



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**



**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E  
INDUSTRIAS EXTRACTIVAS**

**PROPUESTA PARA EL CONTROL DE RESIDUOS  
SÓLIDOS URBANOS Y SU APROVECHAMIENTO EN EL  
MUNICIPIO DE TOLUCA DE LERDO**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO INDUSTRIAL**

**PRESENTAN**

**DOMINIC ABIUD GARCÍA LEDEZMA  
SANDRA ITZEL DÁVALOS FIGUEROA**

Directora de Tesis: M. en C. MARTHA ELENA GARCÍA RUIZ

Ciudad de México, Octubre del 2019





**Folio**  
T-DEySA-057-19

**Asunto**  
Autorización de tema

CDMX, 09 de agosto de 2019

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"  
60 años de la Unidad Profesional Adolfo López Mateos  
70 Aniversario del CECyT No. 3 "Estatísiao Ramírez Ruiz"  
60 años de XEIPN Canal Once, orgullosamente politécnico  
60 Aniversario del CECyT No. 4 "Lázaro Cárdenas"

<b>Pasante</b>	<b>Boleta</b>	<b>Programa Académico</b>
SANDRA ITZEL DÁVALOS FIGUEROA	2015320241	I.Q.I.
DOMINIC ABIUD GARCÍA LEDEZMA	2015320374	I.Q.I.
PRESENTE		

Mediante el presente se hace de su conocimiento que la Subdirección Académica a través de este Departamento autoriza a la. **Ing. Martha Elena García Ruiz** sea asesora en el tema que proponen ustedes desarrollar como prueba escrita en la opción **Tesis Colectiva**, con el título y contenido siguiente:

**"Propuesta para el control de residuos sólidos urbanos y su aprovechamiento en el municipio de Toluca Lerdo"**

- Resumen.  
Introducción  
I. Antecedentes de los residuos sólidos urbanos.  
II. Ubicación, rutas y generación de RSU en la zona de estudio.  
III. Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos.  
IV. Beneficios ambientales y económicos de la propuesta.  
Conclusiones.  
Referencias.

De acuerdo al artículo 28 del Reglamento de Titulación Profesional del Instituto Politécnico Nacional, el trabajo deberá ser concluido en un término no mayor de un año, a partir de esta fecha.

Dr. José Luis Soto Peña  
Presidente de la Academia de Operaciones Unitarias

Ing. Martha Elena García Ruiz  
Directora

Ing. Carlos Rodríguez Guerrero  
Jefe de Departamento de Evaluación y Seguimiento Académico.

M. en C. Isaura García Maldonado  
Subdirectora Académica

c.c.p.- Depno. de Evaluación y Seguimiento Académico.  
c.c.p.- Depno. de Gestión Escolar.  
CRG/mlcp







**Folio**

T-DEySA-057-19

**Asunto**

Autorización de Impresión

CDMX, 18 de septiembre de 2019

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"  
60 años de la Unidad Profesional Adolfo López Mateos  
70 Aniversario del CECyT No. 3 "Estanislao Ramírez Ruiz"  
60 años de XEIPN Canal Once, orgullosamente politécnico  
60 Aniversario del CECyT No. 4 "Lázaro Cárdenas"

**Pasantes**

SANDRA ITZEL DÁVALOS FIGUEROA  
DOMINIC ABIUD GARCÍA LEDEZMA  
PRESENTE

**Boleta**

2015320241  
2015320374

**Programa Académico**

I.Q.I.  
I.Q.I.

Los suscritos tenemos el agrado de informar a usted, que habiendo procedido a revisar el borrador de la modalidad de titulación correspondiente denominado:

**"Propuesta para el control de residuos sólidos urbanos y su aprovechamiento en el municipio de Toluca Lerdo"**

encontramos que el citado trabajo escrito de **Tesis Colectiva**, reúne los requisitos para **autorizar el examen profesional y proceder a su impresión** según el caso, debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se le hicieron.

Atentamente

**JURADO**

Ing. Martha Elena García Ruiz  
Presidenta

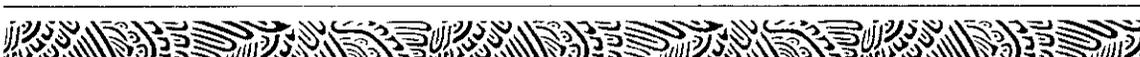
Ing. José Javier Castro Arellano  
Secretario

Ing. Juanita Eloísa Cárdenas Rivas  
Vocal 1

Dr. Gregorio Zacañua Tlacuatl  
Vocal 2

M. en C. Aníbal Quintana Mora  
Vocal 3

c.c.p.- Depto. de Evaluación y Seguimiento Académico.  
c.c.p.- Depto. de Gestión Escolar  
CRG/mlcp







**Folio**  
T-DEySA-057-19

**Asunto**  
Cesión de derechos

CDMX, 18 de septiembre de 2019

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"  
60 años de la Unidad Profesional Adolfo López Mateos  
70 Aniversario del CECyT No. 3 "Estanislao Ramírez Ruiz"  
60 años de XEIPN Canal Once, orgullosamente politécnico  
60 Aniversario del CECyT No. 4 "Lázaro Cárdenas"

## CARTA CESIÓN DE DERECHOS

El/la que suscribe: **Sandra Itzel Dávalos Figueroa** y **Dominic Abiud García Ledezma** estudiantes del Programa de: **Ingeniería Química Industrial** con número de Boleta: **2015320241** y **2015320374**, respectivamente manifiestan que es autor/a intelectual del presente trabajo escrito, por la opción: **Tesis Colectiva** bajo la dirección del profesor/a **Ing. Martha Elena García Ruiz** ceden los derechos del trabajo: **"Propuesta para el control de residuos sólidos urbanos y su aprovechamiento en el municipio de Toluca Lerdo"** al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección de correo electrónico **sandradavalos0201@gmail.com** y **dominicga96@gmail.com** Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

A t e n t a m e n t e

  
Sandra Itzel Dávalos Figueroa  
Nombre y Firma del/la  
estudiante

  
Dominic Abiud García Ledezma  
Nombre y Firma del/la  
estudiante

  
Martha Elena García Ruiz  
Nombre y Firma del/la  
Directora





## **AGRADECIMIENTOS**

### *AL INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL*

*Por abrirnos las puertas a la educación superior, darnos los medios necesarios para poder culminar este trayecto y por fomentar el crecimiento profesional de los jóvenes en México,*

### *A LA GLORIOSA ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS*

*Por prepararnos para el mundo laboral mediante el conocimiento de nuestras habilidades académicas y sociales, por mostrarnos que con perseverancia y esfuerzo se puede lograr lo que sea a pesar de los obstáculos impredecibles que te puede poner la vida y tan solo por hacernos coincidir con nuestra alma gemela,*

### *A LA M en C. MARTHA ELENA GARCÍA RUÍZ*

*Por el esfuerzo, apoyo, paciencia, amor y dedicación que brindó en cada uno de sus consejos durante la elaboración de este trabajo, el cual no habría podido ser posible sin su invaluable experiencia y la forma tan natural con la que la compartió con nosotros.*



#### *A MIS PADRES*

*Quiénes desde mi primer día de vida han velado incansablemente por mi bienestar y me han dado su apoyo incondicional para poder alcanzar mis metas, ningún logro habría sido posible sin ellos. Siempre estaré en deuda con ustedes y espero algún día ser tan buena persona como me han mostrado,*

#### *A MIS HERMANOS*

*Que siempre serán un refugio libre de preocupaciones, al que siempre puedo volver para recordar el significado de la vida y quienes son mi motivación para levantarme cuando siento que no puedo más. Espero éste trabajo sirva como fuente de inspiración y alegría para ustedes,*

#### *A LA FAMILIA DÁVALOS FIGUEROA*

*Quiénes me abrieron las puertas de su hogar y mostraron su apoyo total para la realización de este trabajo, también por sus invaluable consejos,*

#### *A MIS AMIGOS*

*Quienes, aunque hemos tomado caminos distintos han sido parte importante de este camino que comenzamos juntos, especialmente a Martín Ruíz y Claudia Arteaga por mostrarme el significado de la amistad mediante su apoyo para la culminación de este trabajo,*

#### *A SANDRA DÁVALOS*

*Quién decidió apoyarme en la creación de este trabajo y compartió cada alegría, preocupación y sufrimiento que trajo consigo. Quién me mostró que ser paciente, entender al prójimo y dedicar todo tu esfuerzo a la realización de un sueño trae consigo resultados increíbles, pero sobre todo por hacerme creer en la familia y en el amor.*

*Dominic Abiud García Ledezma*



*A MIS PADRES*

*Por acompañarme, guiarme y apoyarme durante toda mi preparación académica, por sus consejos brindados y la confianza que sembraron en mí, pero sobre todo por el tiempo y amor que me dedicaron para que pudiese alcanzar mis sueños,*

*A MI HERMANO*

*Por ser mi compañero fiel, por celebrar mis triunfos y ayudarme a salir de mis derrotas, por cuidarme durante toda la vida y porque es el mejor ejemplo para seguir,*

*A DOMINIC ABIUD GARCÍA LEDEZMA*

*Por tu amor, paciencia y entrega al realizar este trabajo, por compartirme tus sueños y por dejar que te compartiera los míos, por mostrarme una forma diferente de ver la vida y por las experiencias que vivimos desde que nos conocimos, pero sobre todo por ser mi amigo y compañero en esta vida,*

*A LA FAMILIA GARCÍA LEDEZMA*

*Por recibirme en su casa, su confianza que me han brindado, y el apoyo que nos han dado durante este proceso.*

*A MIS AMIGOS*

*En especial a Daniel Ubaldo y Claudia Arteaga por ser la familia que pude elegir, por su apoyo incondicional durante la carrera y por las experiencias que viví con ustedes.*

*Sandra Itzel Dávalos Figueroa*



# ÍNDICE

	pág.
Lista de abreviaturas .....	V
Resumen .....	VII
Introducción .....	VIII
Capítulo 1: Antecedentes de los Residuos Sólidos Urbanos.....	1
1.1 Impacto ambiental .....	1
1.2 Generación.....	6
1.3 Características y composición.....	10
1.4 Manejo y control.....	12
1.5 Normatividad en materia de Residuos Sólidos Urbanos.....	20
Capítulo 2: Ubicación, rutas y generación de RSU en la zona de estudio.....	25
2.1 Ubicación geográfica del sitio.....	25
2.2 Desarrollo social y económico de la zona.....	29
2.3 Vías de comunicación.....	34
2.4 Plan regional de desarrollo.....	38
Capítulo 3: Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos.....	41
3.1 Propuesta de la distribución del sitio de manejo integral de residuos.....	41
3.2 Métodos de recolección y transporte de RSU.....	44
3.3 Descripción del proceso de la planta clasificadora.....	50
3.4 Diseño del relleno sanitario.....	66
3.5 Extracción y purificación de biogás.....	120
Capítulo 4: Beneficios ambientales y económicos de la propuesta.....	135
4.1 Beneficios ambientales.....	135
4.2 Beneficios económicos.....	138
4.3 Impacto social del proyecto.....	140
Conclusiones.....	143
Bibliografía.....	145
Anexos.....	151

# ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.1</b> Demostración gráfica de la contaminación del suelo (K, 2013).....	2
<b>Figura 1.2</b> Tiradero a cielo abierto en el estado de Veracruz (SEDEMA, 2019).....	2
<b>Figura 1.3</b> Gases de efecto invernadero y sus interacciones con la atmósfera (UNEP-GRID-ARENAL, 2019).....	3
<b>Figura 1.4</b> Inventario nacional de emisiones de efecto invernadero (INEEI) con sus categorías y porcentaje de cada una de ellas 2013 (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2019) .....	4
<b>Figura 1.5</b> Adelgazamiento de la capa de ozono a través de los años (Eco México Social, 2019).....	5
<b>Figura 1.6</b> Ilustración de la reacción de los CFCs con la capa de ozono (The National Academies, 2019).....	5
<b>Figura 1.7</b> Los países que más residuos sólidos urbanos generaron en 2014 (Atlas D-Waste, 2019).....	7
<b>Figura 1.8</b> Producción de residuos sólidos urbanos per cápita por país (Atlas D-Waste, 2019) .....	7
<b>Figura 1.9</b> Municipios que más RSU generaron en el Estado de México (INEGI, 2019) .....	9
<b>Figura 1.10</b> Componentes de los RSU en México (SEMARNAT, 2019) .....	11
<b>Figura 1.11</b> Composición de los RSU en CDMX (Procuraduría ambiental y del ordenamiento territorial, 2013).....	11
<b>Figura 1.12</b> Generación de residuos a nivel mundial en los siglos XX y XXI (Hernández S, 2008) .....	13
<b>Figura 1.13</b> Representación esquemática del proceso de compostaje (Agencia de residuos de Cataluña, 2016).....	14
<b>Figura 1.14</b> Representación esquemática del proceso de biodigestión anaeróbica (El Eco de Sunchales, 2014) .....	15
<b>Figura 1.15</b> Representación esquemática del proceso de reciclaje del cartón (Eroski Consumer, 2019) .....	16
<b>Figura 1.16</b> Diagrama esquemático del proceso de reciclaje de vidrio (Asociación de Murcia Limpia, 2019) .....	17
<b>Figura 1.17</b> Diagrama esquemático del proceso de reciclaje de acero (Ostuacan Chiapas, 2019) .....	18
<b>Figura 1.18</b> Símbolos de la sociedad de la industria de plásticos para la identificación de resinas (Sermu Gran, 2016) .....	18
<b>Figura 1.19</b> La jerarquía del residuo (Wikipedia, 2019) .....	19
<b>Figura 2.1</b> Ubicación del terreno para el sitio de disposición final (GOOGLE, 2019) .....	25
<b>Figura 2.2</b> Medidas y área superficial del terreno para el sitio de disposición final (GOOGLE, 2019) .....	26
<b>Figura 2.3a</b> Uso del suelo en el terreno seleccionado (INEGI, 2019) .....	27
<b>Figura 2.3b</b> Acotaciones de los distintos usos del suelo registrado por el INEGI (INEGI, 2019) .....	27
<b>Figura 2.4</b> Geología de la ubicación propuesta para el sitio de disposición final (Gobierno del Estado de México, 2019) .....	28
<b>Figura 2.5</b> Vías de comunicación terrestre para los municipios al Norte del sitio de disposición final (GOOGLE, 2019) .....	36
<b>Figura 2.6</b> Vías de comunicación terrestre para los municipios al Este del sitio de disposición final (GOOGLE, 2019) .....	36
<b>Figura 2.7</b> Vías de comunicación terrestre para los municipios al Sur del sitio de disposición final (GOOGLE, 2019) .....	37
<b>Figura 2.8</b> Vías de comunicación terrestre para los municipios al Oeste del sitio de disposición final (GOOGLE, 2019) .....	37
<b>Figura 3.1</b> Dimensiones del sitio de manejo integral .....	41
<b>Figura 3.2</b> Lay out detallado del sitio de manejo integral .....	43
<b>Figura 3.3</b> Organigrama del personal necesario para iniciar operaciones en el sitio de manejo integral .....	44
<b>Figura 3.4</b> Ubicación de los actuales rellenos sanitarios (GOOGLE, 2019) .....	46
<b>Figura 3.5</b> Lay out típico de una estación de transferencia con descara indirecta (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2007) .....	49
<b>Figura 3.6</b> Diagrama de bloques de planta clasificadora .....	51
<b>Figura 3.7a</b> Detalle de la primera línea de clasificación .....	52
<b>Figura 3.7b</b> Propuesta del proceso de la planta clasificadora .....	53
<b>Figura 3.8</b> Espacios horizontales antropométricos para un banco de trabajo (E., 2015) .....	56
<b>Figura 3.9</b> Etiquetas para contenedores (Gobierno de México, 2015) .....	60

# PROPUESTA PARA EL CONTROL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y SU APROVECHAMIENTO EN EL MUNICIPIO DE TOLUCA DE LERDO

<b>Figura 3.10</b> Contenedores para los residuos valorizables (Tegui Contenedores, 2019) .....	61
<b>Figura 3.11</b> Diagrama de bloques de la operación del relleno sanitario .....	66
<b>Figura 3.12</b> Simbología de la carta hidrológica del Estado de México (Gobierno del Estado de México, 2007) .....	73
<b>Figura 3.13</b> Hidrografía de la zona de interés (Gobierno del Estado de México, 2007) .....	73
<b>Figura 3.14</b> Carta de altimetría de la zona de estudio (Topographic-Map, 2019) .....	74
<b>Figura 3.15</b> Diseño típico de la base de un relleno sanitario .....	78
<b>Figura 3.16</b> Ilustración típica de las celdas de operación de un relleno sanitario .....	79
<b>Figura 3.17</b> Clausura típica de un relleno sanitario .....	80
<b>Figura 3.18</b> Diseño típico de un relleno tipo biorreactor .....	82
<b>Figura 3.19</b> Componentes típicos que constituyen la cobertura final de un relleno .....	85
<b>Figura 3.20</b> Configuración propuesta de la cobertura final .....	85
<b>Figura 3.21</b> Dimensiones del talud propuesto .....	86
<b>Figura 3.22</b> Composición del recubrimiento del fondo del relleno sanitario .....	87
<b>Figura 3.23</b> Gráfica de peso específico de RSU estabilizado .....	90
<b>Figura 3.24</b> Porcentaje de volumen remanente después del asentamiento y compactación del relleno sanitario .....	91
<b>Figura 3.25</b> Ilustración del balance de agua usado para la evaluación de formación de lixiviados en el relleno sanitario .....	96
<b>Figura 3.26a</b> Vista general de un sistema de recolección de lixiviados con terrazas inclinadas .....	103
<b>Figura 3.26b</b> Detalle del tubo de recolección típico de lixiviados .....	103
<b>Figura 3.27</b> Sistema típico usado para recolectar y remover lixiviados del relleno sanitario .....	104
<b>Figura 3.28</b> Tanque de almacenamiento de lixiviados .....	105
<b>Figura 3.29</b> Lisímetro de succión de copa porosa para la recolección de muestras líquidas de la zona vadosa .....	107
<b>Figura 3.30</b> Sonda de monitoreo de gas en la zona vadosa .....	108
<b>Figura 3.31</b> Pozo de monitoreo de agua subterránea .....	109
<b>Figura 3.32</b> Medidor tipo activo de la planta de BENLESA, N.L. México .....	110
<b>Figura 3.33</b> Disposición de los dispositivos de monitoreo ambiental alrededor del relleno sanitario .....	111
<b>Figura 3.34</b> Dimensiones de la mega celda I .....	113
<b>Figura 3.35a</b> Rellenado vertical de residuos con cubierta en 30 días de operación, primera etapa .....	114
<b>Figura 3.35b</b> Rellenado horizontal de residuos con cubierta en 30 días de operación, segunda etapa .....	115
<b>Figura 3.36</b> Ilustración de tractor tipo oruga (FerreyrosCAT,2019).....	116
<b>Figura 3.37</b> Ilustración de pipa de agua ( Pipas de agua de Oaxaca, 2019).....	116
<b>Figura 3.38</b> Ilustración de compactador de ruedas de acero(FerreyrosCAT,2019).....	117
<b>Figura 3.39</b> Ilustración de grúa con un accesorio de mando de chango (FerreyrosCAT,2019).....	117
<b>Figura 3.40</b> Vista de planta de la mega celda I completada .....	119
<b>Figura 3.41</b> Pozo de extracción de biogás típico .....	121
<b>Figura 3.42</b> Pozos verticales usados en sistemas de recuperación de biogás .....	122
<b>Figura 3.43</b> Configuración del sistema de recolección de biogás tipo anillo (López, 2016) .....	123
<b>Figura 3.44</b> Esquema del control del sistema de recolección tipo espina de pescado (López, 2016) .....	123
<b>Figura 3.45</b> Diagrama de viscosidad de gas natural a 1 atm (Pilco, 2014).....	127
<b>Figura 3.46</b> Diagrama de Moody para el cálculo del factor de fricción (La guía de Física, 2011).....	128
<b>Figura 3.47</b> Dimensiones (Largo, Ancho y Altura) de la bomba Dolphin LA 5109 A (BUSCH, 2019) .....	128
<b>Figura 3.48</b> Separadores mecánicos de humedad, típicos para gases (Spirax Sarco, 2019).....	129
<b>Figura 3.49</b> Arreglos de membrana, proceso b) (Baltazar, 2019).....	133
<b>Figura 4.1</b> Emisiones de CO <sub>2</sub> de los países respecto a las emisiones de 1990 (El orden mundial,2019).....	136
<b>Figura 4.2</b> Camión de distribución de mercancía a base de biometano (Encamion, 2019).....	140
<b>Figura 4.3</b> Distribución de la población por edades en el Estado de México en 2015 ( COESPO, 2015).....	141
<b>Figura 4.4</b> Lay out del uso del suelo del sitio de manejo integral de los residuos una vez clausurado.....	142

# ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.1</b> Los diez estados que más RSU generaron en México 2014. (INEGI, 2019) .....	8
<b>Tabla 1.2</b> Municipios que más RSU generaron en el Estado de México. (INEGI, 2019) .....	8
<b>Tabla 1.3</b> Generación de RSU de los municipios del Valle de Toluca. (INEGI, 2019) .....	10
<b>Tabla 1.4</b> Composición porcentual de los RSU en algunos municipios Estado de México.....	12
<b>Tabla 2.1</b> Coordenadas de los vértices del terreno propuesto para el sitio de manejo integral de RSU .....	26
<b>Tabla 2.2</b> Población de los municipios de la zona metropolitana del Valle de Toluca .....	29
<b>Tabla 2.3</b> Población estimada para los municipios de la zona metropolitana del Valle de Toluca para el año 2050 .....	30
<b>Tabla 2.4</b> Características de genero por municipio .....	30
<b>Tabla 2.5</b> Estatus socioeconómico de las localidades de cada municipio .....	31
<b>Tabla 2.6</b> Clasificación de las localidades de los municipios de interés por su sector económico .....	32
<b>Tabla 2.7</b> Clasificación de las localidades de los municipios de interés por su sector económico, considerando solamente la población femenina .....	32
<b>Tabla 2.8</b> Población económicamente activa en 2000 y 2010 en los municipios de interés .....	33
<b>Tabla 2.9</b> Sitios de disposición final para los RSU de cada municipio .....	39
<b>Tabla 3.1</b> Evaluación de los criterios del LIPASAM para determinar la viabilidad de estaciones de transferencia en el caso de estudio .....	47
<b>Tabla 3.2</b> Clasificación de las estaciones de transferencia por tamaño y equipamiento seleccionado .....	48
<b>Tabla 3.3</b> Composición general de los RSU. (Mendoza & Gallardo Izquierdo, 2010) .....	54
<b>Tabla 3.4</b> Composición cuantitativa y cualitativa de los RSU que llegaran al sitio de disposición final .....	54
<b>Tabla 3.5</b> Cantidad de RSU que se recibirán por hora en la planta clasificadora .....	55
<b>Tabla 3.6</b> Densidad de los residuos valorizables .....	56
<b>Tabla 3.7</b> Flujo volumétrico de los residuos valorizables .....	59
<b>Tabla 3.8</b> Volumen que ocuparan los residuos valorizables .....	60
<b>Tabla 3.9</b> Análisis de riesgo de la inspección de RSU .....	62
<b>Tabla 3.10</b> Análisis de riesgo de la descarga de RSU a la planta clasificadora .....	63
<b>Tabla 3.11</b> Análisis de riesgo de la clasificación de RSU .....	64
<b>Tabla 3.12</b> Análisis de riesgo de la carga de RSU .....	65
<b>Tabla 3.13a</b> Especies de vegetación de rápido crecimiento compatibles con la flora y fauna existente en la zona .....	71
<b>Tabla 3.13b</b> Especies de vegetación de rápido crecimiento compatibles con la flora y fauna existente en la zona .....	72
<b>Tabla 3.14</b> Rangos de temperaturas típicas por mes de Almoloya de Juárez .....	75
<b>Tabla 3.15</b> Rango de precipitación pluvial típica por mes de Almoloya de Juárez .....	75
<b>Tabla 3.16</b> Constituyentes típicos encontrados en biogás .....	93
<b>Tabla 3.17</b> Composición típica del lixiviado con no más de dos años .....	95
<b>Tabla 3.18</b> Requerimientos de equipamiento típico para el relleno sanitario .....	113
<b>Tabla 3.19</b> Ejemplos de los tipos de compresores y bombas .....	129
<b>Tabla 3.20</b> Información técnica de la bomba Dolphin LA 5109 A .....	129
<b>Tabla 3.21</b> Ventajas y desventajas de los métodos comerciales para la purificación del biogás (Baltazar, 2019) .....	131
<b>Tabla 3.22</b> Análisis comparativo de las tecnologías de purificación de biogás (Baltazar, 2019) .....	132
<b>Tabla 3.23</b> Análisis de eficiencia de los diferentes arreglos de membrana (Baltazar, 2019).....	134
<b>Tabla 4.1</b> Emisión de GEI en tCO <sub>2</sub> e del relleno sanitario .....	137
<b>Tabla 4.2</b> Beneficio ambiental de los residuos valorizables .....	138
<b>Tabla 4.3</b> Beneficios económicos de los valorizables.....	139

