobertura	5. Manejo de biogas generado	6. Manejo de lixiviados	7. Contratación de maquinaria, personal y servicio	AFECCIONES POSITIVAS	AFECCIONES NEGATIVAS	NUMERO DE INTERACCIONES	AGREGACION DE IMPACTOS	BAJO	MODERADO	SEVERO	CRITICO
		SUELO	Calidad de suelo Cambio de uso de suelo Estabilidad de suelo														
	AGUA	Subterránea Calidad del agua															
	ATMOSFERA	Material particulado Ruidos Gases Olores															
	FLORA	Productos agrícolas (Maíz) Remoción de cobertura vegetal															
	FAUNA	Ahuyentamiento de especies nativas Proliferación de nuevas especies															
COMPONENTES SOCIO- ECONOMICOS	ESTETICA	Vistas escénicas y panorámicas Calidad de espacio abierto Parques y reservas forestales															
	SOCIAL	Salud poblacional y laboral Seguridad laboral															
	ECONOMICO	Calidad de vida Ingresos economicos adicionales Sitios de interes arqueologico/ cultural Uso potencial del suelo Emprendimientos productivos															
AFECTA- CIONES	AFECTACIONES POSITIVAS																
	AFECTACIONES NEGATIVAS																
	NUMERO DE INTERACCIONES																
	AGREGACION DE IMPACTOS																
NIV. DE SIG.	BAJO																
	MODERADO																
	SEVERO																
	CRITICO																

(Mendoza Delgado, 2017)

Figura 2.3 Matriz de Leopold

2. 6 PREDISEÑO DE RELLENO SANITARIO

Para realizar el prediseño del RESA, se utilizaron los datos topográficos del municipio seleccionado para dar servicio a los municipios que pudieran integrar una intermunicipalidad, así como información sobre: población, generación y composición de RSU. Para el prediseño se consideraron dos niveles de prediseño: RESA Tradicional y RESA Sostenible.

2.6.1 Prediseño de Relleno Sanitario Tradicional

Con la información recabada de la generación de RSU, población actual y tasa de crecimiento, se hicieron proyecciones para determinar la cantidad de RSU que se podrían estar disponiendo en distintos años en una celda conforme a la NOM-083-SEMARNAT-2003 (INEGI, 2016; SEMARNAT, 2015; DOF, 2004). Esta información junto con la densidad de compactación de los RSU, el área con la que contaría la celda, la profundidad máxima y la altura máxima de 20 m a partir del nivel del suelo y que por lo menos pudiera recibir 300 t/día; fueron considerados para el dimensionamiento y la vida útil de dicha celda (Ecuación 2.1). Cabe mencionar, que la cantidad de 300 t/día de RSU como alimentación mínima para una celda, es recomendada por expertos en la materia, para que un RESA sea rentable.

$$\text{Vida útil} = C / (F_{\text{RSU}} * 365) \quad (\text{Ec. 2.1})$$

VU; Vida útil [años]

C; Capacidad total de contención de RSU [t]

F_{RSU} ; Flujo de ingreso diario de RSU [t/día]

Para la ubicación de los pozos de venteo se tomó en cuenta el área disponible de la celda y lo estipulado en INCREMI (2013), donde se indica que el radio de influencia de un pozo es de 2.25 a 2.5 veces la profundidad del pozo.

La generación de biogás para la celda de RESA Tradicional prediseñada, se estimó mediante Modulo 4.0, el Método IPCC y el MMB, conforme a los requerimientos descritos en el sub-apartado 1.4.

2.6.2 Prediseño de Relleno Sanitario Sostenible

Para el prediseño de una celda tipo RESA Sostenible, se tomó como base el prediseño descrito en el apartado 2.6.1; y debido a la importancia del reciclado y la minimización de gases de efecto invernadero, se simularon diferentes escenarios para la generación de biogás:

- a) Modelo Mexicano de Biogás. Se llevó a cabo la simulación del sitio retirando 25% y 50% de los residuos valorizables (textil, plásticos, metales ferrosos, metales no ferrosos, aluminio, vidrio, papel y cartón). Los valores de k y L_0 elegidos fueron para la Región 3 (Tablas 1.11 y 1.12) (Stege *et al*, 2009).
- b) Método IPCC. Con ayuda de este modelo se realizaron cinco simulaciones, las cuales fueron: retirando 0% de residuos valorizables con recirculación, retirando 25% y 50% de residuos valorizables con y sin recirculación. La recirculación se indicó en este software eligiendo para k los valores que corresponden a la zona Templada Húmeda (Tablas 1.13 y 1.14) (IPCC, 2006).
- c) Modulo 4.0. Se simularon dos escenarios con las mismas condiciones que el MMB.

El prediseño del sistema de captación, conducción y aprovechamiento del CH₄ en el biogás generado, se realizó conforme a lo sugerido en los trabajos de Bagchi (2004), INCREMI (2013) y SAGARPA & FIRCO (2007) para tuberías, motogeneradores y quemadores; considerando una operación de 24 horas, los 365 días del año y bajo escenarios de generación media. En el sub-apartado 1.3.4 se detallan las ecuaciones y tablas utilizadas.

2.7 EVALUACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL

Para evaluar el RESA Tradicional y el RESA Sostenible, se tomaron en cuenta tres aspectos importantes: Evaluación técnica, Evaluación económica y la Evaluación ambiental.

- a) Evaluación Técnica. Se tomó como punto de partida que las celdas para ambos tipos de RESA, cumplían con lo estipulado en la NOM-083-SEMARNAT-2003; y se analizaron los resultados obtenidos con MMB, Metodo IPCC y Moduelo 4.0, bajo los diferentes escenarios mencionados en el apartado 2.6.

- b) Evaluación Económica. Se estimaron los costos de inversión y de operación mediante la herramienta “Estimación Análoga” (Top Down), tomando como base las experiencias del proyecto del RESA de Saltillo, Coahuila (INCREMI, 2013) y lo recomendado por SCS Engineers (2013). Para la estimación de ingresos, se investigaron los precios de compra de residuos reciclables y se consideró un precio por tonelada de reducción de emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) de \$20 USD, conforme a los certificados de reducción de emisiones (CER) de enero de 2013 (INECC, 2012). Para el Análisis de sensibilidad se utilizaron los indicadores financieros: Valor Presente Neto (VPN), Retorno de Inversión (RI) y el Rango Costo Beneficio (RCB) (SAGARPA & FIRCO, 2007; Rubio *et al.*, 2013).

- c) Evaluación Ambiental. Para las celdas del RESA Tradicional y del RESA Sustentable se analizaron los resultados de generación de biogás y reducción de emisiones de CO₂e, bajo los diferentes escenarios descritos en el subapartado 2.6.2, con MMB, el Método IPCC y Moduelo 4.0; los cuales fueron en total 15 (Tabla 2.5).

Tabla 2.5 Escenarios simulados

MODELOS	ESCENARIOS				
	No.	TIPO DE RESA	RECUPERACIÓN DE	RECIRCULACIÓN DE	
			RESIDUOS VALORIZABLES (%)	LIXIVIADOS NO	SI
MMB	1	Tradicional	0	SR	
	2	Sostenible	25	SR	
	3	Sostenible	50	SR	
	4	Tradicional	0		
	5	Sostenible	0	SR	RL
IPCC	6	Sostenible	25		
	7	Sostenible	25	SR	RL
	8	Sostenible	50		
	9	Sostenible	50	SR	RL
Moduelo 4.0	10	Tradicional	0	SR	
	11	Sostenible	25	SR	
	12	Sostenible	50	SR	

SR, Sin recirculación; RL, Con recirculación de lixiviados

Finalmente, se realizó una comparación entre la operación del RESA Tradicional y el RESA Sostenible o CIR, con el fin de identificar el SDF con mejor desempeño; especialmente en el aspecto ambiental.

3. RESULTADOS

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 muestran los municipios del área de estudio, delimitando en color rojo los que pertenecen a la entidad federativa de Morelos y en azul los del EdoMéx.



Figura 3.1 Municipios delimitados al Este del EdoMéx

Las acciones realizadas para la selección de municipios fueron las siguientes:

- Correlación de variables. En esta actividad los datos que arrojo Minitab se identificaron mediante Variable descartada, Variable correlacionada y su

correspondiente Correlación, como se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Correlación de variables.

VARIABLE DESCARTADA	VARIABLE CORRELACIONADA	CORRELACIÓN
Poblacion Total por municipio	Densidad Poblacional	0.999
Pob. tot. municipios colindante	Unidades Económicas	0.988
Densidad Poblacional	Cantidad RESAD	0.981
Proyección Población 2030	Ingreso Municipal	0,988
PIB	Cantidad SDFT	0,866
Ingreso mun	Unidades Económicas	0,979
Pobreza extrema(%)	Cantidad SCF	0,996
Cant RESAD	Cantidad SDFD	0,955
Cant SDFT	Cantidad SDFD	0,774
Cant RESAF	Cantidad TCAD	0,912
Cant SDFD	Cantidad SDFT	0,718
Cant SDFD	Cantidad RESAF	0,860

De acuerdo al análisis de correlación se omitió el uso de ciertas variables, debido a la similitud que estas mostraban. Las variables que se eliminaron se listan en la tabla 3.2 para cada criterio.

Tabla 3.2 Variables a eliminar

POBLACIONAL	ECONÓMICA	MATERIA DE RSU
Población total por municipio	PIB	Cant. RESA
Población total municipios colindantes	Ingreso municipal	Cant. SDFT
Densidad población	Pobreza extrema (%)	Cant. RESAF
Proyección población 2030		Cant. SDFD
		Cant. SDFD

NOTA: La cantidad de SCD y SCF se sumaron para tener solo SCTOT, al igual que TCAD y TCAF y tener TCATOT por cuestiones de un mejor manejo en análisis de Conglomerados.

Ya teniendo las variables seleccionadas (no descartadas), se realizó una gráfica para visualizar la situación de cada municipio (Figura 3.2).

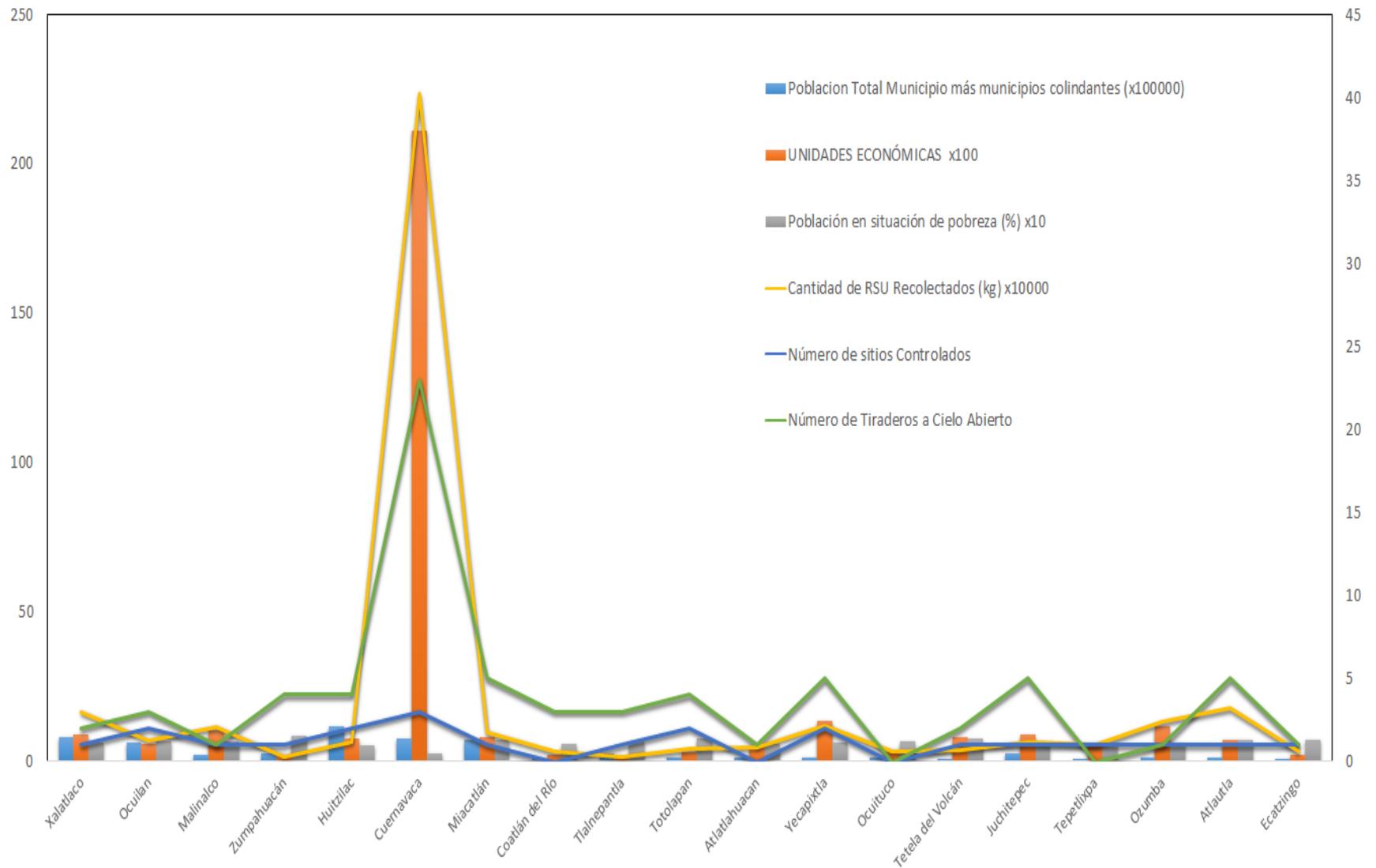


Figura 3.2 Situación de los municipios con respecto a las variables seleccionadas

b) Identificación de datos atípicos. La identificación de datos atípicos se realizó con el análisis de cajas que se muestra en la figura 3.3.

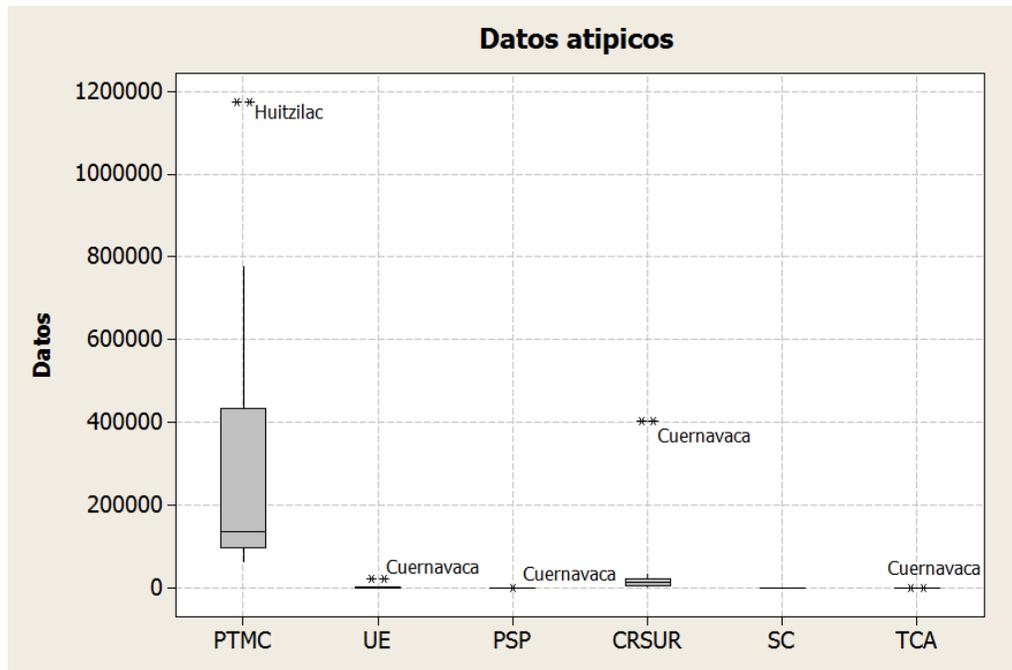


Figura 3.3 Datos típicos

En la tabla de 3.3 se listan los datos resultantes Atípicos por variable, así como su valor correspondiente. Se les denominó Atípicos, ya que los valores reportados para ellos, muestran una gran diferencia con los demás, ésto hace que no puedan ser representativos de alguna zona en específico (NumXL, 2020).

Tabla 3.3 Datos Atípicos por variable

PARÁMETRO	MUNICIPIO	ENTIDAD	VALOR
PTMC	Huitzilac	Morelos	1173659
UE	Cuernavaca	Morelos	21094
PSP	Cuernavaca	Morelos	26.47
CRSUR	Cuernavaca	Morelos	402390
TCA	Cuernavaca	Morelos	23

c) Análisis de Conglomerados. Este análisis de Conglomerados dio como resultado tres diferentes clúster, como se pueden observar en el dendrograma de la figura 3.4, los cuales presentan similitud en cuanto a las variables seleccionadas previamente.

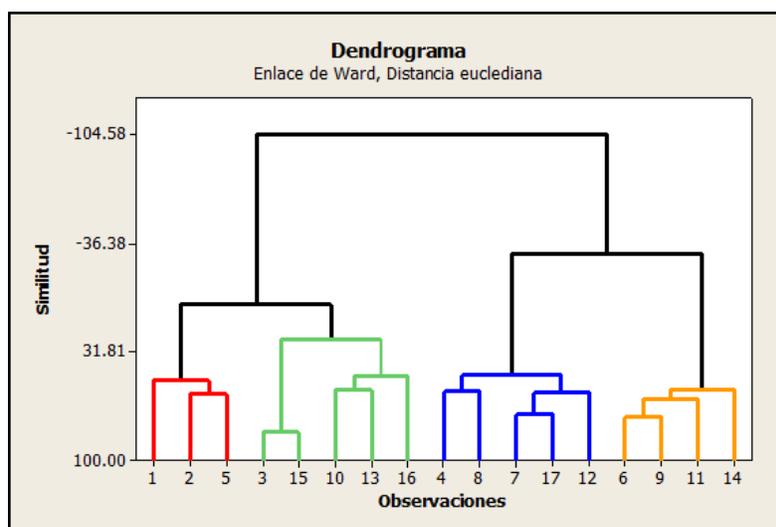


Figura 3.4 Dendrograma de análisis de conglomerados.

Para tener una mejor visualización de esto, se agruparon los municipios por el número de Conglomerados resultante (Tabla 3.4). Además, se elaboró un mapa ubicando los municipios por número de Clúster (Figura 3.5), con el fin de tener una mejor visualización de estas agrupaciones. Los municipios se colorearon según su conglomerado: Verde para el de conglomerado uno con tres municipios, Azul para el dos con cinco municipios, Café para el tres con cuatro municipios, Amarillo para el cuatro con cuatro municipios y Rosa para los dos municipios considerados Atípicos.

Tabla 3.4 Municipios de estudio divididos por conglomerados

NOMBRE DEL MUNICIPIO	CLUSTER	NOMBRE DEL MUNICIPIO	CLUSTER
Xalatlaco EdoMéx	1	Zumpahuacán EdoMéx	3
Ocuilan EdoMéx	1	Tlalnepantla Mor	3
Miacatlán EdoMéx	1	Totolapan Mor	3
Malinalco EdoMéx	2	Tetela del Volcán Mor	3
Yecapixtla Mor	2	Ecatzingo EdoMéx	3
Juchitepec EdoMéx	2	Coatlán del Río	4
Ozumba EdoMéx	2	Atlalahuacan Mor	4
Atlautla EdoMéx	2	Ocuituco Mor	4
Cuernavaca Mor	Atípico	Tepetlixpa EdoMéx	4
		Huitzilac Mor	Atípico

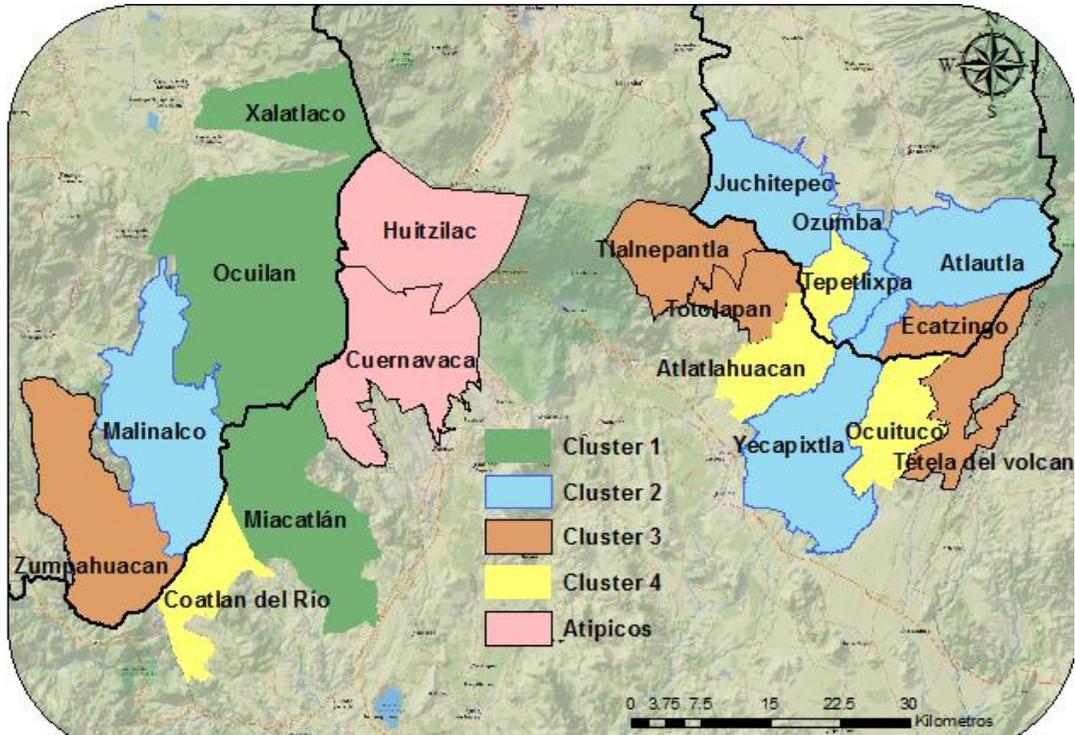


Figura 3.5 Mapa con conglomerados (clúster)

d) Método de ponderación lineal. En la tabla 3.5 se muestran los datos descriptivos de las variables obtenidas con el Software Minitab®.

Tabla 3.5 Datos descriptivos de las variables

VARIABLE	N	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
PTMC	17	239618.00	22752.00
UE	17	634.82	36.52
PSP	17	66.78	6.93
SC	17	1.00	0.4
TCA	17	2.65	1.70
CRSUR	17	13529.00	6239.00

N: Datos usados por variable; PTMC: Población total municipios + colindantes; UE: Unidades económicas; PSP: Población en situación de pobreza; SC: Sitios controlados totales; TCA: Tiraderos a Cielo Abierto Totales; CRSUR: Cantidad de Residuos sólidos urbanos recolectados.

Tabla 3.5 Datos descriptivos de las variables (continuación)

VARIABLE	VARIANZA	MEDIANA	MÍNIMO	MÁXIMO
PTMC	51767604786	132800	63953	777358
UE	134333.40	594	135	1343
PSP	48.034	66.18	57.34	84.09
SC	0.3750	1	0	2
TCA	3.2426	3	0	5
CRSUR	85358456	10000	3000	32000

PTMC: Población total municipios + colindantes; UE: Unidades económicas; PSP: Población en situación de pobreza; SC: Sitios controlados totales; TCA: Tiraderos a Cielo Abierto Totales; RSUR: Cantidad de Residuos sólidos urbanos recolectados.

Con base a los criterios y condiciones que se establecieron en la tabla 2.2, los valores de los puntajes de cada variable, obtenidos para cada municipio fueron los que se presentan en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Puntaje para las variables en los municipios.

Nombre Municipio	PTMC	UE	PSP	CRSUR	SC	TCA
Xalatlaco EdoMéx	8	7	4	9	7	8
Ocuilan EdoMéx	8	6	4	7	8	8
Miacatlán Mor	8	6	4	7	7	9
Malinalco EdoMéx	7	7	4	9	7	8
Yecapixtla Mor	7	7	3	9	8	9
Juchitepec EdoMéx	7	7	4	7	7	9
Ozumba EdoMéx	7	7	3	9	7	8
Atlautla EdoMéx	7	6	5	9	7	9
Zumpahuacán EdoMéx	8	5	5	6	7	9
Tlalnepantla Mor	8	5	4	6	7	8
Totolapan Mor	6	5	5	7	8	9
Tetela del Volcán Mor	6	6	5	7	7	8
Ecatzingo EdoMéx	6	5	5	6	7	8
Coatlán del Río Mor	6	5	3	6	6	8
Atlatlahuacan Mor	7	6	3	7	6	8
Ocuituco Mor	7	6	4	6	6	7
Tepetlixpa EdoMéx	6	6	3	7	7	7

PTMC: Población total municipios + colindantes; UE: Unidades económicas; PSP: Población en situación de pobreza; SC: Sitios controlados totales; TCA: Tiraderos a Cielo Abierto Totales; RSUR: Cantidad de Residuos sólidos urbanos recolectados.

En la tabla 3.7 se muestra el puntaje resultante de la multiplicación del valor de importancia de cada variable (Tabla 2.3), por el puntaje asignado a cada variable (Tabla 3.6).

Tabla 3.7 Puntaje por valor de variables

Nombre Municipio	PTMC	UE	PSP	CRSUR	SC	TCA
Xalatlaco EdoMéx	32	21	12	36	28	40
Ocuilan EdoMéx	32	18	12	28	32	40
Miacatlán Mor	32	18	12	28	28	45
Malinalco EdoMéx	28	21	12	36	28	40
Yecapixtla Mor	28	21	9	36	32	45
Juchitepec EdoMéx	28	21	12	28	28	45
Ozumba EdoMéx	28	21	9	36	28	40
Atlautla EdoMéx	28	18	15	36	28	45
Zumpahuacán EdoMéx	32	15	15	24	28	45
Tlalnepantla Mor	32	15	12	24	28	40
Totolapan Mor	24	15	15	28	32	45
Tetela del Volcán Mor	24	18	15	28	28	40
Ecatzingo EdoMéx	24	15	15	24	28	40
Coatlán del Río Mor	24	15	9	24	24	40
Atlalahuacan Mor	28	18	9	28	24	40
Ocuituco Mor	28	18	12	24	24	35
Tepetlixpa EdoMéx	24	18	9	28	28	35

PTMC: Población total municipios + colindantes; UE: Unidades económicas; PSP: Población en situación de pobreza; SCT: Sitios controlados totales; TCA: Tiraderos a Cielo Abierto Totales; RSUR: Residuos sólidos urbanos recolectados.

Posteriormente se realizó una sumatoria del puntaje por municipio; es decir; la sumatoria de las filas; resultando el puntaje que se muestra en la tabla 3.8.