# LISTA DE ABREVIATURAS

Nombre	Símbolo	Nombre	Símbolo
Ancho de la banda (m)	$A$	Longitud de la banda (m)	$L_b$
Ancho efectivo de la banda (m)	$A_b$	Generación potencial de CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> /ton)	$L_0$
Área necesaria para el relleno sanitario (m <sup>2</sup> )	$A_{rell}$	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos	LPGIR
Grados Celsius	°C	Cantidad de residuos (ton/día)	$M$
Capacidad de campo del relleno (kg de H <sub>2</sub> O/m <sup>3</sup> de relleno)	$CC$	Factor de corrección para el CH <sub>4</sub>	$MCF$
Capacidad de campo del material de cobertura (kg de H <sub>2</sub> O/kg de CM)	$CC_{CM}$	Masa de residuos dispuestos en el año $i$ (ton)	$M_i$
CloroFluoroCarbonos	CFCs	Normal metro cubico por hora	Nm <sup>3</sup> /h
Capacidad de carga permitida para un tráiler de dos ejes (ton/vehículo)	$CT$	Presión (Pa)	$P$
Demanda biológica de Oxígeno en 5 días	DBO <sub>5</sub>	Presión absoluta (atm)	Pabs
Demanda Química de Oxígeno	DQO	Plan de Desarrollo Urbano	PDU
Rugosidad absoluta (mm)	$\epsilon$	Población Económicamente Activa	PEA
Rugosidad relativa	$\epsilon_r$	Polietileno Tereftalato	PET
Factor de fricción del diagrama de Moody	$f$	Poliestireno	PS
Fuerza (N)	$F$	Policloruro de Vinilo	PVC
Factor de ajuste por incendios	$F_a$	Flujo másico de residuos a transportar en la banda en (kg/h)	$Q_b$
Factor de capacidad de campo	FC	Flujo de biogás máximo esperado (m <sup>3</sup> /año)	$Q_{LFG}$
Flujo volumétrico del valorizable (m <sup>3</sup> /h)	$F_v$	Reynolds	$Re$
Gases de efecto invernadero	GEI	Residuos de Manejo Especial	RME
Flujo volumétrico del lixiviado (m <sup>3</sup> /h)	$G_L$	Residuos Peligrosos	RP
Unidad de permeabilidad del gas	GPU	Residuos Peligrosos Biológicos Infecciosos	RPBI
Masa de RSU generados a depositar durante la vida útil del relleno sanitario (kg)	$G_{RSU}$	Residuos Sólidos Urbanos	RSU
Flujo volumétrico promedio del biogás (m <sup>3</sup> /h)	$G_v$	Espesor de la pila de RSU (m)	$S$
Polietileno de Alta Densidad	HDPE	Espesor de la carga de RSU sobre la banda detenida (m)	$S_{RSU}$
Altura del relleno sanitario medida desde la base de este, de acuerdo con las recomendaciones de operación (m)	$H_{rell}$	Edad de la sección $j$ de la masa de residuos dispuestos en el año $i$ (años decimales)	$t_{ij}$
Incremento en tiempo de un año	$I$	Toneladas de CO <sub>2</sub> equivalente	tCO <sub>2</sub> e
Instituto Nacional de Estadística y Geografía	INEGI	Velocidad del gas (m/s)	$v$
Incremento de tiempo en 0.1 años	$J$	Velocidad del fluido de máximo (m/s)	$v$
Índice de generación de CH <sub>4</sub> (1/año)	$k$		

**PROPUESTA PARA EL CONTROL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y SU APROVECHAMIENTO EN EL MUNICIPIO DE TOLUCA DE LERDO**

<b>Nombre</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Símbolo</b>
Longitud de la tubería (m)	$L$	Volumen que ocuparán todos los residuos depositados durante la vida útil del relleno sanitario ( $m^3$ )	$V_{RSU}$
Peso de sobrecarga calculado a una altura media, de los residuos en el nivel en cuestión (kg)	$W$	Peso del agua almacenada en los residuos (kg)	$w_{srs}$
Agua de lluvia ( $kg/m^3$ )	$W_{A(R)}$	Humedad de los residuos que ingresan al relleno sanitario ( $kg/m^3$ )	$W_{SW}$
Peso del agua almacenada en los residuos (kg)	$w_{aar}$	Humedad en la entrada de los lodos ( $kg/m^3$ )	$W_{TS}$
Agua que sale del fondo del relleno (para la celda colocada directamente encima del sistema de colección de lixiviado; El agua desde el fondo corresponde al lixiviado) ( $kg/m^3$ )	$W_{B(L)}$	Perdida de agua como vapor saturado con el biogás ( $kg/m^3$ )	$W_{WV}$
El peso de material de cubierta depositados en la mega celda (kg)	$w_{cm}$	Caída de presión (mbar)	$\Delta P$
Humedad del material de cobertura ( $kg/m^3$ )	$W_{CM}$	Cambio en la cantidad de agua almacenada en los residuos del relleno sanitario ( $kg/m^3$ )	$\Delta S_{SW}$
Pérdida de agua por evaporación en la superficie del relleno sanitario ( $kg/m^3$ )	$W_E$	Densidad del gas ( $kg/m^3$ )	$\rho$
Pérdida de agua en la formación de biogás ( $kg/m^3$ )	$W_{LG}$	Densidad de los RSU ( $kg/m^3$ )	$\rho_{RSU}$
Peso del material de cobertura. (kg)	$w_{mc}$	Diámetro teórico de la tubería (in)	$\emptyset$
Peso total de la mega celda (kg)	$W_N$	Tiempo (h)	$\theta$
El peso de los RSU depositados en la mega celda (kg)	$W_r$	Velocidad media (m/s)	$v$

## **RESUMEN**

La presente tesis propone sentar las bases para la construcción de un sistema de manejo integral centralizado de residuos sólidos urbanos, para beneficiar a la población de Toluca de Lerdo y sus municipios aledaños, mediante un sitio de disposición final que cumpla con la legislación vigente y que tenga un impacto ambiental y social en el largo plazo. En esta propuesta también se incluyen instalaciones periféricas como lo son: planta clasificadora y estaciones de transferencia, que recuperen el valor económico de los residuos, por medio de la separación de residuos valorizables y la explotación de la potencial generación de biogás.

A fin de alcanzar estos objetivos se necesitó definir el impacto de los residuos que han producido en nuestro entorno a través del tiempo y actualmente. Este impacto se estudió primeramente por el frente ambiental, analizando los tipos de contaminación que se presentan debido a los residuos sólidos urbanos. Posteriormente, se analizó la generación, características y composición de estos, seguidamente se investigaron las opciones del manejo y control de los residuos, que existen en la actualidad y por último se realizó una compilación de la normatividad vigente aplicable en materia de residuos.

Para poder conocer la población de interés de la zona metropolitana de Toluca de Lerdo, fue necesario detallar las características de la región mediante una proyección de la población a 30 años y la selección de la ubicación geográfica del sitio de manejo integral de los residuos, esto con base en la normatividad estudiada en el primer capítulo del presente trabajo, además se analizó el desarrollo social y económico de la zona junto con las posibles vías de comunicación entre los municipios de interés y el sitio de manejo integral de los residuos. Finalmente, se verificó que la presente propuesta pueda tener lugar dentro de los Planes Regionales de Desarrollo de los municipios de interés.

Una vez sentadas las bases mencionadas, en el capítulo II se procede a realizar el diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos, comenzando con la propuesta del área a utilizar en la ubicación seleccionada y la distribución del sitio en dicho espacio. Posteriormente, se muestran los métodos de recolección y transporte que seguirán los residuos desde los municipios de interés hasta la ubicación del sitio de gestión integral de los residuos de acuerdo con las rutas desarrolladas. Entonces, con la estimación de la población, previamente realizada se pudo conocer la cantidad de residuos que se ingresarán a la planta clasificadora, se explica también el proceso propuesto para la separación de residuos y, conociendo la composición de estos, se estimó la potencial recuperación de los valorizables, para después determinar la cantidad de residuos que se prevé ingresaran al sitio de disposición final. Con este último valor se diseñó el relleno sanitario junto con el sistema de extracción de biogás y las especificaciones del sistema de purificación del mismo.

Finalmente, en el capítulo IV, se exponen las ventajas y soluciones ambientales, sociales y económicas, de acuerdo con la problemática investigada previamente sobre el impacto ambiental ocasionado por el incorrecto manejo de los residuos, todo esto dentro del marco legal vigente. Además, se tratan los beneficios que existirían de implementarse un sistema de manejo integral centralizado de los residuos en el Valle de Toluca y sus municipios aledaños, de acuerdo con las bases sentadas en la presente propuesta.



# INTRODUCCIÓN

Se viven los tiempos de mayor prosperidad en la historia de la humanidad, es tanto así, que basta con realizar una llamada, utilizar una aplicación móvil o bien ir al mercado o supermercado más cercano para conseguir alimentos en tan sólo unos minutos, por supuesto en su respectivo contenedor inocuo para que los alimentos lleguen con la misma calidad al hogar. Se tiene la facilidad de ir a la tienda y comprar un bocadillo o una bebida con la certeza de que no sufrió ningún desperfecto en su distribución y es seguro comerlo. Se cubren las necesidades de higiene personal como son: jabones, shampoo, acondicionador, crema humectante, desodorante, etc, las básicas como la vestimenta, educación, alimentación y vivienda, y necesidades de entretenimiento como son: televisión, computadora, teléfono celular, tabletas digitales, etc. Lo mencionado anteriormente tiene dos cosas en común; la primera es que cualquier ser humano ha consumido alguno de estos productos en su vida y la segunda es que estos productos o empaques son desechables y por lo tanto se convierten en un residuo. De acuerdo con la definición de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LPGIR) se entiende por residuo como: aquellos materiales o productos cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentran en estado sólido o semisólido, líquido o gaseoso y que se contienen en recipientes o depósitos; pueden ser susceptibles de ser valorizados o requieren sujetarse a tratamiento o disposición final conforme a lo dispuesto en la misma ley (DOF, 2003).

En la mayor parte del territorio mexicano, los residuos son enviados a tiraderos a cielo abierto, sin ningún interés, preocupación o apego a las normas y leyes vigentes del territorio nacional. Uno de los casos con mayor área de oportunidad en el país se encuentra en el Estado de México, en su capital, Toluca de Lerdo y los municipios que lo colindan, que durante toda su existencia han dispuesto de sus residuos en los ya mencionados tiraderos a cielo abierto. De acuerdo con el INEGI (INEGI, 2014), el Estado de México genera 13,014,285 kilogramos de residuos al día, de los cuales el municipio de Toluca y sus municipios vecinos (Atlacomulco, Ixtapan del Oro, Ixtlahuaca, Lerma, Metepec, San Felipe del Progreso, San Mateo Atenco, Santo Tomás, Temoaya, Valle de Bravo, Villa Victoria y Zinacantepec) participan con 1,438.46 toneladas de residuos al día, de los cuales sólo entre 400 y 500 toneladas (El Sol de Toluca, Noviembre 2018), son llevados al único sitio de disposición final autorizado por el gobierno federal, ubicado en el municipio de Zinacantepec, en el kilómetro 1.5 de la carretera federal número 15, Toluca-Morelia. Cabe mencionar que dicho sitio de disposición final se encuentra en proceso de clausura ya que los vecinos, en su mayoría agricultores, alegan que dicho sitio no funciona de manera correcta y está contaminando sus cultivos. El mismo artículo del periódico toluqueño señala al dueño del predio como el responsable de que el sitio de disposición final no funcione adecuadamente, ya que el relleno sanitario no está siendo orientado a la mejora de la comunidad o al cuidado del medio ambiente, sino al beneficio de particulares. Esta situación no hace más que dar una mala imagen de los sitios de disposición final, haciendo creer a la población que no tienen ninguna utilidad.

La situación antes descrita es preocupante a un nivel mundial, es necesario evitar las emisiones de gases de efecto invernadero, causados por los gases producidos durante la descomposición de los residuos y los incendios, y la contaminación al suelo y mantos acuíferos causada por la mala disposición de los residuos sólidos urbanos por dos razones: la primera es el cambio climático, que

## **PROPUESTA PARA EL CONTROL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y SU APROVECHAMIENTO EN EL MUNICIPIO DE TOLUCA DE LERDO**

---

debe de ser frenado lo antes posible para tener un futuro sostenible y la segunda es dar cumplimiento a los acuerdos internacionales para combatir el cambio climático, por mencionar algunos: el Protocolo de Kioto, convenio de Estocolmo, convenio de Brasilea, convención de Viena para la protección de la capa de ozono, protocolo de Montreal de los cuales México forma parte. Cabe mencionar que México cuenta con un sitio de disposición final, en el estado de Nuevo León, municipio de Salinas Victoria, que es el más grande de América Latina, ha sido reconocido por apoyar en el cumplimiento de los acuerdos internacionales y además cumple con estándares nacionales e internacionales para el manejo de residuos, además de una planta clasificadora y una planta generadora de energía eléctrica que abastece el alumbrado público, oficinas de servidores públicos y servicio de metro (Metro Rey). Esto se logró gracias a la colaboración del gobierno estatal y la iniciativa privada.

Con base en lo antes mencionado, la presente tesis propone el diseño y operación de un sitio de disposición final que satisfaga las necesidades del Estado de México, en concreto, la capital Toluca de Lerdo y sus municipios aledaños; el sitio cumplirá con la normatividad vigente y no sólo servirá para disponer de manera permanente de los residuos disminuyendo el daño ecológico y el potencial daño a la población, sino también para recuperar valor económico de los desechos mediante una planta clasificadora de residuos para su posterior venta a la industria recicladora y generar utilidades económicas mediante la venta de energía eléctrica producida a partir del biogás que, de manera natural, los residuos liberan. Dentro de esta propuesta se incluyen las posibles rutas de recolección de residuos y el diseño del sitio de disposición final, que incluye, la extracción y purificación del biogás para la posterior generación de energía eléctrica, además de la ya mencionada planta clasificadora. Por lo que la propuesta mencionada presenta una solución al problema de recolección y disposición de residuos sólidos urbanos en el área conurbada de la ciudad de Toluca de Lerdo, considerando las características de la producción de residuos en la zona y su composición, para determinar la ubicación más factible a fin de mitigar los futuros problemas de disposición de residuos, crecimiento de la población urbana y daños ecológicos, al mismo tiempo que se realice un análisis de beneficios económicos y ambientales del sitio.

# Capítulo 1 Antecedentes de los Residuos Sólidos Urbanos.

## 1.1 Impacto Ambiental.

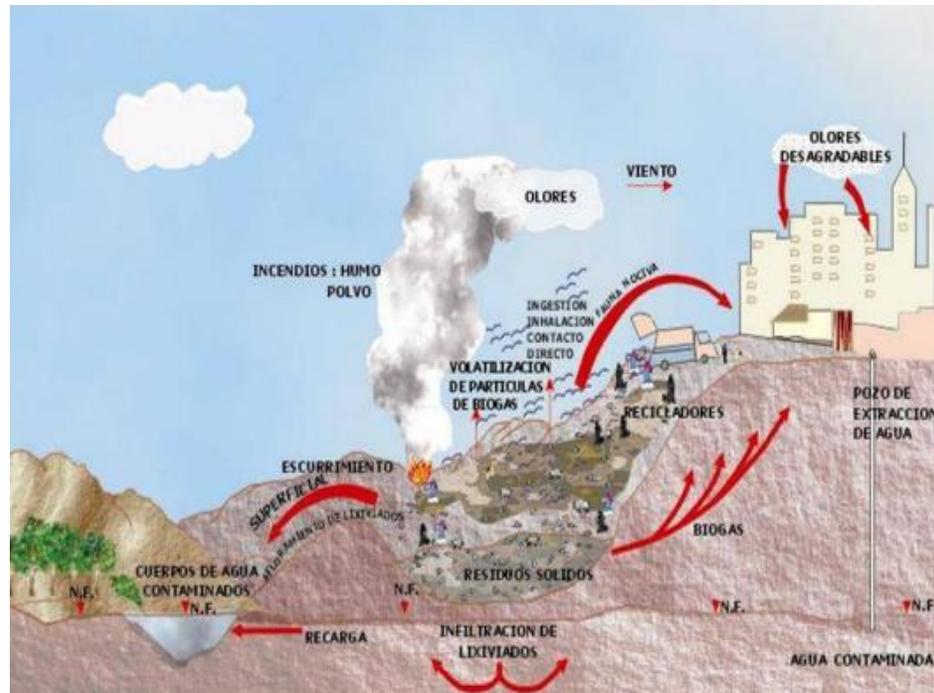
El crecimiento demográfico y de la industria en México durante la segunda mitad del siglo XX, produjo una mayor demanda de materias primas para satisfacer la necesidad de bienes y servicios de una población en aumento, con patrones de consumo cambiantes, cada vez más demandantes. Con la prosperidad en la industria y este crecimiento demográfico, trajo como consecuencia el aumento en la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) y la problemática asociada a la correcta disposición de estos.

Se entiende que los RSU son los que se generan en las casas habitación como resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas, como lo son: productos de consumo, envases, embalajes, empaques, residuos de comida o los que provienen también de cualquier otra actividad que se desarrolla dentro de los establecimientos como lo son: restaurantes, mercados, centros comerciales e industria (DOF, 2003).

Las consecuencias ambientales de no disponer de manera adecuada cualquier tipo de residuo comúnmente son nocivas para la salud de las personas y de los ecosistemas naturales. Algunos de estos impactos son los siguientes:

- A. Contaminación de los suelos y cuerpos de agua:** los residuos sólidos urbanos causan problemas en la atmósfera debido a los gases que desprenden, pero estos también impactan negativamente en las áreas urbanas y rurales. Es importante mencionar que existen otros tipos de residuos, como los llamados residuos peligrosos, los cuales son producidos mayormente en las zonas industriales.

La descomposición de los residuos mencionados (Urbanos y Peligrosos) y su contacto con el agua generan los lixiviados, el peligro que representan para los suelos y cuerpos de agua es que los líquidos que se forman por la reacción, arrastre o filtrado del agua en los residuos, llevan sustancias tóxicas, procedentes de residuos peligrosos, y/o cargas orgánicas muy elevadas que pueden contaminar los suelos, las aguas superficiales y subterráneas. En la Figura 1.1 se puede observar gráficamente la descomposición de los residuos y como esta descomposición afecta al medio ambiente.



*Figura 1.1 Demostración gráfica de la contaminación del suelo.*

*Fuente: Cárdenas, K. (2013). Disposición Final Segura de Residuos Sólidos Municipales. Recuperado de <https://docplayer.es/78896640-Disposicion-final-segura-de-residuos-solidos-municipales.html>*

**B. Proliferación de fauna nociva y transmisión de enfermedades:** los residuos orgánicos que se disponen atraen a un numeroso grupo de especies de insectos, aves y mamíferos que pueden transformarse en vectores de enfermedades peligrosas como: la peste bubónica, tifus murino, salmonelosis, cólera, leishmaniasis, amebiasis, disentería, toxoplasmosis, dengue y fiebre amarilla, entre otras (SEMARNAT 2004), en la Figura 1.2 se puede observar un sitio de disposición no normalizado y la interacción que tiene las aves con los residuos.



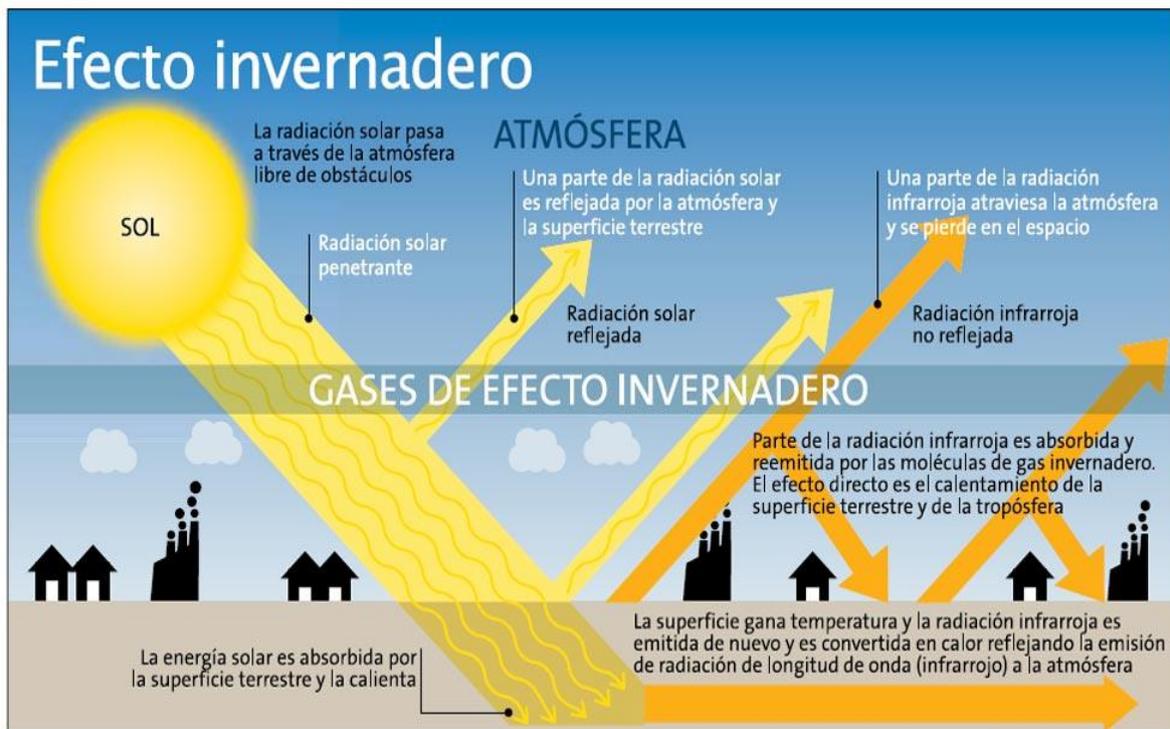
*Figura 1.2 Tiradero a cielo abierto en el Estado de Veracruz*

*Fuente: Formato Siete. (2018). Se contabilizan 800 tiraderos a cielo abierto en Veracruz: SEDEMA. Recuperado de <https://formato7.com/se-contabilizan-800-tiraderos-a-cielo-abierto-en-veracruz-sedema>*

**C. Generación de contaminantes y gases de efecto invernadero:** la descomposición de los residuos orgánicos produce biogases los cuales resultan desagradables y no solo por su aroma, sino que estos son peligrosos debido a su toxicidad y explosividad. Alguno de ellos son también gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático global. Entre estos gases los más conocidos son el bióxido y monóxido de carbono ( $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}$ ) metano ( $\text{CH}_4$ ), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), entre otros.

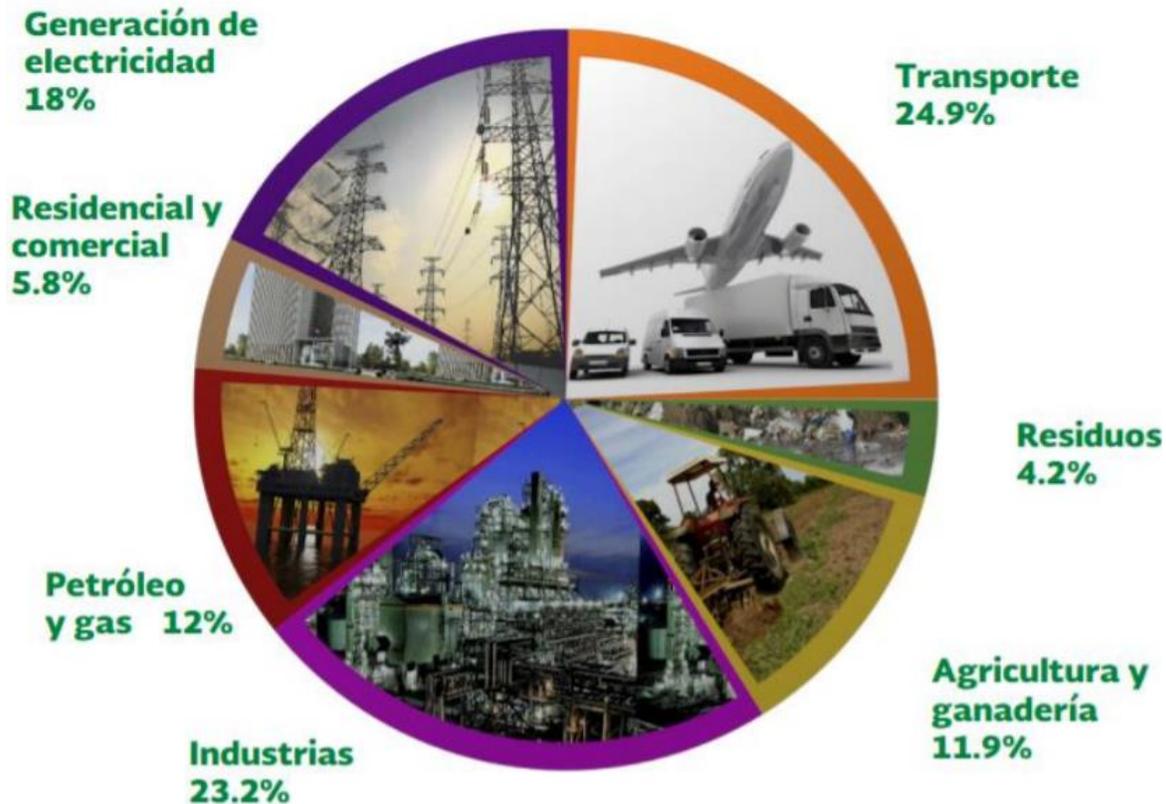
El efecto invernadero es un proceso natural y aunque no lo parezca es necesario para el planeta; ya que la radiación solar pasa a través de la atmósfera y esta es absorbida por algunos gases en la atmósfera, la ya mencionada radiación regresa hacia la superficie interior del planeta, y como resultado se tiene el aumento de temperatura. Es necesario entender que el efecto invernadero que se produce de manera natural es necesario para preservar la vida en el planeta ya que se mantiene una temperatura adecuada y agradable para los seres vivos que aquí habitan, sin embargo, actualmente los gases aislantes que se concentran en la atmósfera son excesivos y no permiten que la radiación atravesase nuevamente la atmósfera y este proceso causa el calentamiento global, como se observa en la Figura 1.3.

De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 2013, como se puede verificar en la Figura 1.4, el 4.2% del total de las emisiones fueron causadas por la generación de residuos.



**Figura 1.3** Gases de efecto invernadero y su interacción con la atmósfera.

Fuente: UNEP- GRID-ARENDAL. (2006). Efecto Invernadero. Recuperado de <https://www.meteorologiaenred.com/efecto-invernadero.html>

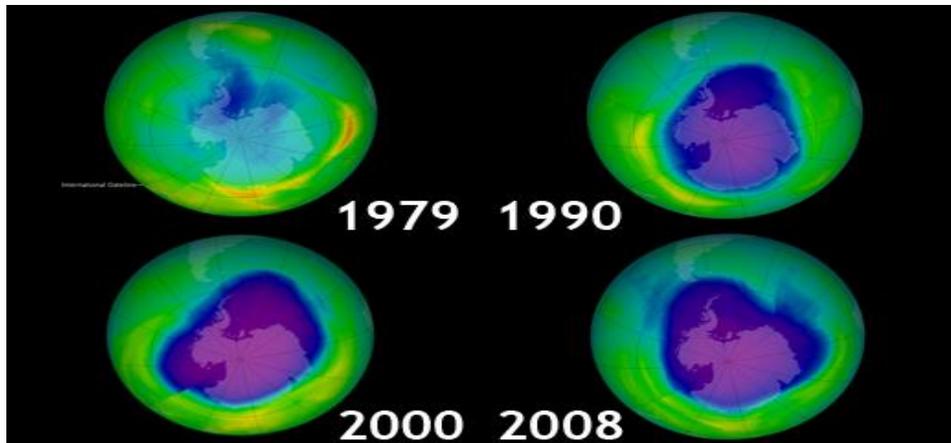


*Figura 1.4 Inventario Nacional de Emisiones de Efecto Invernadero (INEEI) con sus categorías y porcentaje de cada una de ellas 2013.*

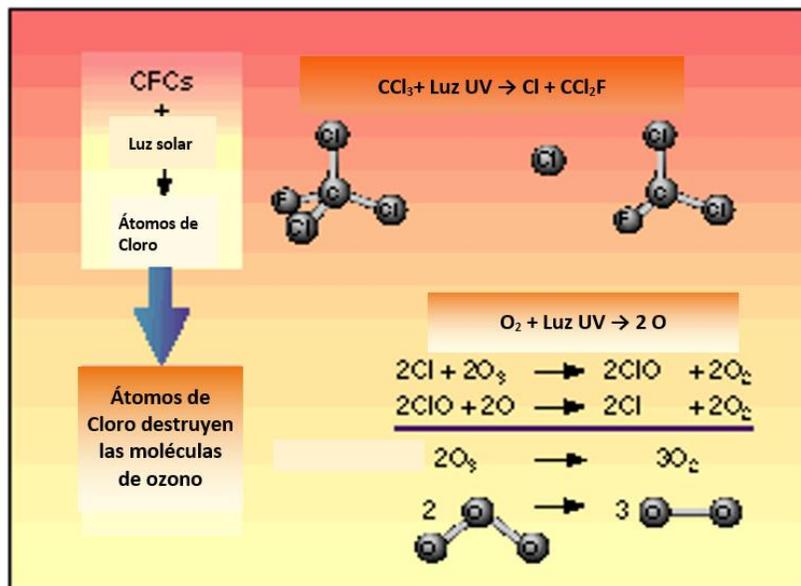
*Fuente: SECTUR. (2013). Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero del Sector Turismo. Recuperado de <http://www.sectur.gob.mx/2017/TurismoSustentable/CambioClimatico/II.2.5%20Presentacion%20Inventario%20GEI%20del%20Sector%20Turismo.pdf>*

**D. Adelgazamiento de la capa de ozono:** las sustancias agotadoras del ozono (SAO) mejor conocidas como los CFCs son los Clorofluorocarbonos, los cuales se emplean para fabricar distintos productos como son: envases de unicel, aerosoles para el cabello, pinturas, desodorantes, etc., los CFCs son invulnerables a la luz solar visible, prácticamente insolubles en agua y resistentes a la oxidación, esto quiere decir que no son alterados en las capas inferiores de la atmósfera, pero por encima de los 29 kilómetros de altitud, en la estratosfera los CFCs son perjudicados por radiaciones ultravioletas de alta energía emitidas por el sol descomponiéndose en átomos y dañando la estratosfera, en la Figura 1.5 se puede observar como los CFCs han dañado la capa de ozono a través de los años.

Se tomará como ejemplo el cloro para explicar la reacción que ocurre en la capa de ozono. Los átomos de cloro al reaccionar con el ozono dan como productos 3 moléculas de oxígeno, en una reacción en cadena en la que los átomos de cloro se regeneran, de forma que continua la descomposición del ozono. En la Figura 1.6 se ilustra las reacciones que ocurren con los CFCs y el ozono.



**Figura 1.5** Adelgazamiento de la capa de ozono a través de los años.  
Fuente: EcoMéxicoSocial. (2011). Esfuerzos para no destruir la capa de ozono. Recuperado de <http://ecomexicosocial.blogspot.com/2011/09/esfuerzos-para-no-destruir-la-capa-de.html>



**Figura 1.6** Ilustración de la reacción de los CFCs con la capa de ozono.  
Fuente: The National Academies. (2003). La pérdida de Ozono: sustancias químicas responsables. Recuperado de [http://www7.nationalacademies.org/spanishbeyonddiscovery/ear\\_007545-05.html](http://www7.nationalacademies.org/spanishbeyonddiscovery/ear_007545-05.html)

El adelgazamiento de la capa de ozono llevó a los gobiernos de diversos países a buscar estrategias para resolver el problema global. Como resultado en 1985 se adoptó la Convención de Viena que trata sobre la Protección de la Capa de Ozono y en 1987 el Protocolo de Montreal que trata sobre Sustancias que Degradan la Capa de ozono. En 2009, 197 países habían firmado y ratificado tanto la Convención como el Protocolo, convirtiéndose en el primero acuerdo internacional de las Naciones Unidas en conseguir la ratificación universal. México firmó ambos tratados y adoptó las enmiendas de Londres (1991), Copenhague (1994), Montreal (2006) Y Beijing (2007; UNEP,2011b).

Para mitigar estos problemas ambientales la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 (se detallará en el subcapítulo 1.3) establece los parámetros para el diseño, operación y clausura de sitios de disposición final. En términos generales, un sitio debe contar con una infraestructura básica para controlar los vectores que podrían causar un impacto ambiental, además de estar 500 metros alejado de asentamientos humanos y de fuentes de agua. Dicha regulación determina que para su operación un sitio de disposición final debe controlar el ingreso de residuos, disponerlos de manera sistemática de acuerdo con un plan, compactarlos y cubrirlos de manera cotidiana, así como el control de la generación de biogás y el manejo de los lixiviados para mantenerlos dentro del sitio (SEMARNAT 2004, SEMARNAT y GTZ 2009). Esta es la única Norma Oficial Mexicana que se encarga de gestionar los sitios de disposición final y se profundizará en ella en el capítulo 3.

De acuerdo con SEMARNAT en su informe de “Tiraderos a Cielo Abierto en México” indica que en el territorio nacional el 87% de los tiraderos de basura son a cielo abierto y solo el 13% son rellenos sanitarios, según datos del Instituto Nacional de Geografía e Informática (INEGI), (SEMARNAT, 2019) desde la perspectiva del problema ambiental de fauna nociva, transmisión de enfermedades, contaminación de suelos y mantos acuíferos, en México se tiene un grave problema ambiental que no está siendo combatido.

### 1.2 Generación.

Como ya se mencionó anteriormente; los residuos sólidos urbanos estarán presentes donde quiera que el ser humano tenga presencia, se está íntimamente ligado a ellos, sin embargo, hay dos cosas que cambian cuando se habla de la producción de residuos a gran escala en ciudades y comunidades: la primera es la composición de los residuos, es decir, de qué tipo de materiales está conformada la basura promedio, lo cual se discutirá en el capítulo siguiente, y la segunda, que es el objeto de este subcapítulo, la cantidad de residuos que se producen, la cual depende completamente del número de habitantes de una población.

Usualmente las ciudades que producen residuos a gran escala son las más urbanizadas y con mayor actividad industrial, mientras que los pueblos pequeños no producen grandes cantidades de basura, es por esto por lo que las grandes urbes tienen sistemas de recolección y disposición más sofisticados, mientras que los pueblos pequeños al tener una menor producción de residuos no ven un problema en la disposición y recolección de estos.

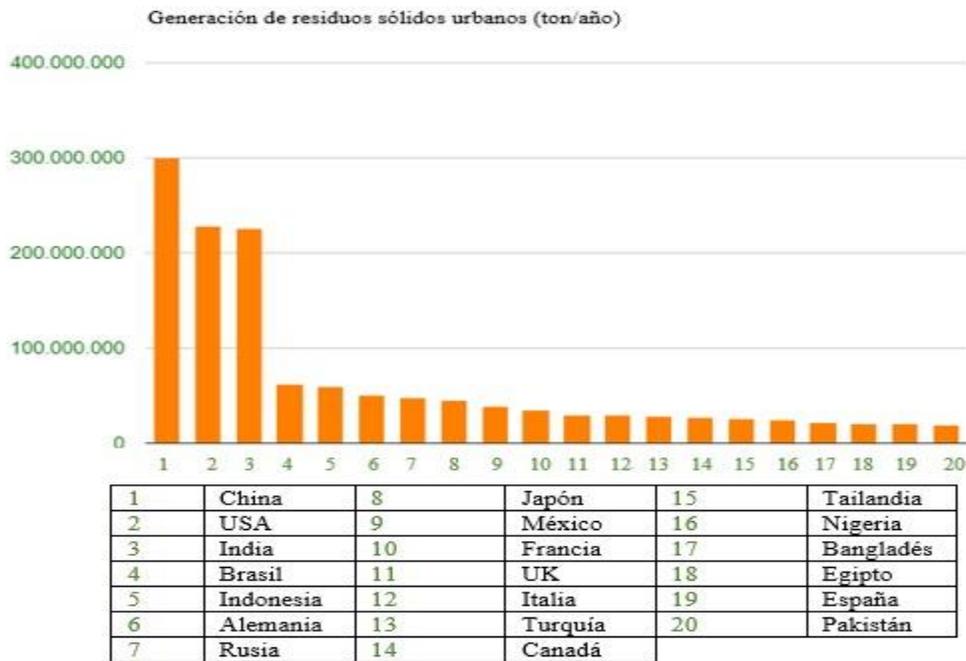
De acuerdo con el informe ambiental del medio ambiente del año 2018, en el 2012 la producción mundial de residuos sólidos urbanos se calculó alrededor de 1,300 millones de toneladas diarias y se estima que podría crecer hasta los 2,200 millones en el año 2025 (Hoorweg y Bhada-Tata, 2012)

Como se puede observar en la Figura 1.7, los tres primeros lugares superan por casi el triple al cuarto lugar y además corresponden a los 3 países más poblados del mundo, 2 de ellos, las principales potencias mundiales. Ejemplo claro de que a mayor urbanización y población mayor producción de basura.

Dentro de esta clasificación México ocupa el noveno lugar, con una producción anual de casi 40,000,000 toneladas de residuos al año. Cabe mencionar que el 35% de la basura que México genera se produce en la Ciudad de México, el Estado de México y Jalisco (INEGI, 2014)

## Capítulo 1 Antecedentes de los Residuos Sólidos Urbanos

La Figura 1.8 muestra que a pesar de que el factor de mayor peso es la población del país, los hábitos y la educación ambiental de cada individuo juegan un papel importante al analizar la generación de residuos a un nivel mundial. También se puede observar que es en los países de primer mundo, consumistas, donde la gente produce mayor cantidad de RSU, sin embargo, hay que tomar en cuenta que estos países poseen la tecnología necesaria para la adecuada disposición de los residuos. En México cada persona genera un promedio de 343.1 kilogramos de residuos al año, ciertamente se encuentra en una posición normal, sin embargo, todos los desechos que se producen no tienen una correcta disposición final.



**Figura 1.7** – Los países que más residuos sólidos urbanos generaron en 2014.

Fuente: D Waste, 2019, Municipal Solid Waste generation Recuperado de: <http://www.atlas.d-waste.com/>



**Figura 1.8** Producción de residuos sólidos urbanos per cápita por país.

Fuente: D Waste, 2019, Municipal Solid Waste generation, Recuperado de: <http://www.atlas.d-waste.com/>

## Capítulo 1 Antecedentes de los Residuos Sólidos Urbanos

En la Tabla 1.1 se demuestra nuevamente la hipótesis de que los asentamientos urbanos con mayor población y actividad comercial o industrial son los que generan mayor cantidad de residuos. Hay que dejar claro que la generación de residuos es algo intrínseco de la naturaleza humana y el verdadero problema no es la cantidad de residuos que se generan, sino, qué es lo que sucede con ellos cuando ya no tienen utilidad inmediata para la persona común, es decir, la forma en que se dispone de ellos.

*Tabla 1.1 Los diez estados que más RSU generaron en México en 2014.*

Estado	Producción de RSU en ton/año
Distrito Federal	16,486
Estado de México	13,014
Jalisco	6,944
Veracruz	6,030
Puebla	4,330
Michoacán de Ocampo	4,187
Nuevo León	4,042
Guanajuato	3,838.1
Chihuahua	3,409
Sinaloa	2,990
Tamaulipas	2,943

Fuente: INEGI, 2019. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/temas/residuos/default.html#Tabulados>

El Estado de México se encuentra en el segundo lugar dentro de esta clasificación, los municipios que más aportan a esta cifra son aquellos que se encuentran en el área metropolitana de la Ciudad de México, debido a la gran población que viven en ellos, en la Tabla 1.2, se muestran los municipios del Estado de México que producen la mayor cantidad de basura:

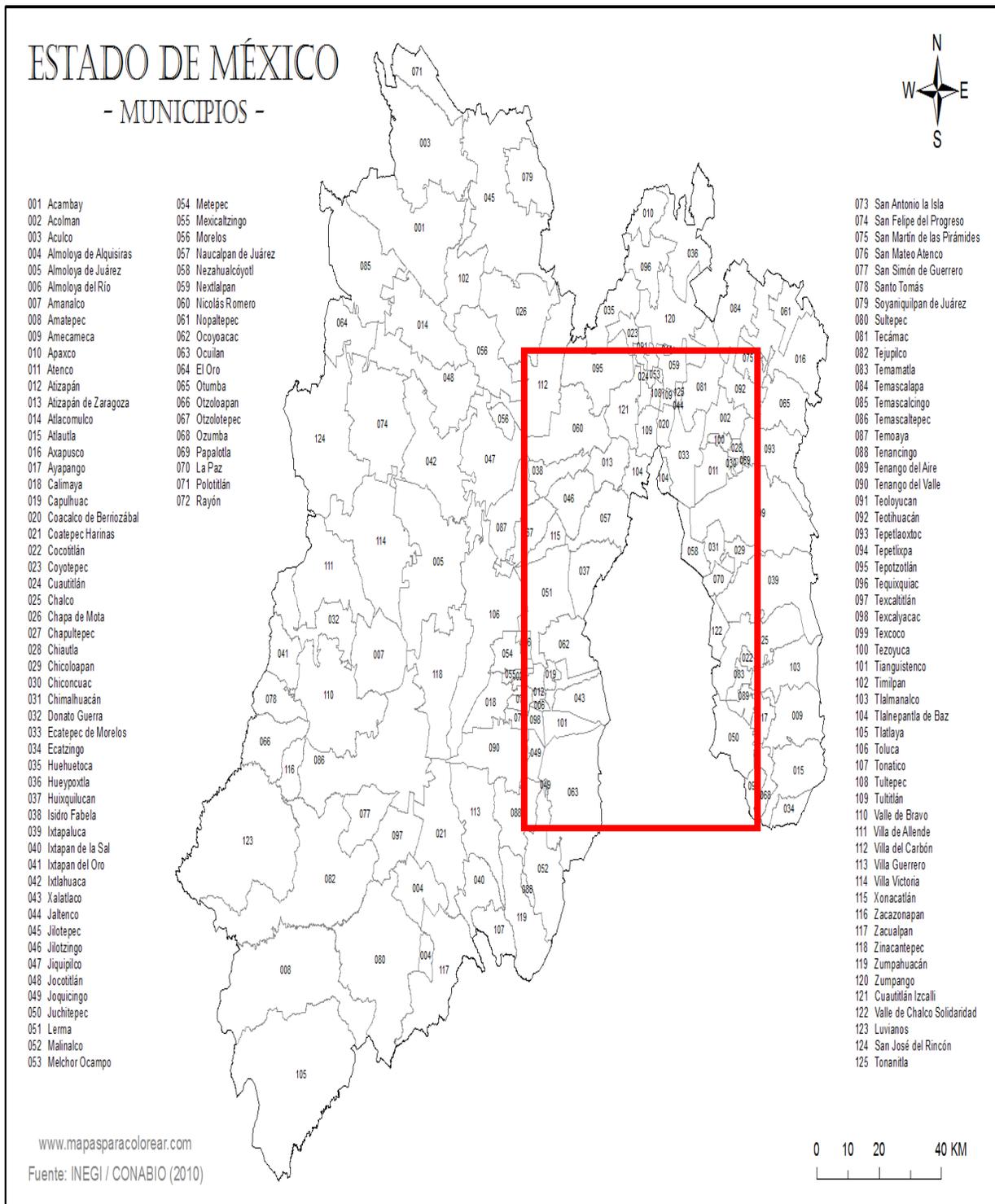
*Tabla 1.2 Municipios que más RSU generaron en el Estado de México.*

Municipio del Edo. Méx.	RSU generados en ton/día	Número de Municipio
Ecatepec de Morelos	3,000	33
Nezahualcōyotl	1,200	58
Tlalnepantla de Baz	608.84	104
Atizapán de Zaragoza	600	13
Toluca	557	106
Naucalpan de Juárez	548.68	57
Valle de Chalco Solidaridad	500	25
Tultitlán	480	109
Chimalhuacán	450	31
Tecámac	404.63	81
Generación Total	8,349	

Fuente: INEGI, 2019. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/temas/residuos/default.html#Tabulados>

## Capítulo 1 Antecedentes de los Residuos Sólidos Urbanos

En la Figura 1.9, dentro de la zona delimitada por un rectángulo, se puede observar la ubicación geográfica de estos municipios (a excepción de Toluca de Lerdo), los cuales representan el 64% de la basura total generada en el Estado de México.



**Figura 1.9 - Municipios que más RSU generaron en el Estado de México.**

Fuente: INEGI/CONABIO, 2010. Recuperado de: <http://www.mapasparacolorear.com/mexico/mapa-estado-mexico-municipios-nombres.png>

Estos municipios tienen infraestructura suficiente para poder recolectar y disponer de sus desechos, ya que dicha infraestructura tiene mucho interés y apoyo debido a que en estos se encuentran los sitios de disposición final que apoyan a la Ciudad de México, lamentablemente, el panorama cambia en el interior del Estado, específicamente en la zona del Valle de Toluca, donde los servicios de recolección son ineficientes, en algunas zonas inexistentes, además de que los sitios de disposición final para el 70% de los residuos son tiraderos a cielo abierto, que como ya se mencionó, son nocivos para la salud y el medio ambiente, principalmente el aire y el agua. En la Tabla 1.3 se muestran los municipios que conforman el Valle de Toluca y su generación de RSU.

Tabla 1.3 Generación de RSU de los municipios del Valle de Toluca.

Municipio	Generación de RSU en toneladas por día	Número de Municipio
Almoloya de Juárez	32	5
Amanalco	5	7
Atlacomulco	97	14
Ixtapan del Oro	5	41
Ixtlahuaca	75	42
Lerma	71.04	51
Metepec	250	54
San Felipe del Progreso	53.42	74
San Mateo Atenco	75	76
Santo Tomas de los Plátanos	8	78
Temoaya	30	87
Tenango del Valle	59.84	90
Toluca	577	106
Valle de Bravo	120	110
Villa Victoria	32	114
Zinacantepec	65	118
<b>Generación Total</b>	<b>1,555.3</b>	

Fuente: INEGI, 2019. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/temas/residuos/default.html#Tabulados>

Estos residuos son llevados a tiraderos de cielo abierto y así ha sido así durante los casi 500 años de existencia de la Ciudad de Toluca, lo que resulta de todo ese tiempo de mala disposición de los RSU es el deterioro para la salud pública y el medio ambiente. Es necesario tomar acciones correctivas de forma inmediata, no para revertir estos daños, sino, para mitigar o al menos controlar los daños que podrían surgir en el futuro de continuar con la práctica de los tiraderos a cielo abierto.