Tabla 3.8 Puntaje resultante

Nombre del Municipio	SCORE	Nombre del municipio	SCORE
Xalatlaco EdoMéz.	169	Tlalnepantla Mor.	151
Ocuilan EdoMéz.	162	Totolapan Mor.	159
Miacatlán Mor.	163	Tetela del Volcán Mor.	153
Malinalco EdoMéz.	165	Ecatzingo EdoMéz.	146
Yecapixtla Mor.	171	Coatlán del Río Mor.	136
Juchitepec EdoMéz.	162	Atlatlahuacan Mor.	147
Ozumba EdoMéz.	162	Ocuituco Mor.	141
Atlautla EdoMéz.	170	Tepetlixpa EdoMéz.	142
Zumpahuacán EdoMéz.	159		

Para visualizar de manera sencilla se agruparon éstos por número de conglomerado, para identificar al municipio con mayor puntaje total en cada grupo. En la tabla 3.9 se muestra el orden que obtuvieron.

Tabla 3.9 Puntaje de municipios por Cluster

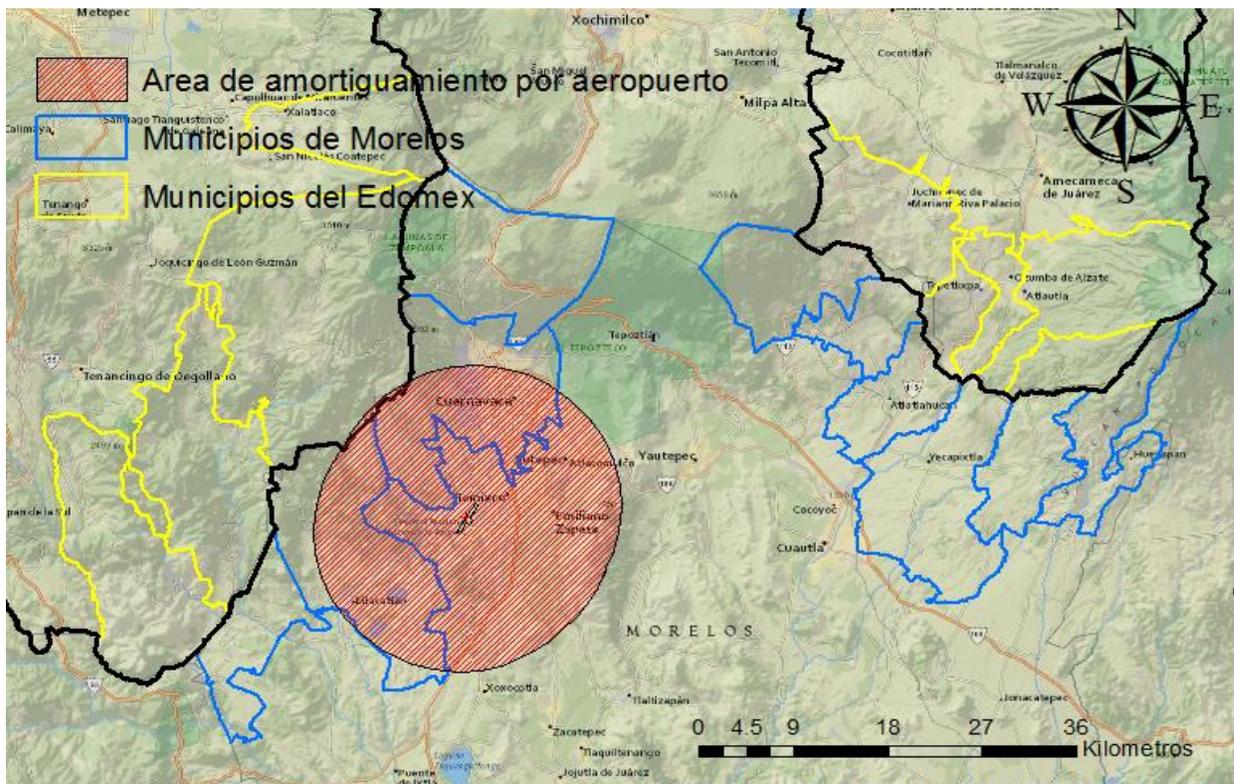
Nombre Municipio	Cluster	SCORE
Xalatlaco, EdoMéz.	1	169
Miacatlán, Mor.	1	163
Ocuilan, EdoMéz.	1	162
Yecapixtla, Mor.	2	171
Atlautla, EdoMéz.	2	170
Malinalco, EdoMex.	2	165
Juchitepec, EdoMex.	2	162
Ozumba, Edo.Mex.	2	162
Zumpahuacán, EdoMex.	3	159
Totolapan, Mor.	3	159
Tetela del Volcán, Mor.	3	153
Tlalnepantla, Mor.	3	151
Ecatzingo, Edo.Mex.	3	146
Atlatlahuacan, Mor.	4	147
Tepetlixpa, Edo.Mex.	4	142
Ocuituco, Mor.	4	141
Coatlán del Río, Mor.	4	136

PTMC: Población total municipios + colindantes; UE: Unidades económicas; PSP: Población en situación de pobreza; SCT: Sitios controlados totales; TCAT: Tiraderos a Cielo Abierto Totales; RSUR: Residuos sólidos urbanos recolectados.

3.2 DETERMINACIÓN DE ÁREAS POSIBLES

Para determinar las áreas posibles para la ubicación de un RESA, se tomó en cuenta el apartado número 6.1 de la NOM-083-SEMARNAT-2003, en el cual hace mención a las especificaciones para la selección del sitio y en específico las restricciones que se tienen. Además de cumplir con las disposiciones legales aplicables, las condiciones mínimas que debe cumplir cualquier SDF (tipo A, B, C o D) son las siguientes:

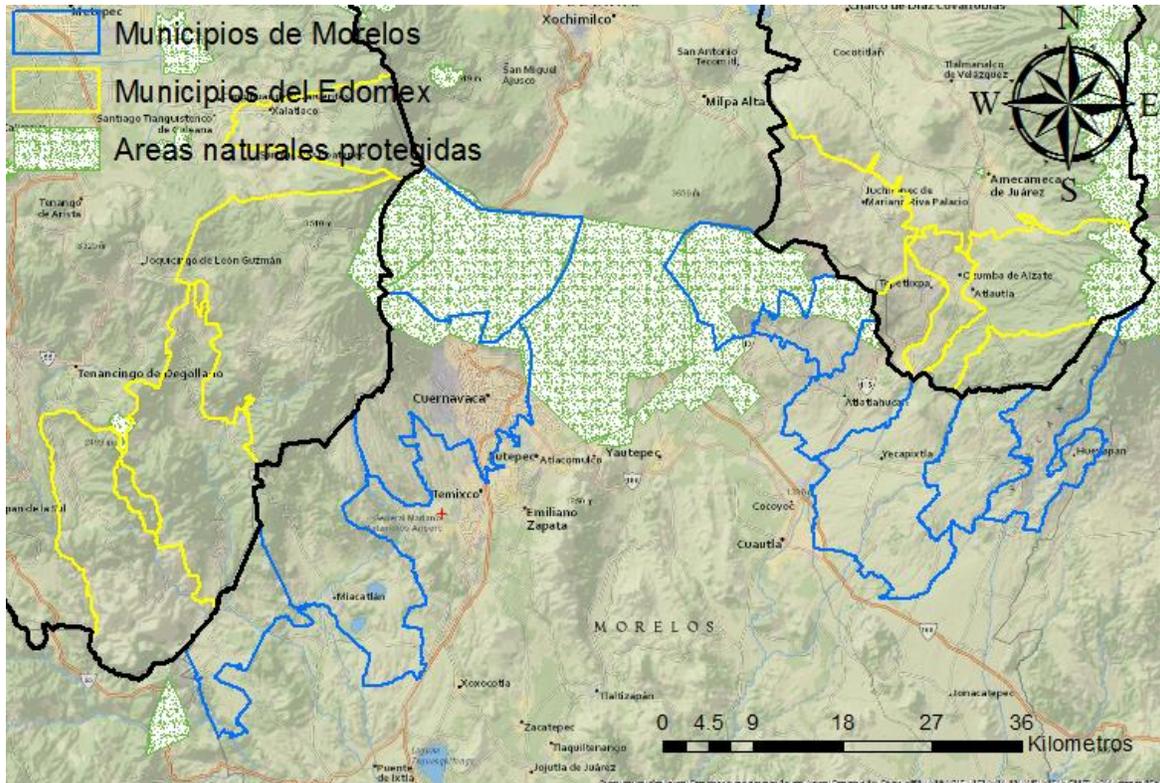
- a) Ubicarse a una distancia de 13 kilómetros de una pista de un aeródromo de servicio al público o aeropuerto. En la figura 3.6 se muestra una zona de color naranja, la cual se encuentra dentro del área de estudio. La determinación de esta zona muestra que gran parte del territorio de los municipios de Cuernavaca y Miaquatlan no pueden ser considerados.



Fuente: INEGI

Figura 3.6 Restricción por aeropuertos

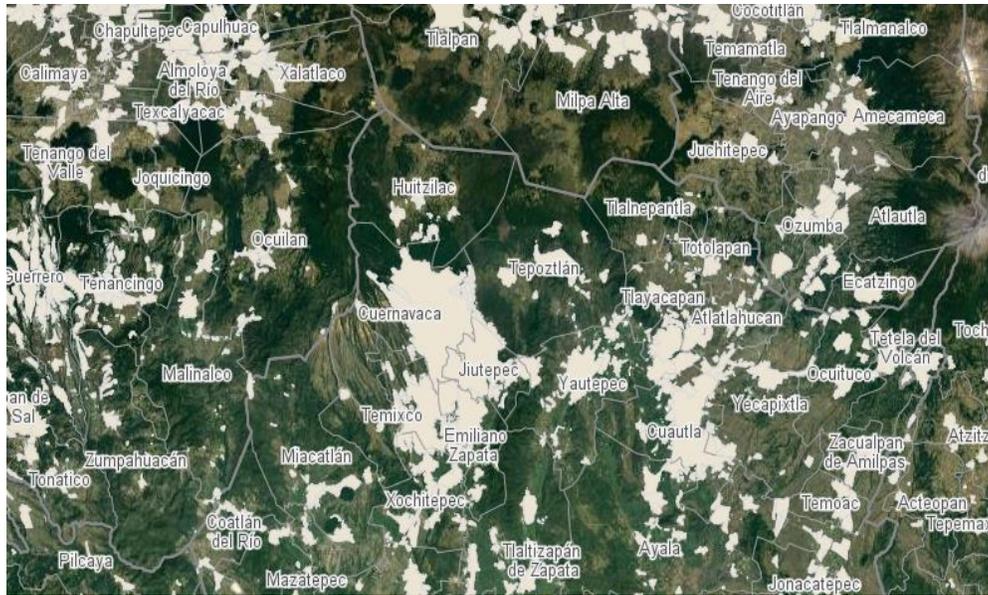
b) No se deben ubicar sitios dentro de áreas naturales protegidas, a excepción de los sitios que estén contemplados en el Plan de manejo de éstas. En la figura 3.7 se encuentran las zonas protegidas, las cuales impiden la construcción de un RESA en los municipios de Morelos: todo Huitzilac, prácticamente todo Tlalnepantla y parte de Totoloapan, Atlatlahuacan, Ocuituco y Cuernavaca; y en el EdoMéx tienen esa restricción los municipios de: parte de Ocuilan y Atlautla.



Fuente: INEGI

Figura 3.7 Restricción por áreas naturales protegidas

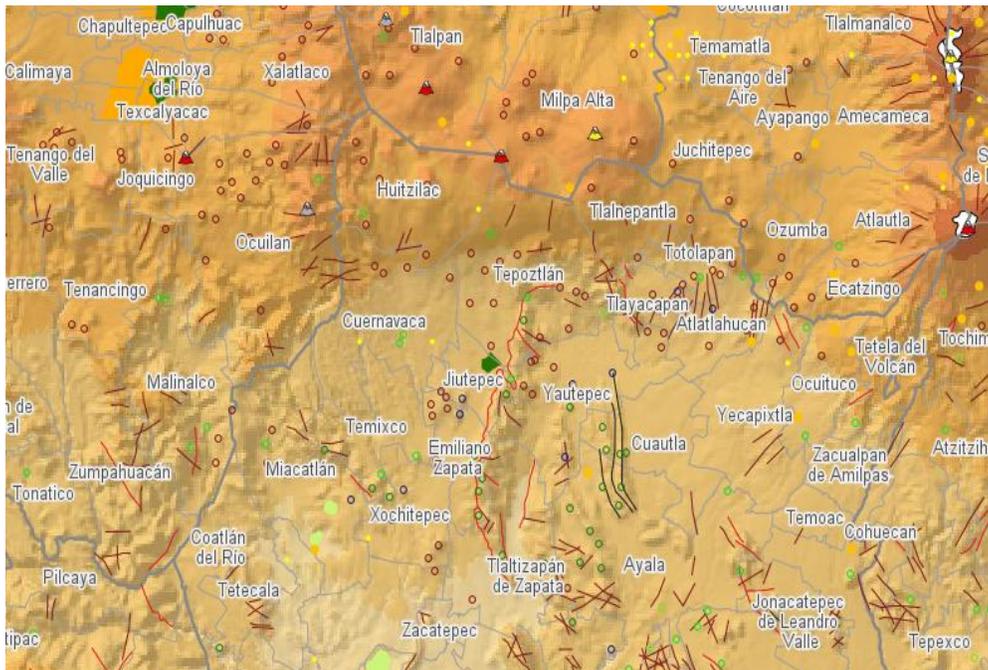
c) En localidades mayores de 2500 habitantes, el límite del sitio de disposición final debe estar a una distancia mínima de 500 m (quinientos metros) contados a partir del límite de la traza urbana existente o contemplada en el plan de desarrollo urbano. La figura 3.8 muestra la ubicación de zonas habitadas en los municipios.



Fuente: INEGI

Figura 3.8 Restricción por habitantes

d) No debe ubicarse en zonas de: marismas, manglares, esteros, pantanos, humedales, estuarios, planicies aluviales, fluviales, recarga de acuíferos, arqueológicas; ni sobre cavernas, fracturas o fallas geológicas. La figura 3.9 muestra los puntos en los cuales se encuentran las restricciones mencionadas.

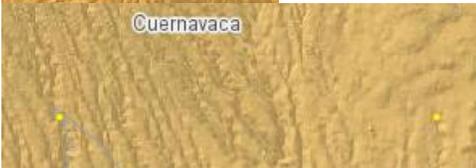


Fuente: INEGI

Figura 3.9 Fallas que corresponden al área de estudio

En la tabla 3.13 se muestra el significado de los símbolos que aparecen en la figura 3.10 y los nombres de algunos de los municipios afectados.

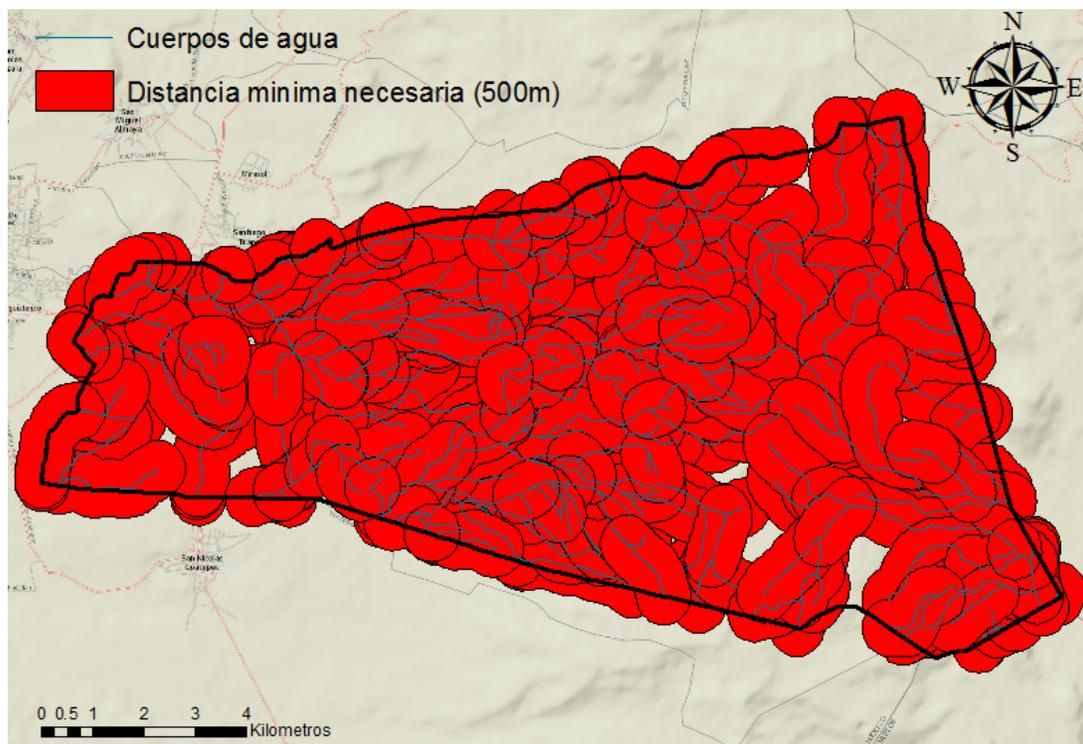
Tabla 3.10 Significado de los símbolos de la figura 3.8

Significado	Imagen
Humedales potenciales	
Humedales	
Fallas y fracturas	
Minas y otras ubicaciones geográficas	
Volcán	
Sismos	
Nieves perpetuas	

Debido al análisis realizado, se centró la atención en los municipios de Xalatlaco, Ocuilán, EdoMéx y Huitzilac, Mor. Teniendo en cuenta los puntos del apartado 6.1 de la NOM-083-SEMARNAT-2003, que en seguida se transcriben, se realizó la búsqueda de los cuerpos de agua en estos municipios (DOF, 2004):

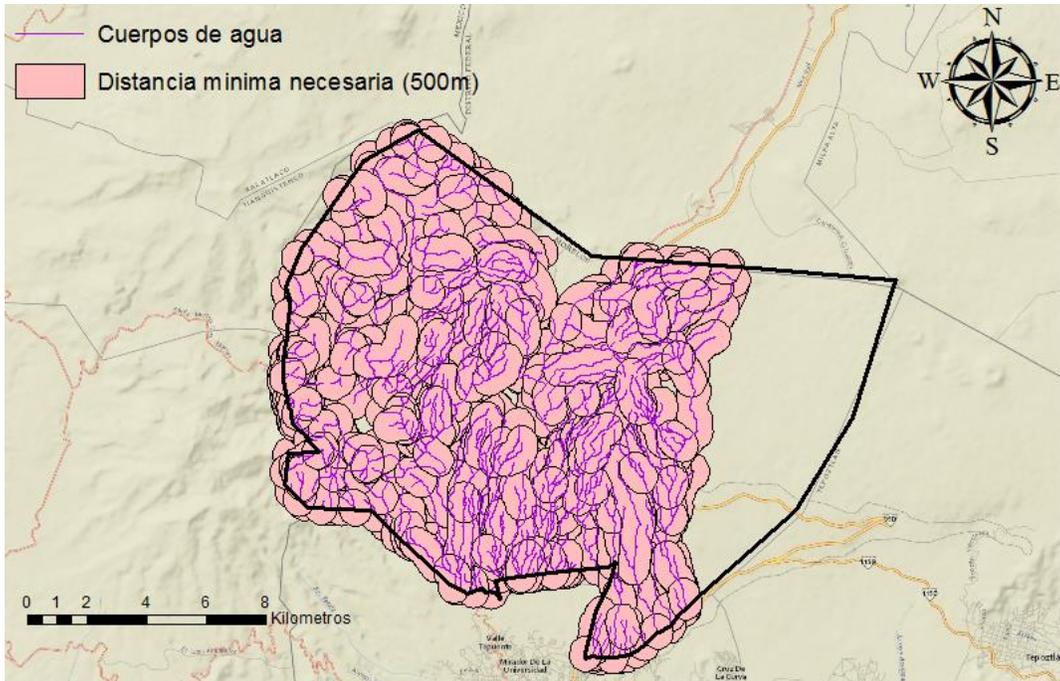
- a) “6.1.6 La distancia de ubicación del sitio de disposición final, con respecto a cuerpos de agua superficiales con caudal continuo, lagos y lagunas, debe ser de 500 m (quinientos metros) como mínimo.”
- b) “6.1.7 La ubicación entre el límite del sitio de disposición final y cualquier pozo de extracción de agua para uso doméstico, industrial, riego y ganadero, tanto en operación como abandonados, será de 100 metros adicionales a la proyección horizontal de la mayor circunferencia del cono de abatimiento. Cuando no se pueda determinar el cono de abatimiento, la distancia al pozo no será menor de 500 metros.”

En las figuras 3.10 a 3.12 se muestran los cuerpos de agua con la distancia de 500 metros para los municipios de Huitzilac, Mor, Xalatlaco y Ocuilan, EdoMéc., respectivamente.

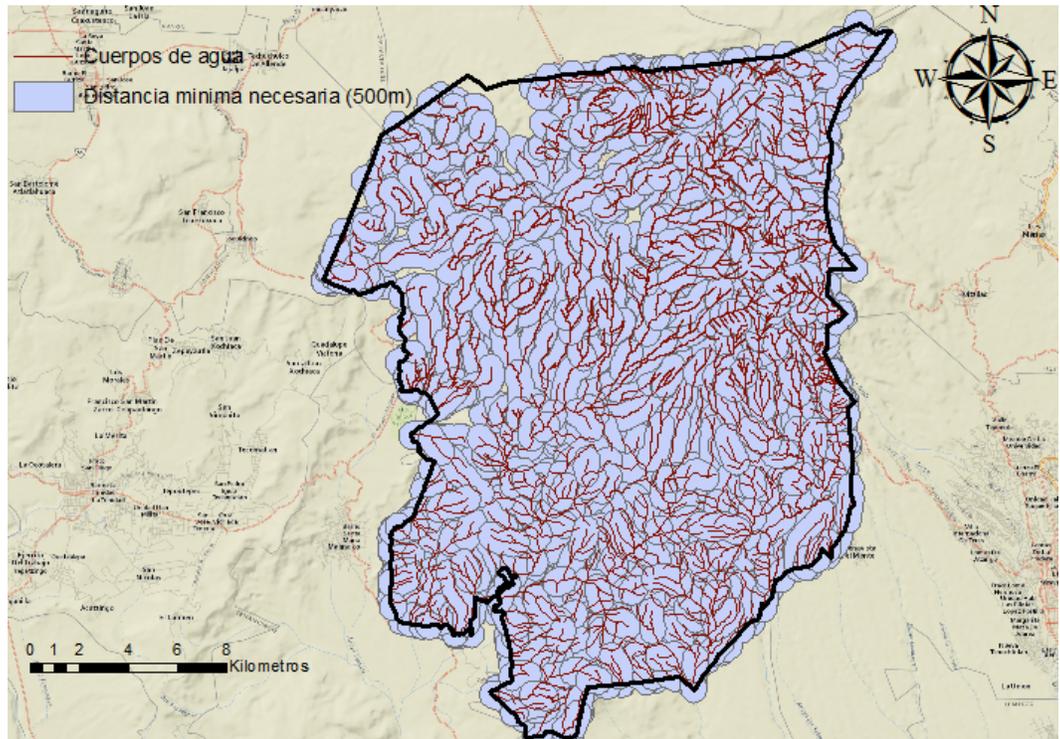


Fuente: CONAGUA

Figura 3.10. Restricción por cuerpos de agua en el municipio de Xalatlaco, EdoMéc.



Fuente: CONAGUA
 Figura 3.11. Restricción por Cuerpos de agua en el municipio de Huitzilac, Mor.



Fuente: CONAGUA
 Figura 3.12. Restricción por cuerpos de agua en el municipio de Ocuilán, EdoMéx.

Según el estudio de conglomerados y de puntaje, Xalatlaco, EdoMéx tiene mayor necesidad de un SDF; sin embargo la ubicación de su actual SDF no es adecuada, porque se encuentra a una distancia menor de 500 metros de un cuerpo de agua (punto A, Figura 3.10). Huitzilac, Mor., según la restricción de Áreas protegidas, no puede tener un SDF, sin embargo lo tiene (punto A, Figura 3.11). Mientras que el municipio de Ocuilan, EdoMéx., no cuenta con SDF, por lo que envía sus residuos al RESA del municipio de Tenango del Valle, que se encuentra a 33.6 km de distancia y tarda en promedio 54 minutos en llevar a disponer sus RSU.

Cabe mencionar que de acuerdo a la restricción de áreas protegidas el municipio de Huitzilac, Mor., ya había sido descartado; por lo que se localizaron cinco posibles ubicaciones para RESA en el municipio de Xalatlaco, EdoMéx, las cuales se identificaron con las letras A, B, C, D y E en la figura 3.13 y nueve en el municipio de Ocuilan, EdoMéx, las cuales se denominaron con las letras F, G, H, I, J, K, L, M y N (Figura 3.14).

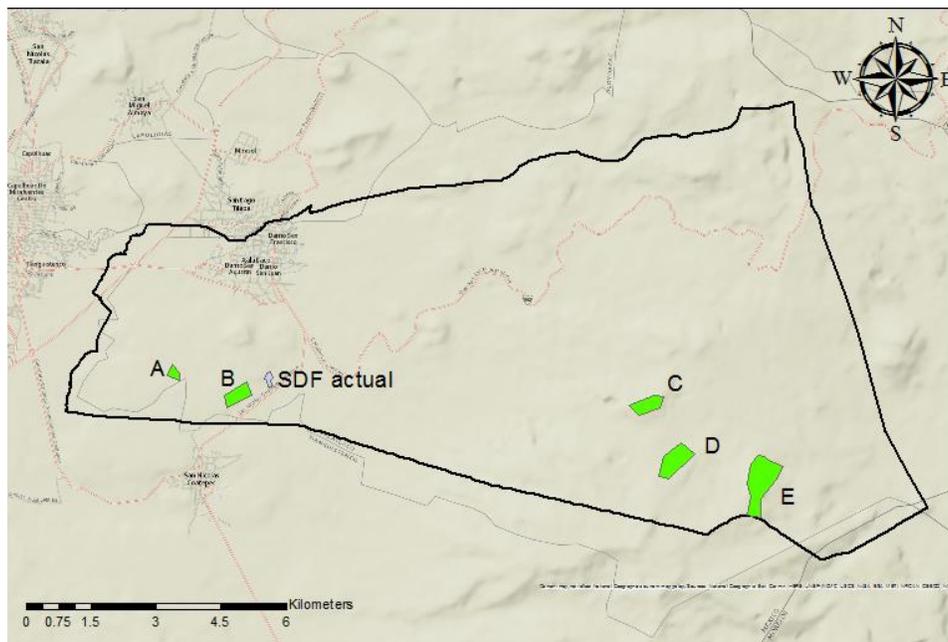


Figura 3.13. Localización de posibles ubicaciones de RESA y su actual SDF en Xalatlaco, EdoMéx.