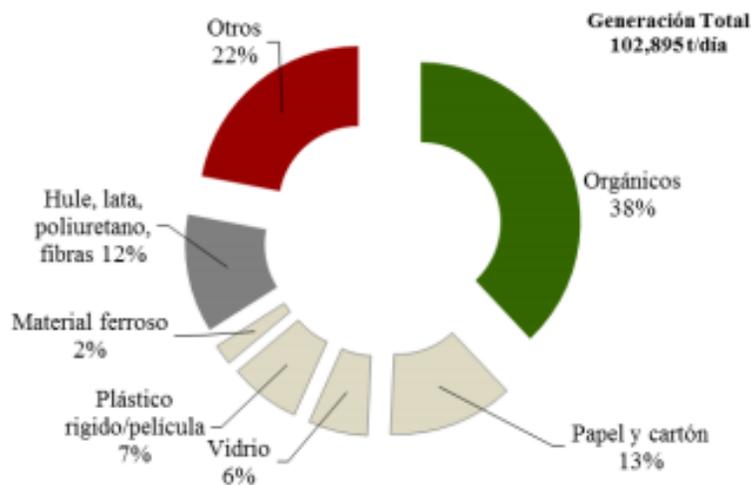
### 1.3 Características y Composición.

Los residuos se definen formalmente como los materiales o productos que se desechan ya sea en estado sólido, semisólido, líquido o gaseoso, que se contienen en recipientes o depósitos, y que necesitan estar sujetos a tratamiento o disposición final con base en lo dispuesto en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR; DOF, 2003). Se clasifican de acuerdo con sus características y orígenes en tres grupos:

residuos sólidos urbanos (RSU), residuos de manejo especial (RME) y residuos peligrosos (RP).

La composición de los RSU en general se asocia a la condición económica de la población, es decir en los países con menores ingresos económicos dominan los residuos con composición orgánica, mientras que en los países con mayores ingresos económicos los principales residuos son los inorgánicos.

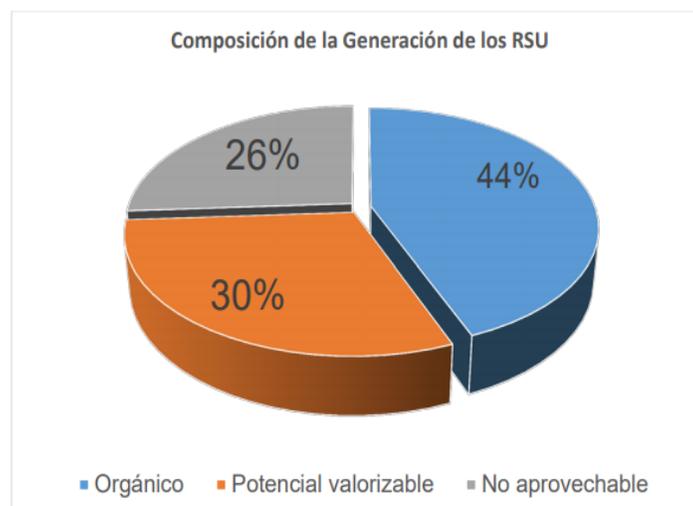
Actualmente en México predomina la composición de residuos orgánicos, pero esto ha ido cambiando ya que, en la década de los años 50, el porcentaje de los residuos orgánicos oscilaba entre el 65% y 70%, mientras que en el 2012 esta cifra se redujo a 38%, la Figura 1.10 muestra los componentes principales de los residuos que se producen en el país.



**Figura 1.10** Componentes de los RSU en México.

Fuente: Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. (2018). Composición de RSU. Recuperado de [http://dsiappsdev.semamat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/PNPGIR%20\\_2017-2018.pdf](http://dsiappsdev.semamat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/PNPGIR%20_2017-2018.pdf)

La Figura 1.11 muestra el porcentaje de la composición de RSU de la Ciudad de México.



**Figura 1.11** Composición de RSU en CDMX.

Fuente: Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial. (2013). Diagnóstico actual del flujo de RSU que se genera en el Distrito Federal. Recuperado de [http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/estudios/flujo\\_residuos\\_DF.pdf](http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/estudios/flujo_residuos_DF.pdf)

La Tabla 1.4 de la composición de Residuos Sólidos Urbanos muestra la composición de éstos, así como el estrato socio económico que se muestreo en algunos municipios del Estado de México.

*Tabla 1.4 Composición porcentual de los RSU en algunos municipios del Estado de México*

Municipio	Estrato	% ORG.	% VAL	%Pot Val	% Otros	% Total
Toluca	Alto	31	30	10	29	100
	Medio	37	31	12	20	100
	Bajo	31	19	11	39	100
Atlacomulco	Alto	48	15	9	27	100
	Medio	19	18	10	53	100
	Bajo	24	25	13	38	100
Valle de Bravo	Alto	43	21	12	24	100
	Medio	45	24	10	21	100
	Bajo	38	20	12	25	100
El Oro	Medio	15	22	16	48	100
	Bajo	14	21	18	46	100

\*ORG. Orgánicos; VAL. Valorizables; Pot Val. Potencialmente Valorizables

\*\*Debido al redondeo de las cifras, es posible que su suma no coincida con los totales indicados

*Fuente: Elaboración propia, con datos de Estudio de valorización y aprovechamiento de residuos sólidos urbanos en el Estado de México por el Centro Mario Molina para Estudios Estrategias, (2015).*

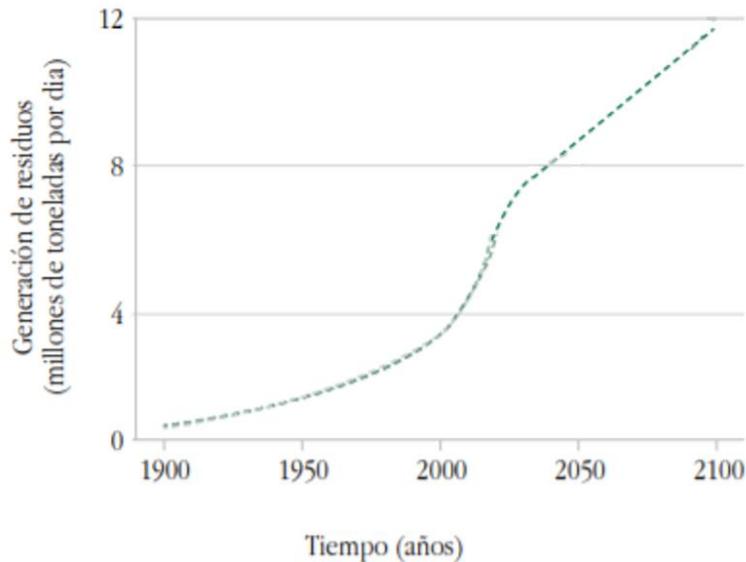
Nota: se entiende como residuos potencialmente valorizables y valorizables como el papel, el cartón, el plástico, el vidrio, y como productos no aprovechables el hule y latas.

Analizando los municipios se podría decir que existe un promedio de porcentaje de composición del 30% de basura orgánica y aproximadamente un 25% de residuos potencialmente valorizables, por lo que se entiende que el 55% de los residuos totales generados pueden ser aprovechados, para un correcto manejo como los que se mencionaran a continuación.

### 1.4 Manejo y control.

Históricamente el ser humano ha tenido que lidiar con sus propios desechos, comenzando con las tribus nómadas, quienes sabían que debían llevar los restos de los alimentos que consumían lejos de sus campamentos, debido al latente peligro de que atrajera depredadores o animales carroñeros, por supuesto, el problema era olvidado al cabo de unos días, debido a que no permanecían prolongado tiempo en un mismo lugar. Posteriormente, con el inicio de la agricultura y el surgimiento de tribus sedentarias, dio origen a la acumulación de residuos. Por supuesto, lo que hacían las diferentes tribus para deshacerse de los residuos cambia de cultura a cultura, pero en general lo que hacían era llevar los residuos lejos de la comunidad para mitigar el fétido olor y el riesgo de atraer depredadores. Es importante mencionar que, hasta la revolución industrial, los residuos eran solamente orgánicos y por lo tanto su periodo de descomposición era relativamente rápido. Todo cambió a comienzos del siglo XX con el inicio de la producción industrial y el consumismo que trajo consigo, y no solo eso, sino también la invención de los plásticos y por lo tanto su posterior desecho desmedido, ya que la gente no estaba consciente de los daños que podría causar y que aun repercuten en la actualidad. En la Figura 1.12 se puede ver el comportamiento de la generación de residuos a

nivel mundial en el último siglo. Es evidente que ha crecido de una forma exponencial y va de la mano con el comienzo de la era moderna.



**Figura 1.12** – Generación de residuos a nivel mundial en los siglos XX y XXI.

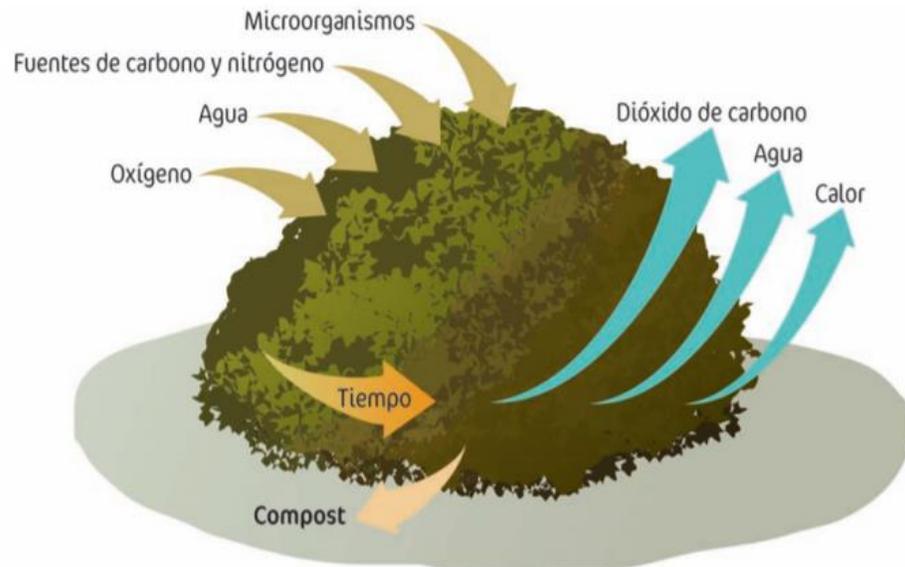
Fuente: Hernández S, Corredor L.; Reflexiones sobre la importancia económica y ambiental del manejo de residuos en el siglo XXI. *Journal of Technology* No. 15 P 60

Esto es un problema a nivel global, ya no es tan sencillo como llevar la basura a un lugar alejado donde se pueda descomponer. Los dos principales factores que convierten a los residuos en un problema son: la cantidad de basura generada, como se ve en la Figura 1.12, antes del siglo XX la cantidad de residuos generados a nivel global era constante y prácticamente inexistente. El segundo factor es la composición de la basura, como ya se mencionó en el subcapítulo anterior existen varios tipos de basura, a grandes rasgos se puede considerar como orgánica e inorgánica, la basura inorgánica es la que genera mayor problema, debido a su largo tiempo de degeneración natural y además de que resulta imposible que vuelva al medio ambiente de manera natural, mientras que la basura orgánica puede descomponerse de manera natural, aunque su desventaja es que el principal foco de generación de enfermedades y fauna nociva (Hernandez S, 2008).

Identificados estos tipos de basura, sus características y los problemas que traen consigo, el ser humano comenzó a idear técnicas adecuadas para su recolección, disposición y, más recientemente, su aprovechamiento. Algunas de dichas técnicas, de acuerdo con el tipo de residuo, son las siguientes:

- Residuos orgánicos
  - Composta: desde el año 74 D.C. se tiene registro de la técnica de composta, es sabido que los antiguos romanos la utilizaban de manera cotidiana para disponer de sus residuos y fertilizar sus cultivos, como lo mencionan en sus tratados de agricultura Plinio el Viejo (Gaius Plinius Secundus, 23 d. C. - 79 d. C.) y Columela (Lucius Junius Moderatus, 4 d. C. - 70 d. C.). La técnica de compostar los residuos es exclusivamente para material orgánico, donde lo que se busca es imitar los procesos naturales de descomposición, es decir, el ciclo de los fitonutrientes que pasan del suelo a las plantas y posteriormente a los animales, incluidos los humanos, para después de un cierto tiempo o proceso regresar al suelo y reiniciar así el ciclo. La composta busca facilitar

el proceso de retorno a los suelos. Se basa en una actividad microbiológica compleja, realizada en condiciones controladas (siempre aerobias y típicamente termófilas). Esta genera un producto estable que se puede almacenar sin inconvenientes y que se debe higienizar sanitariamente. En la Figura 1.13 se puede observar a grandes rasgos el proceso de compostaje (Agencia de residuos de Cataluña, 2016).

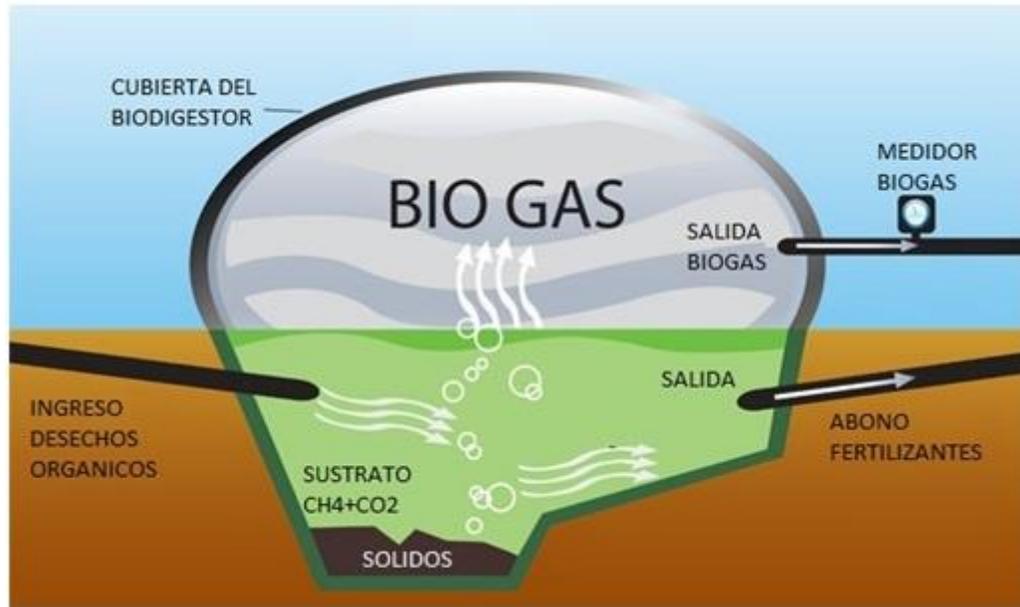


**Figura 1.13-** Representación esquemática del proceso de compostaje.

Fuente: Agencia de Residuos de Cataluña, 2016, Guía práctica para el diseño y la explotación de plantas de compostaje. Recuperada de: [http://residus.gencat.cat/web/.content/home/laagencia/publicacions/form/GuiaPC\\_web\\_ES.pdf](http://residus.gencat.cat/web/.content/home/laagencia/publicacions/form/GuiaPC_web_ES.pdf)

- **Biodigestión anaeróbica:** la biodigestión anaeróbica (BDA) es un proceso de descomposición de materia orgánica, que fue descubierto en 1776 por Alessandro Volta, al observar la presencia de gases combustibles en la superficie de pantanos, lagos y aguas estancadas, inmediatamente lo relacionó con la cantidad de materia orgánica depositada en el fondo, sin embargo, fue hasta 1886 cuando se definió que eran reacciones orgánicas consecuencia de un proceso microbiológico. En la actualidad se sabe que los polímeros complejos presentes en los residuos orgánicos, como lo son las proteínas y los polisacáridos, son degradados en un ambiente anaerobio (libre de oxidantes) mediante un proceso de cuatro etapas: la hidrolítica, la acetogénica, la acidogénica y la metanogénica. El ambiente libre de aire es indispensable para el crecimiento de las bacterias características de cada etapa. Al final del proceso de BDA se obtiene metano, agua y dióxido de carbono principalmente, también algunos gases, como ácido sulfhídrico, amoníaco y monóxido de carbono, dependiendo de la composición de la materia orgánica y la eficiencia del proceso de BDA. Históricamente, esta técnica fue utilizada durante la segunda guerra mundial por granjeros alemanes, franceses e ingleses para producir gas combustible y alimentar sus tractores, también se encuentra el caso de Donald Cameron, quien en 1890 diseñó una gran fosa

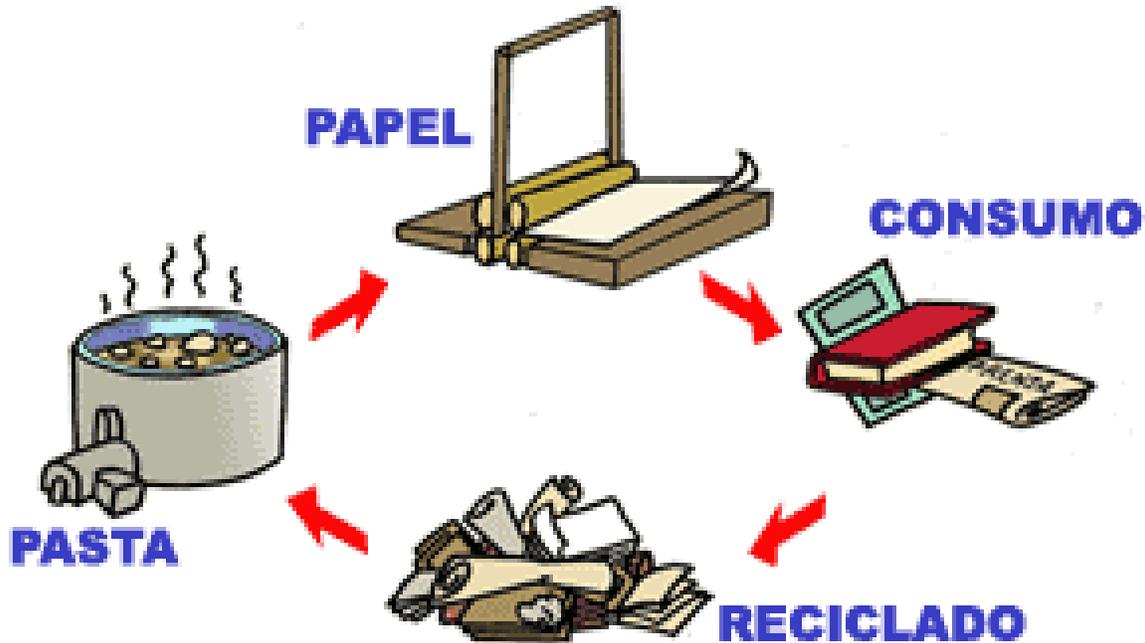
séptica para la Ciudad de Exeter, en Gran Bretaña y con el gas obtenido alimento la red de alumbrado público de la ciudad, sin embargo, con el apogeo de los combustibles fósiles estas técnicas fueron olvidadas. Actualmente países como India, China, Taiwán, Corea, Tailandia y Sudáfrica tienen programas donde fomentan la construcción de digestores anaeróbicos a pequeña escala (familias, pueblos agrícolas), los cuales han tenido buenos resultados con la presencia de miles de pequeños digestores. Cabe mencionar que en estos casos el biogás no recibe ningún tratamiento (El Eco de Sunchales, 2014). La Figura 1.14 ilustra de manera esquemática el proceso de BDA.



**Figura 1.14** - Representación esquemática del proceso de Biodigestión Anaeróbica.

Fuente: El Eco de Sunchales, 2019, Avanza el proyecto de construcción de un biodigestor en Sunchales. Recuperado de: <http://elecodesunchales.com.ar/noticia/101884/avanza-el-proyecto-de-construccion-de-un-biodigestor-en-sunchales>

- Papel y cartón
  - El proceso de reciclaje de papel consiste en destruir las fibras de este mismo, se utiliza agua para formar nuevamente una pasta que posteriormente se mezcla con pasta “nueva”, reduciendo así el consumo de árboles necesarios para producir papel. Cabe mencionar que solo se puede realizar este proceso unas pocas veces, ya que las fibras de papel y cartón empiezan a perder resistencia a nivel molecular y crean un producto final de mala calidad. Estos procesos no son comúnmente utilizados a pequeña escala o en sitios de disposición final, quienes principalmente lo implementan son las grandes productoras de papel y cartón, como Smurfit Kappa o biopappel (Scribe), quienes ven ahorros del 40 al 60% en temas de materia prima y energía, dentro de sus procesos de producción al reciclar papel y cartón. En la Figura 1.15 se muestra de manera esquemática el proceso de reciclaje de cartón.



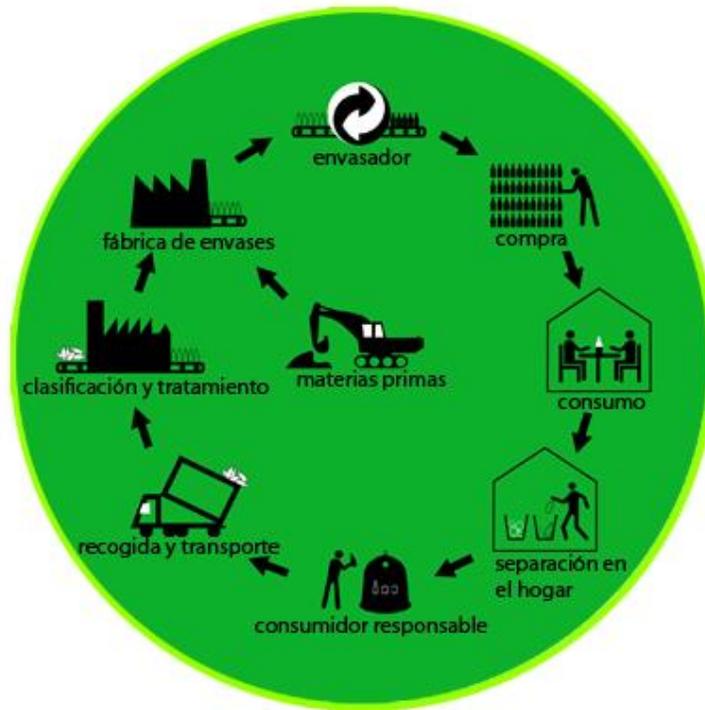
**Figura 1.15-** Representación esquemática del proceso de reciclaje de cartón.

Fuente: Eroski Consumer, 2019, Papel-Cartón. Recuperado de: <http://escuelas.consumer.es/web/es/reciclaje/online/pag0403.php>

- Vidrio

- El reciclaje de vidrio es el más eficiente de todos los procesos por varias razones: primero, cuando se utiliza el vidrio de desecho como materia prima es necesaria solo el 25% de la energía que típicamente se consume cuando se parte desde arena, hidróxido de sodio y caliza, otra razón es que si se recicla una botella de vidrio se puede volver a hacer esa misma botella sin pérdidas y además se podría reciclar un número indefinido de veces sin perder su calidad, como pasa con el plástico y el papel.

El proceso de reciclaje de vidrio comienza con su recolección, posteriormente llega a una planta donde es limpiado de materiales extraños, como las etiquetas, corchos y corcholatas, después es separado por colores y triturado hasta convertirse en un polvo grueso que se denomina calcín. Este polvo se mezcla nuevamente con arena, caliza e hidróxido de sodio para ser llevado a un horno, donde se calienta y se obtiene el vidrio fundido que finalmente es moldeado a la forma deseada. El reciclaje de vidrio es hecho por empresas que lo manufacturan, debido al proceso que conlleva y los ahorros que generan para ellas, cabe mencionar que no es posible mezclar vidrio “común” con algún tipo de vidrio especial, como el *pírex* o el vidrio borosilicatado resistentes a altas temperaturas, ya que alteran las propiedades de fluidez y viscosidad del vidrio fundido al salir del horno (Asociación de Murcia Limpia, 2019). En la Figura 1.16 se muestra de manera esquemática el proceso de reciclaje de vidrio.