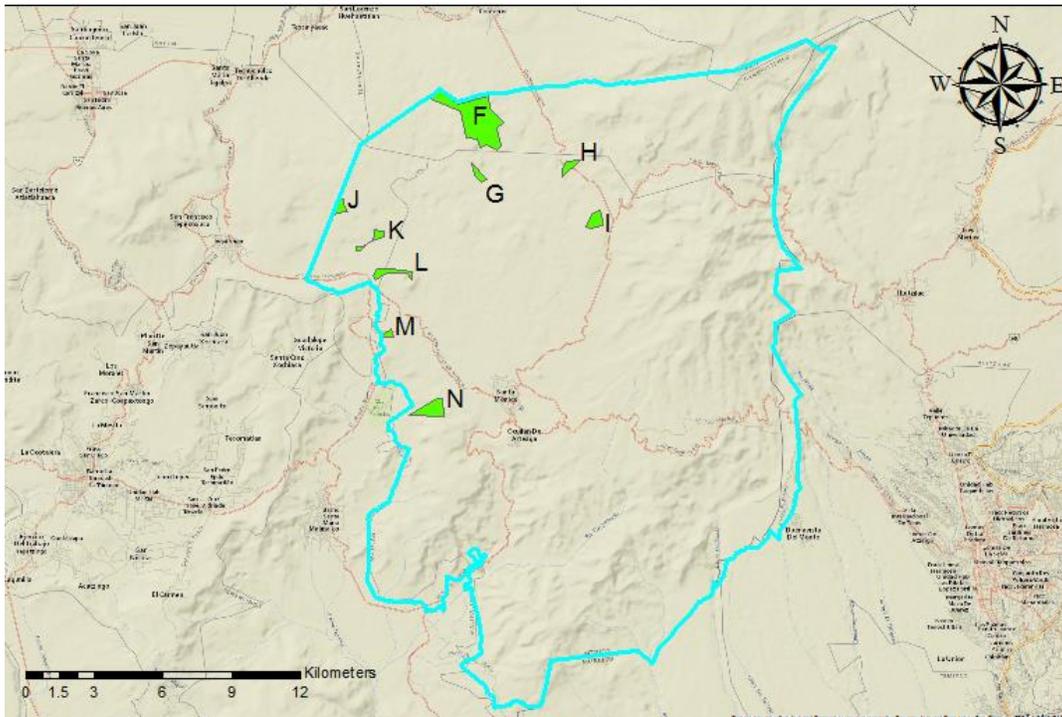


Figura 3.14. Localización de posibles ubicaciones de RESA en Ocuilán, EdoMéx.

Con estas ubicaciones se estimó la distancia, tiempo y costo a las cabeceras municipales, considerando el precio de gasolina tipo magna de \$19.92 y un rendimiento de 17 km/L; así como el área con la que cuentan. Esta información se concentra en la tabla 3.11.

Tabla 3.11 Área, distancia, costo y tiempo de posibles ubicaciones a cabeceras municipales

Ubicaciones	Coordenadas	Area (Ha)	Distancia a cabeceras (km)			Costo total a SDF (\$)			Tiempo (min)		
			Xalatlaco	Ocuilan	Huitzilac	Xalatlaco	Ocuilan	Huitzilac	Xalatlaco	Ocuilan	Huitzilac
A	99° 26' 6.47" W 19° 9' 30.21" N	5.53	2.60	33.80	45.00	3.05	39.61	52.73	14.00	63.00	73.00
B	99° 25' 16.42" W 19° 9' 14.41" N	18.48	4.80	26.90	38.10	5.62	31.52	44.64	25.00	48.00	58.00
C	99° 20' 12.18" W 19° 9' 6.13" N	15.61	20.60	48.30	26.20	24.14	56.60	30.70	32.00	74.00	47.00
D	99° 19' 51.74" W 19° 8' 25.41" N	27.38	21.90	49.60	26.30	25.66	58.12	30.82	34.00	76.00	48.00
E	99° 18' 49.83" W 19° 8' 13.84" N	58.00	23.50	51.20	24.80	27.54	59.99	29.06	27.00	79.00	45.00
F	99° 26' 6.81" W 19° 5' 42.98" N	319.00	16.30	26.40	37.60	19.10	30.93	44.06	32.00	47.00	58.00
G	99° 26' 12.02" W 19° 4' 35.06" N	19.67	15.50	24.50	35.30	18.16	28.71	41.36	31.00	45.00	55.00
H	99° 24' 1.45" W 19° 4' 38.80" N	24.55	14.20	16.10	27.30	16.64	18.87	31.99	24.00	27.00	38.00
I	99° 23' 23.49" W 19° 3' 28.63" N	24.52	17.00	13.90	25.10	19.92	16.29	29.41	28.00	24.00	35.00
J	99° 29' 21.57" W 19° 3' 47.42" N	19.64	29.90	21.30	52.80	35.04	24.96	61.87	48.00	34.00	76.00
K	99° 28' 56.64" W 19° 2' 52.44" N	16.53	29.90	12.00	43.50	35.04	14.06	50.97	45.00	20.00	61.00
L	99° 28' 21.84" W 19° 2' 21.96" N	38.25	30.50	11.40	42.90	35.74	13.36	50.27	45.00	19.00	60.00
M	99° 28' 13.18" W 19° 0' 58.11" N	12.35	33.80	10.40	41.90	39.61	12.19	49.10	49.00	19.00	59.00
N	99° 27' 13.69" W 18° 59' 21.45" N	50.00	38.40	14.90	46.40	45.00	17.46	54.37	59.00	29.00	70.00

En la tabla 3.11 puede observarse que la ubicación denominada “I” en Ocuilan, EdoMéz., es la mejor opción con respecto al tiempo, distancia y costo.

Revisando la normatividad vigente en el EdoMéz y Morelos, en cuanto a los requerimientos para la ubicación de un SDF que cumpla con la NOM-083-SEMARNAT-2003; la Gaceta No. 68 del Poder Ejecutivo del EdoMéz (PEEM), publicada el día 08 de Octubre del 2018 (PEEM, 2018), menciona la creación de Regiones ambientales con la finalidad de minimizar el impacto ambiental generado por el cambio climático. Los municipios de Xalatlaco y Ocuilan, EdoMéz., pertenecen a la Región ambiental denominada “Río Lerma: Subcuenca la Laguna” que se muestra en la figura 3.15.

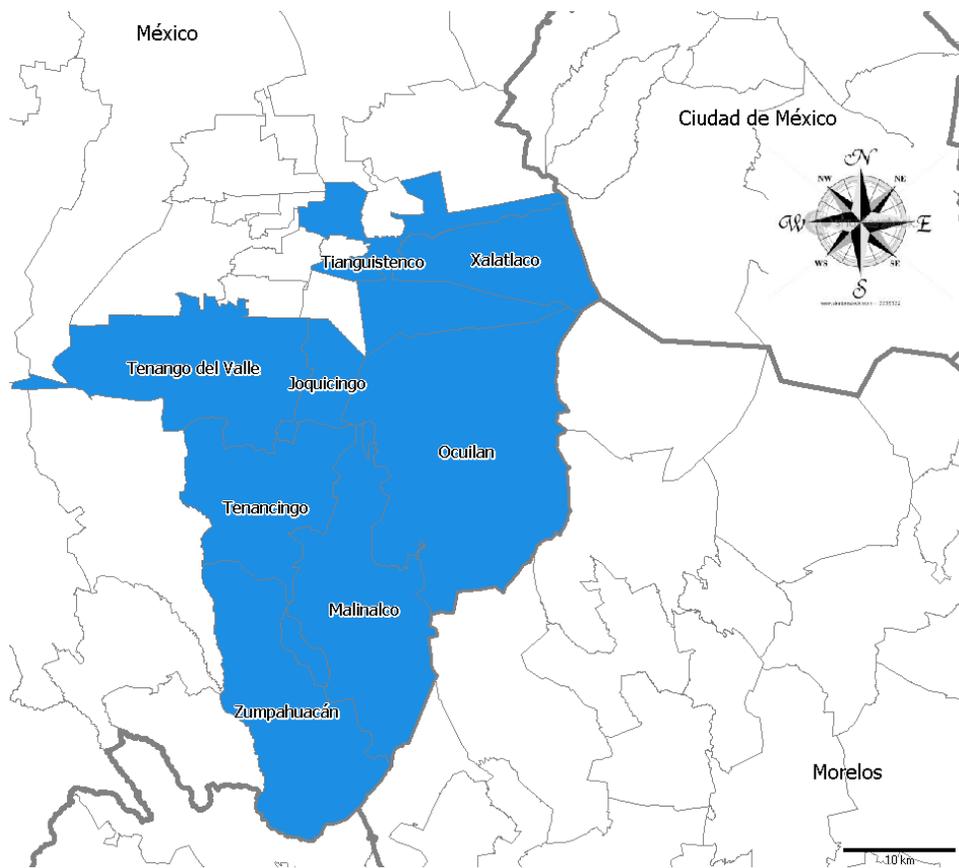


Figura 3.15 Región Ambiental “Río Lerma: Subcuenca la Laguna”

La Secretaria del Medio Ambiente del EdoMéz (SMAGEM), con base a la Gaceta No. 68 del PEEM (PEEM, 2018), está fomentando la creación o la reingeniería de

los SDF, para que no solo sean RESA que cumpla con la NOM-083-SEMARNAT-2003, sino “Centros Integrales de Residuos (CIR)”, de manera que se extraiga de los RSU la mayor parte de los residuos valorizables y disminuya la cantidad que llega a disposición final. Además, se tiene como información verbal, que debe realizarse la clausura del SDF del municipio de Xalatlaco, EdoMéx., con lo que este municipio deberá depositar en el RESA de Tenango del Valle, EdoMéx.

La Gaceta No. 68 del PEEM (PEEM, 2018) busca que los municipios de cada Región ambiental conformen intermunicipalidades, para tratar de manera integral sus RSU en CIR autorizados. Conforme a ésto se determinó que el RESA de Tenango del Valle, EdoMéx era el SDF más cercano a los municipios de Ocuilan y Xalatlaco, EdoMéx; el cual se encuentra a una distancia de 64 km de la cabecera municipal de Huitzilac, Mor.

3.3 ANÁLISIS DEL MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS SOLIDOS URBANOS.

En la tabla 3.12 destaca que Huitzilac, Mor. es el único que cuenta con PMIRSU y REG; y Ocuilan, EdoMéx no tiene GEN ni REC eficiente. Los RSU en el municipio de Xalatlaco, EdoMéx cuentan con TRAT, aunque en su Bando Municipal no lo menciona (BM Xalatlaco, 2019); al contrario de Huitzilac, Mor. y Ocuilan, EdoMéx, que dicen tener TRAT en sus Bandos Municipales pero no lo llevan a cabo (BPPGMH, 2016). Xalatlaco, EdoMéx y Huitzilac, Mor. cuentan con SC y TCA respectivamente, mientras que Ocuilan EdoMéx. requiere de su estación de transferencia para transportar sus RSU y disponerlos en el RESA de Tenango del Valle, EdoMéx.

Xalatlaco, EdoMéx es el que más RSU genera de los tres municipios seleccionados, seguido de Huitzilac, Mor y Ocuilan, EdoMéx. Es preocupante que Huitzilac, Mor tenga un TCA con 30 años de operación; y es importante confirmar la veracidad de la información, ya que se encontraron discrepancias entre lo recabado con la CE y la información publicada en FOfi (Tabla 3.12).

Tabla 3.12 Información del MIRSU de los municipios

Municipio	Xalatlaco, EdoMéx (FOfi)	Xalatlaco, EdoMéx (CE)	Ocuilan, EdoMéx (FOfi)	Ocuilan, EdoMéx (CE)	Huitzilac, Mor (FOfi)	Huitzilac, Mor (CE)
PMIRSU	NO	NO	NO	NO	SI	NO
REG	NO	NO	NO	SI	SI	SI
GEN	SI	SI	SI	NO	SI	SI
REC	SI	SI	SI	NO	SI	SI
TRAT	NO	SI	SI	NO	SI	NO
TRANSF	NO	NO	NO	SI	NO	NO
SDF	SI	SI	SI	NO	SI	SI
CANTIDAD DE RSU (TON)	30	33	13	13	12	20
TIPO DE SDF	SC	SC	TCA	NC	TCA	TCA
TIEMPO DE OPERACIÓN DEL SDF	7	7	-	-	30	30

PMIRSU: Plan de Manejo Integral de Residuos Sólidos Urbanos; REG: Reglamento; GEN: Generación; REC: Recolección; TRAT: Tratamiento; TRANSF: Transferencia; SDF: Sitio de Disposición Final.

3.4 ESTUDIOS DE CARACTERIZACIÓN

Una vez definidas las posibles ubicaciones de RESA se gestionó la visita a los SDF de los municipios de Xalatlaco, EdoMex y Huitzilac, Mor., así como a la estación de transferencia de Ocuilan, EdoMex.

Se eligieron en cada SDF cinco puntos para coleccionar sobre 200 kg de RSU y conformar una muestra compuesta, a la cual se le aplicó la NMX-015-SEMARNAT-1985. A los 50 kg de RSU de muestra final se les realizó la caracterización física conforme a la NMXAA-022-1985 (DOF, 1985b), agrupándose en las categorías del documento publicado por INECC-SEMARNAT (2012). En las caracterizaciones realizadas a los SDF, el subproducto "Otros" fue integrado por: Residuos finos, electrónicos, medicamentos, hule, pañal desechable, algodón, loza y cerámica, materiales de construcción y varios; mientras que los materiales susceptibles de ser valorizados fueron integrados por Cartón, Goma y Cuero, Metal, Papel, Plástico, Tetrapack, Textil y Vidrio.

3.4.1 Caracterización en Xalatlaco, EdoMéx.

En la figura 3.16 se muestra el SDF del municipio de Xalatlaco, EdoMéx, donde se puede observar que tienen un área asignada para RME, una zona de composteo, dos celdas saneadas con pozos de venteo, aunque algunos de ellos tapados; y una zona de recuperación de valorizables cerca del frente de tiro (Figura 3.16b).

La separación y cuantificación de subproductos *in situ* se llevó a cabo cerca del frente de tiro. En este SDF se encontró que predominan los materiales potencialmente valorizables (51.82 %) y existen diferencias en la fracción orgánica (FO) respecto a la media nacional (52.45%) (SEMARNAT, 2015). En la tabla 3.13 y la figura 3.17 se presenta la caracterización de los subproductos RSU determinada.

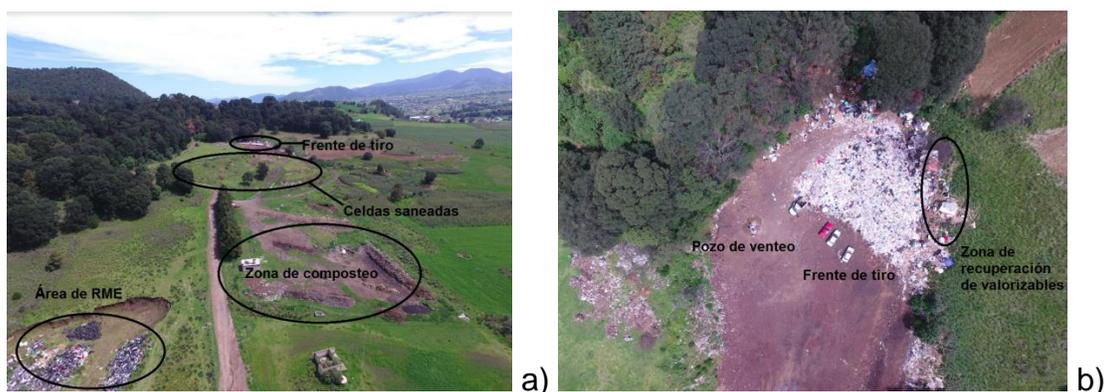


Figura 3.16 SDF de Xalatlaco, EdoMéx.

Tabla 3.13 Caracterización de residuos del SC de Xalatlaco, EdoMéx.

Subproductos	%	Kg
FO	26.26	13.13
Papel, carton y papel	16.05	8.03
Textiles	6.09	3.05
Plasticos	24.81	12.40
Metal no ferroso	0.24	0.12
Vidrio	4.87	2.44
Aluminio	0.24	0.12
Metal ferroso	0.02	0.01
Otros	21.40	10.70
Total	100	50

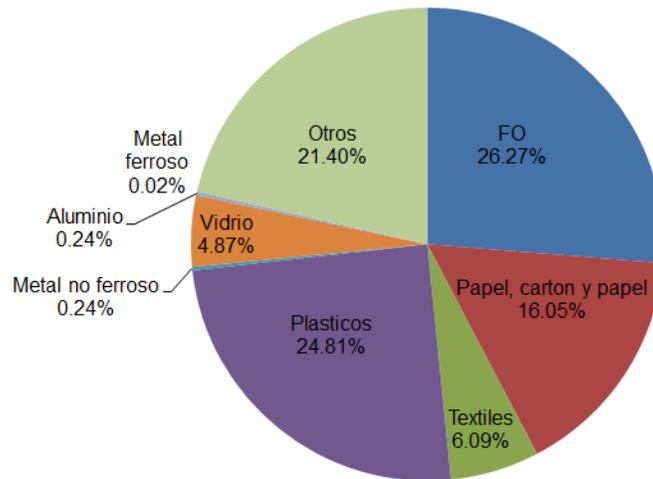


Figura 3.17. Caracterización de residuos del SC de Xalatlaco, EdoMéx.

3.4.2 Caracterización en Huitzilac, Mor.

En la figura 3.18 se presentan dos tomas del TCA de Huitzilac, Mor, en el que puede observarse que no se tiene un frente de tiro definido y los camiones que llegan depositan en cualquier lugar, tiene RSU y REM mezclados y no se tiene ningún tipo de compactación. El estudio de caracterización física evidenció que la FO (38.90%) se encuentra 13.55% por debajo de la media nacional (Tabla 3.14); lo cual es típico en municipalidades semi-rurales (INEGI, 2015). En cuanto a los materiales considerados valorizables, éstos representaron solo el 25.2%. Cabe mencionar que los textiles superan en 12.48% a la media nacional (SEMARNAT, 2015), lo que corrobora que los usos y costumbres, así como los patrones de consumo, afectan la composición de los RSU (SEMARNAT, 2012).



Figura 3.18. SDF de Huitzilac, Mor.

Tabla 3.14 Caracterización de residuos del SC de Huitzilac, Mor.

Subproductos	%	Kg
FO	38,90	19.45
Papel, carton y papel	10,37	5.19
Textiles	13,88	6.94
Plasticos	13,59	6.80
Metal no ferroso	0,24	0.12
Vidrio	0,72	0.36
Aluminio	0,01	0.01
Metal ferroso	0,27	0.14
Otros	22,02	11.01
Total	100,00	50.00

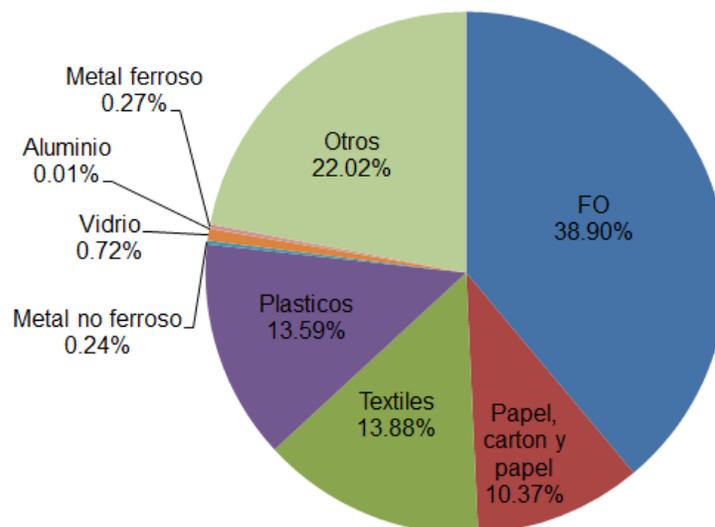


Figura 3.19. Caracterización de residuos del SC de Huitzilac, Mor.

3.4.3 Caracterización en Ocuilan, EdoMéx.

En el municipio de Ocuilan, EdoMéx, se realizó la solicitud escrita para que se autorizara la visita a la Estación de transferencia y poder llevar a cabo el estudio de caracterización de RSU, sin embargo no se contó con una respuesta positiva de las autoridades. Debido a ésto y a que como se muestra en el análisis de Cluster (Tabla 3.4), muestra similitudes en sus características con Xalatlaco, EdoMex; por lo que se decidió realizar un promedio ponderado de las caracterizaciones de los SDF de Xalatlaco, EdoMex. y Huitzilac, Mor. Los valores obtenidos se muestran en la tabla 3.15 y figura 3.20.

Tabla 3.15 Caracterización de residuos para de Ocuilan, EdoMéc

Subproductos	Rango	Promedio	%
FO	13.13- 19.45	16.29	32.58
Papel, cartón y papel	8.03 - 5.19	6.61	13.21
Textiles	3.05 - 6.94	4.99	9.99
Plásticos	12.40 - 6.80	9.60	19.20
Metal no ferroso	0.12 - 0.12	0.12	0.24
Vidrio	2.44 - 0.36	1.40	2.80
Aluminio	0.12 - 0.01	0.06	0.13
Metal ferroso	0-01 - 0.14	0.07	0.15
Otros	10.70 - 11.01	10.86	21.71
Total		50	100

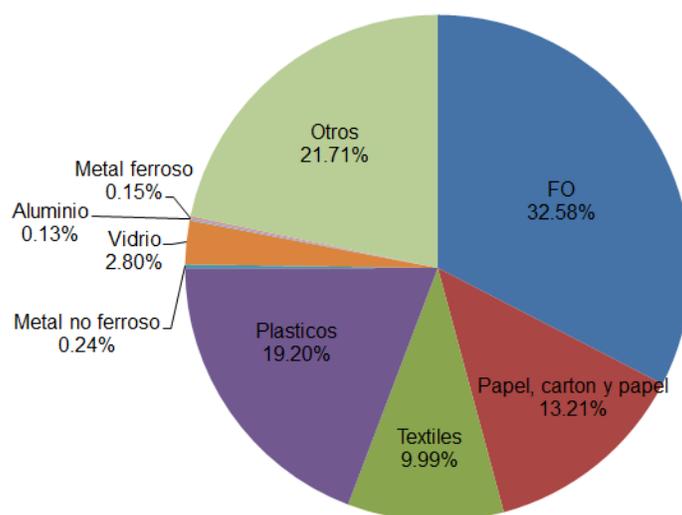


Figura 3.20. Caracterización de residuos del SC de Ocuilan

3.5 EVALUACIÓN DE LOS SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL ACTUALES

Para realizar la LV y obtener los datos necesarios para el llenado de la Matriz de Leopold (Apartado 2.4 y subapartado 1.3.4), se gestionó y visitó en agosto 2018 los SDF de los municipios de Xalatlaco, EdoMéc y Huitzilac, Mor. A continuación se presentan los resultados para cada uno de estos municipios.

3.5.1 Evaluación técnica

La aplicación de la LV presentada en el Anexo B (Díaz-Archundia 2016), evidenció que el SDF de Xalatlaco, EdoMéx, reportado como SC, cumple prácticamente con $\frac{3}{4}$ de las Restricción para ubicación del sitio; solo cuenta con estudios de generación y composición de biogás y lixiviados posteriores al Proyecto 263315; de las características constructivas y operativas tiene (Figura 3.16): barrera geológica (según operadores), pozos de venteo (tres tapados), control de dispersión de materiales y fauna nociva, cobertura mensual, caceta de vigilancia y caminos de acceso; además de que no cuenta con programa posclausura.

La tabla 3.16 muestra el resumen de las áreas de oportunidad del SC de Xalatlaco, EdoMéx, que obtuvo un nivel de cumplimiento de solo 36.39% con respecto a lo indicado por la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004), por lo que tiende a ser un TCA; y si no se atienden las áreas de oportunidad a corto plazo, corre el riesgo incrementar su impacto a nivel local.

En cuanto al SDF Huitzilac, Mor., recibe RME y no los separa (Figura 3.19); los valorizables RSU son colectados por algunos segregadores primarios en condiciones paupérrimas. En la Restricción para ubicación del sitio se cumple solo una tercera parte de las condicionantes (Tabla 3.16), mientras que en el resto de las categorías tuvo cero puntos, con lo que solo obtuvo el 14.17 % de cumplimiento; presentando muchas áreas de oportunidad, sobre todo en características constructivas y operativas, así como en la clausura del sitio.

De acuerdo a los años de operación y a la falta de atención, se recomienda la remediación y clausura del SDF de Huitzilac, Mor., que es un TCA, para evitar una mayor afectación de la ya encontrada.

Tabla 3.16 Evaluación técnica

MUNICIPIO	XALATLACO, EDOMÉX		HUITZILAC, MOR	
TIPO DE SITIO	SC	ÁREAS DE OPORTUNIDAD	TCA	ÁREAS DE OPORTUNIDAD
CATEGORÍA	C	Puede recibir de 50 t/día.	C	Puede recibir hasta 50 t/día
Disposiciones generales	100	Incrementar la separación de RSU y RME valorizables	50	Separar RME e incrementar la separación de RSU valorizables
Restricción para ubicación del sitio	75	Obstruyó el paso de un escurrimiento de temporada de lluvias. Casas aisladas a 190 m y mancha urbana >500m	35	Ubicado dentro de área protegida y no cuenta con PMIRSU. Casas aisladas a 90 m, mancha urbana >500m y se encuentra una laguna a escasos 10 m
Estudios y análisis previos para la selección del sitio	NA	No aplica por ser tipo C	NA	No aplica por ser tipo C
Estudios y análisis, en el sitio previos a la construcción y operación de un SDF	0	No cuenta con ningún tipo de estudio previo a la construcción y operación del sitio	0	No cuenta con ningún tipo de estudio previo a la construcción y operación del sitio
Estudios de generación y composición	0	No cuenta con estudio de generación de biogás ni de lixiviados hasta antes del Proyecto 263315	0	No cuenta con estudio de generación de biogás ni de lixiviados hasta antes del Proyecto 263315
Características constructivas y operativas del sitio	10	Carece de: determinación de coeficiente de conductividad hidráulica; extracción, captación, conducción y quemado del biogás; captación, extracción y recirculación de lixiviados, 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 enlistados en la tabla 7.8. Tiene 7 años de operación y posiblemente 2 años de vida útil más. Compostean RO.	0	Carece de: determinación de coeficiente de conductividad hidráulica; extracción, captación, conducción y quemado del biogás; captación, extracción y recirculación de lixiviados, área de emergencia; compactación y cobertura diaria de RSU; control de fauna nociva, registro 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 enlistados en la tabla 7.8. Se encontraron RP. Tiene 30 años de operación
Clausura del sitio	33	Tiene dos celdas saneadas y 3 pozos de venteo tapados. No cuenta con programa de monitoreo de biogás y lixiviados posclausura, no cuenta con programa posclausura.	0	No cuenta con programa de monitoreo de biogás y lixiviados posclausura, no cuenta con programa posclausura. No se ha atendido en los 30 años de operación.
Evaluación del cumplimiento	218/700	36.39%	85/700	14.17%

3.5.2 Evaluación ambiental y socioeconómica

Esta evaluación se realizó mediante la matriz de Leopold, identificándose 128 interacciones entre las actividades y los componentes del entorno para Xalatlaco, EdoMéx y 121 para Huitzilac, Mor:

- a) Xalatlaco, EdoMéx. La Matriz de Leopold aplicada en el SDF del municipio de Xalatlaco, EdoMéx (Anexo C), muestra niveles de significancia Severo,

Moderado y Bajo; donde las actividades que tuvieron mayor impacto fueron Disposición de RP y Manejo de lixiviados, con valores de 6.0 y 6.2 respectivamente, lo cual indica que se tienen que tomar acciones para disminuir las afectaciones, sobre todo en la categoría de Suelo y Agua (que pertenece a los componentes biofísicos).