*Figura 1.16 – Diagrama esquemático del proceso de reciclaje de vidrio.*

Fuente: Asociación de Murcia limpia, 2019, *Reciclar vidrio ¿Para qué?* Recuperado de: <http://regiondemurcialimpia.es/fracciones-reciclaje/reciclar-vidrio>

- Metales

- La mayoría de los metales de uso común, como el acero, el aluminio, el cobre, son fácilmente reciclables si no están mezclados con otras sustancias, ya que pueden volver a ser fundidos y convertirse en cualquier otro producto. El proceso de reciclaje de este tipo de materiales es bastante sencillo, ya que basta con agregarlos a la fundición para volverlos a procesar y darles una nueva vida útil. Ni siquiera es necesario quitar algunos contaminantes como las etiquetas o incluso la pintura, ya que las temperaturas son tan altas que estas sustancias se descomponen, o en el peor de los casos se retiran como escoria. Este es también un proceso muy rentable, sin embargo, los desechos generados de manera cotidiana que pudieran caer en esta categoría son muy escasos, en realidad los residuos que pasan por este proceso son principalmente equipos viejos, tales como autos, estufas, lavadoras o de manera industrial, tanques, válvulas o bombas obsoletas.

La industria del reciclaje de metales consiste en 4 pasos principales: primero la recolección, que bien puede ser gestionada por la empresa o comprada a los pepenadores, el segundo paso es el procesamiento donde se clasifican los residuos de acuerdo a su material de composición, el tercero es la fragmentación, que se logra mediante molinos de bolas de capacidad industrial, para después compactar la chatarra y por último el proceso de distribución, en el cual llevan los bloques a sus clientes que son principalmente compañías fundidoras que le pueden aprovechar a estos materiales. En la Figura 1.17 se muestra un depósito de chatarra, que ilustra el primer paso del proceso de reciclaje de metales.

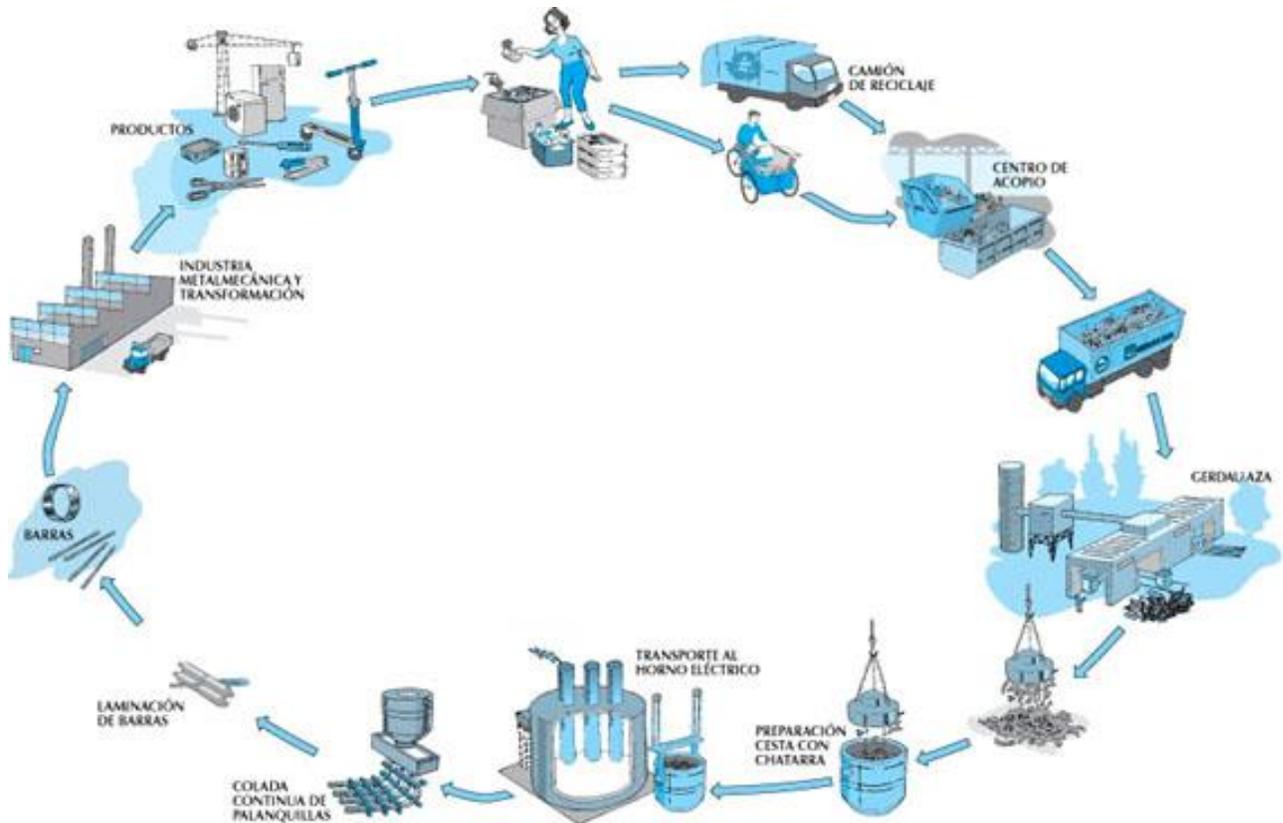


Figura 1.17- Diagrama esquemático del proceso de reciclaje del acero.

Fuente: Ostuacan Chiapas, 2019, Ostuacan, un lugar para unas buenas vacaciones. Recuperado de: <http://ostuacanchiapas.blogspot.com/2011/10/acero-en-proceso.html>

- Plástico

Todos los procesos de reciclaje comienzan con la recolección, la parte de la separación se puede dar desde la fuente de generación o bien en una planta separadora, posteriormente para el plástico se considera que puede ser reciclado de 3 maneras distintas:

- Reciclaje Mecánico: este método consiste en separar los plásticos por clase, como el PET (Polietilen tereftalato), PVC (Policloruro de vinilo), PS (Poliestireno), HDPE (Polietileno de alta densidad), entre otros y llevarlos a un molino para volver a convertirlos en pequeñas partículas (*repelletizarlos*) que posteriormente serán extruidas en un molde para darles una segunda vida. Cada tipo de plástico tiene un proceso de reciclaje distinto, sin embargo, los fabricantes se encargaron en 1988 de estandarizar un número para cada empaque, dependiendo de la resina de la que este hecho. En la Figura 1.18 se puede observar dicha clasificación, la cual también se puede ver en los envases plásticos de uso diario.

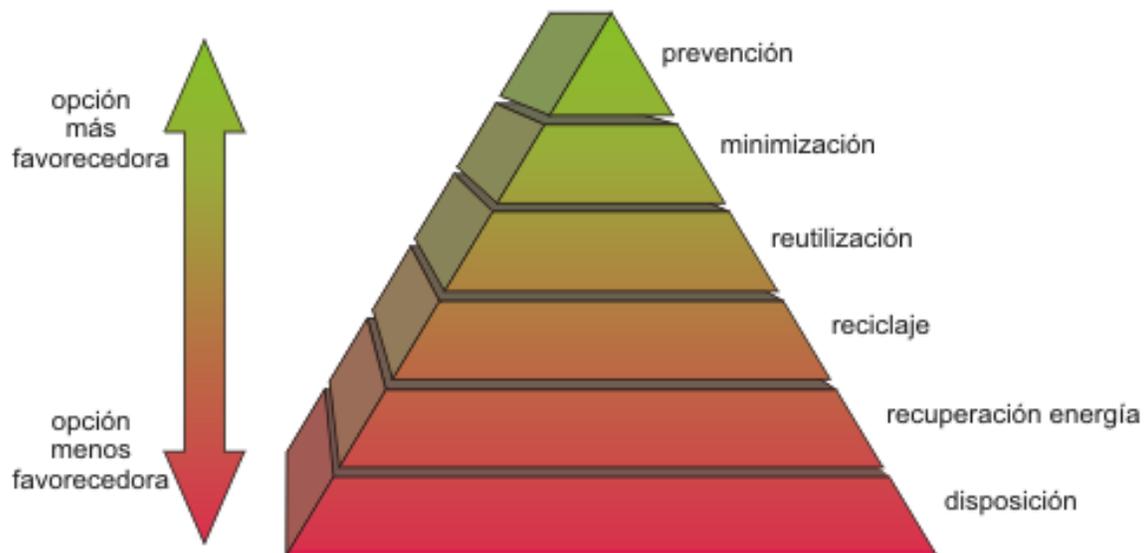


Figura 1.18 Símbolos de la sociedad de la Industria de Plásticos para la identificación de resinas.

Fuente: Sermu Gran. ¿Sabes que significan los símbolos de los envases de plástico? Recuperado de: <http://www.sermugran.es/sabes-que-significan-los-simbolos-de-los-envases-de-plastico/>

- Reciclaje químico: este proceso se considera complementario al reciclaje mecánico y consiste en realizar la degradación del polímero a un nivel molecular, de modo que se vuelven a obtener las estructuras monoméricas que posteriormente son aprovechadas como copolímero en los procesos de creación de plástico. Existen diversas técnicas de degradación, algunas de ellas son:
  - Pirólisis: consiste en la descomposición de las cadenas poliméricas a altas temperaturas ( $>450^{\circ}\text{C}$ ) en ausencia de aire y largos periodos de residencia.
  - Hidrogenación: en este proceso es necesaria la presencia de altas presiones (10 bar) y elevadas temperaturas ( $400\text{-}500^{\circ}\text{C}$ ), además de la presencia de una atmósfera rica en hidrogeno molecular y un catalizador que fomente los enlaces Carbono – Hidrogeno, los cuales son metales del grupo 10.
- Recuperación energética: consiste en la descomposición química de los polímeros, sin embargo, el enfoque del uso es lo que lo distingue, ya que los productos del reciclaje no serán para formar nuevos plásticos sino para obtener combustibles. Estos procesos siguen en desarrollo y hasta el momento solo están en uso en países asiáticos desarrollados, donde utilizan bacterias que se alimentan de polímeros y dan como resultado alcoholes de uno o dos carbonos.

En general, se debe dirigir hacia una gestión integral de los residuos donde la prioridad sea evitar la generación de residuos, el aprovechamiento de estos o en última instancia la correcta disposición de estos para evitar los daños ya mencionados al medio ambiente o a la sociedad (Eco México Social, 2019). La Figura 1.19 ilustra esta prioridad.



**Figura 1.19** – La jerarquía del residuo.

Fuente: Wikipedia, 2019, Gestión de residuos. Recuperado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Gesti%C3%B3n\\_de\\_residuos](https://es.wikipedia.org/wiki/Gesti%C3%B3n_de_residuos)

### 1.5 Normatividad en materia de Residuos Sólidos Urbanos.

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, leyes ambientales, normas oficiales mexicanas y normas mexicanas tienen como objetivo y obligación garantizar el derecho a vivir en un medio ambiente adecuado para el desarrollo, salud y bienestar de los mexicanos.

En el mundo se está prefiriendo fortalecer el derecho ambiental porque es el principio de un desarrollo sustentable. En este asunto México ha recorrido una larga distancia, comenzando por el informe Brundtland (1987) donde algunas naciones discutieron acerca de un desarrollo que garantice las necesidades de un presente sin poner en riesgo un futuro, en el cual el derecho ambiental juegue un papel determinante. Es entonces cuando México estableció la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección Ambiental (Diario Oficial de la Federación, 1988) y sus modificaciones que hasta hoy en día rige.

Entrando en materia legal, el 28 de junio de 1999 en el Diario Oficial de la Federación se publicaron las reformas de los artículos 4° y 27, de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, los que a continuación se presentan.

Artículo 4° párrafo 5.- “Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley”.

Artículo 27 párrafo 3.- “La nación tendrá en todo tiempo el derecho de imponer a la propiedad privada las modalidades que dicte el interés público, así como el de regular, en beneficio social, el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de apropiación, con objeto de hacer una distribución equitativa de la riqueza pública, cuidar de su conservación, lograr el desarrollo equilibrado del país y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural y urbana. En consecuencia, se dictarán las medidas necesarias para ordenar los asentamientos humanos y establecer adecuadas provisiones, usos, reservas y destinos de tierras, aguas y bosques, a efecto de ejecutar obras públicas y de planear y regular la fundación, conservación, mejoramiento y crecimiento de los centros de población; para preservar y restaurar el equilibrio ecológico; para el fraccionamiento de los latifundios; para disponer, en los términos de la ley reglamentaria, la organización y explotación colectiva de los ejidos y comunidades; para el desarrollo de la pequeña propiedad rural; para el fomento de la agricultura, de la ganadería, de la silvicultura y de las demás actividades económicas en el medio rural, y para evitar la destrucción de los elementos naturales y los daños que la propiedad pueda sufrir en perjuicio de la sociedad”.

Para poder seguir garantizando la procuración de un medio ambiente limpio, se le dio peso punitivo a la Ley Federal de Protección Ambiental con su última reforma publicada DOF 07-06-2013, donde es importante para este tema de tesis tener presentes los artículos 11 y 12 que dicen.

Artículo 11.- “La responsabilidad por daños ocasionados al ambiente será subjetiva, y nacerá de actos u omisiones ilícitos con las excepciones y supuestos previstos en este Título<sup>1</sup>.”

En adición al cumplimiento de las obligaciones previstas en el artículo anterior, cuando el daño sea ocasionado por un acto u omisión ilícitos dolosos, la persona responsable estará obligada a pagar una sanción económica. Para los efectos de esta Ley, se entenderá que obra ilícitamente el que realiza una conducta activa u omisiva en contravención a las disposiciones legales, reglamentarias, a las normas oficiales mexicanas, o a las autorizaciones, licencias, permisos o concesiones expedidas por la Secretaría<sup>2</sup> u otras autoridades”.

Artículo 12.- “Será objetiva la responsabilidad ambiental, cuando los daños ocasionados al ambiente devengan directa o indirectamente de:

- I. Cualquier acción u omisión relacionada con materiales o residuos peligrosos;
- II. El uso u operación de embarcaciones en arrecifes de coral;
- III. La realización de las actividades consideradas como Altamente Riesgosas, y
- IV. Aquellos supuestos y conductas previstos por el artículo 1913 del Código Civil Federal”.

Derivado de la Ley Federal de Protección Ambiental, le abre camino a la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (DOF,28-I-1988) y sus modificaciones (DOF 07-06-13), la cual menciona en el artículo 6 que se describe a continuación.

Artículo 6 párrafo 3.- “Las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal que ejerzan atribuciones que les confieren otros ordenamientos cuyas disposiciones se relacionen con el objeto de la presente Ley, ajustarán su ejercicio a los criterios para preservar el equilibrio ecológico, aprovechar sustentablemente los recursos naturales y proteger el ambiente en ella incluidos, así como a las disposiciones de los reglamentos, normas oficiales mexicanas, programas de ordenamiento ecológico y demás normatividad que de la misma se derive”.

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección Ambiental menciona en sus artículos 134, 135 y 136 los que enfatizan en la prevención y control de la contaminación del suelo generada por residuos sólidos.

ARTÍCULO 134.- “Para la prevención y control de la contaminación del suelo, se considerarán los siguientes criterios:

- I. Corresponde al Estado y la sociedad prevenir la contaminación del suelo;
- II. Deben ser controlados los residuos en tanto que constituyen la principal fuente de contaminación de los suelos;
- III.- Es necesario prevenir y reducir la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; incorporar técnicas y procedimientos para su reusó y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final eficientes;

---

<sup>1</sup> La Ley Federal de Protección Ambiental

<sup>2</sup> Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)

IV.- La utilización de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas, debe ser compatible con el equilibrio de los ecosistemas y considerar sus efectos sobre la salud humana a fin de prevenir los daños que pudieran ocasionar, y;

V.- En los suelos contaminados por la presencia de materiales o residuos peligrosos, deberán llevarse a cabo las acciones necesarias para recuperar o restablecer sus condiciones, de tal manera que puedan ser utilizados en cualquier tipo de actividad prevista por el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable”.

ARTÍCULO 135.- “Los criterios para prevenir y controlar la contaminación del suelo se consideran, en los siguientes casos:

I. La ordenación y regulación del desarrollo urbano;

II. La operación de los sistemas de limpia y de disposición final de residuos municipales en rellenos sanitarios;

III.- La generación, manejo y disposición final de residuos sólidos, industriales y peligrosos, así como en las autorizaciones y permisos que al efecto se otorguen”.

ARTÍCULO 136.- “Los residuos que se acumulen o puedan acumularse y se depositen o infiltren en los suelos deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir o evitar:

I. La contaminación del suelo;

II. Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos;

III.- Las alteraciones en el suelo que perjudiquen su aprovechamiento, uso o explotación y

IV.- Riesgos y problemas de salud”.

Por su parte la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR) plantea establecer las bases para regular y controlar los residuos en México desde dos distintas situaciones que son complementarias, la primera es la reglamentación de los servicios urbanos de limpieza y la segunda es como establecer la distribución de los residuos de manera proporcional al volumen y características de estos, que producen los distintos generadores y permitiendo que cada localidad organice sus sistemas de gestión de conformidad con el volumen y tipo de residuos que se generan en ella, atendiendo, entre otros, a los criterios de economía de escala y de prioridad; por ello, es sumamente importante que la reglamentación local de la gestión de los residuos se base en un diagnóstico de la situación al respecto y responda a los principios de mejora y flexibilidad.

En apego al artículo 97 de esta ley, se encuentra la **NOM-083-SEMARNAT-2003**, que establece 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.

En adición a lo anterior, hay otra norma oficial mexicana que es de interés es la **NOM-098-SEMARNAT-2002**, que establece la protección ambiental para la incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes

Al final se encuentran las siguientes normas mexicanas:

**NMX-AA-015-1985**. Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Muestreo - Método de cuarteo.

**NMX-AA-016-1984.**Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de humedad.

**NMX-AA-018-1984.**Protección al ambiente - Contaminación de suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de cenizas.

**NMX-AA-019-1985.**Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Peso volumétrico “in situ”.

**NMX-AA-021-1985.**Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de materia orgánica.

**NMX-AA-022-1985.**Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Selección y cuantificación de subproductos.

**NMX-AA-024-1984.**Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de Nitrógeno total.

**NMX-AA-025-1984.**Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos - Determinación del PH - Método potenciométrico.

**NMX-AA-031-1976.**Determinación de Azufre en desechos sólidos.

**NMX-AA-032-1976.**Determinación de Fósforo total en desechos sólidos (método del fosfavanadomolibdato).

**NMX-AA-033-1985.**Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de poder calorífico superior.

**NMX-AA-052-1985.**Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Preparación de muestras en el laboratorio para su análisis.

**NMX-AA-061-1985.**Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de la generación.

**NMX-AA-067-1985.**Protección al ambiente - contaminación del suelo -Residuos sólidos municipales - Determinación de la relación Carbono / Nitrógeno.

**NMX-AA-068-1986.**Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de Hidrógeno a partir de materia orgánica.

**NMX-AA-080-1986** Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación del porcentaje de Oxígeno en materia orgánica.

**NMX-AA-091-1987** Calidad del suelo – Terminología.

**NMX-AA-092-1984** Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de Azufre.

**NMX-AA-094-1985.**Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de Fósforo total.

La gestión de residuos es tan antigua como la civilización misma, los países desarrollados conocen los riesgos y las técnicas adecuadas para mitigar dichos riesgos desde hace cien años, y, como se describió en este subcapítulo, la República Mexicana cuenta con la regulación necesaria para tener una correcta disposición de residuos desde hace al menos 30 años, entonces, ¿Por qué la situación en México es tan precaria en este aspecto? Lo único que hace falta es una correcta implementación de las normas que rigen desde hace tanto tiempo y para lograr esto es necesario tomar acciones inmediatas y crear conciencia social, que cumpla con la ley.

# Capítulo 2 Ubicación, rutas y generación de RSU en la zona de estudio.

## 2.1 Ubicación geográfica del sitio

Se propone una ubicación geográfica para el sitio de disposición final que esté dentro de las especificaciones de protección ambiental que marca la NOM-083-SEMARNAT-2003 en el punto 6.1 “Restricciones para la ubicación del sitio”. En el subcapítulo 3.4.1 se puede observar a detalle el desarrollo de los criterios para la selección del sitio.

La ubicación propuesta se encuentra en el Estado de México, municipio de Almoloya de Juárez, que tiene una población de 176,237 habitantes (INEGI, 2015), dentro de las localidades de San Cristóbal y el Ejido Loma de Salitre, con una población de 416 y 760 (INEGI, 2005) habitantes respectivamente. De acuerdo con el plan de desarrollo urbano de Almoloya de Juárez que dice, “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”.

En la Figura 2.1 se observa la ubicación exacta del sitio propuesto, con coordenadas: 19.426231, -99.853450. Se puede apreciar que al sur se encuentra la carretera federal número 15, que conecta Ciudad de México con Toluca de Lerdo y a su vez Toluca de Lerdo con Morelia, al noreste se observa la presa Ignacio Ramírez, cuya capacidad es de 36.30 millones de m<sup>3</sup>, cabe mencionar que dicha presa no es un área natural protegida, por lo que no aplica el punto 6.1.2 “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”, además, esto implica que solo se considera un cuerpo de agua, cuyo punto más cercano a la ubicación propuesta es de 2.76 kilómetros, satisfaciendo así la restricción del inciso 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”.



*Figura 2.1 Ubicación del terreno para el sitio de disposición final.*

Fuente: Google Maps. Recuperado de: <https://www.google.com.mx/maps/>

## Capítulo 2 Ubicación, rutas y generación de RSU en la zona de estudio

En la ubicación mencionada se encuentran algunas casas de pobladores, que de acuerdo con los artículos 4 y 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, citados en el capítulo I del presente documento, deberán ser entregadas para beneficio del Estado. De igual forma la Ley del Cambio Climático del Estado de México en el apartado de Exposición de motivos”, párrafo 3, menciona: “... (ii) manejar de modo sustentable los residuos industriales y residenciales, e ...”, en consecuencia, la ubicación propuesta para el sitio de disposición final está alineada con los objetivos estatales y además cumple con la normatividad federal.

En la Figura 2.2 se muestra el terreno propuesto, el cual cuenta con una superficie de 400 Hectáreas y en la Tabla 2.1 se muestran las coordenadas de cada vértice del terreno propuesto para el sitio de manejo integral de RSU.

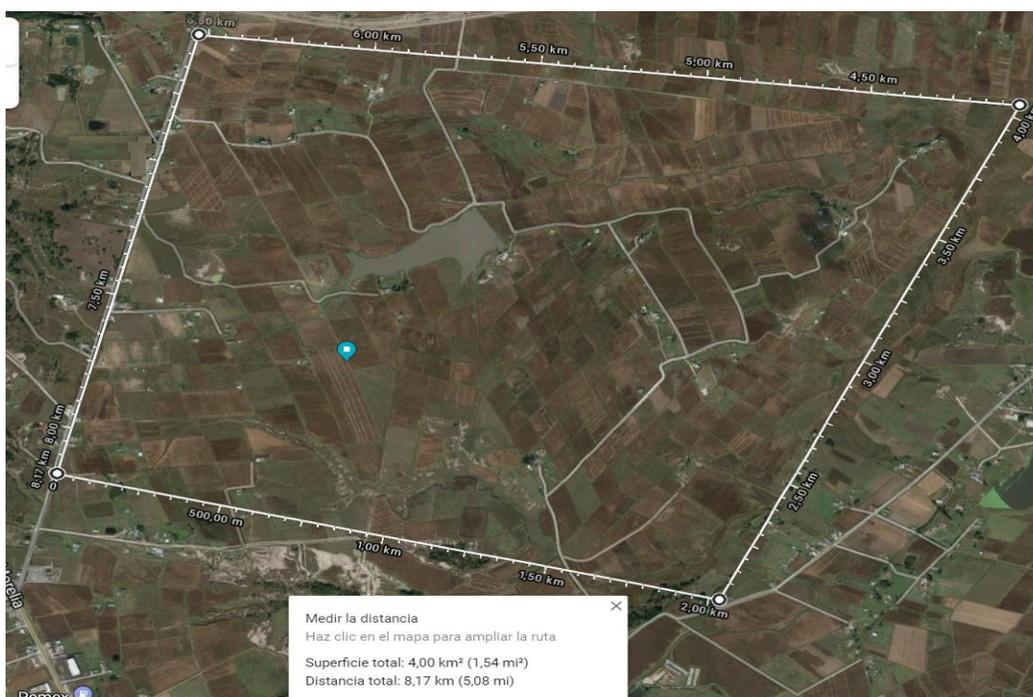


Figura 2.2 Medidas y área superficial del terreno para el sitio de disposición final.