En cuanto a Componentes Socioeconómicos, el atributo que tiene mayor nivel de significancia es Seguridad laboral, seguido de Calidad de espacio abierto, Parques y reservas forestales, Emprendimientos productivos y Calidad de vida; los cuales se deben de atender para disminuir su impacto; aunque éste se considere Moderado. El atributo de Uso potencial del suelo tuvo un valor positivo de agregación de impactos, debido a que se realizan actividades de compactación y se contrata maquinaria para ello.

Los atributos con menores valores de nivel de significancia bajo fueron: Salud poblacional y laboral, Uso potencial del suelo, Ingresos económicos adicionales, Ruidos y Vistas escénicas y laborales; estos atributos muestran áreas de oportunidad, que deben atender las autoridades de Xalatlaco, EdoMéx antes de que se incremente el impacto en ellos.

- b) Huitzilac, Mor. Para el SDF de este municipio, la Matriz de Leopold (Anexo D) evidenció con Nivel de Significancia Crítico los Atributos Calidad de Agua (7.9) y Uso potencial del suelo (7.6). Esto es preocupante en ambos Atributos, en el primero debido a que se trata de un TCA con 30 años de operación, colocado en un área con restricción por Cuerpos de agua (Figura 3.11); y en el segundo Atributo, porque hay una afectación económica importante, tanto en donde está la mayor cantidad de RSU, como en los alrededores, donde personas inconscientes dejan sus RSU (Figura 3.18a).

Más de la mitad de los atributos se encuentran con un nivel de significancia severo, resaltando: Gases, Parques y reservas forestales Cambio de usos de

suelo, Subterránea, Emprendimientos productivos, Salud poblacional y laboral; se puede observar que gran parte de ellos son debido al desinterés de las autoridades y al tiempo que estado operando, el atributo de Parques y reservas forestales es alto debido a que se encuentra dentro de un área natural protegida (Figura 3.7). Por otro lado los atributos con un bajo nivel de significancia son Ruidos e Ingresos económicos adicionales, esto es debido a que al no haber ningún control solo se hace ruido al depositar los residuos y por lo mismo solo se tienen un egreso.

3. 6 PREDISEÑO DE RELLENO SANITARIO

Con base a las tablas 3.16 de la LV, se definieron como TCA a los SDF de Huitzilac, Mor y Xalatlaco, EdoMéx, los cuales además tienen restricciones de ubicación como se determinó en el apartado 3.2 (DOF, 2004); debido a ésto y a las indicaciones de la SMAGEM conforme a la Gaceta No. 68 (PEEM, 2018), no fue posible elaborar una propuesta de prediseño en estos municipios, por lo que se tuvo que buscar otro municipio. Por otro lado, cuatro de los municipios del área de estudio (Malinalco, Zumpahuacan, Xalatlaco y Ocuilan, EdoMéx) pertenecen a la Región ambiental Río Lerma Sub-cuenca La Laguna y deben depositar sus RSU en el RESA de Tenango del Valle. Este SDF tiene planeado construir una nueva celda, por lo que se decidió realizar el prediseño para este RESA.

Con la intención de prediseñar la celda lo más apegada al área prevista por la empresa “Constructora y Operadora de Rellenos Sanitarios S.A. de C.V.” (CORES) que opera del RESA de Tenango del valle, se realizaron visitas de campo para conocer el SDF, recabar información y con ayuda de un dron DJI Phantom 4 Pro, fue posible visualizar de mejor manera el área propuesta para la celda, denominada Celda 2, tomar medidas del perímetro y estimar el área real disponible (Figura3.21).



Figura 3.21 Área para Celda 2 de estudio de RESA de Tenango del Valle

Con la información recabada y la proporcionada por el encargado del RESA de Tenango del Valle, se realizó un concentrado de población y RSU (Tabla 3.17), de los municipios que ya disponen en el RESA y se consideró incluir a Huitzilac, Mor; cuya cabecera municipal se encuentra a 64 km, distancia aproximada que tendrían que recorrer para llevar sus RSU al RESA de Tenango del Valle, Edo Mex.

Tabla 3.17 Municipios que disponen RSU en el RESA de Tenango del Valle, Edo Mex

MUNICIPIO	POBLACIÓN (INEGI, 2015)	RSU (kg/día) (SEMARNAT, 2018)
Joquicingo	13857	13000
Malinalco	27482	21000
Ocuilan	34485	15000
Tenancingo	97891	55000
Tenango del Valle	86380	59840
Tianguistenco	77147	47000
Xalatlaco	29572	38000
Zumpahuacan	13857	3500
Huitzilac	19231	13757
Tonatico	12324	11464
Almoloya del Río	11126	9171
Total	423352	286732

3.6.1 Prediseño de Relleno Sanitario Tradicional

Con base a los datos de la tabla 3.17 se realizaron proyecciones, considerando una tasa de crecimiento poblacional anual de 1.40% para el Estado de México y 1.60% para Morelos (INEGI, 2015) y, la tasa de crecimiento de generación de RSU anual de 2.77% a nivel nacional. Las proyecciones de crecimiento poblacional y de generación de RSU se muestran en los Anexos E y F respectivamente (SEMARNAT, 2015).

El área planeada por la empresa CORSA para la Celda 2 tiene aproximadamente 200 m de largo por 50 m de ancho. Con esta información, lo establecido en el subapartado 2.6.1 (profundidad máxima y altura máxima de 20 m a partir del nivel del suelo) y recomendaciones de la empresa en cuanto a forma, se estimó un volumen de 296296 m³.

El material de cobertura, suelo de la región, para prediseño comprende el 20% del volumen (PAHO, 2010), por lo que la Celda 2 contaría en realidad con un volumen de 237037 m³ para RSU, que para una densidad de compactación de 0.85 t/m³, podría contener 201481 t en total de RSU. Ya que es recomendable que al menos se reciban 300 t/día para que sea rentable, la vida útil se estimó con la ecuación 2.1 (Bagchi, 2004; Colomer *et al.*, 2013):

$$VU = 201481 \text{ t} / (300 \text{ t/día} * 365 \text{ días/año}) = 1.84 \text{ años}$$

La VU estimada equivale a un año y diez meses (22 meses) de operación. Las emisiones de CH₄ en el biogás generado a nivel de prediseño por esta Celda 2 operada como un RESA tradicional se hizo mediante tres modelos, iniciando con Modulo 4.0, debido a que éste permite visualizar una celda en tercera dimensión. A continuación se describe la forma en que se llevó a cabo este prediseño:

a) Moduelo 4.0. Con la cartografía en AutoCad ® proporcionada por el encargado del RESA de Tenango del Valle, se inició la construcción de la celda, partiendo del plano real para la Celda 2 en formato “DXF” (Figura 3.22a). Con las herramientas de Moduelo 4.0 se discretizó el plano (Figura 3.22b), para crear el Modelo morfológico que se muestra en la figura 3.22c. El modelo morfológico para la Celda 2 fue dividido en “miniceldas” cúbicas, con dimensiones de: Largo= 5m, Ancho= 5m y Alto= 2m.

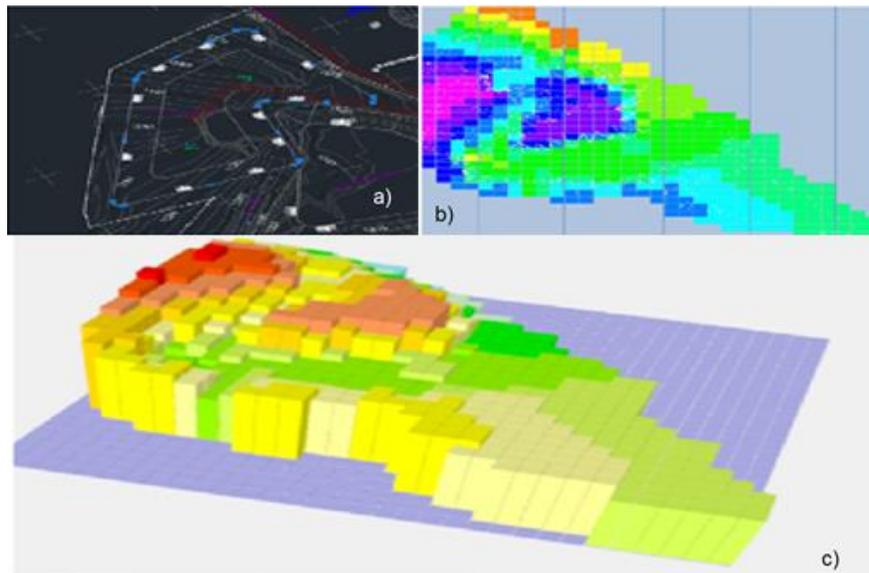


Figura 3.22 Creación del Modelo morfológico

Una vez que se tuvo el Modelo morfológico se dio forma al vaso de la Celda 2, para su posterior llenado conforme a las recomendaciones hechas por el encargado operativo de CORES. El llenado se realizó de manera que los RSU se “recargaran” en la Celda saneada, para ir conformando una sola macrocelda, como se muestra en la figura 3.23c y d. En la figura 3.23c se pueden ver los cuatro pozos ubicados siguiendo las recomendaciones de la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2003) e INCREMI (2013).

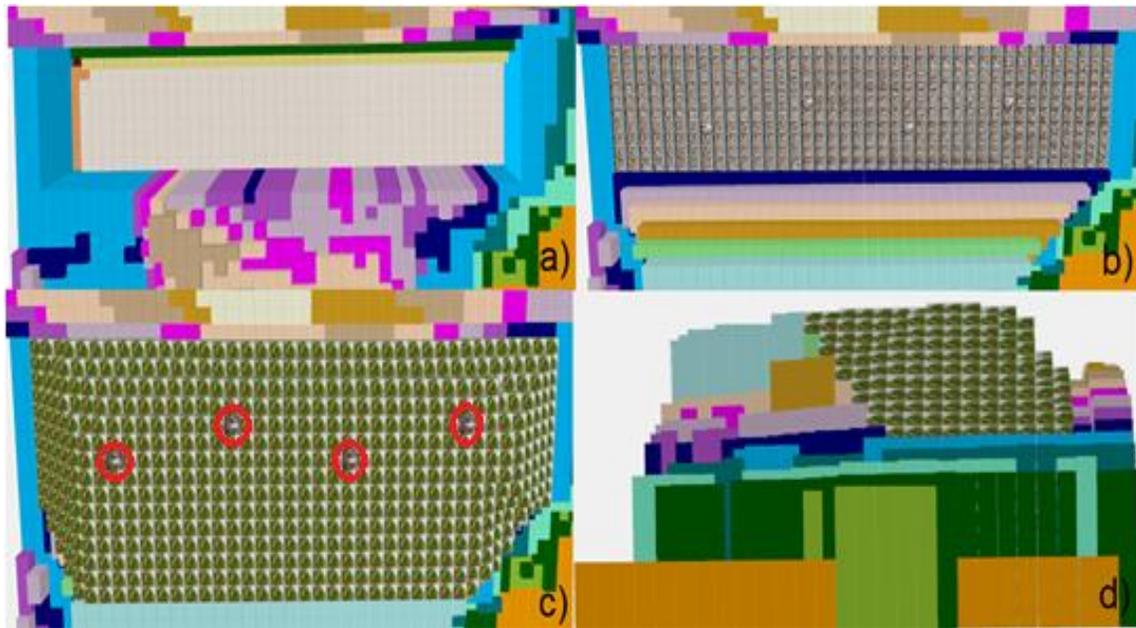


Figura 3.23 Prediseño y llenado con RSU: a) Vista de planta, vaso Celda 2; b) Inicio de llenado; c) Término de llenado con cuatro pozos; d) Vista frontal, vaso Celda 2

Debido a lo anterior, se tuvo que hacer un ajuste en cuanto a la cantidad de RSU a disponer en la Celda 2, considerando el número de miniceldas de Disposición y Clausura que se utilizaron y la densidad de compactación de RSU de 0.850 t/m³; obteniendo la cantidad real de RSU necesarios para llenarla que se muestra en la tabla 3.20.

Tabla 3.18 Capacidad de la celda

Celda	Cantidad	Cobertura (m)	Area (m ²)	Altura (m ²)	Volumen de minicelda (m ³)	Volumen total de celda (m ³)	Densidad (t/m ³)	Capacidad de celda (t)
Residuos SCT	3189	0.00	25	2.00	50	159450	0.85	135533
Residuos CT	396	0.15	25	1.85	46	18315	0.85	15568
Residuos ST	3655	0.00	25	2.00	50	182750	0.85	155338
Sellado T	772	0.60	25	1.40	35	27020	0.85	22967
Total	8012				181	387535		329405

Con el ajuste se obtuvo para la Celda 2 incrementos en cuanto a volumen y capacidad de RSU; de 296296 m³ a 387535 m³ (91239 m³ más) y de 201481 t

a 329405 t de RSU (127923 t más), respectivamente. Con estos resultados y datos del Anexo F, se hizo nuevamente la proyección de la VU por año de la Celda 2 hasta su llenado (Tabla 3.19).

Tabla 3.19 Vida útil del SDF

Año	RSU	RSU acumulado
2020	110535.36	110535.36
2021	113597.184	224132.544
2022	105272.206	329404.75

En la tabla 3.20 con las proyecciones de RSU y las caracterizaciones del apartado 3.4, se calculó una composición global de RSU y se definió el análisis elemental de cada subproducto, con respecto a lo reportado por Tchobanoglous *et al* (1994), con la cual se pudo realizar el Modelo de generación de residuos de Modulo 4.0.

Tabla 3.20 Composición y análisis elemental de subproductos

SUBPRODUCTO	%	C	H	O	N	AZUFRE	CENIZAS	BIODEGRADABILIDAD
Alimentos	29.6	48	6.4	37.6	2.6	0.4	5.0	Rápida
Metal	0.5	4.5	.6	4.3	0.10	0	90.5	Inerte
Otros	21.6	26.3	3.0	2.0	0.5	0.2	68	Rápida
Papel	14.5	43.5	6.0	44	0.3	0.2	6.0	Rápida
Plástico	21.8	60	7.2	22.8	0	0	10	Inerte
Textil	8.2	55.0	6.60	31.2	4.60	0.15	2.45	Lenta
Vidrio	3.8	0.5	0.10	0.40	0.10	0	98.9	Inerte

Para el Modelo morfológico se le asignaron propiedades específicas que corresponden al funcionamiento de las mini celdas en la simulación, las cuales se presentan en la tabla 3.21.

Tabla 3.21 Características de las celdas en los modelos morfológicos

TIPO DE CELDA EN Moduelo 4.0	MINICELDA	SÍMBOLO
Disposición	Residuos SCT	
	Residuos CT	
	Residuos ST	
Recolección	ConductoGas	
	ConductoLix	
Clausura de sitio de disposición	Sellado T	

El tipo de “Disposición” se dividió en tres: Residuos sin cobertura Tenango (SCT), Residuos con cobertura Tenango (CT) y Residuos superficiales Tenango (ST). Las celdas Residuos SCT corresponden a los RSU contenidos en el vaso y no cuentan con material de cobertura; las celdas Residuos CT contienen una capa de material de cobertura equivalente a 0.15 m de espesor como lo indica la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF,2003); por último, los Residuos ST son aquellos RSU que se disponen encima de la primera capa de cobertura intermedia que alcanza el nivel del suelo. Las celdas de Recolección corresponden a las miniceldas asignadas a la ubicación de pozos de lixiviado

(ConductoLix) y de extracción de biogás (ConductoGas). Las celdas de Clausura contienen 1.4 m de altura de RSU y 0.60 m de material final de cobertura (sellado). Además del espesor de cobertura las celdas tienen otras propiedades diferentes. En la tabla 3.24 se presentan las constantes relacionadas con las diversas propiedades de los RSU en las simulaciones (López et al., 2013; Schroeder, 1994).

Tabla 3.22 Constantes utilizadas en los distintos escenarios de simulación

	RSU SIN COBERTURA	RSU CON COBERTURA	RSU SUPERFICIALES	SELLADO
PARÁMETROS DE LOS RSU				
Humedad residual inicial (%)	12	12	12	12
Capacidad de campo inicial (%)	25	25	25	25
Humedad de saturación inicial (%)	56.2	56.2	59	59
Conductividad hidráulica vertical (m/s)	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005
Conductividad hidráulica horizontal (m/s)	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005
PARÁMETROS DEL MATERIAL DE COBERTURA				
Espesor (m)	0	0.15	0	0.6
Humedad inicial (%)	20	20	20	20
Densidad (kg/m ³)	1400	1400	1400	1400
Humedad residual inicial (%)	5	5	5	5
Capacidad de campo inicial (%)	20	20	20	20
Humedad de saturación inicial (%)	25	25	25	25
Conductividad hidráulica vertical (m/s)	0.000002	0.0000001	0.000002	0.0000001
INFILTRACIÓN SUPERFICIAL				
Tasa de infiltración mínima (mm/h)	3.81	3.81	3.81	10
Tasa de infiltración máxima (mm/h)	76.2	76.2	76.2	150
Parámetro de Horton (1/h)	4.14	4.14	4.14	4.14
EVAPOTRANSPIRACIÓN SUPERFICIAL				
Profundidad de evaporación (m)	0.1	0.1	0.1	0.1
Punto de marchitez (%) ESCORRENTÍA	100	100	100	100
Acumulación superficial máxima	0.2	0.05	0.05	0.05
FLUJO PREFERENCIAL				
Fración del volumen afectada por canales preferenciales (%)	35	35	45	45

Tabla 3.22 Constantes utilizadas en los distintos escenarios de simulación
(Continuación)

	RSU SIN COBERTURA	RSU CON COBERTURA	RSU SUPERFICIALES	SELLADO
HUMEDAD RESIDUAL				
Humedad residual mínima del RSU (%Hbh)	5	5	5	5
Influencia de la carga en la humedad residual (kg/m ²)	4536	4536	4536	4536
MODELO DE DEGRADACIÓN				
Tasa de hidrólisis rápida (1/d)	0.1	0.1	0.1	0.1
Tasa de hidrólisis lenta (1/d)	0.01	0.01	0.01	0.01
Tasa de acetogénesis (1/d)	0.1	0.1	0.1	0.1
MODELO DE RSU				
Factor de accesibilidad	0.65	0.65	0.65	0.65
Factor de arrastre	0.2	0.2	0.2	0.2

Las variables meteorológicas ingresadas corresponden al periodo 2010 a 2050, con las cuales Moduelo 4.0 calculó la evaporación, evapotranspiración, cantidad de agua en la superficie de la matriz de RSU correspondiente al periodo de operación y clausura, así como la humedad y generación de lixiviado (ANEXO G). Para la estimación del biogás generado se realizó una simulación que comprendió del 01 de enero de 2020 al 01 de enero de 2050, teniendo como resultado la gráfica color lila denominada “0% SR Moduelo “ de la figura 3.27.

b) Modelo MMB. Para este modelo se alimentó la generación anual de RSU (Tabla 3.21) y la composición de RSU utilizada en Moduelo 4.0 (Tabla 3.22), además de llenar la hoja de “Alimentación” conforme a la información proporcionada por el encargado operativo del RESA de Tenango del Valle (Figura 3.25). En la figura 3.27 se presenta con la gráfica color naranja (0% SR MMB), la dinámica del CH₄ calculado con MMB en el Biogás generado por la Celda 2.

PROYECCIONES DE LA GENERACION Y RECUPERACION DE BIOGAS DE RELLENOS SANITARIOS		INSTRUCCIONES: Editar los ítems en amarillo siguiendo las instrucciones proveídas enseguida de cada ítem. Ítems con letra blanca no pueden ser cambiados. Las instrucciones siguientes describen los requerimientos para la alimentación del Modelo.
PAGINA DE ALIMENTACION		
1	Nombre del Sitio: Reheno de Tenango del Valle	1. Alimentar el nombre del relleno sanitario. Esta alimentará la hoja de cálculo "Resultados-Tabla".
2	Ciudad: Tenango del Valle	2. Alimentar la ciudad donde está ubicado el relleno sanitario. Esta alimentará la hoja de cálculo "Resultados-Tabla".
3	Estado: México	3. Seleccionar el estado donde está ubicado el relleno sanitario. Has click en la flecha que aparece cuando seleccionas la celda.
4	Región: Central Interior	4. El modelo automáticamente seleccionará la región y su clima basado en la ubicación del estado.
5	¿Existen datos de caracterización de residuos específicos al relleno sanitario en cuestión? S	5. Seleccionar No si no existen datos, Si si existen datos. Si la respuesta es Si , alimentar los datos específicos en la hoja de cálculo "Caracterización de Residuos".
6	Año de apertura del sitio: 2020	6. Alimentar el año cuando el relleno sanitario inicio recibiendo residuos.
7	Disposición anual del año más reciente: 110,538 Mg	7. Alimentar la disposición en el año más reciente. Si existe información de varios años, alimentar esta información en la hoja de cálculo "Disposición y Recuperación de Biogás".
8	Año de disposición (arriba): 2020	8. Alimentar el año más reciente reflejando la información de arriba.
9	Año de clausura o año de clausura proyectado: 2022	9. Alimentar el año de clausura actual o proyectado del relleno sanitario.
10	Incremento anual estimado de la disposición: 2.8%	10. Alimentar el porcentaje de crecimiento de disposición anual.
11	Profundidad promedio del relleno sanitario: 42 m	11. Alimentar la profundidad de residuos promedio en metros.
12	Prácticas de diseño y manejo del relleno sanitario: 2	12. Seleccionar el valor del menú: 1= Sitio sin manejo; 2= Sitio con manejo; 3= Sitio semi-aeróbico; 4= Condición desconocida. Ver el manual del usuario para las definiciones de cada categoría.
13a	¿Ha habido algún incendio en el relleno sanitario? No	13a. Seleccionar Si o No del menú. Si se desconoce seleccionar No .
13b	Si la respuesta de 13a es "Si", indique el área del impacto en % del total: 0%	13b. Si la respuesta de 13a es Si , alimentar el % del área impactada.
13c	Si la respuesta de 13a es "Si", indique la severidad del impacto del incendio: 1	13c. Si la respuesta de 13a es Si , seleccionar la severidad del impacto: 1=bajo; 2=medio; 3=severo.
14	Año de arranque del sistema de captura (actual/estimado): 2020	14. Si no existe un sistema instalado, alimentar el año en que se espera el sistema este funcionando.
15	Porcentaje del área con residuos con sistema de captura: 100%	15. Alimentar un valor de hasta 100%, dependiendo de la cobertura del sistema de captura (rellenos sanitario activos tendrán una cobertura < 100%).
16	Porcentaje del área con residuos con cubierta final: 100%	16. Alimentar un valor de hasta 100%, dependiendo del área con cobertura final.
17	Porcentaje del área con residuos con cubierta intermedia: 50%	17. Alimentar un valor de hasta 100%, dependiendo del área con cobertura intermedia pero no cobertura final.
18	Porcentaje del área con residuos con cubierta diaria: 50%	18. Alimentar un valor de hasta 100%, dependiendo del área con solo cobertura diaria.
19	Porcentaje del área con residuos sin cobertura: -100%	19. Este valor es calculado automáticamente en base a las respuestas de las preguntas anteriores.
20	Porcentaje del área de residuos con recubrimiento inferior de arcilla/geomembrana: 100%	20. Alimentar un valor de hasta 100%, dependiendo del área con recubrimiento inferior de arcilla o geomembrana.
21	¿Se compactan los residuos regularmente? S	21. Seleccionar Si o No del menú.
22	¿La disposición de residuos se hace en una área específica? S	22. Seleccionar Si o No del menú.
23a	Existen afloramientos/brotos de lixiviado en la superficie del relleno sanitario? S	23a. Seleccionar Si o No del menú.
23b	Si la respuesta de 23a es "Si", ¿esto ocurre solo después de llover? S	23b. Si la respuesta de 23a es Si , indicar si los afloramientos/brotos ocurren inmediatamente después de las lluvias.
24	Eficiencia de captura estimada: 103%	24. Este valor es estimado en base a las respuestas de las preguntas anteriores.

Figura 3.24 Hoja de alimentación del MMB

c) Modelo IPCC. Para este modelo, lo primero que se eligió fue la región "América: Central", de la tabla 1.14 se determinó el clima como "Templado seco", los RSU depositados por año son los listados en la tabla 3.21 y se alimentó los residuos por composición de acuerdo a la tabla 3.22 (Figura 3.26), los resultados de generación de CH₄ en el biogás se muestran en la gráfica color azul (0% SR IPCC) de la figura 3.27.

Parameters

Country: Region:

Please enter parameters in the yellow cells. If no national data are available, copy the IPCC default value. Help on parameter selection can be found in the 2006 IPCC guidelines

	IPCC default value		Country-specific parameters	
	Value	Reference and remarks	Value	Reference and remarks
Starting year	1950		1950	
DOC (Degradable organic carbon) (weight fraction, wet basis)	Waste by composition			
	Range	Default		
Food waste	0.08-0.20	0.15	0.15	
Garden	0.18-0.22	0.2	0.2	
Paper	0.36-0.45	0.4	0.4	
Wood and straw	0.39-0.46	0.43	0.43	
Textiles	0.20-0.40	0.24	0.24	
Disposable nappies	0.18-0.32	0.24	0.24	
Sewage sludge	0.04-0.05	0.05	0.05	
Industrial waste	0-0.54	0.15	0.15	
DOCf (fraction of DOC dissimilated)		0.5	0.5	
Methane generation rate constant (k) (years⁻¹)	Dry temperate			
	Range	Default		
Food waste	0.05-0.08	0.06	0.06	
Garden	0.04-0.06	0.05	0.05	
Paper	0.03-0.05	0.04	0.04	
Wood and straw	0.01-0.03	0.02	0.02	
Textiles	0.03-0.05	0.04	0.04	
Disposable nappies	0.04-0.06	0.05	0.05	
Sewage sludge	0.05-0.08	0.06	0.06	
Industrial waste	0.04-0.06	0.05	0.05	
Delay time (months)		6	12	

Instructions Parameters MCF Activity Amnt_Deposited Recovery_OX Results HWP Stored_C Theory Defaults

Figura 3.25 Modelo IPCC

Como puede apreciarse en la figura 3.26, la cantidad máxima de generación de CH₄ se obtuvo en el año 2023, cuando se completa la capacidad de la Celda 2 y se deja de depositar RSU, clausurándose; sin embargo la generación de CH₄ continúa, aunque de manera decreciente. La dinámica de CH₄ obtenida mediante MMB muestra una mayor generación, seguida del Modelo IPCC y Moduelo 4.0; lo cual está en relación inversa con su nivel de certidumbre; es decir, Moduelo 4.0 es más preciso que Modelo IPCC y éste más que MMB.

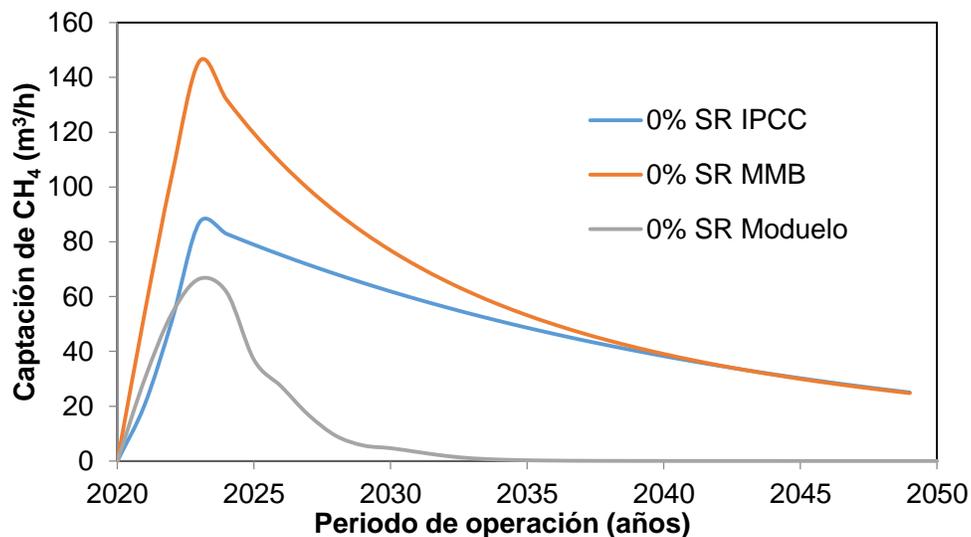


Figura 3.26 Generación de Biogás.

3.6.2 Prediseño de Relleno Sanitario Sostenible

Para el prediseño del RESA sostenible o CIR, se llevaron a cabo simulaciones como se detalla en el subapartado 2.6.2, teniendo como resultados las figuras 3.27 a 3.29 para Moduelo 4.0, MMB y Método IPCC respectivamente.

Las simulaciones con Moduelo 4.0, MMB e IPCC permitieron observar que la generación de CH_4 se amplía a más tiempo conforme se recuperan valorizables, sin embargo no es así con la generación misma (Figura 3.27), como puede apreciarse en la tabla 3.23.

Las simulaciones con el IPCC permitieron observar la influencia positiva de la humedad en la generación de CH_4 , la cual es mayor en los primeros diez años y hay una mayor generación (aproximadamente 30%).

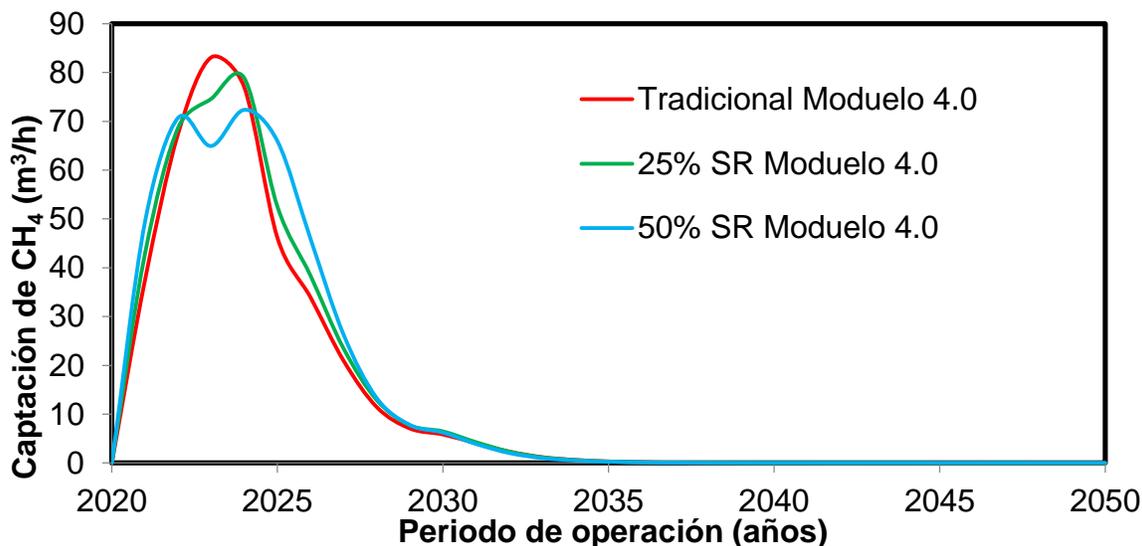


Figura 3.27 Generación de Biogás de Moduelo 4.0.

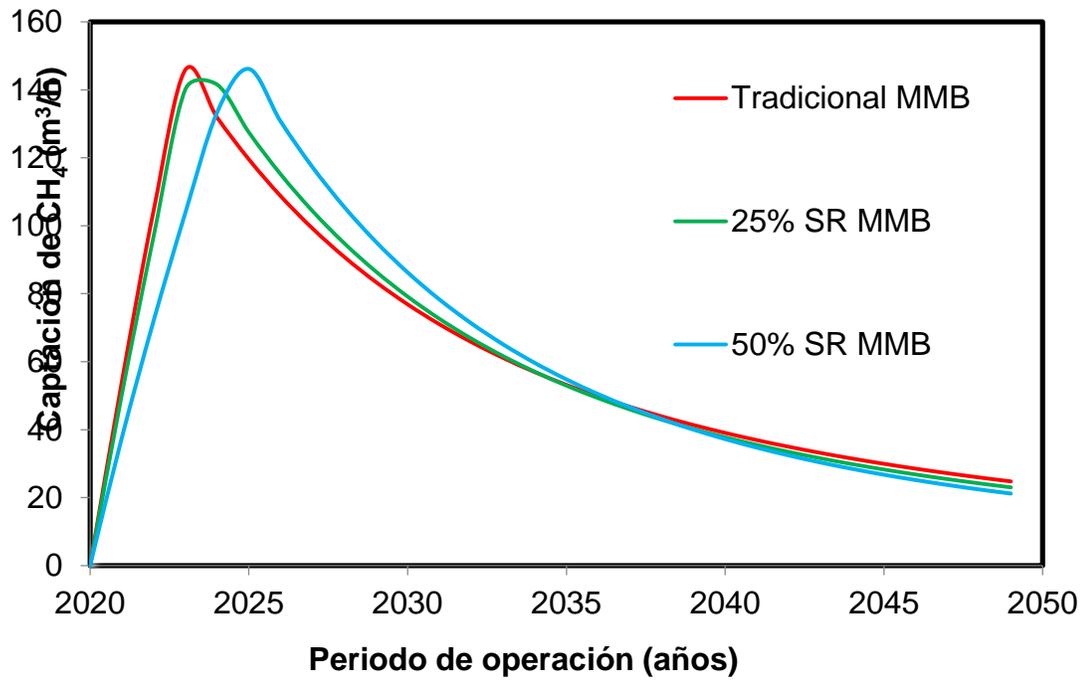


Figura 3.28 Generación de Biogás de MMB.

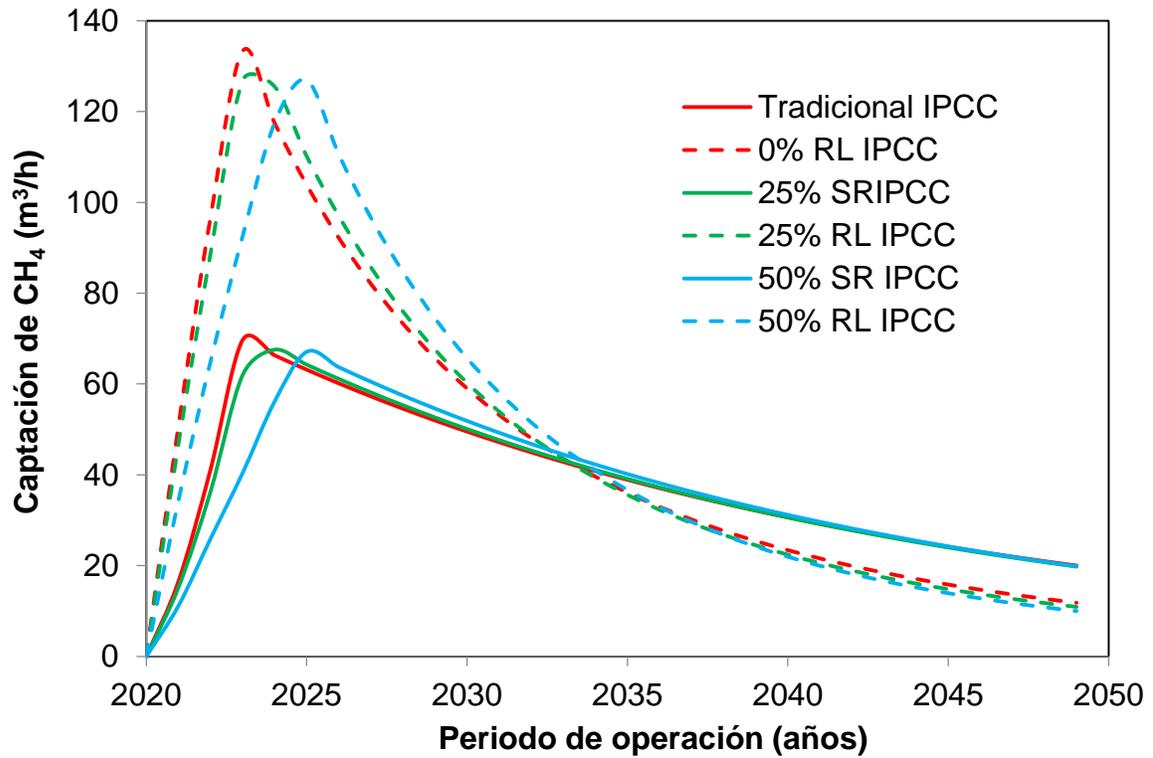


Figura 3.29 Generación de Biogás del Método IPCC.

Tabla 3.23 Comparación de la generación de CH₄ con los tres modelos

Flujo (m ³ /h)	Modelo	0% revalorizables		25% revalorizables		50% revalorizables	
		Años a este flujo	CH ₄ acumulado (m ³ /h)	Años a este flujo	CH ₄ acumulado (m ³ /h)	Años a este flujo	CH ₄ acumulado (m ³ /h)
25	MMB	28	708	27	672	25	636
	Moduelo 4.0	5	134	6	153	6	144
	IPCC SR	23	573	23	567	23	570
	IPCC RL	19	468	18	456	18	449
40	MMB	19	754	18	732	18	717
	Moduelo 4.0	3	138	5	191	4	156
	IPCC SR	12	499	12	496	12	484
	IPCC RL	13	524	13	519	13	521
Variable	MMB	30	1817	30	1822	30	1819
	Moduelo 4.0	30	319	30	345	30	332
	IPCC SR	30	1133	30	1126	30	1105
	IPCC RL	30	1380	30	1377	30	1366

Se consideró conformar sobre la Celda 2 una red de tubería HDPE; de acuerdo a la distancia entre pozos y a donde se podría colocar el sistema de destrucción y aprovechamiento, se estimó requerir 60 m de tubería de 4" para los ramales e interconectar los cuatro pozos entre sí, además de 195 m de una tubería principal de 6", para transportar el biogás hacia el sistema de tratamiento, para eliminar humedad, H₂S, Siloxanos, etc.; del cual se pretende enviar el 80% al sistema de aprovechamiento para generar energía eléctrica y el resto a un sistema de destrucción (INCREMI, 2013).

Debido a que se planea que se haga recirculación en la Celda 2, se tomaron los datos proporcionados por la simulación 25% RL IPCC (Figura 3.29), para las evaluaciones técnica, económica y ambiental. Para el prediseño del motogenerador requerido para convertir CH₄ en energía eléctrica, se consideraron: los flujos bajo (25m³/h) y medio (40m³/h) (Figura 3.30), con un rendimiento térmico de 33% y 40% respectivamente, una concentración del 50% de CH₄ en el biogás, con una recuperación del 80% y los criterios de la tabla 1.3. Los cálculos realizados mediante la ecuación 1.4 se muestran enseguida:

$$\text{Potencia disponible media} = 0.33 * 5 \text{ kWh/m}^3 * \frac{25 \text{ m}^3/\text{h}}{0.5} = 88.2 \text{ kW}$$

$$\text{Potencia disponible baja} = 0.40 * 5 \text{ kWh/m}^3 * \frac{40 \text{ m}^3/\text{h}}{0.5} = 160.0 \text{ kW}$$

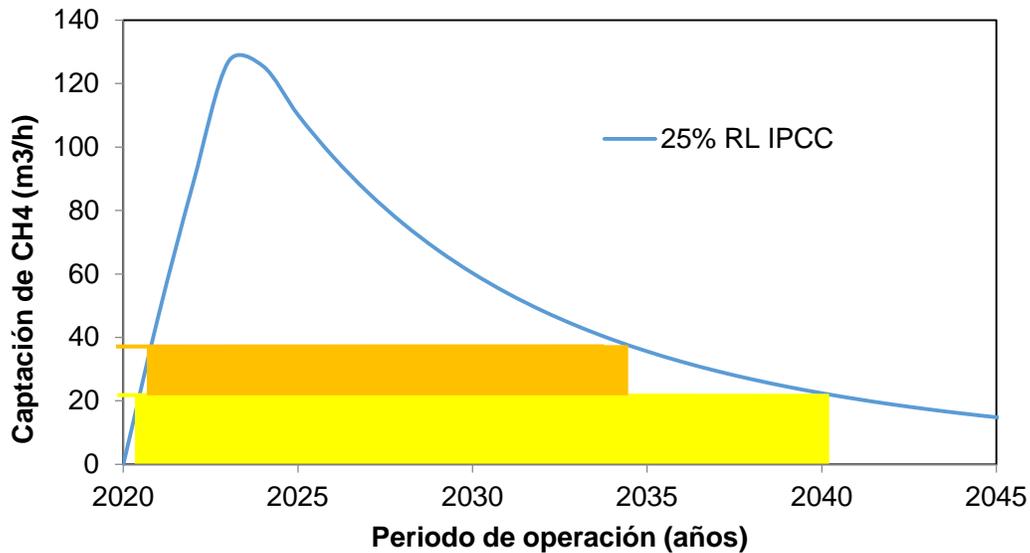


Figura 3.30 Recuperación de CH₄ para escenarios medio y bajo

El motogenerador requerido para la Celda 2 en el CIR, con un factor del 20 % de sobre diseño para cada caso fue de 105.84 kW (bajo) y 192.00 kW (medio). La energía eléctrica por generar se estimó en función de la Potencia disponible y un factor de disponibilidad de 85 % por mantenimiento según la ecuación 1.5 (Blanco *et al.*, 2017).

$$\text{Electricidad} = 88.2 \text{ kW} * 0.85 * 8760 \frac{\text{h}}{\text{año}} = 386316 \text{ kW/año} = 386.32 \text{ MW/año}$$

$$\text{Electricidad} = 160.0 \text{ kW} * 0.85 * 8760 \frac{\text{h}}{\text{año}} = 1191360 \text{ kW/año} = 1191.36 \text{ MW/año}$$

$$=136 \text{ kW/h}$$

3.7 EVALUACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL

Se llevó a cabo la evaluación de los escenarios como se menciona en el subapartado 2.7; a continuación se describen los resultados obtenidos:

a) Evaluación técnica. Analizando las dinámicas de generación de CH₄ (Figura 3.26 a 3.29), se puede apreciar que la mayor generación acumulada se obtuvo en las simulaciones sin recuperación de valorizables para el Método IPCC, mientras que para Moduelo 4.0 y MMB fueron los casos donde se recupera el 25% de los RSU valorizables; esto se debe a que aunque se incrementa la FO, es mayor la cantidad de papel que se retira como residuo valorizable.

Las dinámicas de generación de CH₄ con los tres diferentes Software, también permitieron observar que los periodos de estabilización, fueron prácticamente similares para los casos en los que se extrae o no valorizables. Haciendo la comparación con IPCC, los periodos de estabilización se acortan con la recirculación, debido a que se favorece la biodegradación (Hernández-Berriel, *et al*, 2010).

Por otro lado, como se muestra en la tabla 3.24, al aumentar la recuperación de RSU potencialmente valorizables, se incrementa la vida útil del CIR.

Tabla 3.24 Vida útil del SDF sin y con recuperación de RSU potencialmente valorizables

AÑO /VALORIZABLES	VIDA ÚTIL		
	0%	25%	50%
2020	110535	97046	83558
2021	113597	99700	85900
2022	105273	102500	80941
2023		26325	71647
Meses	35	40	47

b) Evaluación económica. Para estimar los costos de inversión de los principales equipos y componentes del sistema de aprovechamiento del CH₄ en el biogás producido, se consideraron experiencias semejantes y las ecuaciones 1.6 y 1.7. Con el fin de realizar posteriormente comparaciones, se eligieron para la Celda 2 los casos del RESA Tradicional y el CIR con las condiciones 25% RL IPCC (Figura 3.29).

Tomando como base lo reportado por Santana-Rodriguez (2017), se estimaron los costos de inversión para la excavación del vaso de la Celda 2, los pozos de venteo y el sistema de drenado de lixiviados. Estos costos se muestran en la tabla 3.25.

Tabla 3.25 Costo de Inversión de Excavación de Vasos, pozos de venteo y drenado de lixiviados

CONCEPTO	RANGO DE COSTOS	COSTOS RESA X (MXN \$)	UNIDADES	CELDA 2		
				CANTIDAD	COSTO (2017)	COSTO (2019)
Topografía	\$ 4.00-5.00 /m ²	4.5	m ²	12000	\$54,000	\$56,020
Estudios Geotécnicos (Completo)	\$ 220 000.00- \$230 000.00	225,000	Paquete	1	\$225,000	\$233,415
Excavación mecánica de vaso	\$32.00- \$38.00/m ³	35	m ³	240000	\$8,400,000	\$8,714,154
Acarreo (material extraído)	\$20.00- \$24.00/m ³	22	m ³	200000	\$4,400,000	\$4,564,557
Geomembrana (HDP, 5mm)	\$ 85.00-92.00 /m ²	90	m ²	20000	\$1,800,000	\$1,867,319
Capa de Cobertura Inicial (suelo)	\$70.00- \$73.00/m ³	73	m ³	180000	\$13,140,000	\$13,631,426
Desplante de Pozos	\$9000.00-9200.00 /pozo	9,000	Piezas	4	\$36,000	\$37,346
Piedra Braza pozos	\$700.00-750.00 /m ³	750	m ³	176	\$132,000	\$136,937
Tubo PVC y Malla	\$450.00-500.00 /m lineal	450	m	176	\$79,200	\$82,162
Quemadores	\$6500.00-7000.00 /quemador	6,500	Piezas	4	\$26,000	\$26,972
Tubería HPDE 6"	\$300.00-350.00 tramo de 6 m	350	6 m	195	\$11,550	\$11,982
Piedra Braza dren lixiviados	\$700.00-750.00 /m ³	750	m ³	100	\$75,000	\$77,805
TOTAL					\$28,378,750	\$29,440,094

De acuerdo a INCREMI (2013), los costos por Recolección y Disposición final de RSU en el SDF eran de \$129 por tonelada dispuesta en 2013, con este dato y los CEPCI reportados por CE (2019), el costo por tonelada se estimó en

\$133.82. En las tablas 3.26 y 3.27 se detallan los egresos del RESA Tradicional y CIR respectivamente; para este último se consideró que el costo por tratamiento (separación) en el SDF, fuera el 50% del costo de Recolección y Disposición (\$66.91/t RSU).

Tabla 3.26 Costo por recolección y disposición final de RSU en RESA Tradicional

AÑO	RSU DISPUESTOS (t)	COSTO POR DISPOSICIÓN (\$MXN)
2020	110535	\$ 14,792,339
2021	113600	\$ 15,202,463
2022	105269	\$ 14,087,524
Total	329404	\$ 44,082,326.39

Tabla 3.27 Costo por Separación, Recolección y Disposición final de RSU en RESA Sostenible

AÑO	RSU INGRESADO AL CIR (t)	RSU DISPUESTOS EN SDF (t)	RSU RECUPERADOS (t)	COSTO POR DISPOSICIÓN (\$MXN)	COSTO POR SEPARACIÓN (\$MXN)
2020	110535	97046	13489.4	\$ 12,987,132.66	\$902,603.16
2021	113600	99700	13900.0	\$ 13,342,302.89	\$930,080.29
2022	116700	102500	14200.0	\$ 13,717,011.50	\$950,153.97
2023	32906	30158	2748.0	\$ 4,035,879.34	\$183,874.87
	373741	329404	44337.4	\$ 44,082,326.39	\$2,966,712.29

Debido a que el CIR requiere un costo por separación, el costo neto es mayor que el del RESA Tradicional por \$2,966,712.29 (dos millones novecientos sesenta y seis mil setecientos doce pesos 29/100 MN); sin embargo como existe una cuota para la disposición de RSU, la cual se consideró de \$150.00 por tonelada de RSU dispuesta, los ingresos son 13.46% mayores para el CIR (Tablas 3.28 y 3.29), debido a que en este entrarían una mayor cantidad de RSU (Tabla 3.26).

Tabla 3.28 Ingresos por disposición al RESA Tradicional

AÑO	TONELADA DE RSU	INGRESO POR DISPOSICIÓN 2018 (\$MXN)
2020	110535	\$ 17,200,394.17
2021	113600	\$ 17,677,283.11
2022	105273	\$ 16,381,519.58
Total	329408	\$ 51,259,196.86

Tabla 3.29 Ingresos por disposición al CIR

AÑO	TONELADA DE RSU	INGRESO POR DISPOSICIÓN 2018 (\$MXN)
2020	110535	\$17,200,394.17
2021	113600	\$17,677,283.11
2022	116700	\$18,159,673.76
2023	32906	\$5,120,498.93
Total	373741	\$58,157,849.96

Para el balance de ingresos y egresos, se estimó el ingreso por la venta de los RSU potencialmente revalorizables para el CIR. En el Anexo H se listan los precios de los productos reportados por Martínez-Morales (2016).

En el Anexo I se listan los costos en USD de los equipos y componentes necesarios para el Sistema de quemado del CH₄ en un RESA, conforme al trabajo de SCS (2008), así como el escalamiento a las capacidades requeridas para Celda 2 para 2013 en USD (Ec. 1.6) y al año 2018 (Ec. 1.7).

En el Anexo J se muestran los costos adicionales a los mencionados en el Anexo I, para el aprovechamiento de CH₄ en la generación de energía eléctrica en el CIR. Se consideró un valor de \$18.70 MXN por 1 USD. Una vez realizado los cálculos, se obtuvo un costo de inversión adicional al del quemado de CH₄ de \$30,230,984 (treinte millones doscientos treinta mil novecientos ochenta y cuatro pesos 00/100 MXN).

Para llevar a cabo la recirculación de lixiviados se propuso la adquisición de una bomba centrífuga de 20 hp, para recircular 30 m³/mes de lixiviado a cada pozo, considerando 56 semanas por año (Tabla 3.30).

Tabla 3.30 Gastos para recirculación de lixiviados en 2020

CONCEPTO	RANGO DE COSTOS	COSTO RESA X ^{a)}	UNIDADES	CELDA 2	
				CANTIDAD	COSTO (\$/año)
Salario de operador	\$450.00-500.00 /día	\$450.00 /día	Salario	56	\$28,000.00
Mantenimiento de bomba centrífuga para RESA	\$350.00-400.00 / semana	\$400.00 /semana	Mantenimiento	28	11,200.00
Consumo de diesel (1.4 l/h)a)	\$16.50 - 17.00 / L	\$21.30	\$/L	134.4	\$2,862.00
Bomba centrífuga de 20 hp b)	\$22833-23730	\$23281.50	Equipo	1	\$23,282.00
TOTAL					\$40,138.00

Fuente: ^{a)} Santana-Rodriguez (2017)

Otro punto importante fueron los ingresos por la generación de electricidad y por las reducciones de emisiones de CO₂, las cuales se presentan en el Anexo K y L. Para estas estimaciones se consideró la conversión de 1 tonelada de CH₄ a 23 toneladas de CO₂e (Martínez & Fernández, 2004), con un precio de \$20 USD por tonelada de CO₂e para los CER (INECC, 2012) y de USD\$0.12 kW/hora de energía producida por biogás (INCREMI, 2013).

Con el fin de mostrar el panorama general del RESA Tradicional y el CIR con los datos de 25% RL IPCC, se elaboraron las tablas 3.31 y 3.32 respectivamente, donde se concentran los Costos e Ingresos. Para el caso del RESA Tradicional no se está considerando ningún ingreso por la quema del biogás emitido y estos costos e ingresos serian para el primer año de operación. En la tabla 3.31 se muestra que son mayores lo ingresos que los egresos.