Fuente: Google Maps. Recuperado de: [www.google.com/maps](http://www.google.com/maps)

Tabla 2.1 Coordenadas de los vértices del terreno propuesto para el sitio de manejo integral de RSU

Coordenadas del sitio de manejo integral	
Latitud	Longitud
19.436998	-99.857668
19.422733	-99.861696
19.418551	-99.842693
19.434908	-99.834581

Fuente: Elaboración propia con datos recuperado de GOOGLE MAPS: <https://www.google.com.mx/maps/>

En la Figura 2.3a se puede observar el uso de suelo en el terreno seleccionado, mientras que en la Figura 2.3b se muestran las acotaciones de dicha figura. Se observa que el terreno está destinado a la agricultura de temporal lluvioso, lo que significa que el terreno es un ejido y

## Capítulo 2 Ubicación, rutas y generación de RSU en la zona de estudio

puede, de acuerdo con el artículo 27 de la constitución, citado en el Subcapítulo I.IV del presente documento, el gobierno puede disponer de las tierras ejidales para beneficio de la población en materia ambiental.

Es responsabilidad de los interesados establecer diálogos y acuerdos con los propietarios del terreno y los gobiernos municipales y estatales para hacer uso de los terrenos, de manera que no se afecte a ninguno de los involucrados.



**Figura 2.3a** Uso de suelo en el terreno seleccionado.

Fuente: INEGI, 2019, Uso de Suelo y vegetación. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/temas/ususuelo/>



**Figura 2.3b** Acotaciones de los distintos usos de suelo registrados por el INEGI.

Fuente: INEGI, 2019, Uso de Suelo y vegetación. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/temas/ususuelo/>



### 2.2 Desarrollo social y económico de la zona.

El Estado de México tiene una población total de 16,187,608 habitantes, de los cuales 7,834,068 son hombre y 8,353,540 son mujeres, el municipio de Almoloya de Juárez cuenta con una población total 176, 237 lo cual representa el 1.088% de la población del Estado de México (INEGI, 2019).

La Tabla 2.2 muestra los habitantes de los municipios que se verán beneficiados con la operación del relleno sanitario de acuerdo con el censo de población y vivienda INEGI 2015, sin embargo, se sabe que la población aumenta de manera exponencial, por lo tanto, el diseño del relleno sanitario deberá contemplar el crecimiento demográfico de la zona, por lo que se presenta la Tabla 2.3 con la población estimada en 2050, para más detalles revisar el Anexo 2.

Comparando ambas tablas se puede observar que la población será más del doble en menos de 35 años y en consecuencia la generación de residuos tendrá un crecimiento proporcional que deberá ser considerado para el diseño del relleno sanitario en el siguiente capítulo.

La Tabla 2.4 muestra la cantidad de hombres y mujeres que tiene cada municipio del área de estudio al 2015.

*Tabla 2.2 Población de los municipios de la zona metropolitana del Valle de Toluca.*

Municipio	Población en 2015
Almoloya de Juárez	176,237
Amanalco	24,669
Atlacomulco	100,675
Ixtapan del Oro	6,791
Ixtlahuaca	153,184
Lerma	146,654
Metepec	227,827
San Felipe del Progreso	134,143
San Mateo Atenco	75,511
Santo Tomas de los Plátanos	9,682
Temoaya	103,834
Tenango del Valle	86,380
Toluca	873,536
Valle de Bravo	65,703
Villa Victoria	104,612
Zinacantepec	188,927
Total	2,478,365

*Fuente: Elaboración propia con datos del Consejo Estatal de la Población, por el INEGI, (2015).*

## Capítulo 2 Ubicación, rutas y generación de RSU en la zona de estudio

Tabla 2.3 Población estimada para los municipios de la zona metropolitana de Toluca para el año 2050.

Municipio	Población en 2050
Almoloya de Juárez	496,212
Amanalco	46,603
Atlacomulco	241,194
Ixtapan del Oro	8,323
Ixtlahuaca	330,451
Lerma	441,612
Metepec	450,967
San Felipe del Progreso	269,844
San Mateo Atenco	172,728
Santo Tomas de los Plátanos	15,066
Temoaya	293,747
Tenango del Valle	209,318
Toluca	1,977,791
Valle de Bravo	153,292
Villa Victoria	236,064
Zinacantepec	596,666
Total	5,939,879

Fuente: Elaboración propia con datos del Censo de población y vivienda, INEGI 2015

Tabla 2.4 Características de género por municipio.

Municipio/Género	Hombres	Mujeres
Almoloya de Juárez	86,702	89,535
Amanalco	11,918	12,751
Atlacomulco	48,020	52,655
Ixtapan del Oro	3,426	3,365
Ixtlahuaca	73,286	79,898
Lerma	145,033	148,692
Metepec	110,495	117,332
San Felipe del Progreso	63,833	70,310
San Mateo Atenco	36,719	38,792
Santo Tomas de los Plátanos	6,538	6,752
Temoaya	50,017	53,817
Tenango del Valle	42,014	44,366
Toluca	418,527	455,009
Valle de Bravo	31,980	33,723
Villa Victoria	51,563	53,049
Zinacantepec	92,503	96,424
Total	1,272,574	1,356,470

Fuente: Elaboración propia con datos del Consejo Estatal de la Población, por el INEGI, (2015).

## Capítulo 2 Ubicación, rutas y generación de RSU en la zona de estudio

La Tabla 2.5 muestra la cantidad de localidades urbanas y rurales que tiene cada municipio, lo que será de apoyo para hacer una estimación de la composición que tendrán los RSU que llegarán al sitio de disposición final. Se puede observar que mayormente son localidades rurales, por lo que los RSU tendrán una mayor fracción orgánica. El criterio para clasificar las localidades en las dos categorías mencionadas anteriormente es: de 0 a 2,500 habitantes, localidad rural y más de 2,500 habitantes, localidad urbana (INEGI, 2019).

La población económicamente activa (PEA) se clasifica en tres sectores económicos: primario, que son las actividades de extracción de recursos naturales, secundario, que son las actividades de transformación de la materia y manufactura y el sector terciario, que son quienes se dedican a prestar servicios a un consumidor final. En la Tabla 2.6 se observa la distribución de la población económicamente activa por sector económico, para visualizar el cálculo revisar el Anexo 3. Esta información es útil para la elaboración del capítulo III, ya que con ella se pueden conocer las actividades económicas de cada municipio y, por lo tanto, inferir la composición de sus residuos.

En la Tabla 2.7 se presenta la distribución por sectores económicos de la población femenina económicamente activa, cabe mencionar que en los municipios de interés solamente el 7.7% de la PEA son mujeres, lo que demuestra que la mayor parte de la población femenina en los municipios de interés se dedica a actividades domésticas.

*Tabla 2.5 Estatus socioeconómico de las localidades de cada municipio.*

Municipio	Rural	Urbano
Almoloya de Juárez	85.57%	14.42%
Amanalco	96.77%	3.23%
Atlacomulco	85.93%	14.06%
Ixtapan del Oro	100.00%	0.00%
Ixtlahuaca	66.66%	33.33%
Lerma	81.69%	18.31%
Metepec	50%	50%
San Felipe del Progreso	87.50%	12.5%
San Mateo Atenco	50%	50%
Santo Tomas de los Plátanos	100%	0%
Temoaya	82.53%	17.47%
Tenango del Valle	77.50%	22.50%
Toluca	69.00%	31.00%
Valle de Bravo	97.29%	2.71%
Villa Victoria	96.22%	3.78%
Zinacantepec	76.78%	23.22%
Promedio	81.47%	18.53%

Fuente: Elaboración propia con datos de los planes de desarrollo urbano de cada municipio, recuperados de: [http://coespo.edomex.gob.mx/sites/coespo.edomex.gob.mx/files/files/coespo\\_pdf\\_cdnestad15.pdf](http://coespo.edomex.gob.mx/sites/coespo.edomex.gob.mx/files/files/coespo_pdf_cdnestad15.pdf)

## Capítulo 2 Ubicación, rutas y generación de RSU en la zona de estudio

*Tabla 2.6 Clasificación de las localidades de los municipios de interés por su sector económico.*

Municipio	Sector Primario	Sector Secundario	Sector Terciario	No específico
Almoloya de Juárez	18%	40%	38%	3%
Amanalco	48%	24%	26%	2%
Atlacomulco	16%	24%	58%	2%
Ixtapan del Oro	57%	16%	25%	2%
Ixtlahuaca	16%	37%	42%	5%
Lerma	6%	49%	41%	4%
Metepec	2%	29%	65%	4%
San Felipe del Progreso	33%	33%	32%	3%
San Mateo Atenco	2%	52%	44%	3%
Santo Tomás	29%	23%	43%	5%
Temoaya	18%	22%	57%	3%
Tenango del Valle	32%	23%	43%	2%
Toluca	2%	32%	62%	4%
Valle de Bravo	11%	25%	61%	4%
Villa Victoria	31%	37%	28%	4%
Zinacantepec	9%	39%	48%	4%

Fuente: Elaboración propia con información del censo de población y vivienda, INEGI (2000). Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2000/default.html#Tabulados>

*Tabla 2.7 Clasificación de las localidades de los municipios de interés por su sector económico, considerando solamente la población femenina.*

Municipio	Sector Primario	Sector Secundario	Sector Terciario	No específico
Almoloya de Juárez	5%	16%	74%	5%
Amanalco	22%	7%	67%	4%
Atlacomulco	5%	18%	74%	3%
Ixtapan del Oro	20%	8%	69%	3%
Ixtlahuaca	5%	38%	51%	6%
Lerma	1%	37%	56%	5%
Metepec	0%	15%	80%	5%
San Felipe del Progreso	16%	7%	72%	5%
San Mateo Atenco	0%	35%	60%	4%
Santo Tomás	5%	8%	79%	9%
Temoaya	7%	17%	73%	4%
Tenango del Valle	9%	19%	69%	3%
Toluca	1%	19%	76%	5%
Valle de Bravo	2%	6%	87%	5%
Villa Victoria	16%	7%	70%	7%
Zinacantepec	2%	18%	74%	6%

Fuente: Elaboración propia con información del censo de población y vivienda, INEGI (2000). Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2000/default.html#Tabulados>

## Capítulo 2 Ubicación, rutas y generación de RSU en la zona de estudio

Nuevamente, este hecho permite inferir que los residuos que se dispondrán en el sitio y que sean recolectados en las casas habitación, deberán tener una mayor fracción orgánica.

Es importante hacer mención de que la información que se muestra en la Tabla 2.7 tiene 19 años de antigüedad esto debido a que los censos de población y vivienda del INEGI 2005 y 2010 no muestran una clasificación de la PEA por sectores económicos, sin embargo, es necesario conocer las actividades económicas que predominan en la zona de interés, para tener un panorama más acorde a la actualidad en la Tabla 2.8 se compara la PEA del 2000 contra la del 2010.

*Tabla 2.8 Población económicamente activa 2000 y 2010 en los municipios de interés.*

Municipio	PEA 2000	PEA 2010
Almoloya de Juárez	28,897	48,703
Amanalco	4,582	6,950
Atlacomulco	22,759	33,037
Ixtapan del Oro	1,472	1,949
Ixtlahuaca	30,058	49,107
Lerma	31,925	49,546
Metepec	72,668	87,780
San Felipe del Progreso	36,724	36,018
San Mateo Atenco	20,533	28,009
Santo Tomas de los Plátanos	1,871	2,883
Temoaya	18,210	31,042
Tenango del Valle	19,848	28,039
Toluca	232,761	322,928
Valle de Bravo	16,872	23,465
Villa Victoria	17,868	29,153
Zinacantepec	35,386	58,912
<b>Total</b>	<b>569,698</b>	<b>837,521</b>

Fuente: Elaboración propia con datos de los censos de población y vivienda INEGI 2000 y 2010. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv>

Todos los datos presentados en el actual subcapítulo son las bases para un adecuado diseño del sitio de disposición final, haciendo hincapié en la cantidad (datos sociales de la población) y composición de los RSU, (datos del crecimiento económico de la población) que se recibirán diariamente, lo cual es un factor determinante a la hora de definir el tiempo de vida útil del sitio y por lo tanto el bienestar que le traerá a la población. También resultan útiles para planear la logística de recolección y transporte al sitio de disposición final que es necesaria para satisfacer las necesidades de la población en términos de disposición de RSU y no se debe pasar por alto que los datos serán útiles para el cálculo de la cantidad de camiones recolectores que se deberán adquirir para satisfacer la necesidad de transporte de residuos desde el inicio de operaciones del sitio hasta cierre de este.

### 2.3 Vías de comunicación

El sistema de recolección de RSU consiste comúnmente en camiones con rutas definidas que pasan por los sitios generadores, domiciliarios y no domiciliarios, los domiciliarios tienen a su vez métodos de almacenamiento con capacidad de contener los residuos hasta que el camión recolector disponga de ellos, estos métodos pueden ser de almacenamiento interno o externo, en el primero, el contenedor se encuentra dentro de la vivienda, mientras que, en el segundo, el contenedor tiene un lugar específico fuera de la vivienda. Los no domiciliarios son aquellos que se realizan en diversas fuentes generadoras, como son: comercios, mercados, tiendas de auto servicio, terminales, plantas industriales, etc. En algunos de estos sitios no domiciliarios las empresas contratan un servicio de recolección particular, ya que los servicios públicos no son capaces de satisfacer la necesidad de recolección de la gran cantidad de residuos generados. Una vez que los camiones recolectores, públicos o particulares, alcanzan su máxima capacidad de residuos compactados se dirigen a un sitio de disposición final. Usualmente dichos camiones no realizan una sola recolección en el día, por eso la importancia de que un sitio de disposición final cuente con vías terrestres de comunicación hacía las comunidades a las que les brinda el servicio, es importante que dichas vías estén diseñadas para el tránsito continuo de transporte pesado.

Por lo anteriormente dicho, es fundamental que en el diseño de un sitio de disposición final se contemplen las rutas terrestres por las que llegarán los servicios de recolección, el sitio propuesto cuenta con las siguientes vías de comunicación:

- Al Norte se encuentran los municipios de: Atlacomulco, Ixtlahuaca y San Felipe del Progreso. Para el municipio de San Felipe del Progreso, se debe tomar la avenida principal hacia el este durante 15 km hasta entroncar la carrera federal 55D que posteriormente se seguirá en dirección sur, durante 53 km, hasta el poblado de San Cayetano de Morelos. Para los municipios de Atlacomulco e Ixtlahuaca la ruta es directamente por la carretera federal 55D, dirigiéndose hacia el sur durante 60 km y 32 km respectivamente, hasta llegar al poblado de San Cayetano de Morelos. Una vez que los camiones recolectores provenientes de los municipios mencionados lleguen al poblado deberán seguir por la carretera federal 7D dirección oeste durante 10 km, hasta llegar al poblado de San Pedro de Hortaliza, donde se incorporarán a la carretera federal 15 dirección Morelia durante 8.5 km, hasta llegar al libramiento de la carretera federal 385, donde girarán al norte y al cabo de 500 m llegarán al sitio de disposición final.
- Al Este se encuentran los municipios de: Lerma, San Mateo Atenco y Temoaya. Para el Municipio de Temoaya se deberá tomar la carretera federal número 53 hacia el libramiento a la carretera número 6D durante 6.7 km, una vez entroncada la carretera federal número 6D se deberá seguir por dicha carretera en dirección oeste durante 21.2 km hasta el libramiento de la carretera número 15 en el poblado de San Pedro de Hortaliza. Para los municipios de Lerma y San Mateo Atenco la ruta es directamente sobre la carretera 6D, con dirección al norte y se deberá seguir durante 40 y 43 km respectivamente, hasta llegar al libramiento de la carretera federal número 15 que se

encuentra en el poblado de San Pedro la Hortaliza. Una vez que los camiones recolectores provenientes de los municipios mencionados lleguen al poblado deberán incorporarse a la carretera federal 15 dirección Morelia durante 8.5 km, hasta llegar al libramiento de la carretera federal 385, donde girarán al norte y al cabo de 500 m llegarán al sitio de disposición final.

- Al Sur se encuentran los municipios de: Metepec, Tenango del Valle, Toluca y Zinacantepec. Para el municipio de Tenango del Valle se deberá tomar la carretera federal número 55 en dirección norte durante 23 km hasta entroncar con Av. Solidaridad las Torres en Toluca de Lerdo, de igual forma los camiones recolectores provenientes del municipio de Metepec deberán llegar a la Av. Solidaridad las Torres y seguirla dirección oeste hasta el final de esta en el municipio de Zinacantepec donde entroncarán con la carretera federal 15. Cabe mencionar que los camiones del municipio de Toluca también deberán llegar al entronque de Zinacantepec con la carretera 15. Una vez en la carretera federal 15 continuarán en dirección oeste durante 22.5 km, hasta llegar al libramiento de la carretera federal 385, donde girarán al norte y al cabo de 500 m llegarán al sitio de disposición final.
- Al Oeste se encuentran los municipios de: Villa Victoria, Amanalco, Valle de Bravo, Santo Tomás, Ixtapan del Oro. Los municipios de Ixtapan del Oro y Santo Tomás tienen una población muy pequeña, por lo que se considera que llevarán sus residuos al municipio de Valle de Bravo una vez a la semana y serán transportados al sitio de disposición junto con los generados en este municipio por la carretera federal número 15, en dirección norte durante 62 km. De igual forma para el municipio de Villa Victoria se deberá seguir la calle Abelardo Rodríguez en dirección sur durante 3 km hasta entroncar la carretera federal número 15 que seguirá en dirección este durante 15 km. Desde los municipios de Villa Victoria y Valle de Bravo se llegará al libramiento de la carretera federal 385, donde girarán al norte y al cabo de 500 m llegarán al sitio de disposición final.

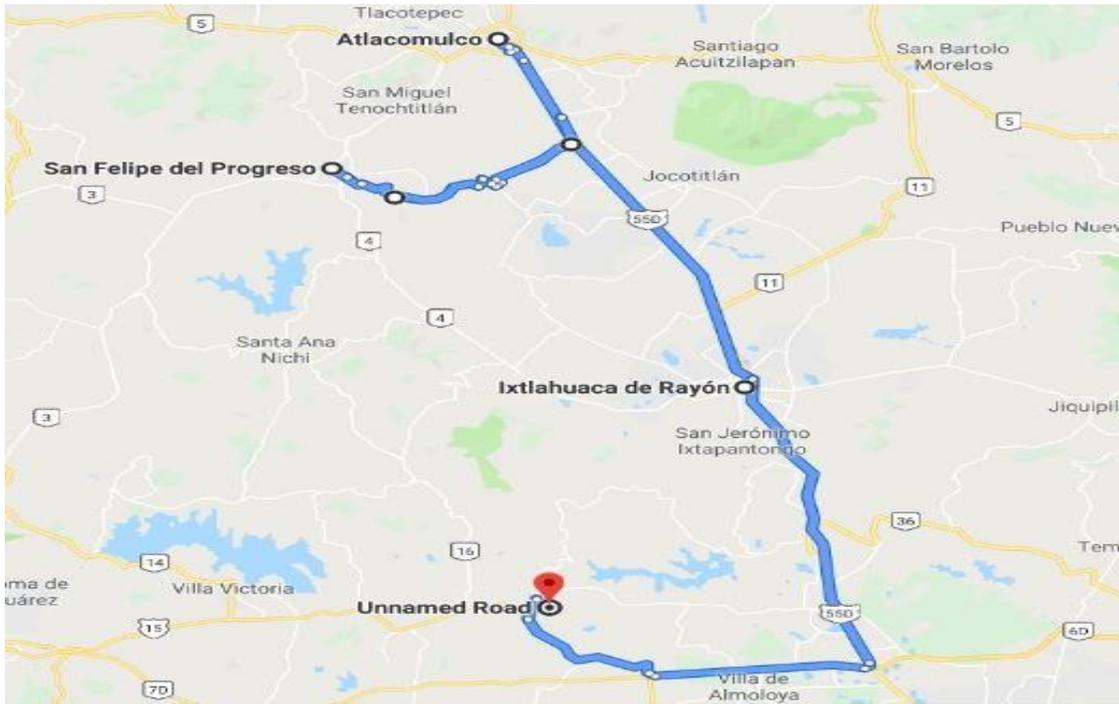
En las Figuras 2.5, 2.6, 2.7 y 2.8 se muestran las rutas de los municipios al Norte, Este, Sur y Oeste, respectivamente, de acuerdo con lo que se describió con anterioridad.

El tiempo promedio de llegada, desde los municipios más alejados por punto cardinal, que son Atlacomulco al Norte, San Mateo Atenco al Este, Tenango del Valle al Sur y Valle de Bravo al Oeste, es de 1 hora con 30 minutos, lo cual implica que los transportistas podrían realizar al menos dos recolecciones por jornada laboral y por lo tanto la ubicación seleccionada seleccionada cuenta con suficientes y adecuadas vías de comunicación para la llegada de dichos camiones recolectores.

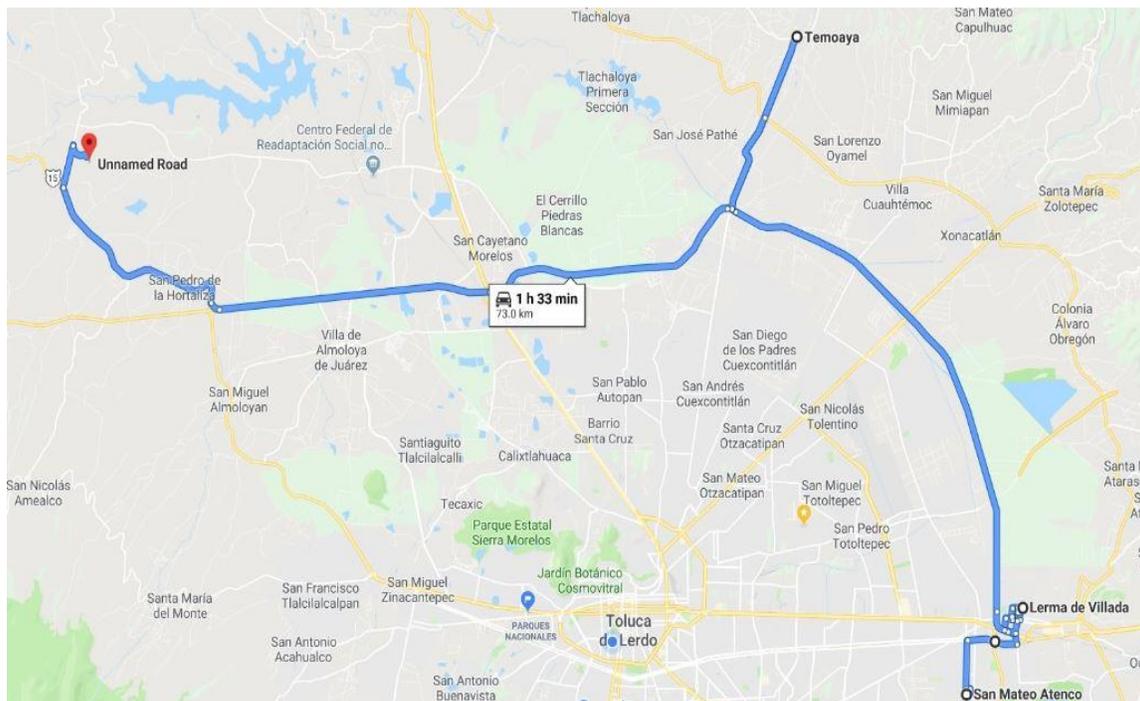
También se puede observar en las Figuras mencionadas con anterioridad y en las descripciones de ruta, que los trayectos de los camiones recolectores de los municipios por cuadrante cardinal se unen en una misma vía de comunicación en un punto determinado, lo que es una situación viable para la construcción de estaciones de transferencia, donde se puedan concentrar los residuos de los municipios más alejados del sitio de disposición final

## Capítulo 2 Ubicación, rutas y generación de RSU en la zona de estudio

y acopiar dichos residuos en el municipio más cercano. Dichas estaciones traerían beneficios económicos en términos de recolección y transporte al sitio de disposición final.