Tabla 3.31 Costos e ingresos resumidos para RESA Tradicional

CONCEPTO	COSTOS	INGRESOS
Inversión de Excavación de Vasos, pozos de venteo y drenado de lixiviados	\$29,440,094	
Costos por disposición de RSU 2020-2023	\$44,082,326	
Ingresos por recepción de RSU 2020-2023		\$51,259,197
Total	\$73,522,420	\$51,259,197

Tabla 3.32 Costos e ingresos resumidos para el CIR

CONCEPTO	COSTOS	INGRESOS
Inversión de Excavación de Vasos, pozos de venteo y drenado de lixiviados	\$29,440,093.78	
Inversión del Sistema de quema de biogás	\$8,335,662.27	
Inversión del Sistema de aprovechamiento de biogás	\$30,230,984.47	
Costos por disposición de RSU 2020-2023	\$44,082,326.39	
Costo por separación de RSU 2020-2023	\$2,966,712.29	
Costos por recirculación de lixiviados 2023-2025	\$107,406	
Ingresos por recepción de RSU 2020-2023		\$58,157,849.96
Ingresos Bonos de Carbono 2021-2034		\$44,933,665.41
Ingresos por Energía Eléctrica 2020-2034		\$37,427,765.76
Ingresos de venta de reciclables (2020-2023)		\$79,902,614.90
Total	\$115,163,185.20	\$220,421,896.03

Los Costos de operación anual se estimaron mediante la ecuación 3.1 (Jiménez, 2003), donde “a” es un factor que considera gastos anuales como regalías, mantenimiento, etc., los cuales no se conocen a este nivel de diseño preliminar, de manera que se estimaron como el 10 % del costo de Inversión fija total (I). Los costos variables incluyen los Costos por disposición de RSU y los Costos de recirculación de lixiviados. El término pSP se refiere a la venta de subproductos, lo cual ocurre cuando se considera la venta del 25% de reciclables, electricidad y bonos de carbono para el caso del CIR.

$$C = a I + bMP + cE + dMO - pSP \quad (\text{Ec. 3.1})$$

C; Costos de operación

I; Inversión fija

bMP; Costos de materias primas

cE; Costos de energía

dMO; Costos de mano de obra

pSP; Venta de subproductos

De acuerdo a la ecuación 3.1 los costos de operación para los escenarios de RESA Tradicional (Tabla 3.25) y CTIR (Tabla 3.26) se calcularon para el 2023 de la siguiente manera:

$$C = \left(\frac{0.1}{\text{año}}\right) * \$73,522,420 + 15,202,463/\text{año}$$

$$C = \$22,554,705 / \text{año}$$

$$C_{CIR} = \left(\frac{0.1}{\text{año}}\right) * \$115,163,185 + \$ 14,087,524 / \text{año} + \$ 23,282 / \text{año} - \$ 25,212,561/\text{año}$$

$$- \$3,724,268 - \$2,673,412 = \$ -5,983,116.48 / \text{año}$$

Para el caso de C_{CIR} se obtiene un valor negativo debido a que los ingresos son mayores que los egresos.

Una vez obtenidos los Costos de operación se calculó la Utilidad Bruta o Beneficio Bruto (R) con la ecuación 3.2; donde S son las Ventas que se obtienen como ingresos por la recepción de RSU en el RESA.

$$R = S - C \quad (\text{Ec. 3.2})$$

$$R = \$16,381,519.58/\text{año} - \$22,554,705 / \text{año}$$

$$R = \$ -6,173,185.42 / \text{año}$$

$$R_{CIR} = \$ 18,159,673.76 / \text{año} - \$ -5,983,116.48 / \text{año}$$

$$R_{CIR} = \$24,142,790.24$$

El que R sea negativo para el RESA Tradicional, indica que hay pérdidas, debido a que los costos anuales superan a las ventas, por lo que no es posible proseguir con la estimación de la Ganancia Neta (P).

La R_{CIR} cuando se recupera el 25% de los reciclables es positiva y rinde un valor interesante, de manera que con la ecuación 3.3 se estimó P_{CIR} .

$$P_{CIR} = R - eI - t(R - dI) \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Dónde:

P_{CIR} ; Utilidad neta

e, Factor de depreciación para fines contables (0.1)

d, Factor de depreciación para fines de impuestos (0.1)

t, Tasa de impuesto (0.33)

$$P_{CIR} = \$ 24,142,790.24/\text{año} - 0.1 * \$ 115,163,185.20 \\ - 0.33(\$24,142,790.24/\text{año} - 0.1 * \$ 115,163,185.20)$$

$$P_{CIR} = \$ 8,459,736.05 / \text{año}$$

Para obtener la viabilidad económica del CIR, se hizo uso de las ecuaciones 1.6 a 1.10, para estimar RI , RCB , VPN , V y TR con un 8% de tasa de interés (FAO, 2011; Jiménez, 2003; SAGARPA & FIRCO, 2007).

$$RI = \frac{\$ 8,459,736.05 / \text{año}}{\$ 115,163,185.20 * 0.1} * 100 = 73.4 \%$$

$$RCB = \frac{(\$18,159,673.76 + \$ 25,212,561/\text{año} + \$3,724,268 + \$2,673,412) * 100}{(\$115,163,185.20 * 0.1 + \$ 14,087,524 / \text{año} + \$ 23,282 / \text{año})}$$

$$RCB = 194.21 \%$$

$$VPN = \frac{\$ 8,459,736.05 / \text{año}}{(1+0.08)^{14}} = \$ 7,833,088.89 / \text{año}$$

$$V = \$ 8,459,736.05/\text{año} - 0.4 * \$ 115,163,185.20 = -\$37,605,538.03 / \text{año}$$

$$TR = \frac{\$ 115,163,185.20}{\$ 8,459,736.05/\text{año} + 0.1 * \$ 115,163,185.20 / \text{año}} = 5.8 \text{ años}$$

De acuerdo a los valores obtenidos con excepción de V , el proyecto es atractivo; aunque no supera el valor mínimo establecido del 40 % ($RI > i_{min}$), la TR puede considerarse de medio plazo.

En cuanto al VNP , es positivo, lo que significa que se obtiene la tasa requerida del 8% y una suma como un extra, lo cual es atractivo pero no recomendable, pues el proyecto requerirá que parte de ellas se reinviertan.

c) Evaluación ambiental. En el Anexo K se muestran las emisiones correspondientes a los casos para el RESA Tradicional y al CIR. Para el RESA Tradicional se tiene un total de emisiones de CH_4 que equivalen a 227516 t CO_2e más 29797 t de CO_2 , que representan 257312 t de CO_2 a la atmosfera denominado sin proyecto; para el CIR las emisiones de CH_4 equivalen a 107372 t CO_2e , más 120143 t de CO_2e que representan CH_4 destruido en términos de CO_2e (ya sea por flama o por generación de electricidad), lo que rinde un cambio neto (reducción de emisiones de CO_2 bajo el escenario propuesto) de 137169 t de CO_2 ; que representan un ahorro de impacto al ambiente del 53.30%.

CONCLUSIONES

- La aplicación de los análisis estadísticos y técnicas multicriterio, permitieron agrupar en cuatro Cluster los 17 municipios del área de estudio de acuerdo a características similares y detectar a aquellos con mayor necesidades de un SDF viable.
- Los estudios de caracterización física realizados en los SDF de Xalatlaco, EdoMéx y Huitzilac, Mor corroboran que los usos y costumbres y, los patrones de consumo, afectan la composición de los RSU; evidenciando que en Xalatlaco, EdoMéx predominan los materiales potencialmente valorizables (51.82 %) y en Huitzilac, Mor representaron solo el 25.2%, así como que su fracción orgánica es menor a la media nacional.
- Conforme a la Matriz de Leopold el SDF de Xalatlaco, EdoMéx presenta un impacto socio-economico y ambiental moderado (4.2 de Nivel de significancia); mientras que el SDF de Huitzilac, Mor tiene un impacto severo (6.5 de Nivel de significancia); requiriendo con urgencia ser saneados y clausurados conforme a la NOM-083-SEMARNAT-2003.
- Los SDF de los municipios de Xalatlaco, EdoMéx, Huitzilac, Mor y Ocuilan, EdoMéx necesitan de sitio para disponer sus RSU de manera sostenible, perfilándose el RESA de Tenango del Valle, EdoMéx como la localización más viable.
- Las dinámicas de generación de CH₄ obtenidas mediante el Modelo Mexicano de Biogás (MMB), el Método IPCC y Simulador Moduelo 4.0; demostraron que a mayor generación de CH₄ es menor la certidumbre de los Software utilizados; y

que los periodos de estabilización fueron prácticamente similares para los casos donde se extrajeron el 25% y el 50% de RSU valorizables, en comparación con los casos base.

- De acuerdo con la evaluación técnica, económica y ambiental la operación de la Celda 2 bajo las condiciones de un CIR es viable; con un Retorno de Inversión de 73.4%, un Valor Presente Neto de \$7,833,088.89/año y una Tasa de Retorno Media de 5.8 años.

REFERENCIAS

Aguayo, F., Peralta, M., Lama, J., Sotelo, V. (2013). *Ecodiseño: Ingeniería Sostenible de la Cuna a la Cuna C2C*. Madrid, España: RC Libros.

Aguilar-Virgen Q., Armijo-de Vega C., Taboada-González P. (2009). El potencial energético de los residuos sólidos municipales. *Ingeniería–Revista Académica FIUADY*, 13(1), 59-62.

Bagchi, A. (2004). *Design of landfills and integrated waste management*. 3rd ed. pp:119-125. Editor Wiley. ISBN-10: 0471254991. ISBN-13: 978-0471254997.

BID. (2015) Situación de la gestión de RESIDUOS SÓLIDOS en América Latina y el Caribe. Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (documento web, ultimo acceso:09/06/2019)
<https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Situaci%C3%B3n-de-la-gesti%C3%B3n-de-residuos-s%C3%B3lidos-en-Am%C3%A9rica-Latina-y-el-Caribe.pdf>.

BM Xalatlaco. (2019). Bando Municipal de Xalatlaco.
<https://legislacion.edomex.gob.mx/sites/legislacion.edomex.gob.mx/files/files/pdf/bdo/bdo2019/bdo119.pdf>

BPBGMH. (2016) BANDO DE POLICÍA Y BUEN GOBIERNO DEL MUNICIPIO DE HUITZILAC (BPBGMH), MORELOS, 2016-2018

Batool S.A., Chuadhry M.N. (2008). The impact of municipal solid waste treatment methods on greenhouse gas emissions in Lahore, Pakistan. *Waste Management*, 29(1), 63-69.

Bel, G. Mur, M. (2009). Intermunicipal Cooperation, Privatization and Waste Management Costs: Evidence From Rural Municipalities. *Waste Management*, 29 (10), 2772-2778.

Blanco, G., Santalla, E., Córdoba, V., Levy, A. (2017). Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos. Un análisis teórico-práctico. Nota técnica N° IDB-TN-1260. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Energía. <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/8202/Generacion-de-electricidad-a-partir-de-biogas-capturado-de-residuos-solidos-urbanos-Un-analisis-teorico-practico.PDF?sequence=1>

Buivid, M.G., Wise, D.L., Blanchet, M.J. (1981). Fuel gas enhancement by controlled landfilling of municipal solid waste. *J Resour Conserv*, 6, 3–20.

CACER consultores (2009). *Proyecto ejecutivo para la construcción del relleno sanitario intermunicipal en el grullo, Jalisco*. (Documento web, último acceso: 11/01/2018)
<https://semadet.jalisco.gob.mx/sites/semadet.jalisco.gob.mx/files/elgrullo.pdf>

CFE & IIE. (2012). *Guía de usuario: Generación de electricidad mediante residuos sólidos urbanos*. Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Investigaciones Eléctricas. México. (Documento Web, último acceso: 10/enero/2017)
<http://www.ineel.mx/docu/Guia-RSU.pdf>.

Chiemchaisri C., Visvanathan C. (2008). Greenhouse gas emission potential of the municipal solid waste disposal sites in Thailand. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 58(5), 629-35.

Colomer, F.J., Esteban, J., Gallardo, A. (2013) LABWASTE.12: Calculation Tool for the Design of Solid Waste Landfills with Inert Waste Recovery. Project Management and Engineering. 17th International Congress on Project Management and

Engineering Logroño, 17-19th July 2013.
https://www.aepro.com/files/congresos/2013logronio/CIDIP2013_0742_0754.4003.pdf

Conesa-Fernández, Vitora. (1993). "Guía metodológica para la evaluación de impacto ambiental". 2ª Edición. España. Editorial Mundi-Prensa.

Díaz L, Hernandez M, Buenrostro O. (2016). "Diagnóstico de la generación de biogás en tres sitios de disposición de residuos sólidos urbanos en el Estado de México", Tesis de grado, Metepec, Estado de México.

Digaetano, A. & Lawless, P. (1999). Urban Governance and Industrial Decline: Governing Structures and Policy Agendas in Birmingham and Sheffield, England, and Detroit, Michigan, 1980-1997. *Urban Affairs Review*, 34 (4), 546-577.

DOF. (1992a). NMX-AA-16-1984. Protección al ambiente, contaminación del suelo, residuos sólidos municipales, determinación de humedad. Diario Oficial de la Federación (DOF), Ciudad de México, México, 6 de noviembre de 1992.

DOF. (1992b). NMX-AA-25-1984. Protección al ambiente, contaminación del suelo-residuos sólidos-determinación del pH-método potenciométrico. Diario Oficial de la Federación (DOF), Ciudad de México, México, 6 de noviembre de 1992.

DOF. (1992c). NMX-AA-21-1985, Protección al ambiente-contaminación del suelo, residuos sólidos municipales: Determinación de materia orgánica. Diario Oficial de la Federación (DOF), Ciudad de México, México, 6 de noviembre de 1992.

DOF. (1992d). NMX-AA-24-1984, Protección al ambiente, contaminación del suelo, residuos sólidos municipales: Determinación de nitrógeno total. Diario Oficial de la Federación (DOF), Ciudad de México, México, 6 de noviembre de 1992.

DOF. (1992e). NMX-AA-67-1985, Protección al ambiente - contaminación del suelo residuos sólidos municipales determinación de la relación carbono/nitrógeno. Diario Oficial de la Federación (DOF), Ciudad de México, México, 6 de noviembre de 1992.

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. (2015). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Diario Oficial de la Federación (DOF), Ciudad de México, México, 22 de mayo de 2015.

EPA. (2016). *LFG Energy Project Development Handbook*. Environmental Protection Agency. USA. (Documento Web, último acceso: 15/enero/2017) https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-11/documents/pdh_full.pdf.

Espinoza, G. (2002). *Gestión y fundamentos de Evaluación de Impacto Ambiental*. Banco Interamericano de Desarrollo. Chile. (Documento Web, último acceso: 12/enero/2017) <http://www.ced.cl/ced/wp-content/uploads/2009/03/gestion-y-fundamentos-de-eia.pdf>.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2011). Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables.

Feiock, R. (2004). Politics, Institutions and Local Land-Use Regulation. *Urban Studies*, 41 (2), 363-375.

Feiock, R. C. (2008). Metropolitan Governance and Institutional Collective Action. *Urban Affairs Review*, 44 (3), 356-377.

Flores J, Expósito J y Gómez M. (2013). Identificación de sitios potenciales para la disposición final de residuos sólidos en los municipios Atlacomulco, Ixtlahuaca y Jocotitlán, Estado de México. UAEM. Tesis. (Documento Web, último acceso: 29/Noviembre/2018) <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/21779>

FNS. (2013). *Manual práctico de análisis de agua. Brasilia*. (Documento web, último acceso 12/enero/2017). http://www.funasa.gov.br/site/wpcontent/files_mf/manualaguaespanholweb_2.pdf.

Foth & Van Dyke and Associates, Inc. (2004). *Updated Research Report on Bioreactor Landfills, Landfill Leachate Recirculation and Landfills with Methane Recovery*. Minnesota. (Documento Web, último acceso: 15/enero/2017) http://static1.squarespace.com/static/55118948e4b06b1b4f71b1f4/t/5613fb7fe4b0982e4b9b3118/1444150143764/PC_Research_Report_on_Bioreactor_Landfills.pdf.

PEEM. (2018). Decreto del Ejecutivo del Estado por el que se establecen las Regiones ambientales del Estado de México. Periódico Oficial Gaceta No. 68 Tomo CCVI del Poder Ejecutivo del Estado de México (PEEM). 08 de Octubre del 2018

GADMCM. Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Mera. 2014. "Estudio de impacto ambiental del proyecto manejo integral de desechos sólidos del Cantón Mera". Pastaza.

Giménez M, Cardozo C. (2012). "Localización óptima de relleno sanitario aplicando técnicas multicriterio en sistemas de información geográfica (SIG) en el área metropolitana del alto paraná", 7mo congreso de medio ambiente,

http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/26832/Documento_completo.pdf?sequence=1

Hughes, S. (2012). Authority Structures and Service Reform in Multilevel Urban Governance: The Case of Wastewater Recycling in California and Australia. *Urban Affairs Review*, 49 (3), 381-407.

Idiano, F., Gastaldi, M. (2016). Sustainable waste management: Waste to energy plant as alternative to landfill. *Energy Conversion and management*, 131, 18 – 31.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2006) Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Vol. 5. Desechos.

INECC-SEMARNAT. (2012). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

INEGI. 2016. *Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos 2016*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. (Documento Web, último acceso: 10/Enero/2017).
<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825087340>.

Ingeniería para el Control de Residuos Municipales e Industriales (INCREMI). (2013). Estudio de Factibilidad para el Aprovechamiento del Metano en el Relleno Sanitario Municipal de Saltillo Coahuila.

Jain, P., Ko, J.H., Kumar, D., Powell, J., Kim, H., Maldonado, L., Townsend, T., Reinhart, D.R. (2014). Case study of landfill leachate recirculation using small-diameter vertical wells. *Waste Manage*, 34(11):2312–2320.

Jaramillo, J. (2012). Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos

sanitarios manuales. Una solución para la disposición final de residuos sólidos municipales en pequeñas poblaciones.

Jiménez, A. (2003). Diseño de procesos en Ingeniería Química. Reverté, ed 1ª, ISBN: 968-6708-51-0, pp:10-30.

LANDTEC, 2009. GEM 2NAV Plus GEM 2000 Plus,

Leckie, J.O., Pacey, J.G., Halvadakis, C. (1979). Landfill management with moisture control. *J Environ Eng-ASCE*, 105, 337–355.

Lefevre, C. (1998). Metropolitan Government and Governance in Western Countries: A Critical Review. *International Journal of Urban and Regional Research*, 22 (1), 9-25.

Lobo A., Hernández M. C., Mañón M. C. (2015). “Biorrellenos: Perspectivas tras dos décadas de experiencias en el mundo” *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*.

López A, Gonzaloren R, Cuartas M, Lobo A. (2011) “Modelación de una celda vertedero experimental con Modulo 4.0” *Rev. Int. Contam. Ambie.* 28 Sup. (1) 89-96, 2012

Machado S.L., Carvalho M.F., Gourc J., Vilar O.M., Nascimento J.C.D. (2009). Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results. *Waste Management*, 29(1), 153-161.

Madrid-León, Vladimir E. 2011. “Plan de manejo integral de residuos sólidos de mercado central del cantón esmeraldas”. (Tesis de grado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Ecuador.

Marin L, Torres V, Bolongaro A, Reyna J, Pohle O, Hernández- Espriú A., Chavarría J, García-Barrios R., Parra Tabla F. (2012). "Identifying suitable sanitary landfill locations in the state of Morelos, México, using a Geographic Information System", *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Volumes 37–39, 2012, Pages 2-9.*

Martínez J y Fernández A. (2003). *Cambio climático: una visión desde México.* Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) e Instituto Nacional de Ecología. <https://books.google.com.mx/books?id=2N46Q0HQmzkC&printsec=frontcover#v=onepage&q=co2&f=false>

Mendoza Delgado JG. (2017) *Evaluación del impacto ambiental de tiraderos a cielo abierto de municipios vecinos del Estado de México, Morelos y Guerrero.* Estado de México, ITTol. Tesis de Maestría.

Meraz L., Aranda C., Domínguez A. (2008). Producción de metano en relleno sanitario: Un Modelo Cinético Fractal. En XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales: La sustentabilidad en las grandes ciudades. 159-165, AIDIS-FEMISCA, México.

McDonough, W., Braungart, M. (2002). *Cradle to cradle (de la cuna a la cuna): rediseñando la forma en que hacemos las cosas.* Madrid, España: McGraw-Hill / Interamericana de España S. A.

McDonough, W., Braungart, M., Anastas, P., Zimmerman JB. (2004). Applying the Principles Engineering of Green to Cradle to Cradle Design. *Environmental Science & Technology. Vol. 37,434-441.*

Morris, J.W., Vasuki, N.C., Baker, J.A., Pendleton, C.H. (2003). Findings from long-term monitoring studies at MSW landfill facilities with leachate recirculation. *Waste Manag, 23, 653–666.*

Nájera H, Gómez J, García C, Gutiérrez R, Rojas M, (2010). Manejo de biogas y lixiviados en rellenos sanitarios del centro de México, un panorama general, LACANDONIA, año 4, vol. 4, no. 2: 117-131.

Ngnikam E., Tanawa E., Rousseaux P., Riedacker A., Gourdon R. (2002). Evaluation of the potentialities to reduce greenhouse gases (GHG) emissions resulting from various treatments of municipal solid wastes (MSW) in moist tropical climates: Application to Yaounde. Waste Management Research, ISWA, 20(6), 501-513.

NumXL. (2020) Valor Atípico (Outlier) (Documento Web, último acceso:18/01/2020) <https://support.numxl.com/hc/es/articles/115000145183-Valor-At%C3%ADpico-Outlier->

Pacheco, R. & Vega, O. (2008). *Los Debates sobre la Gobernanza del Agua: Hacia una Agenda de Investigación en México*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y Universidad de Guadalajara. Jalisco. (Documento Web, último acceso: 15/enero/2017) http://www.academia.edu/4066116/Pacheco-Vega_and_Vega_2008_Los_debates_sobre_la_gobernanza_del_agua_Hacia_una_agenda_de_investigaci%C3%B3n_en_M%C3%A9xico.

Pacheco, R. (2013). Geographies of Waste water: A Comparative Analysis of Urban Sanitation Governance in the Mexican Municipalities of Aguascalientes (Aguascalientes) and Leon (Guanajuato). Ponencia presentada en el 2013 Meeting of the American Association of Geographers, 9 al 13 de abril Los Angeles, California, Estados Unidos.

Pacheco, R. (2014). Intermunicipalidad como un arreglo institucional emergente: el caso del suministro de agua en la zona metropolitana de Aguascalientes, México. *Revista Gestión Pública*, 3(2), 207 – 234.

PAHO. (2010). Tecnologías para residuos sólidos. Resultados de búsqueda Pan American Health Organization. <http://www.paho.org/hq/dmdocuments/2010/Sanemiento-Capitulo7.pdf>

Peralta, M. E, Aguayo, F., Lama J. R. (2011). Ingeniería sostenible de la cuna a la cuna: una arquitectura de referencia abierta para el diseño C2C (Sustainable engineering based on cradle to cradle model. An open architectural reference for C2C design). *Dyna Ingeniería e Industria*, 86(2): 199-211.

Pinto-Arroyo, SC. 2007. “Valoración de impactos ambientales.” (Documento Web, último acceso: 16/Noviembre/2016) http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:48150/componente48148.pdf

Pohland, F.G. (1980). Leachate recycle as landfill management option. *J Environ Eng-ASCE*, 106, 1057–1069.

Rojas, M., Sahagún, C. (2012). *Tiraderos a cielo abierto. Ciencia y desarrollo*. Mayo – Junio (Documento Web, último acceso: 15/enero/2017) <http://www.cyd.conacyt.gob.mx/259/articulos/tiraderos-a-cielo-abierto.html>.

Ramírez de la Cruz, E. E. (2012). Instituciones y Gobernanza Metropolitana: Una Primera Aproximación al Caso de México. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 27 (2), 491-520.

Reinhard, M., Goodman, N.L., Barker, J.F. (1984). Occurrence and distribution of organic chemicals in two landfill plumes. *Environ Sci Technol*, 18, 953–961.

Reinhart, D.R., Townsend, T.G. (1997). *Landfill bioreactor design and operation*.

Boca Raton, USA: Lewis Publishers.

Reinhart, D.R., McCreanor, P.T., Townsend, T.G. (2002). The bioreactor landfill: its status and future. *Waste Management & Research*, 20(2):172–186.

Rodríguez, O. (2016). Construirán relleno sanitario para acopio de basura en la ciudad de Oaxaca. [Figura].<http://www.diariomarca.com.mx/2016/02/construiran-relleno-sanitario-para-acopio-de-basura-en-la-ciudad-de-oaxaca/>.

Rubio, J., Arjona, R., López, A. (2013). Profitability analysis of biogás recovery in Municipal Waste landfills. *Journal of Cleaner Production*, 55, 84 – 91.

SAGARPA & FIRCO. (2007), Aprovechamiento de Biogás para la Generación de Energía Eléctica en el sector Agropecuario. Resultados de búsqueda. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SAGARPA). Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO).
http://www.porcimex.org/apoyos/BIOGAS0902/0524_LIBRO_de_BIOGAS.pdf

Sawney, B.L., Kozloski R.P. (1984). Organic pollutants in leachate from landfill sites. *J Environ Qual*, 13(3), 349–352. doi:10.2134/jeq1984.00472425001300030005x

Scharff, H. (2007). *The Role Of Sustainable Landfill In Future Waste Management Systems*. NV Afvalzorg Holding. Netherlands. (Documento Web, último acceso: 20/diciembre/2016)
http://nswaienvi.nic.in/DataBank/Reports_pdf/The_Role_Of_Sustainable_Landfill_In.pdf.

Schroeder, P. (1994). The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: Engineering Documentation for Version 3., Whashington, DC (USA).
Schultz, B., Kjeldsen, P. (1986). Screening of organic matter in leachates from sanitary landfills using chromatography and mass spectrometry. *Water*

Res,20(8), 965–970.

SCS Engineers. (2013) Estudio de Prefactibilidad Utilización de Biogás de Relleno Sanitario. Stearns, Conrad & Schmidt, Consulting Engineers, Inc. (SCS Engineers). https://www.globalmethane.org/Data/148_LosCocos.Pre-Feasibility.Report.Final.Spanish.pdf

SCS Engineers. (2008) Estudio de Prefactibilidad para la Recuperación y la Utilización del Biogás en el Relleno Sanitario Loma de Los Cocos Cartagena de Indias, Colombia. Stearns, Conrad & Schmidt, Consulting Engineers, Inc. (SCS Engineers). https://www.globalmethane.org/Data/148_LosCocos.Pre-Feasibility.Report.Final.Spanish.pdf

Secretaría de Energía (SENER). (2014). Balance Nacional de Energía. México. pp:24.

SEGEM. (2002). *Alternativas de Rellenos Sanitarios: Guía de toma de decisión*. Secretaria de Ecología Gobierno del Estado de México. Estado de México. (Documento Web, último acceso: 10/diciembre/2016) <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd48/alternativas.pdf>.

SEMARNAT & GTZ, S. del M.A. y R.N.& A. de C.T.A., 2004. Guía de Cumplimiento de la NOM – 083 – SEMARNAT – 2003. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). http://centro.paot.org.mx/documentos/semarnat/Guia_Cumplimiento_NOM_083.pdf

SEMARNAT. (2008). *Curso gestión integral de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial*. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). México (Documento Web, último acceso 28/Diciembre/2016) http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/residuos/login.php?going_to=index.php.

SEMARNAT. (2012) Informe del Medio Ambiente – Residuos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/pdf/Cap7_residuos.pdf

SEMARNAT. (2013). *Residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Secretaria del medio ambiente y recursos naturales*. México. (Documento Web, último acceso: 20/diciembre/2016).
<http://www.semarnat.gob.mx/temas/residuos/solidos/Paginas/solidos.aspx>.

SEMARNAT. (2014a). *Compendio de Estadísticas Ambientales. Residuos Sólidos Urbanos*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). México. (Documento Web, último acceso 15/Enero/2017).
http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen14/07_residuos/7_1_2.html.

SEMARNAT. (2014b). *Normas oficiales mexicanas en materia de residuos sólidos urbanos y de manejo especial*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). México. (Documento Web, Último acceso: 20/diciembre/2016).
<http://www.semarnat.mx/leyes-y-normas/noms>.

SEMARNAT. (2015). Informe del Medio Ambiente (Documento Web, Último acceso: 22/ENERO/2020).
<https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap7.html>

SEPA. (2004). Guidance on the management of landfill gas, Bristol. Scottish Environment Protection Agency (SEPA).
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/321606/LFTGN03.pdf

Steger Alex, Davila Jose y SCS Engineers. (2009). Manual del Usuario Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0.

SWANA. (2002). Request for comment on bioreactor definition. Solid Waste Association of North America. United States Environmental Protection Agency, 29 June 2001. <https://www.epa.gov/landfills/bioreactor-landfills>

Tchobanoglous G., Theisenand H., Vigil S. 1994. Gestión Integral de Residuos Sólidos. McGraw-Hill-Interamericana de España, S.A. México, D.F. Vol. I, pp. 407-409.

Techint-Brown and Caldwell S.A. (2011). *Ecodiseño en grandes obras de ingeniería. Argentina*. (Documento Web, último acceso: 10/diciembre/2016) <http://www.ceads.org.ar/casos/1999/Techint%20%20Eco%20dise%F1o%20en%20grandes%20obras.pdf>.

The World Bank Group (2019) WHAT A WASTE 2.0 A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050, (document web, ultimo acceso: 09/ junio/ 2019) <http://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/>

Townsend, G., Powell, J., Jain, P., Xu, O., Tolaymat, T., Reinhart, D. (2015). *Sustainable Practices for Landfill Design and Operation*. New York, USA: Springer.

Ulca Jose. (2006). "Los Rellenos Sanitarios". LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida, núm. 4, 2006, pp. 2-17

Valencia Londoño DE, Arias Muñoz C, Vanegas Ospino E, METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE UN PARQUE DE TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS DE TIPO REGIONAL DESDE UNA PERSPECTIVA MULTIDIMENSIONAL. Revista Ingenierías Universidad de Medellín [en línea] 2010, 9 (Julio-Diciembre): [Fecha de consulta: 26 de noviembre de 2018] Disponible en:<<http://uaeh.redalyc.org/articulo.oa?id=75017164017>> ISSN 1692-3324

- Vera, I., Martínez, J., Estrada, M., Ortiz, A. (2014). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte II: residuos sólidos urbanos. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 16(3), 471 – 478.
- Visvanathan, C., Karthik, O. (2016). Sustainable landfilling in tropical conditions: Comparison between open and closed cell approach. *Waste Management & Research* 29(4), 386 – 396.
- Warner, M. E. & Bel, G. (2008). Competition or Monopoly? Comparing Privatization of Local Public Services in the Us and Spain. *Public Administration*, 86 (3), 723-735.
- Yáñez-García, F. J. 2009. Relleno Sanitario Sustentable para los Residuos Sólidos Urbanos de la Región No. 2 del Estado de Morelos (Municipios de Yecapixtla, Atlatlahucan, Ocuituco y Tetela del Volcán) ubicado en el Municipio Yecapixtla. (Tesis de Licenciatura) Escuela superior de ingeniería y arquitectura, Unidad Zacatenco.
- Zapata, A., Zapata C. (2013). Un método de gestión ambiental para evaluar rellenos sanitarios. *Gestión y Ambiente*, 16(2), 105 – 120.
- Zhang, H. et al., 2013. Effect of rainfall of the diurnal variations of CH₄, CO₂ and N₂O fluxes from a municipal solid waste landfill. *Science of the Total Environment*, 442, pp.73–76.

ANEXO

ANEXO A.LISTA DE VERIFICACIÓN

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	Indicar como se da cumplimiento para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Evaluación NC/Obs										
5. Disposiciones Generales																
¿Reciben RSU y RME?	5.1															
¿Cantidad de RSU y RME ingresan por día? <table border="1" style="width: 100%; margin-top: 5px;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">TIPO</th> <th style="text-align: left;">TON/DIA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>Mayor a 100</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>50 hasta 100</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>10 y menor a 50</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>Menor a 10</td> </tr> </tbody> </table>	TIPO	TON/DIA	A	Mayor a 100	B	50 hasta 100	C	10 y menor a 50	D	Menor a 10	5.2					
TIPO	TON/DIA															
A	Mayor a 100															
B	50 hasta 100															
C	10 y menor a 50															
D	Menor a 10															
6. Especificaciones para la selección del sitio																
6.1 Restricciones para la ubicación del sitio																
Sí el sitio se ubica a una distancia menor de 13km de un aeródromo o un aeropuerto. ¿Cuenta con un estudio de riesgo aviario?	6.1.1															
¿El sitio se ubica dentro de un área natural protegida?	6.1.2															
Si lo anterior es SI ¿El plan de manejo lo contempla?																
En localidades mayores a 2500 habitantes ¿El límite del sitio de disposición final está a una distancia mínima de 500m contados a partir del límite de la traza urbana o contemplada en el plan de desarrollo urbano?	6.1.3															
El sitio, ¿No se ubica en zonas de: marismas, manglares, estéreos, 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?																

ANEXO A. LISTA DE VERIFICACIÓN

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	Indicar como se da cumplimiento para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Evaluación NC/Obs
¿El sitio se ubica a mínimo 500m con respecto a cuerpos de agua superficiales como caudal continuo, lagos y lagunas?	6.1.6					
¿El sitio se ubica a mínimo 100m 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					
Para el anterior en caso que no se pueda determinar el cono de abatimiento, ¿La distancia al pozo no es menor a 500m?						
6.2 Estudios y análisis previos requeridos para la selección del sitio						
ESTUDIO GEOLÓGICO:						
El estudio determina el marco geológico regional con el fin de obtener: descripción estratigráfica						
Geometría y distribución	6.2.1					
Identificación de discontinuidades tales como fallas o fracturas						
Otra información para conocer el sitio como: cortes litológicos de pozos perforados						
Informes realizados por alguna institución particular u oficial						
ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO:	6.2.2					
Evidencias y usos del agua subterránea						
¿Se define la ubicación de las evidencias de agua subterránea tales como manantiales, pozos y norias en la zona de influencia para conocer el gradiente hidráulico?	a)					
¿Se determina el volumen de extracción?						
¿Se determinan las tendencias de la explotación?						
¿Se determinan planes de desarrollo en la zona de estudio?						
Identificación del tipo de acuífero						
¿Se identifican las unidades hidrogeológicas?	b)					
¿Se identifica el tipo de acuífero (confinado o semiconfinado)?						
¿Se identifica la relación entre las diferentes unidades hidrogeológicas que definen el sistema acuífero?						
Análisis del sistema de flujo						
¿Se determina la dirección del flujo subterráneo regional?	c)					
6.3 Estudios y análisis, en el sitio, previos a la construcción y operación de un sitio de disposición final.						
ESTUDIO TOPOGRÁFICO						
¿El estudio incluye planimetría y altimetría a detalle del sitio seleccionado?	a)					
ESTUDIO GEOTÉCNICO						
¿El estudio incluye al menos las siguientes pruebas?:	b)					
<i>Exploración y Muestreo:</i>						
Exploración para definir sitios de muestreo.						
Muestreo e identificación de muestras.	b.1					
Análisis de permeabilidad de campo.						
Peso Volumétrico <i>in situ</i> .						

ANEXO A. LISTA DE VERIFICACIÓN

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	<u>Indicar como se da cumplimiento para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003</u>	Evaluación NC/Obs
Estudios en laboratorio: Clasificación de muestras según el Sistema Unificado de Clasificación de suelos. Análisis granulométrico. Permeabilidad. Prueba Proctor. Límites de consistencia (Límites de Atterberg). Consolidación unidimensional. Análisis de resistencia al esfuerzo cortante. Humedad.	b.2					
¿Con los resultados de las propiedades físicas y químicas del laboratorio se realizaron los análisis de estabilidad de taludes de las obras de terracería correspondientes?						
EVALUACIÓN GEOLÓGICA: ¿Se precisa la litología de los materiales, así como la geometría, distribución y presencia de fracturas y fallas geológicas en el sitio?	c) c.1					
¿Se determinan las características estratigráficas del sitio?	c.2					
EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA: ¿Se determinan los parámetros hidráulicos, dirección del flujo subterráneo, características físicas, químicas y biológicas del agua?	d) d.1					
¿Se determinan las unidades hidro geológicas que componen el subsuelo, así como las características que las identifican (espesor y permeabilidad)?	d.2					
6.4 Estudios de generación y composición						
Generación y composición de los RSU y RME ¿Se elaboraron los estudios de generación y composición de los RSU y RME de la población por servir, con proyección para al menos la vida útil del sitio de disposición final?	a)					
Generación de biogás ¿Se tiene estimada la cantidad de generación esperada de biogás, mediante análisis químicos estequiométricos, que tomen en cuenta la composición química de los residuos por manejar?	b)					
Generación de lixiviado ¿Se tiene cuantificado el lixiviado mediante algún balance hídrico?	c)					
6.5 Cumplimiento de estudios y análisis previos VER TABLA 2 de la NOM-083-SEMARNAT-2003.						

ANEXO A. LISTA DE VERIFICACIÓN

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	<u>Indicar como se da cumplimiento para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003</u>	Evaluación NC/Obs
7. Características constructivas y operativas del sitio de disposición final						
El sitio de disposición final ¿Cuenta con una barrera geológica natural o equivalente a un espesor de 1m?	7.1					
El sitio de disposición final ¿Cuenta con un coeficiente de conductividad hidráulica de al menos 1×10^{-7} cm/s sobre la zona destinada al establecimiento de las celdas de disposición final o bien garantizarla con un sistema de impermeabilización equivalente?						
¿Se garantiza la extracción, captación, conducción y control del biogás generado en el sitio de disposición final?	7.2					
¿Se efectúa la quema a través de pozos individuales o mediante establecimiento de una red con quemadores centrales?						
¿Cuenta con un sistema que garantice la captación y extracción del lixiviado generado en el sitio de disposición final?	7.3					
¿El lixiviado se recircula en las celdas de los RSU confinados en función de los requerimientos de humedad o bien es tratado o una combinación de ambos?						
¿Se tiene diseñado un drenaje pluvial para el desvío de escurrimientos pluviales y el desalojo del agua de lluvia?	7.4					
¿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					
De acuerdo a la tabla No. 3 de la NOM-083, ¿se alcanzan los niveles mínimos de compactación?	7.6					
¿Se controla la dispersión de materiales ligeros, la fauna nociva y la infiltración pluvial?	7.7					
¿Los residuos son cubiertos en forma continua y dentro de un lapso menor a 24h posteriores a su depósito?						
¿El sitio ha adoptado medidas para que los residuos enlistados en el punto 7.8 de la norma no sean admitidos?	7.8					
¿Los lodos son tratados o acondicionados antes de su disposición final en el frente de trabajo, conforme la normatividad vigente?	7.8.1					
¿Los sitios de disposición final contiene las obras complementarias indicadas en la Tabla No.4?	7.9					
El sitio ¿cuenta con un manual de operación? Y este contiene:	7.10 a)					
Dispositivos de control de accesos de personal, vehículos y materiales, prohibiendo el ingreso de RP, radiactivos o inaceptables						
Método de registro de tipo y cantidad de residuos ingresados						
Cronogramas de operación						
Programas específicos de control de calidad, mantenimiento y monitoreo ambiental de biogás, lixiviados y acuíferos						

ANEXO A. LISTA DE VERIFICACIÓN

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	Indicar como se da cumplimiento para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Evaluación NC/Obs
Dispositivos de seguridad y planes de contingencia para: incendios, explosiones, sismos, fenómenos meteorológicos y manejo de lixiviados, sustancias reactivas, explosivas e inflamables.	7.10 a)					
Procedimientos de operación						
Perfil de puestos						
Reglamento interno						
Un control de registros de ingreso de RSU y RME, materiales, vehículos, personal y visitantes	b)					
Secuencia de llenado del sitio de disposición final						
Generación y manejo de lixiviados y biogás						
Contingencias						
Informe mensual de actividades	c)					
Se tiene instrumentado un programa que incluya la medición y control de los impactos ambientales, además del programa de monitoreo ambiental de dichos sitios	7.11					
Los registros se conservan y mantienen						
¿Se tiene un programa de monitoreo del biogás?	7.11.1					
¿Se conoce el grado de estabilización de los residuos y las migraciones fuera del predio?						
¿Se especifican los parámetros de composición, explosividad y flujo del biogás?						
¿Se tiene un programa de monitoreo del lixiviado?	7.11.2					
¿Se conoce el potencial de hidrogeno (pH)?						
¿Se conoce la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)?						
¿Se conoce la Demanda Química de Oxígeno (DQO)?						
¿Se conoce los metales pesados?						
¿Se tiene un programa de monitoreo de acuíferos?	7.11.3					
¿El programa cuenta con puntos de muestreo que correspondan a las condiciones particulares del sistema de flujo hidráulico, mismo que define la zona de influencia?						
8. Requisitos mínimos que deben cumplir los Sitios de Disposición Final de los RSU y RME, tipo D (menos de 10 Ton/día)						
Por lo menos dos pozos de muestreo, uno aguas arriba y otro aguas debajo de sitio?	7.11.3					
Se consideran los parámetros básicos en el diseño de los pozos como: El gradiente 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						
Las actividades de separación de residuos no afectan el cumplimiento de las especificaciones de operación contenidas en la presente Norma, ni significan un riesgo para las personas que la realicen	7.12					

ANEXO A. LISTA DE VERIFICACIÓN

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	<u>Indicar como se da cumplimiento para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003</u>	Evaluación NC/Obs
¿El sitio garantiza un coeficiente de conductividad hidráulica de 1×10^{-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					
¿El sitio garantiza una compactación mínima de la basura, de 300 Kg/m ³ ?	8.2					
¿El sitio garantiza una cobertura de los residuos, por lo menos cada semana?	8.3					
¿El sitio evitar el ingreso de los RP en general?	8.4					
¿El sitio garantiza el control de una fauna nociva y evitar el ingreso de animales?	8.5					
¿El sitio cerca en su totalidad el sitio de disposición final?	8.6					
9. Clausura del sitio						
¿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	X	H		X tiene una celda saneada	0.5 0
¿Las áreas que alcancen su altura final y tengan una extensión de dos hectáreas son cubiertas conforme el alcance en los trabajos y el diseño específico del sitio?				X H	No cuentan con diseño específico	NA NA
La conformación final que se da al sitio de disposición final ¿Contempla las restricciones relacionadas con el uso del sitio, estabilidad de taludes, límites del predio, características de la cobertura final de clausura, drenajes superficiales y la infraestructura para el control del lixiviado y biogás?	9.2	X	H		X tiene una celda saneada y algunos drenes	0.5 0
¿El sitio elabora y opera un programa de mantenimiento de pos clausura para todas las instalaciones, por un periodo de 20 años?	9.3	X	H		X realiza trabajos eventuales	0.5 0
¿El programa incluye el mantenimiento de la cobertura final para reparar las grietas y hundimientos provocados por la degradación de los RSU y RME, así como los daños ocasionados por erosión?	9.3	X	H		X realiza trabajos eventuales	0.5 0
¿El sitio elabora y opera un programa de monitoreo para detectar condiciones inaceptables de riesgo al ambiente por la emisión de biogás y generación de lixiviado?	9.4		X H			0 0
¿El uso final del sitio de disposición final es acorde con el uso del suelo aprobado por la autoridad competente con las restricciones inherentes a la baja capacidad de carga, posibilidad de hundimientos diferenciales y presencia de biogás?	9.5		X H			0 0

ANEXO B. LISTA DE VERIFICACIÓN DE MUNICIPIOS

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	Indicar como se da cumplimiento para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Evaluación NC/Obs
5. Disposiciones Generales						
¿Reciben RSU y RME?	5.1	X	H		Xalatlaco (X): Recibe RME, separa llantas y electrónicos Huitzilac (H) : Recibe RME y no los separa	1 0
¿Cantidad de RSU y RME ingresan por día?	5.2	X H			X recibe 30-33 t/día tipo C H recibe 12-20 t/día tipo C	1 1
6. Especificaciones para la selección del sitio						
6.1 Restricciones para la ubicación del sitio						
Sí el sitio se ubica a una distancia menor de 13km de un aeródromo o un aeropuerto. ¿Cuenta con un estudio de riesgo aviario?	6.1.1	X H			Los municipios no se encuentran cerca de algún aeródromo o aeropuerto (Figura 3.6)	1 1
¿El sitio se ubica dentro de un área natural protegida?	6.1.2	X	H		Solo H (Figura 3.7)	1 0
Si lo anterior es SI ¿El plan de manejo lo contempla?			H	X	H no cuenta con PMIRSU (Tabla 3.12)	NA 0
En localidades mayores a 2500 habitantes ¿El límite del sitio de disposición final está a una distancia mínima de 500m contados a partir del límite de la traza urbana o contemplada en el plan de desarrollo urbano?	6.1.3	X H			X casas aisladas a 190 m y mancha urbana >500m H casas aisladas a 90 m y mancha urbana >500m	0.5 0.5
El sitio, ¿No se ubica en zonas de: marismas, manglares, estéreos, pantanos, humedales, estuarios, planicies aluviales, fluviales, recarga de acuíferos, arqueológicas; ni sobre cavernas, fracturas o fallas geológicas?	6.1.4	X	H		Figura 3.9	1 0
¿El sitio se ubica fuera de zonas de inundación con periodos de retorno de 100 años?	6.1.5	X	H		H se encuentra una laguna a escasos 10 m	1 0
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?	6.1.5		X H		X obstruyó el paso de un escurrimiento de temporada de lluvias H se encuentra una laguna a escasos 10 m	0 0

ANEXO B. LISTA DE VERIFICACIÓN DE MUNICIPIOS (Continuación)

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	Indicar como se da cumplimiento para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Evaluación NC/Obs
¿El sitio se ubica a mínimo 500m con respecto a cuerpos de agua superficiales como caudal continuo, lagos y lagunas?	6.1.6	X	H		X Figura 3.10 H Figura 3.11	1 0
¿El sitio se ubica a mínimo 100m adicionales a la proyección horizontal de la mayor circunferencia del cono de abatimiento, con respecto a pozos de extracción de agua para uso doméstico, industrial, riego y ganadero, tanto en operación como abandonados?	6.1.7	X	H			1 1
Para el anterior en caso que no se pueda determinar el cono de abatimiento, ¿La distancia al pozo no es menor a 500m?		X	H			1 1
6.2 Estudios y análisis previos requeridos para la selección del sitio						
ESTUDIO GEOLÓGICO:					No aplica por ser tipo C	
El estudio determina el marco geológico regional con el fin de obtener: descripción estratigráfica	6.2.1			X H		NA NA
Geometría y distribución				X H		NA NA
Identificación de discontinuidades tales como fallas o fracturas				X H		NA NA
Otra información para conocer el sitio como: cortes litológicos de pozos perforados				X H		NA NA
Informes realizados por alguna institución particular u oficial				X H		NA NA
ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO:	6.2.2				No aplica por ser tipo C	
Evidencias y usos del agua subterránea ¿Se define la ubicación de las evidencias de agua subterránea tales como manantiales, pozos y norias en la zona de influencia para conocer el gradiente hidráulico?	a)			X H		NA NA
¿Se determina el volumen de extracción?				X H		NA NA
¿Se determinan las tendencias de la explotación?				X H		NA NA
¿Se determinan planes de desarrollo en la zona de estudio?				X H		NA NA
Identificación del tipo de acuífero ¿Se identifican las unidades hidrogeológicas?	b)			X H		NA NA
¿Se identifica el tipo de acuífero (confinado o semiconfinado)?				X H		NA NA
¿Se identifica la relación entre las diferentes unidades hidrogeológicas que definen el sistema acuífero?				X H		NA NA
Análisis del sistema de flujo ¿Se determina la dirección del flujo subterráneo regional?	c)			X H		NA NA
6.3 Estudios y análisis, en el sitio, previos a la construcción y operación de un sitio de disposición final.						
ESTUDIO TOPOGRÁFICO ¿El estudio incluye planimetría y altimetría a detalle del sitio seleccionado?	a)		X H		No cuentan con estudios	0 0
ESTUDIO GEOTÉCNICO ¿El estudio incluye al menos las siguientes pruebas?: <i>Exploración y Muestreo:</i> Exploración para definir sitios de muestreo. Muestreo e identificación de muestras. Análisis de permeabilidad de campo. Peso Volumétrico <i>in situ</i> .	b.1		X H		No cuentan con estudios	0 0

ANEXO B. LISTA DE VERIFICACIÓN DE MUNICIPIOS (Continuación)

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	<u>Indicar como se da cumplimiento para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003</u>	Evaluación NC/Obs
Estudios en laboratorio: Clasificación de muestras según el Sistema Unificado de Clasificación de suelos. Análisis granulométrico. Permeabilidad. Prueba Proctor. Límites de consistencia (Límites de Atterberg). Consolidación unidimensional. Análisis de resistencia al esfuerzo cortante. Humedad.	b.2		X H		No cuentan con estudios	0 0
¿Con los resultados de las propiedades físicas y químicas del laboratorio se realizaron los análisis de estabilidad de taludes de las obras de terracería correspondientes?			X H			No cuentan con estudios
EVALUACIÓN GEOLÓGICA: ¿Se precisa la litología de los materiales, así como la geometría, distribución y presencia de fracturas y fallas geológicas en el sitio?	c) c.1			X H	No aplica por ser tipo C	NA NA
¿Se determinan las características estratigráficas del sitio?	c.2			X H	No aplica por ser tipo C	NA NA
EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA: ¿Se determinan los parámetros hidráulicos, dirección del flujo subterráneo, características físicas, químicas y biológicas del agua?	d) d.1			X H	No aplica por ser tipo C	NA NA
¿Se determinan las unidades hidro geológicas que componen el subsuelo, así como las características que las identifican (espesor y permeabilidad)?	d.2			X H	No aplica por ser tipo C	NA NA
6.4 Estudios de generación y composición						
Generación y composición de los RSU y RME ¿Se elaboraron los estudios de generación y composición de los RSU y RME de la población por servir, con proyección para al menos la vida útil del sitio de disposición final?	a)		X H		No cuentan con estudios antes de los realizados por el proyecto 263315	0 0
Generación de biogás ¿Se tiene estimada la cantidad de generación esperada de biogás, mediante análisis químicos estequiométricos, que tomen en cuenta la composición química de los residuos por manejar?	b)			X H	No aplica por ser tipo C	NA NA
Generación de lixiviado ¿Se tiene cuantificado el lixiviado mediante algún balance hídrico?	c)			X H	No aplica por ser tipo C	NA NA
6.5 Cumplimiento de estudios y análisis previos VER TABLA 2 de la NOM-083-SEMARNAT-2003.						