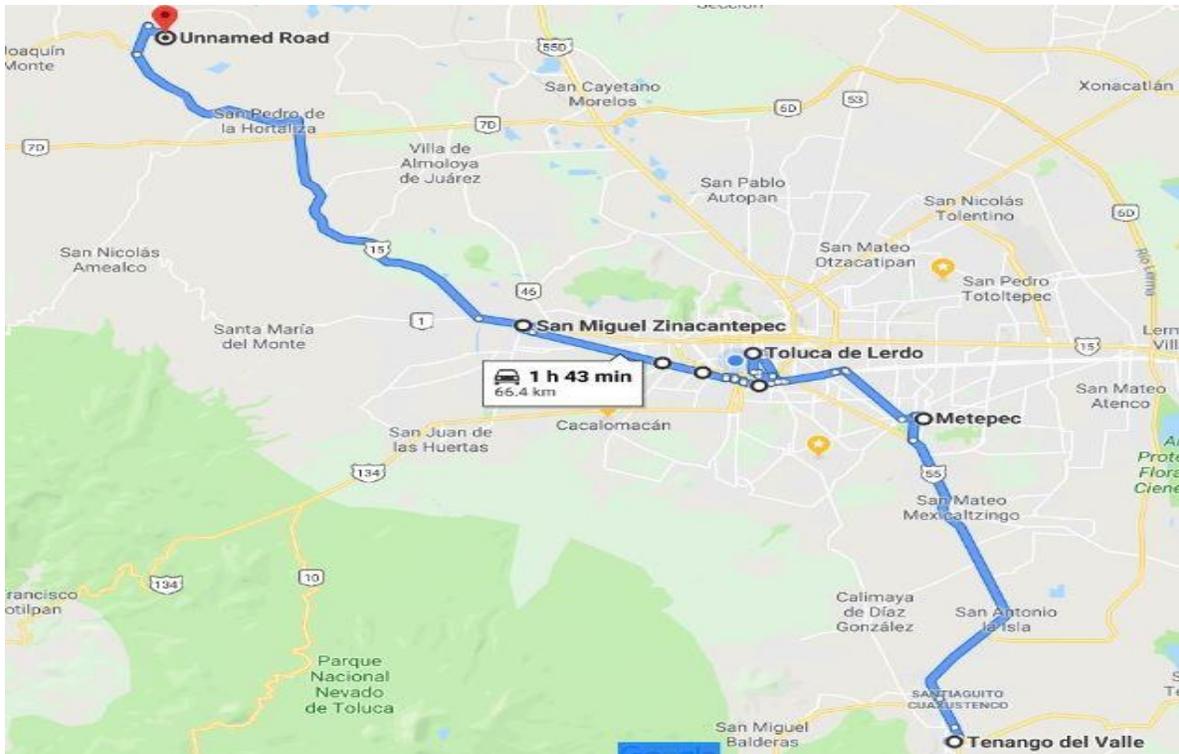


*Figura 2.5 Vías de comunicación terrestre para los municipios al Norte del sitio de disposición final.  
Fuente: Elaboración propia. Recuperado de: Google Maps*



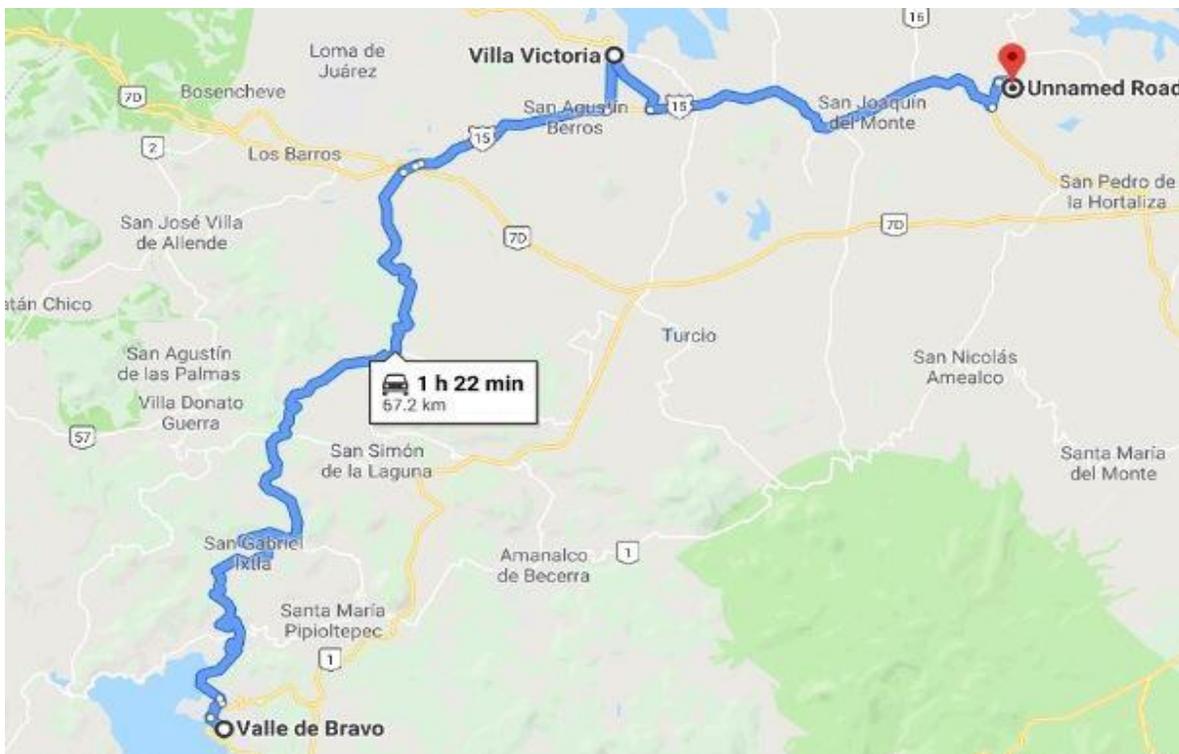
*Figura 2.6 Vías de comunicación terrestre para los municipios al Este del sitio de disposición final.  
Fuente: Elaboración propia. Recuperado de: Google Maps*

## Capítulo 2 Ubicación, rutas y generación de RSU en la zona de estudio



*Figura 2.7 Vías de comunicación terrestre para los municipios al Sur del sitio de disposición final.*

*Fuente: Elaboración propia. Recuperado de: Google Maps*



*Figura 2.8 Vías de comunicación terrestre para los municipios al Oeste del sitio de disposición final.*

*Fuente: Elaboración propia. Recuperado de: Google Maps*

### 2.4 Plan Regional de Desarrollo

“Un plan de desarrollo urbano es el instrumento rector en materia de ordenamiento territorial que establece las estrategias territoriales para orientar el desarrollo urbano y regional en la entidad... El plan tiene como propósito establecer los objetivos, políticas y estrategias del ordenamiento territorial de los asentamientos humanos del Estado, así como los criterios básicos para el desarrollo urbano de sus centros de población” (Gobierno del Estado de México, 2019), dicha herramienta es utilizada en todo el mundo y debe ser regulada de acuerdo con los estándares de cada país, en México la Ley General de Asentamientos humanos, ordenamiento territorial y desarrollo urbano regula las leyes estatales en materia de distribución de la población y uso del territorio, además de asegurarse que exista coordinación entre la federación, los estados y sus municipios.

Para el Estado de México la Ley de Asentamientos humanos del Estado de México, en el Artículo 30 menciona: “Los planes municipales de desarrollo urbano y los de centros de población, así como los planes parciales que deriven de este último se someterán al siguiente procedimiento:

- I. El ayuntamiento en sesión de cabildo, acordará que se elabore el correspondiente plan y resolverá la forma en que este se lleve a cabo, en la misma sesión se dispondrá a encomendar a la comisión de planeación para el desarrollo del municipio o a quien se designe al efecto, que tome a su cargo las gestiones necesarias para el cumplimiento de estos acuerdos.
- II. La comisión de planeación para el desarrollo del municipio, coordinará las consultas que efectuarán los consejos de participación ciudadana para recabar la opinión de la comunidad, misma que se harán en la forma establecida en esta Ley y demás ordenamientos aplicables.
- III. Una vez terminado el proyecto del plan de que se trate, el ayuntamiento recabará de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas el dictamen de congruencia de este con el Plan Estatal de Desarrollo Urbano.
- IV. El ayuntamiento aprobará formalmente el respectivo plan en sesión de cabildo y lo someterá con todos sus antecedentes a la aprobación definitiva de la Legislatura, salvo en el caso de los planes parciales, que aprobará directamente.”

Una vez aprobado el plan de desarrollo urbano de acuerdo con lo citado en el Artículo 30 de la Ley de Asentamientos humanos del Estado de México, cada municipio publica su plan de desarrollo urbano en la página web del gobierno del Estado de México donde toda la población puede consultarlos.

El terreno seleccionado para el sitio de disposición final se encuentra en el municipio de Almoloya de Juárez, cuyo plan de desarrollo urbano (PDU) 2018 menciona que en el manejo de los residuos sólidos es una de las fuentes que más degrada el suelo, la región I (Toluca) destaca por el volumen de residuos sólidos recolectados, más de 539,000 toneladas que se considera solo representa el 35% del total que se genera. Los rellenos sanitarios en operación se encuentran en los municipios de San Antonio la Isla y Zinacantepec, en los cuales se dispone solo un 10% del total producido, el resto del volumen recolectado se desecha en otros

## Capítulo 2 Ubicación, rutas y generación de RSU en la zona de estudio

sitios de disposición final, controlados y no controlados, así como en otros sitios de otros municipios.

El PDU también menciona que el municipio carece de un centro de depósito de residuos sólidos urbanos, actualmente son llevados al relleno sanitario del municipio de Zinacantepec (en proceso de clausura) y pretenden crear un tiradero municipal a cielo abierto, relleno sanitario o socavón, para recolectar las 45 mil toneladas que generan actualmente, situación que resulta favorecedora para el presente trabajo.

El servicio de recolección se realiza solo en los centros urbanos, es decir en el 15% de las localidades, por medio de nueve camiones recolectores de basura, mientras que en el 85% restante aún se practica la quema de basura, debido a la ausencia de formulación y difusión de programas dirigidos a dicho segmento de la población para que separen sus residuos. Esta situación presenta una oportunidad para disminuir las emisiones de gases de efectos invernadero mediante la creación de un relleno sanitario en su localidad, apegado a la normatividad federal, estatal y el plan de desarrollo urbano del municipio de Almoloya.

En la Tabla 2.9 se muestra el sitio de disposición final donde cada municipio deposita sus RSU de acuerdo con la información publicada en sus planes de desarrollo urbano. También es importante mencionar que en los planes mencionados se externa la necesidad de un sistema regional de gestión de RSU junto con un sitio regional para la disposición final de los residuos, en beneficio de los habitantes de estos municipios ya que actualmente se cuenta con poca o nula infraestructura, así como desconocimiento del paradero del más del 70% de la basura recolectada.

*Tabla 2.9 Sitios de disposición final para los RSU de cada municipio.*

<b>MUNICIPIO</b>	<b>Sitio de Disposición</b>	<b>Municipio</b>
Almoloya de Juárez	Relleno Sanitario	Zinacantepec
Amanalco	Relleno Sanitario	Zinacantepec
Atacomulco	Relleno Sanitario	Atacomulco
Ixtapan del Oro	Tiradero a cielo abierto	Comunidad Calera de los Gallos
Ixtlahuaca	Tiradero a cielo abierto	Ixtlahuaca
Lerma	Relleno Sanitario	Xonacatlán
Metepec	Relleno Sanitario	San Antonio la Isla
San Felipe del Progreso	Tiradero a cielo abierto	San Felipe del Progreso
Santo Tomas de los P.	Tiradero a cielo abierto	Santo Tomás de los Plátanos
Temoaya	Relleno Sanitario	Xonacatlán
Tenango del Valle	Tiradero a cielo abierto	Tenango del Valle
Toluca	Relleno Sanitario	Zinacantepec y San Antonio.
Valle de Bravo	Relleno Sanitario	Valle de Bravo
Villa Victoria	Tiradero a cielo abierto	Villa Victoria
Zinacantepec	Relleno Sanitario	Zinacantepec

*Fuente: Elaboración propia con datos de los planes de desarrollo municipal. Recuperado de: [http://seduym.edomex.gob.mx/planes\\_municipales\\_de\\_desarrollo\\_urbano](http://seduym.edomex.gob.mx/planes_municipales_de_desarrollo_urbano).*

Los planes de desarrollo urbano de los municipios de interés hacen hincapié en la necesidad de mejorar el actual sistema de manejo de RSU, incluso el PDU de Toluca y Metepec mencionan que la falta de actualización en la estrategia de recolección y disposición es obsoleta, y sería importante para el desarrollo sustentable de la región, implementar un relleno sanitario regional junto con estaciones de transferencia, dado que la estrategia actual data de hace más de 30 años.

La mayoría de los residuos son llevados a tiraderos de cielo abierto y al relleno sanitario de Zinacantepec, que como ya se mencionó anteriormente, se encuentra en puertas de clausura debido a su mala operación, lo que significa que el 26% de los municipios de interés, que son los que más RSU generan, se verán en la necesidad de buscar un nuevo sitio de disposición final.

De acuerdo con el plan de desarrollo estatal del Estado de México, a diciembre de 2017 se llevaban 7 mil 637 toneladas diarias a 19 rellenos sanitarios distribuidos en el Estado y adicionalmente se apoya a la Ciudad de México con 8 mil 500 toneladas al día en 4 rellenos sanitarios, además de que ninguno de estos rellenos sanitarios aprovecha el biogás para la generación de energía. En el punto 3.2.2 del PDU del Estado de México menciona: “3.2.2. ESTRATEGIA: Fomentar la reducción, reciclaje y reutilización de desechos urbanos, industriales y agropecuarios, así como mejorar su gestión. Líneas de Acción:

- Promover una cultura de reciclaje y reducción de desechos entre los diferentes sectores de la sociedad.
- Fomentar la separación de residuos desde la fuente para su reutilización o reciclaje.
- Impulsar el saneamiento de tiraderos clandestinos en apego a la normatividad ambiental.
- Aprovechar los residuos sólidos urbanos y agropecuarios para la generación de biogás como fuente de energía.
- Establecer una visión metropolitana en la gestión de residuos sólidos urbanos.” (Gobierno del Estado de México, 2019)

Por lo que se puede decir que la presente tesis se adecua a los objetivos y estrategias del actual gobierno estatal y municipal, así como a las regulaciones federales, estatales y municipales. Todo esto da expectativas favorables para continuar con el diseño de un sitio de disposición final clase A junto con un sistema de gestión de residuos a nivel regional.

# Capítulo 3 Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos.

## 3.1 Propuesta de la distribución del sitio de manejo integral de residuos.

La propuesta del sitio de disposición final se encuentra en un terreno ejido con un área de 400 hectáreas, con posibilidades de ampliación, dicha área será mayormente utilizada para el relleno sanitario que será operado en distintas etapas, además pretende ser un sitio integral que tendrá: la capacidad de clasificar los desechos valorizables para su posterior recuperación económica, se recibirán residuos de manejo especial para su aprovechamiento económico, contará con control de entradas y salidas de las unidades recolectoras. El sistema consistirá en el pesaje de la cantidad de RSU que entrará y la inspección de cada unidad para verificar que las unidades no ingresen con RPBI, también tendrá instalaciones administrativas, como: oficinas, laboratorio de análisis, comedor, vestidores, taller de mantenimiento, entre otras y por último la planta generadora de energía eléctrica a partir de biogás, que en este trabajo solo serán abordados los temas de extracción y purificación de biogás.

En la Figura 2.2 se muestra la geometría del sitio propuesto, en la Figura 3.1 se muestran las dimensiones de dicho terreno.

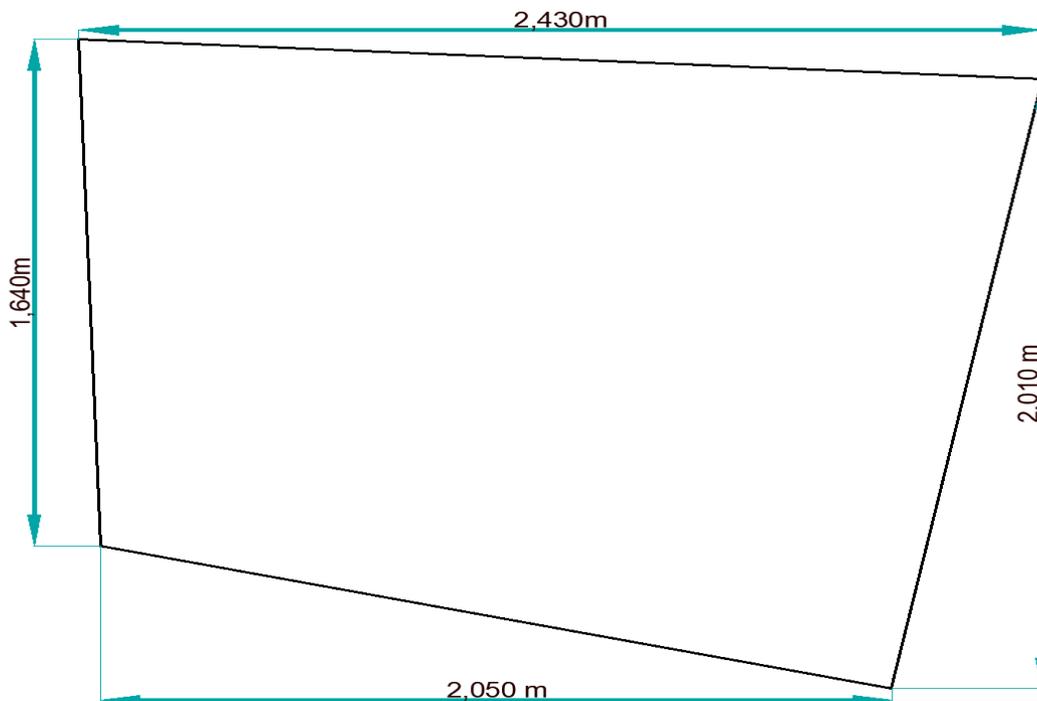


Figura 3.1 Dimensiones del sitio de manejo integral.  
Fuente: Elaboración propia

Tomando en cuenta que la mayor parte de la superficie mencionada será para el relleno sanitario a continuación en la Figura 3.2 se muestra una propuesta de la disposición que deberán tener el relleno y los edificios del sitio de manejo integral, con la parte del relleno sanitario interrumpida. Mientras que en el Anexo 8 se puede observar una imagen completa del lay out del sitio. De acuerdo con las Figura 3.2, el área que ocuparán los edificios administrativos y de proceso será de 9.13 hectáreas (91,374 m<sup>2</sup>), dejando 390.87 hectáreas (3,880,000 m<sup>2</sup>) para el relleno sanitario.

El tamaño del sitio de disposición final al inicio de su operación y hasta el último año estarán determinados por la cantidad de residuos que se pretendan ingresar. Para el año 2020 de acuerdo con la proyección del anexo 2 habrá 2,804,240 habitantes, y según datos del INEGI un mexiquense produce 0.77 kg/día de RSU, por lo tanto, en el primer año de operación del sitio de disposición final deberá tener la capacidad de recibir 2,159.26 toneladas de RSU al día, es decir un total de 790,289.16 toneladas de RSU al año, considerando una capacidad permitida en los *tráiler* de 2 ejes de 35 toneladas, se recibirán 62 unidades al día, es decir, 5 camiones por hora, tomando en cuenta dos jornadas laborales de 7 horas.

De acuerdo con los datos del Anexo 4 del presente trabajo, el sitio de disposición final deberá aumentar su capacidad proporcionalmente al aumento en la generación de RSU, hasta el último año de operación el 2050, donde se prevé habrá 5,939,879 habitantes y realizando la proyección del incremento de la generación de RSU diaria por mexiquense se obtiene un valor de 1.87 kg/día de RSU, por lo tanto, en dicho año el sitio de disposición final deberá tener la capacidad de recibir 10,691.78 toneladas de RSU al día es decir un total de 4,052,079 toneladas de RSU al año.

Esta información es de utilidad para determinar el tamaño de las áreas de proceso, tanto al momento de construcción como para planificar futuras ampliaciones que satisfagan la demanda.

Para determinar los edificios de proceso y áreas administrativas, como son estacionamientos, oficinas, vestidores y laboratorio, se propone un organigrama de las personas necesarias para operar el sitio al comienzo de las operaciones, que se detalla en la Figura 3.3.

Esta planificación de la distribución del sitio de disposición final sienta las bases para la logística de la disposición de los RSU dentro del sitio, la ubicación y dimensiones de las básculas, de la planta clasificadora, sitios de inspección de las unidades, del relleno sanitario y el sistema de extracción y purificación de biogás, debido a que así es posible visualizar el área con la que se dispone para cada diseño. Por otra parte, los valores obtenidos de la cantidad de RSU recolectados servirán para determinar el tamaño de las estaciones de transferencia y sus métodos de operación.