ANEXO B. LISTA DE VERIFICACIÓN DE MUNICIPIOS (Continuación)

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	<u>Indicar como se da cumplimiento para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003</u>	Evaluación NC/Obs
7. Características constructivas y operativas del sitio de disposición final						
El sitio de disposición final ¿Cuenta con una barrera geológica natural o equivalente a un espesor de 1m?		X	H		X de acuerdo con operadores	1 0
El sitio de disposición final ¿Cuenta con un coeficiente de conductividad hidráulica de al menos 1×10^{-7} cm/s sobre la zona destinada al establecimiento de las celdas de disposición final o bien garantizarla con un sistema de impermeabilización equivalente?	7.1		X H		No se cuenta con los estudios	0 0
¿Se garantiza la extracción, captación, conducción y control del biogás generado en el sitio de disposición final?		X	H		X cumple parcialmente, solo tiene pozos de venteo	0.5 0
¿Se efectúa la quema a través de pozos individuales o mediante establecimiento de una red con quemadores centrales?	7.2		X H			0 0
¿Cuenta con un sistema que garantice la captación y extracción del lixiviado generado en el sitio de disposición final?			X H			0 0
¿El lixiviado se recircula en las celdas de los RSU confinados en función de los requerimientos de humedad o bien es tratado o una combinación de ambos?	7.3		X H			0 0
¿Se tiene diseñado un drenaje pluvial para el desvío de escurrimientos pluviales y el desalojo del agua de lluvia?	7.4	X	H		X cuenta con escurrimientos pluviales	1 0
¿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		X H			0 0
De acuerdo a la tabla No. 3 de la NOM-083, ¿se alcanzan los niveles mínimos de compactación?	7.6		X H		No se realiza compactación	0 0
¿Se controla la dispersión de materiales ligeros, la fauna nociva y la infiltración pluvial?		X	H		X se controla la dispersión	1 0
¿Los residuos son cubiertos en forma continua y dentro de un lapso menor a 24h posteriores a su depósito?	7.7		X H		X cubre cada mes	0.5 0
¿El sitio ha adoptado medidas para que los residuos enlistados en el punto 7.8 de la norma no sean admitidos?	7.8		X H			0 0
¿Los lodos son tratados o acondicionados antes de su disposición final en el frente de trabajo, conforme la normatividad vigente?	7.8.1		X H			0 0
¿Los sitios de disposición final contiene las obras complementarias indicadas en la Tabla No.4?	7.9	X	H		X tiene caseta de vigilancia y caminos de acceso	0.5 0
El sitio ¿cuenta con un manual de operación? Y este contiene:					No cuenta con manuales, ni dispositivos de control	
Dispositivos de control de accesos de personal, vehículos y materiales, prohibiendo el ingreso de RP, radiactivos o inaceptables	7.10		X H			0 0
Método de registro de tipo y cantidad de residuos ingresados	a)		X H			0 0
Cronogramas de operación			X H			0 0
Programas específicos de control de calidad, mantenimiento y monitoreo ambiental de biogás, lixiviados y acuíferos			X H			0 0

ANEXO B. LISTA DE VERIFICACIÓN DE MUNICIPIOS (Continuación)

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	Indicar como se da cumplimiento para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Evaluación NC/Obs
Dispositivos de seguridad y planes de contingencia para: incendios, explosiones, sismos, fenómenos meteorológicos y manejo de lixiviados, sustancias reactivas, explosivas e inflamables.	7.10 a)	X	H			0 0
Procedimientos de operación		X	H			0 0
Perfil de puestos		X	H			0 0
Reglamento interno		X	H			0 0
Un control de registros de ingreso de RSU y RME, materiales, vehículos, personal y visitantes	b)	X	H			0 0
Secuencia de llenado del sitio de disposición final		X	H			0 0
Generación y manejo de lixiviados y biogás		X	H			0 0
Contingencias		X	H			0 0
Informe mensual de actividades	c)	X	H			0 0
Se tiene instrumentado un programa que incluya la medición y control de los impactos ambientales, además del programa de monitoreo ambiental de dichos sitios	7.11	X	H		No cuenta con programas	0 0
Los registros se conservan y mantienen		X	H			0 0
¿Se tiene un programa de monitoreo del biogás?	7.11.1	X	H			0 0
¿Se conoce el grado de estabilización de los residuos y las migraciones fuera del predio?		X	H			0 0
¿Se especifican los parámetros de composición, explosividad y flujo del biogás?		X	H			0 0
¿Se tiene un programa de monitoreo del lixiviado?	7.11.2	X	H			0 0
¿Se conoce el potencial de hidrogeno (pH)?		X	H		No cuentan con estudios antes de los realizados por el proyecto 263315	0 0
¿Se conoce la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)?		X	H		No cuentan con estudios antes de los realizados por el proyecto 263315	0 0
¿Se conoce la Demanda Química de Oxígeno (DQO)?		X	H		No cuentan con estudios antes de los realizados por el proyecto 263315	0 0
¿Se conoce los metales pesados?		X	H		No cuentan con estudios antes de los realizados por el proyecto 263315	0 0
¿Se tiene un programa de monitoreo de acuíferos?	7.11.3	X	H		No cuenta con programas	0 0
¿El programa cuenta con puntos de muestreo que correspondan a las condiciones particulares del sistema de flujo hidráulico, mismo que define la zona de influencia?		X	H			0 0

ANEXO B. LISTA DE VERIFICACIÓN DE MUNICIPIOS (Continuación)

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	<u>Indicar como se da cumplimiento para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003</u>	Evaluación NC/Obs	
8. Requisitos mínimos que deben cumplir los Sitios de Disposición Final de los RSU y RME, tipo D (menos de 10 Ton/día)							
Por lo menos dos pozos de muestreo, uno aguas arriba y otro aguas debajo de sitio?	7.11.3		X			0	
			H			0	
Se consideran los parámetros básicos en el diseño de los pozos como: El gradiente superior y descendente hidráulico			X				0
			H				0
Variaciones naturales del flujo del acuífero			X				0
		H				0	
Variaciones estacionales del flujo del acuífero		X				0	
		H				0	
Calidad del agua antes y después del establecimiento del sitio de disposición final		X				0	
		H				0	
Las actividades de separación de residuos no afectan el cumplimiento de las especificaciones de operación contenidas en la presente Norma, ni significan un riesgo para las personas que la realicen	7.12		X		En ambos sitios existen segregadores primarios	0 0	
¿El sitio garantiza un coeficiente de conductividad hidráulica de 1×10^{-5} cm/s, con un espesor mínimo de un metro, o su equivalente, por condiciones naturales del terreno, o bien, mediante la impermeabilización del sitio con barreras naturales o artificiales?	8.1			X H	Los SDF son tipo C	NA NA	
¿El sitio garantiza una compactación mínima de la basura, de 300 Kg/m ³ ?	8.2			X H		NA NA	
¿El sitio garantiza una cobertura de los residuos, por lo menos cada semana?	8.3			X H		NA NA	
¿El sitio evitar el ingreso de los RP en general?	8.4			X H		NA NA	
¿El sitio garantiza el control de una fauna nociva y evitar el ingreso de animales?	8.5			X H		NA NA	
¿El sitio cerca en su totalidad el sitio de disposición final?	8.6			X H		NA NA	
9. Clausura del sitio							
¿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	X	H		X tiene una celda saneada	0.5 0	
¿Las áreas que alcancen su altura final y tengan una extensión de dos hectáreas son cubiertas conforme el alcance en los trabajos y el diseño específico del sitio?				X H	No cuentan con diseño específico	NA NA	
La conformación final que se da al sitio de disposición final ¿Contempla las restricciones relacionadas con el uso del sitio, estabilidad de taludes, límites del predio, características de la cobertura final de clausura, drenajes superficiales y la infraestructura para el control del lixiviado y biogás?	9.2	X	H		X tiene una celda saneada y algunos drenes	0.5 0	
¿El sitio elabora y opera un programa de mantenimiento de pos clausura para todas las instalaciones, por un periodo de 20 años?	9.3	X	H		X realiza trabajos eventuales	0.5 0	

ANEXO B. LISTA DE VERIFICACIÓN DE MUNICIPIOS (Continuación)

Requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003	Numeral	Cumple	No Cumple	No Aplica	<u>Indicar como se da cumplimiento para cada punto de la NOM-083-SEMARNAT-2003</u>	Evaluación NC/Obs
8. Requisitos mínimos que deben cumplir los Sitios de Disposición Final de los RSU y RME, tipo D (menos de 10 Ton/día)						
¿El programa incluye el mantenimiento de la cobertura final para reparar las grietas y hundimientos provocados por la degradación de los RSU y RME, así como los daños ocasionados por erosión?	9.3	X	H		X realiza trabajos eventuales	0.5 0
¿El sitio elabora y opera un programa de monitoreo para detectar condiciones inaceptables de riesgo al ambiente por la emisión de biogás y generación de lixiviado?	9.4		X H			0 0
¿El uso final del sitio de disposición final es acorde con el uso del suelo aprobado por la autoridad competente con las restricciones inherentes a la baja capacidad de carga, posibilidad de hundimientos diferenciales y presencia de biogás?	9.5		X H			0 0

ANEXO C. MATRIZ DE LEOPOLD DEL MUNICIPIO DE XALATLACO, EDOMEX

MATRIZ DE LEOPOLD			ACTIVIDADES DE LA DISPOSICION DE RSU							AFECTACIONES				NIV. DE SIG.									
CATEGORIA	ATRIBUTO		1. Transporte y descarga	2. Disposición de RSU y RME	3. Disposición de RP	4. Compactación y cobertura	5. Manejo del biogás generado	6. Manejo de lixiviados	7. Contratación de maquinaria, personas y servicios	AFECTACIONES POSITIVAS	AFECTACIONES NEGATIVAS	NÚMERO DE INTERACCIONES	AGREGACIÓN DE IMPACTOS	BAJO	MODERADO	SEVERO	CRITICO						
COMPONENTES BIOFISICOS	SUELO	Calidad del suelo		-6	4	-6	6	-2	2	-9	2	-9	4	3	2	1	5	6	-112			4.3	
		Cambio de uso de suelo		-6	6	-6	9	-6	5	-6	2	-6	4	-7	5	0	6	6	-221			6.1	
		Estabilidad del suelo		-2	3	-6	5	-9	6	-9	5	-9	8	-4	4	0	6	6	-223			6.1	
	AGUA	Subterránea		-5	7	-6	8	-4	2		-9	8	3	5	1	4	5	-148			5.4		
		Calidad de agua		-6	8	-6	8	-6	8		-8	8	3	5	1	4	5	-209			6.5		
	ATMOSFERA	Material particulado		-1	1	-4	2	-5	5	-6	4	-4	5		-4	4	0	6	6	-94		4.0	
		Ruidos		-4	1										-4	1	0	3	3	-12	2.0		
		Gases		-2	1	-9	8	-6	8	-4	1	-6	8		-4	1	0	6	6	-178		5.4	
		Olores		-2	1	-6	2	-6	5	-2	1	-6	5		-4	1	0	6	6	-80		3.7	
	FLORA	Productos agrícolas (Maíz)		-2	2	-2	-6	5		-5	5	-8	5	-5	8	0	6	6	-143			4.9	
		Remoción de cobertura vegetal			-5	3	-6	3	-4	2	-6	4	-6	5	-4	3	0	6	6	-107			4.2
	FAUNA	Ahuyentamiento de especies nativas		-5	5	-8	5	-8	5	-4	1	-5	5	-9	6		0	6	6	-188			5.6
		Proliferación de nuevas especies			-2	1	-6	5	-4	1						0	3	3	-36			3.5	
	COMPONENTES SOCIOECONOMICOS	ESTETICA	Vistas escénicas y panorámicas		-4	1	-6	2	-3	2	5	1	3	1	5	4	4	1	4	3	7	-2	0.5
Calidad de espacio abierto				-4	4	-6	5	-8	5	4	4	-5	5	-6	5	4	5	2	5	7	-105		3.9
Parques y reservas forestales				2	2	-9	6	-9	6	2	2	2	5	-5	5	2	5	4	3	7	-105		3.9
SOCIAL		Salud poblacional y laboral		3	5	3	8	-10	5	3	2	-3	2	-6	5	3	2	4	3	7	-35	2.2	
		Seguridad laboral		-3	2	-5	5	-10	5	-2	2	-8	2	-8	5	-4	2	0	7	7	-149		4.6
ECONOMICO		Calidad de vida		5	5	6	5	-10	5	-5	5	-3	5	-6	5	3	2	3	4	7	-59		2.9
		Ingresos económicos adicionales		-3	2	-2	2	-2	2	-3	2					-3	1	0	5	5	-23	2.1	
		Sitios de interés arqueológico cultural																					
		Uso potencial del suelo			-2	5	-5	5	6	5	6	8	-8	5	5	5	3	3	6	28	2.2		
	Emprendimientos productivos			4	5	-5	5		-5	8	-7	5	5	5	2	3	5	-55			3.3		
AFECTACIONES	AFECTACIONES POSITIVAS			3	3	0	5	3	1	10	25												
	AFECTACIONES NEGATIVAS			10	18	21	15	14	15	10		103											
	NÚMERO DE INTERACCIONES			13	21	21	20	17	16	20			128										
	AGREGACIÓN DE IMPACTOS			-26	-397	-753	-168	-288	-614	-10				-2256									
NIV. DE SIG.	BAJO			1.4						0.7													
	MODERADO				4.3		2.9	4.1															
	SEVERO					6.0																	
	CRITICO																					4.2	

ANEXO E. PROYECCIÓN DE POBLACIÓN (2015-2025)

MUNICIPIO	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Joquicingo	13857	14051	14248	14447	14649	14855	15062	15273	15487	15704	15924
Malinalco	27482	27867	28257	28652	29054	29460	29873	30291	30715	31145	31581
Ocuilan	34485	34968	35457	35954	36457	36967	37485	38010	38542	39082	39629
Tenancingo	97891	99261	100651	102060	103489	104938	106407	107897	109407	110939	112492
Tenango del Valle	86380	87589	88816	90059	91320	92598	93895	95209	96542	97894	99264
Tianguistenco	77147	78227	79322	80433	81559	82701	83858	85032	86223	87430	88654
Xalatlaco	29572	29986	30406	30831	31263	31701	32145	32595	33051	33514	33983
Zumpahuacan	13857	14051	14248	14447	14649	14855	15062	15273	15487	15704	15924
Huitzilac	19231	19539	19851	20169	20492	20820	21153	21491	21835	22184	22539
Tonatico	12324	12497	12671	12849	13029	13211	13396	13584	13774	13967	14162
Almoloya del Río	11126	11282	11440	11600	11762	11927	12094	12263	12435	12609	12786
Total	423352	429317	435367	441502	447723	454032	460430	466919	473498	480171	486938

ANEXO F. PROYECCIÓN DE RSU EN TONELADAS POR AÑO (2018-2025)

Municipio	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Joquicingo	13	13.36	13.73	14.11	14.50	14.90	15.32	15.74
Malinalco	21	21.58	22.18	22.79	23.43	24.07	24.74	25.43
Ocuilan	15	15.42	15.84	16.28	16.73	17.20	17.67	18.16
Tenancingo	55	56.52	58.09	59.70	61.35	63.05	64.80	66.59
Tenango del Valle	59.84	61.50	63.20	64.95	66.75	68.60	70.50	72.45
Tianguistenco	47	48.30	49.64	51.01	52.43	53.88	55.37	56.91
Xalatlaco	38	39.05	40.13	41.25	42.39	43.56	44.77	46.01
Zumpahuacan	3.5	3.60	3.70	3.80	3.90	4.01	4.12	4.24
Huitzilac	13.76	14.14	14.53	14.93	15.35	15.77	16.21	16.66
Tonatico	11.46	11.78	12.11	12.44	12.79	13.14	13.51	13.88
Almoloya del Río	9.17	9.43	9.69	9.95	10.23	10.51	10.80	11.10
Total	286.73	294.67	302.84	311.23	319.85	328.71	337.81	347.17

ANEXO G. MODELO METEOROLOGICO

Date	RH	TP	TP	I	PH1	PH24	PD	Tmax	Tmin
19890101	62.21	10.40	0.60	6.90	0.00	0.00	0.00	22.00	-1.20
19890102	32.90	9.60	1.29	5.10	0.00	0.00	0.00	20.4	-1.2
19890103	57.46	10.00	0.43	6.85	0.00	0.00	0.00	22.2	-2.2
19890104	34.88	9.00	1.04	6.85	0.00	0.00	0.00	21.2	-3.2
19890105	57.63	8.60	0.39	1.00	0.00	0.00	0.00	22.0	-4.8
19890106	43.31	8.30	1.04	2.15	0.00	0.00	0.00	21.0	-4.4
19890107	59.83	9.70	0.59	1.00	0.00	0.00	0.00	22.0	-2.6
19890108	31.04	9.60	1.61	0.00	0.00	0.00	0.00	21.6	-2.4
19890109	49.75	9.15	0.55	5.85	0.00	0.00	0.00	20.5	-2.2
19890110	33.50	8.80	0.97	5.30	0.00	0.00	0.00	20.0	-2.4
19890111	52.27	10.00	0.57	8.20	0.00	0.00	0.00	21.0	-1.0
19890112	22.71	10.60	2.06	6.20	0.00	0.00	0.00	22.2	-1.0
19890113	44.60	9.75	0.65	8.20	0.00	0.00	0.00	20.0	-0.5
19890114	33.96	9.75	2.52	3.40	0.00	0.00	0.00	20.0	-0.5
19890115	49.33	9.75	2.30	6.65	0.00	0.00	6.90	20.0	-0.5
19890116	39.46	10.35	3.18	7.20	0.00	0.00	0.00	20.5	0.2
19890117	45.75	9.40	2.09	3.30	0.00	0.00	0.00	20.0	-1.2
19890118	24.33	10.35	1.99	7.35	0.00	0.00	0.00	21.2	-0.5
19890119	29.77	9.00	1.41	6.50	0.00	0.00	0.00	17.5	0.5

ANEXO H. INGRESOS POR RSU POTENCIALMENTE VALORIZABLES

PRODUCTO	RESIDUOS POTENCIALMENTE REVALORIZABLES				INGRESO DE LA VENTA DE LOS RSU VALORIZABLES			
	2020 (t/año)	2021 (t/año)	2022 (t/año)	2023 (t/año)	2020 (\$/año)	2021 (\$/año)	2022 (\$/año)	2023 (\$/año)
Papel, carton y papel	4018	4134	4237	1039	\$ 6,429,052	\$ 6,614,753	\$ 6,779,498	\$ 1,662,005
Textiles	2256	2321	2379	583	\$ 1,127,978	\$ 1,160,559	\$ 1,189,464	\$ 291,599
Plasticos	6031	6205	6360	1559	\$ 15,680,418	\$ 16,133,343	\$ 16,535,156	\$ 4,053,621
Metal ferroso	25	25	26	6	\$ 59,437	\$ 61,154	\$ 62,677	\$ 15,365
Metal no ferroso	67	69	71	17	\$ 140,634	\$ 144,696	\$ 148,300	\$ 36,356
Vidrio	1042	1072	1098	269	\$ 416,669	\$ 428,704	\$ 439,381	\$ 107,715
Aluminio	50	52	53	13	\$ 55,083	\$ 56,674	\$ 58,085	\$ 14,240
Total	13489	13878	14224	3487	\$23,909,270	\$24,599,882	\$ 25,212,561	\$ 6,180,902
						Total		\$ 79,902,615

ANEXO I. COSTOS DE INVERSIÓN PARA SISTEMAS QUEMA DE BIOGÁS EN RESA

CONCEPTO	COLOMBIA, 2008 ^{a)}				CELDA 2						
	Cantidad	Unidad	Costo por unidad (U.S. \$)	Costo inicial total (U.S.\$)	Cantidad	Unidad	Costo por unidad (U.S. \$)	Costo inicial total (U.S.\$)	Costo dimensiones requeridas (U.S.\$)	Costo al año 2018 (U.S.\$)	Costo al año 2018 (MXN \$)
Movilización y gestión	1	uno	\$54,000	\$54,000	1	uno	\$54,000	\$54,000	\$54,000	\$56,020	\$1,047,566
Pozos de extracción (20m)	24	uno	\$8,000	\$192,000	4	uno	\$8,000	\$32,000	\$49,944	\$51,812	\$968,878
Equipo dual de extracción	6	uno	\$5,000	\$30,000	1	uno	\$5,000	\$5,000	\$5,000	\$5,187	\$96,997
Cruces de calles	3	uno	\$5,000	\$15,000		uno	\$5,000	\$0		\$0	\$0
Tubería Principal (14 plg)	1300	m	\$100	\$130,000	195	m	\$100	\$19,500	\$11,729	\$12,167	\$227,529
Tubería lateral (4 plg)	800	m	\$40	\$32,000	60	m	\$40	\$2,400	\$2,400	\$2,490	\$46,558
Trampas de condensado	4	uno	\$9,000	\$36,000	1	uno	\$9,000	\$9,000	\$9,000	\$9,337	\$174,594
Válvula de Cabezal Principal (14 plg)	1	uno	\$7,000	\$7,000	1	uno	\$7,000	\$7,000	\$4,210	\$4,368	\$81,677
Estación cerrada de biogás 4250 m3/h	1	uno	\$250,000	\$250,000	1	uno	\$250,000	\$250,000	\$29,405	\$30,504	\$570,431
Construcción y preparación del lugar	1	uno	\$50,000	\$50,000	1	uno	\$50,000	\$50,000	\$50,000	\$51,870	\$969,968
Inicio del quemador	1	uno	\$15,000	\$15,000	1	uno	\$15,000	\$15,000	\$15,000	\$15,561	\$290,990
Prueba del quemador	1	uno	\$25,000	\$25,000	1	uno	\$25,000	\$25,000	\$25,000	\$25,935	\$484,984
Equipo de medida y monitoreo de Biogás	1	uno	\$35,000	\$35,000	1	uno	\$35,000	\$35,000	\$35,000	\$36,309	\$678,978
Ingeniería, Contingencia y Costos Iniciales	1	uno	\$115,000	\$115,000	1	uno	\$115,000	\$115,000	\$115,000	\$119,301	\$2,230,927
Costos				\$1,010,000				\$642,900	\$429,687	\$445,757	\$8,335,662

Fuente: a) SCS 2008

ANEXO J. COSTOS DE INVERSIÓN PARA SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS EN RESA

CONCEPTO	COLOMBIA, 2008 (a)				CELDA 2					
	Cantidad	Unidad	Costo por unidad (U.S. \$)	Costo inicial total (U.S.\$)	Cantidad	Unidad	Costo por unidad (U.S. \$)	Costo inicial total (U.S.\$)	Costo al año 2018 (U.S.\$)	Costo al año 2018 (MXN \$)
Movilización y gestión del proyecto	1	uno	\$ 160,000	\$ 160,000	1	uno	\$160,000	\$160,000	\$170,097	\$3,180,813
Construcción y preparación del lugar	1	uno	\$ 120,000	\$ 120,000	1	uno	\$120,000	\$120,000	\$124,488	\$2,327,924
Bomba de succión y tratamiento de biogás	0	uno	\$ 200,000	\$ -	0	uno	\$200,000	\$0	\$0	\$0
Equipo de medida y monitoreo de Biogás	1	uno	\$ 35,000	\$ 35,000	1	uno	\$35,000	\$35,000	\$36,309	\$678,978
Planta de energía que funciona con biogás 1600 kW	1600	uno	\$ 1,200	\$ 1,920,000	192	uno	\$1,200	\$538,034	\$558,156	\$10,437,525
Subestación de la planta	1	uno	\$ 275,000	\$ 275,000	1	uno	\$275,000	\$275,000	\$285,285	\$5,334,826
Interacción eléctrica	1	uno	\$ 250,000	\$ 250,000	1	uno	\$250,000	\$250,000	\$259,350	\$4,849,841
Desechos de paso	0	uno	\$ -	\$ -	0	uno	\$0	\$0	\$0	\$0
Prueba de fuente	1	uno	\$ 25,000	\$ 25,000	1	uno	\$25,000	\$25,000	\$25,935	\$484,984
Ingeniería y contingencia	15%	porcentaje	\$ 420,000	\$ 420,000	15%	porcentaje	\$151,350	\$151,350	\$157,010	\$2,936,094
Total			\$ 1,486,200	\$ 3,205,000				\$1,554,384	\$1,616,630	\$30,230,984

Fuente: a) SCS 2008

ANEXO K. CO₂ emitido

AÑO	EMISIONES DE CH ₄ (m ³ /año)	EMISIONES DE CH ₄ (T/año)	CH ₄ EN TÉRMINOS DE CO ₂ EQ. EMITIDO A LA ATMÓSFERA SIN PROYECTO (T/año)	CO ₂ EMITIDO A LA ATMÓSFERA SIN PROYECTO (m ³ /año)	CO ₂ EMITIDO A LA ATMÓSFERA SIN PROYECTO (T/año)	CO ₂ total emitido a la atmósfera RESA Tradicional	Emisiones de CH ₄ (T/año) del 20% no recuperado destruido	Emisiones de CH ₄ (T/año) Considerando 80% recolección	CH ₄ destruido para aprov. (40% aprox eficiencia térmica media) (T/año)	CH ₄ emitido a la atmósfera (T/año)= CH ₄ generado – CH ₄ destruido – CH ₄ destruido para aprov.	CH ₄ EN TÉRMINOS DE CO ₂ EQ. EMITIDO A LA ATMÓSFERA A BAJO PROYECTO (T/año)	CH ₄ DESTRUIDO EN TÉRMINOS DE CO ₂ EQ. (YA SEA POR FLAMAS O POR GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD) (TON/año)	CAMBIO NETO (REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO ₂ BAJO EL ESCENARIO PROPUUESTO)
2020	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021	510693	335	7705	510693	1009	8714	67	268	161	107	2466	5240	3475
2022	970574	637	14644	970574	1918	16562	127	509	306	204	4686	9958	6604
2023	1388092	911	20944	1388092	2743	23686	182	728	437	291	6702	14242	9445
2024	1374172	901	20734	1374172	2715	23449	180	721	433	288	6635	14099	9350
2025	1206296	791	18201	1206296	2384	20584	158	633	380	253	5824	12376	8208
2026	1062340	697	16029	1062340	2099	18128	139	558	335	223	5129	10899	7228
2027	938590	616	14161	938590	1855	16016	123	493	296	197	4532	9630	6386
2028	831931	546	12552	831931	1644	14196	109	437	262	175	4017	8535	5661
2029	739753	485	11161	739753	1462	12623	97	388	233	155	3572	7590	5033
2030	659865	433	9956	659865	1304	11260	87	346	208	139	3186	6770	4490
2031	590425	387	8908	590425	1167	10075	77	310	186	124	2851	6058	4017
2032	529887	348	7995	529887	1047	9042	70	278	167	111	2558	5437	3605
2033	476948	313	7196	476948	942	8139	63	250	150	100	2303	4893	3245
2034	430509	282	6496	430509	851	7346	56	226	136	90	2079	4417	2929
2035	389646	256	5879	389646	770	6649	0	0	0	256	5879	0	6649
2047	138911	91	2096	138911	274	2370	0	0	0	91	2096	0	2370
2048	128766	84	1943	128766	254	2197	0	0	0	84	1943	0	2197
2049	119489	78	1803	119489	236	2039	0	0	0	78	1803	0	2039
	15079244	9892	227516	15079244	29797	257312	1536	6145	3687	4668	107372	120143	137169

ANEXO L. INGRESOS POR VENTA DE BIOGÁS Y BONOS DE CARBONO

Año	Toneladas de CH ₄ destruido	Bonos de carbono (\$ USD)	Bonos de carbono (\$ MXN)	kW/h	Ingreso por Quema de biogas (\$USD/h)	Ingreso por Quema de biogas (\$USD/año)	Ingreso por Quema de biogas (\$MXN/año)	Totales (\$USD)	Total (\$MXN)
2020	0	\$-	\$-	136	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-
2021	5240	\$104,793	\$1,959,621	136	\$16	\$142,963	\$2,673,412	\$247,756	\$4,633,032
2022	9958	\$199,159	\$3,724,268	136	\$16	\$142,963	\$2,673,412	\$342,122	\$6,397,680
2023	14242	\$284,832	\$5,326,357	136	\$16	\$142,963	\$2,673,412	\$427,795	\$7,999,769
2024	14099	\$281,976	\$5,272,946	136	\$16	\$142,963	\$2,673,412	\$424,939	\$7,946,358
2025	12376	\$247,528	\$4,628,774	136	\$16	\$142,963	\$2,673,412	\$390,491	\$7,302,185
2026	10899	\$217,989	\$4,076,391	136	\$16	\$142,963	\$2,673,412	\$360,952	\$6,749,803
2027	9630	\$192,596	\$3,601,539	136	\$16	\$142,963	\$2,673,412	\$335,559	\$6,274,951
2028	8535	\$170,710	\$3,192,270	136	\$16	\$142,963	\$2,673,412	\$313,673	\$5,865,682
2029	7590	\$151,795	\$2,838,566	136	\$16	\$142,963	\$2,673,412	\$294,758	\$5,511,978
2030	6770	\$135,402	\$2,532,019	136	\$16	\$142,963	\$2,673,412	\$278,365	\$5,205,431
2031	6058	\$121,153	\$2,265,567	136	\$16	\$142,963	\$2,673,412	\$264,117	\$4,938,979
2032	5437	\$108,731	\$2,033,271	136	\$16	\$142,963	\$2,673,412	\$251,694	\$4,706,683
2033	4893	\$97,868	\$1,830,134	136	\$16	\$142,963	\$2,673,412	\$240,831	\$4,503,545
2034	4417	\$88,339	\$1,651,942	136	\$16	\$142,963	\$2,673,412	\$231,302	\$4,325,354
2035									
2049									
	120143	\$2,402,870	\$44,933,665				\$37,427,766	\$4,404,355	\$82,361,431