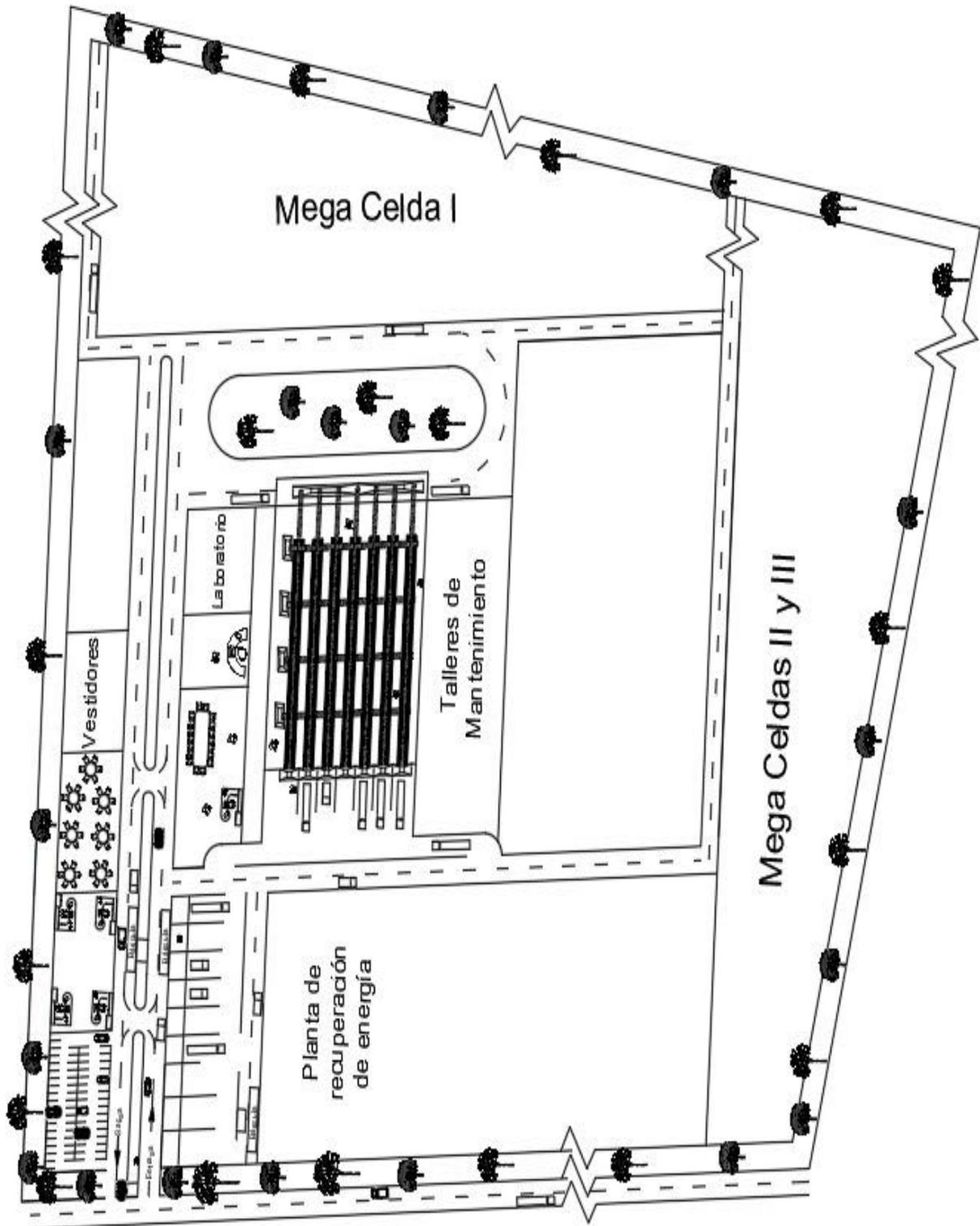


Figura 3.2 Lay Out detallado del Sitio de Manejo Integral.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3.3** Organigrama del personal necesario para iniciar operaciones en el sitio de manejo integral  
*Fuente: Elaboración propia*

### 3.2 Método de recolección y transporte de RSU

Una forma eficiente de reducir costos y tiempo al momento de que los RSU lleguen al sitio de disposición final es concentrarlos en las localidades más cercanas a dicho sitio, de modo que también estén cerca de los municipios generadores. Este concepto es denominado estaciones de transferencia, las cuales son instalaciones diseñadas para recibir los RSU de las localidades más alejadas del punto final. La principal función de las estaciones es evitar que los camiones recolectores “locales” deban hacer todo el trayecto hasta el sitio de disposición final además compactar los RSU y retirar los Residuos de Manejo Especial, que al no ser compactables, quitan espacio de los camiones recolectores destinado para los RSU, esto conlleva un incremento del área de recolección de basura y de la cantidad recolectada, además de reducir el tiempo de recolección. Otra de las ventajas es que se tiene un mejor control de los RSU que llegan al sitio de disposición final y por otro lado se asegura que los camiones recolectores que llegan al sitio cumplirán las especificaciones que se requieren.

“Las estaciones de transferencia son la piedra angular de cualquier sistema integral regional de gestión de residuos, ya que evitan la creación de programas y/o sitios municipales para pequeñas comunidades” (Diego, 2019).

De acuerdo con la guía de construcción de plantas o estaciones de transferencia de la empresa de Limpieza Pública del Ayuntamiento de Sevilla (LIPASAM), publicado en 2007, indica las siguientes recomendaciones para seleccionar el sitio geográfico para la construcción de una estación de transferencia:

- Sobre la distancia de los sitios generadores al punto de disposición final: sí es menor a 10 km, no es conveniente construir una estación de transferencia, sí se encuentra entre los 10 a 20 km de distancia debe realizarse una evaluación, ya que estadísticamente, el 30% de los casos resulta ser viable y sí se encuentra a más de 20 km de distancia siempre es rentable utilizar sitios de transferencia.
- Se debe contar con una cantidad “grande” de residuos a transportar; más de 50 toneladas de RSU al día resulta rentable
- Se debe de considerar el sitio más cercano al centro de gravedad de la zona, es decir, tratar que los caminos que lleven a la estación tengan una pendiente positiva hacia dicha estación de transferencia. Es necesario mencionar que este criterio es poco aplicado.
- Debe tener un fácil acceso a carreteras
- El sitio seleccionado debe tener el menor impacto ambiental posible, teniendo en cuenta los cuerpos de agua y la cercanía a la población, además de considerar las corrientes de aire dominantes.
- La construcción y los costos de operación y mantenimiento deben ser lo más económicos posibles.

La jerarquía de los 4 aspectos más importantes a considerar para la construcción de una estación de transferencia en orden de mayor a menor relevancia es la siguiente: capacidad, ambiental, equipamiento y de seguridad (industrial).

- Capacidad: para este rubro se deberán de considerar varios aspectos; tiempo de espera de los vehículos, capacidad de almacenamiento, capacidad de absorción y el ritmo de evacuación. Por lo tanto, es necesario determinar las toneladas al día que se pretende lleguen a la estación de transferencia
- Ambiental: la contaminación visual que generará la estación de transferencia, la contaminación del aire que podría generarse debido a los polvos que se liberan en el vaciado de los residuos, evitar a toda costa la contaminación del suelo o del agua y, por último, evitar los olores, considerando un ambiente libre de viento y los vientos dominantes.
- Equipamiento: se debe decidir qué tipo de estación de transferencia se va a construir, considerando el equipamiento que se pretende adquirir y la cantidad de residuos. Pueden:
  - Con o sin compactación
  - Si se va a utilizar como centro de dirección de otras operaciones
  - Con o sin báscula
  - Con carga directa o con almacenamiento
- Seguridad: se debe de pensar en la seguridad en las operaciones, es decir seguridad industrial. Se deberá contar con procedimientos de descarga de vehículos, evacuación de residuos, incendios en planta, descarga de particulares, manejo de maquinaria, etc.

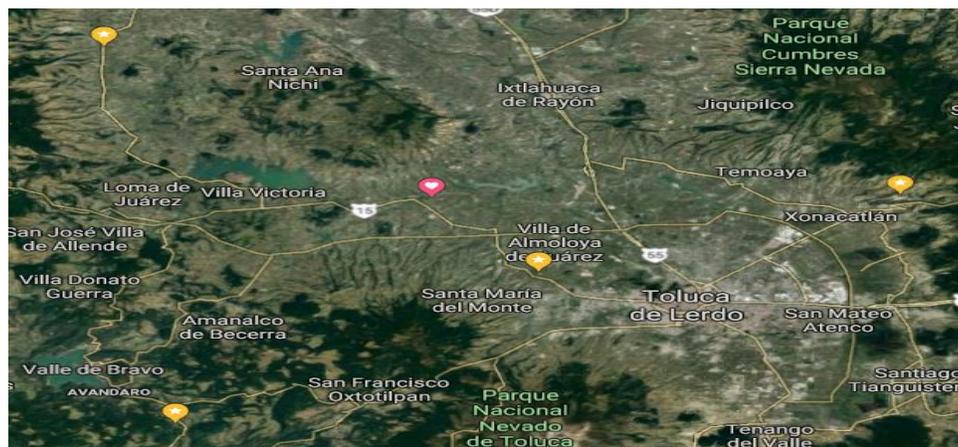
Para el presente trabajo se considera, de acuerdo con las recomendaciones de James E. Kundell y Deanna L. Ruffer en el Capítulo 4 del Libro “Handbook of Solid Waste

### Capítulo 3 Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos

Management”, que para una buena gestión de implementación de un nuevo sitio de disposición final deben considerarse la clausura o utilización de los sitios, rellenos o tiraderos a cielo abierto donde cada localidad actualmente dispone sus residuos. Por lo mencionado con anterioridad y tomando en cuenta las recomendaciones de la guía de LIPASAM, se propone utilizar como estaciones de transferencia los siguientes:

- Para las localidades al norte se utilizará el tiradero a cielo abierto de Ixtlahuaca.
- Para las localidades al este el relleno sanitario de Xonacatlán.
- Para las localidades al sur el relleno sanitario de Zinacantepec.
- Para las localidades al oeste se deberá dividir en dos etapas, la primera será aprovechar el relleno sanitario de Valle de Bravo donde llegarán los RSU de Santo Tomas de los Plátanos e Ixtapan del Oro que serán llevados desde Valle de Bravo hasta la segunda etapa, y la segunda etapa será aprovechar el tiradero a cielo abierto de Villa Victoria.

En la Figura 3.4 se muestran los sitios mencionados, para el caso de Villa Victoria resulta no favorable la ubicación de su actual tiradero, de acuerdo con las recomendaciones del LIPASAM y para Ixtlahuaca no se encontraron datos de ubicación. Para los otros sitios se marca con una estrella el sitio de disposición final que utilizan actualmente de acuerdo con la Tabla 2.9 del presente trabajo.



**Figura 3.4** Ubicación de los actuales rellenos sanitarios y/o tiraderos a cielo abierto.

Fuente: Google Maps, Recuperado de: <https://www.google.com/maps/@19.3380093,-99.9733596,81745m/data=!3m1!1e3>

El tema de daño ambiental queda mitigado al utilizar los actuales sitios de disposición, dado que ya están habilitados para la disposición de residuos y además se mejoraría la disposición de los RSU ya que hoy por hoy son sitios no controlados. Por otro lado, por la parte de responsabilidad social, representa ventaja para los recolectores locales, que no tendrían la necesidad de cambiar sus rutas de recolección y de llegada al sitio de descarga. Por supuesto las instalaciones de los actuales tiraderos deberán ser mejoradas para su operación como estaciones de transferencia.

### Capítulo 3 Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos

En la Tabla 3.1 se determina la factibilidad de utilizar o no estaciones de transferencia para cada una de las zonas generadoras de RSU, de acuerdo con el criterio de distancia al sitio de disposición final y la potencial generación diaria que tendrán los sitios de acuerdo con la información del Anexo 4. Para la distancia se considera la trayectoria desde la localidad más lejana y la más cercana.

**Tabla 3.1** Evaluación de los criterios del LIPASAM para determinar la viabilidad de estaciones de transferencia en el caso de estudio.

Zona	Distancia (Km)		Generación (Ton/día)		Factibilidad Distancia	Factibilidad Generación
	Localidad más lejana	Localidad más cercana	2020	2050		
Norte	99.2	42.9	333	1,572.7	Cumple	Cumple
Este	73	37	447.7	2,624.2	Cumple	Cumple
Sur*	66.4	24.6	1,196.2	6,045.7	Por evaluar	Cumple
Oeste**	67.2	8.4	181.7	858.5	No cumple	Cumple

Fuente: Elaboración propia

Nota: \*el caso del sur se propone evaluarlo ya que el relleno sanitario de Zinacantepec se encuentra relativamente cerca (24.6 km) sin embargo, los municipios generadores se encuentran a más de 30 km, por lo que se consideraría viable.

\*\*Para la zona oeste el poblado más cercano Villa Victoria, sin embargo, los otros tres municipios de esta zona (Valle de Bravo, Ixtapan del Oro y Santo Tomás) se encuentra a poco más de 50 km y su generación de RSU indica que es factible, se recomienda construir la estación de transferencia.

La guía de estaciones de transferencia del LIPASAM menciona que las estaciones de transferencia se clasifican de acuerdo con su tamaño (capacidad) como:

- Pequeña: <100 ton/día de RSU
- Mediana: 100 a 500 ton/día de RSU
- Grande: > 500 ton/día de RSU

En la Tabla 3.2 se muestra la clasificación de las estaciones propuestas además del tipo de equipamiento con el que contará cada una.

### Capítulo 3 Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos

Tabla 3.2 Clasificación de las estaciones de transferencia por tamaño y equipamiento seleccionado.

Zona	Tamaño		Tipo de estación	
	2020	2050	2020	2050
Norte	Mediana	Grande	Fosa	Fosa
Este	Mediana	Grande	Fosa	Fosa
Sur	Grande	Grande	Fosa	Fosa
Oeste	Mediana	Grande	Fosa	Fosa

Fuente: elaboración propia

Como se observa en la Tabla 3.2, la cantidad RSU por disponer en cada zona es considerable, además de que tiene un crecimiento exponencial. Si bien actualmente se podrían considerar estaciones de transferencia medianas por motivos económicos, en un futuro se deberán considerar grandes debido a dicho crecimiento. La manera de mitigar este problema es escogiendo estaciones de transferencia tipo fosa, ya que es adecuada para estaciones de transferencia medianas y grandes, por otro lado, se debe de considerar en el diseño estas futuras expansiones.

Para las estaciones de transferencia propuestas se recomienda utilizar equipo de fosa sin compactación, el equipo de compactación incrementaría la inversión inicial y como menciona LIPASAM, en la última recomendación para la construcción de estaciones de transferencia, “La construcción y los costos de operación y mantenimiento deben ser lo más económicos posibles”, por otro lado el flujo de materiales en el sitio de disposición final indica que debe pasar por la estación de verificación y la planta clasificadora, si los RSU llegarán compactados implicaría aumento en el tiempo de operación y la dificultad de realizar estas tareas.

En la Figura 3.5 se muestra una planta de conjunto de estación de transferencia con descarga indirecta en fosa. Este sistema típico es el que se propone para las estaciones de transferencia, presenta varias ventajas para la presente propuesta:

- Cuenta con muchos lugares para la descarga de los camiones recolectores, lo que evita la formación de cuellos de botella que entorpezcan la operación o afecten las vías de comunicación fuera de la planta.
- Permite la carga de dos contenedores de camiones de transferencia al mismo tiempo.
- Cuenta con una zona de descarga directa en caso de que la fosa no se encuentre disponible para operación.
- También cuenta con una zona de contenedores de residuos valorizables, los cuales servirán para que las empresas que lleven sus RSU clasificados puedan colocarlos y así disminuyan el costo de disposición.



### 3.3 Descripción del proceso de la planta clasificadora

La planta clasificadora es el área del sitio de manejo integral de los residuos donde se separarán los residuos valorizables de aquellos que se enviarán al relleno sanitario. Es importante describir el proceso de separación que los residuos requieren en esta área, dado que es aquí donde se retiran la mayoría de los valorizables, creando un beneficio económico para el sitio y para el relleno sanitario, ya que solo se dispondrán aquellos que no pueden ser aprovechables, esto quiere decir que, al llegar menos residuos al relleno sanitario, este tendrá mayor tiempo de vida útil y al separar más residuos valorizables mayor beneficio económico tendrá el sitio.

La descripción del proceso de la planta clasificadora incluye: la cantidad de RSU que llegarán a esta, así como la distribución de los residuos valorizables que se tendrán que separar, el diseño del área, la capacidad que deberán cumplir las bandas transportadoras, tolvas y los contenedores. También se determinará la cantidad de equipo necesario para su operación, usando como referencia la planta clasificadora de la empresa “SIMEPRODE” que se encuentra ubicada en el Estado de Nuevo León.

De acuerdo con la investigación de campo realizada a la planta clasificadora de SIMEPRODE se harán propuestas de mejora al proceso de clasificación de valorizables. En esta sección de la tesis se describe el proceso de la siguiente manera:

Los camiones accederán por la caseta de vigilancia, posteriormente serán pesados en las básculas de acceso, seguirán a la parte de inspección donde solo en caso de tener RPBI, será pesado nuevamente, previa remoción de los RSU que aun puedan aprovecharse, esto con la finalidad de conocer el valor de pesaje verdadero de los RSU. Los vehículos continuarán su camino con dirección a la planta clasificadora, donde descargarán la basura y esta pasará con la ayuda de una tolva a las bandas transportadoras. Cuando la basura pasa por las bandas, los operadores deberán separar los residuos valorizables, cada residuo tendrá su propia banda de separación, permitiendo así que la tarea para cada operador sea más sencilla, al final de las bandas transportadoras habrá contenedores que se pesarán para la posterior venta de los valorizables. Los RSU que no fueron separados llegaran al final de la banda principal, donde se encontrará una tolva que es la encargada de cargar a los camiones con dirección al relleno sanitario. Esto se puede observar gráficamente en el diagrama de bloques de la Figura 3.6, mientras que en la Figura 3.7a y la Figura 3.7b representa diagrama isométrico de la primera línea de separación y de la planta, respectivamente.

Por otro lado, se mencionarán los estándares de seguridad e higiene que se deben cumplir en la operación de la planta clasificadora, ya que, para las bandas transportadoras, son necesarios operadores que serán los encargados de separar los residuos valorizables, de aquellos que no lo son, y al estar en contacto con ellos, se deberán tomar las medidas de seguridad e higiene adecuadas para evitar accidentes y enfermedades en esta parte del proceso.

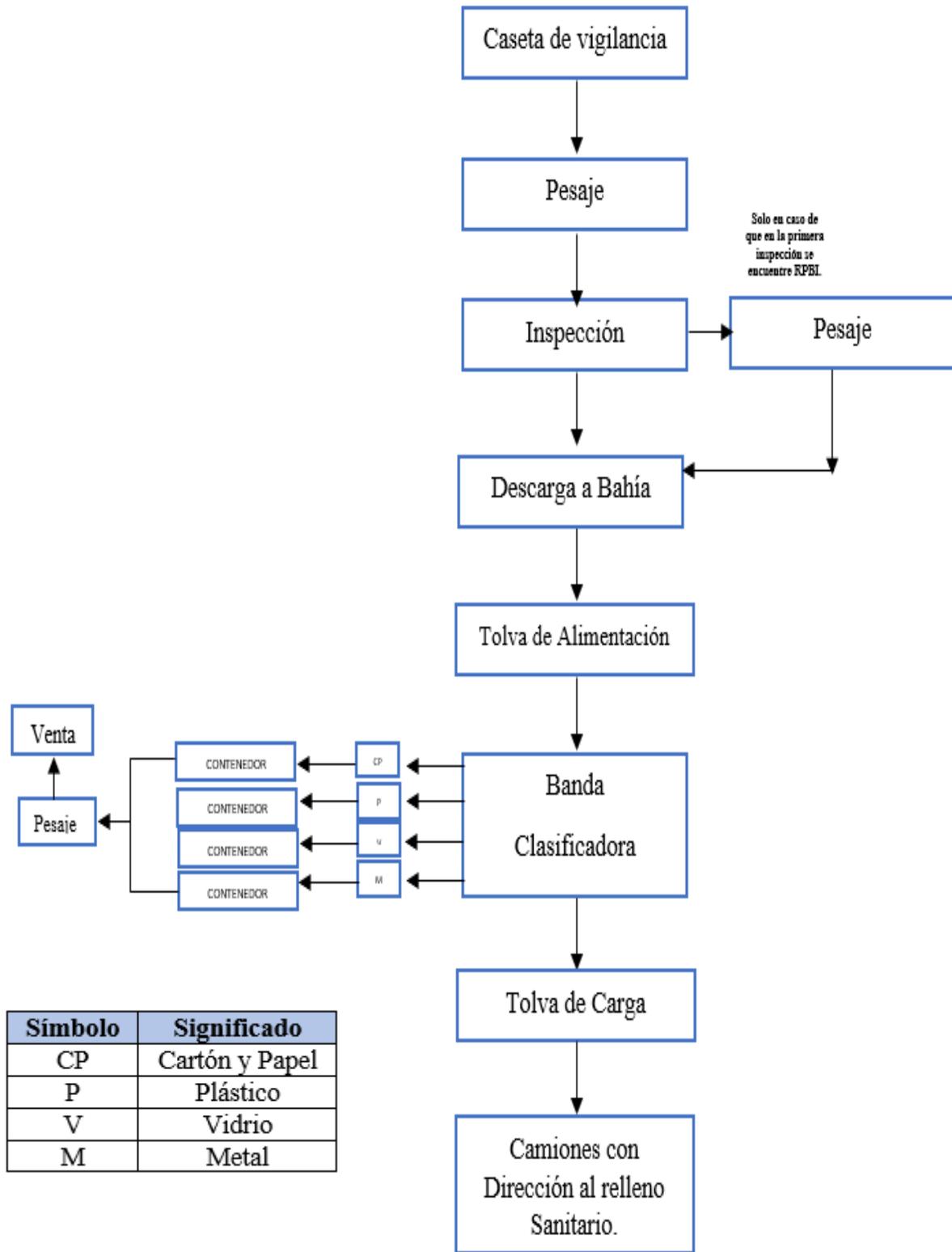


Figura 3.6 Diagrama de Bloques de Planta Clasificadora.  
Fuente: Elaboración Propia.

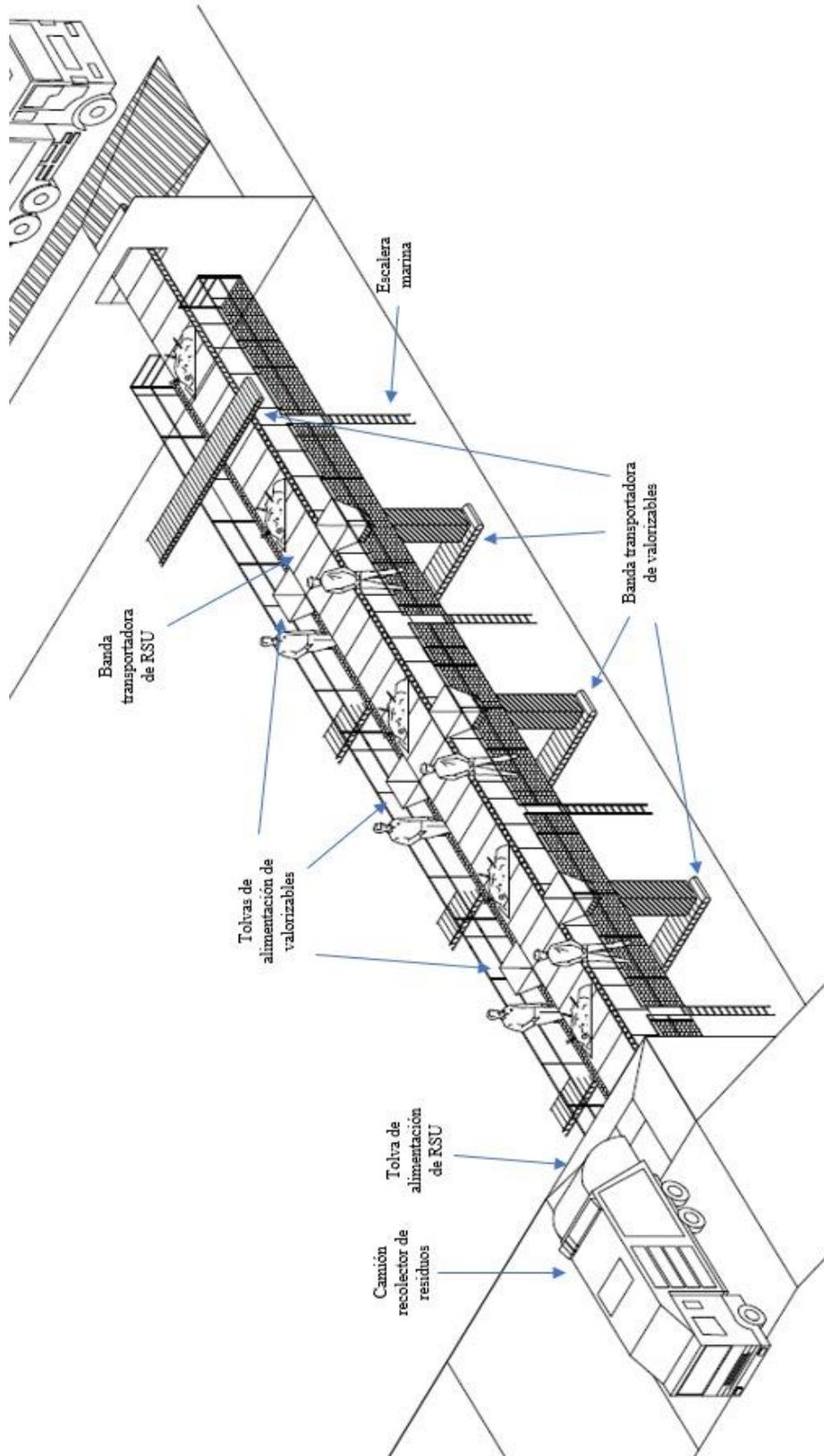


Figura 3.7a Detalle de la Primera línea de clasificación.  
Fuente: Elaboración Propia.

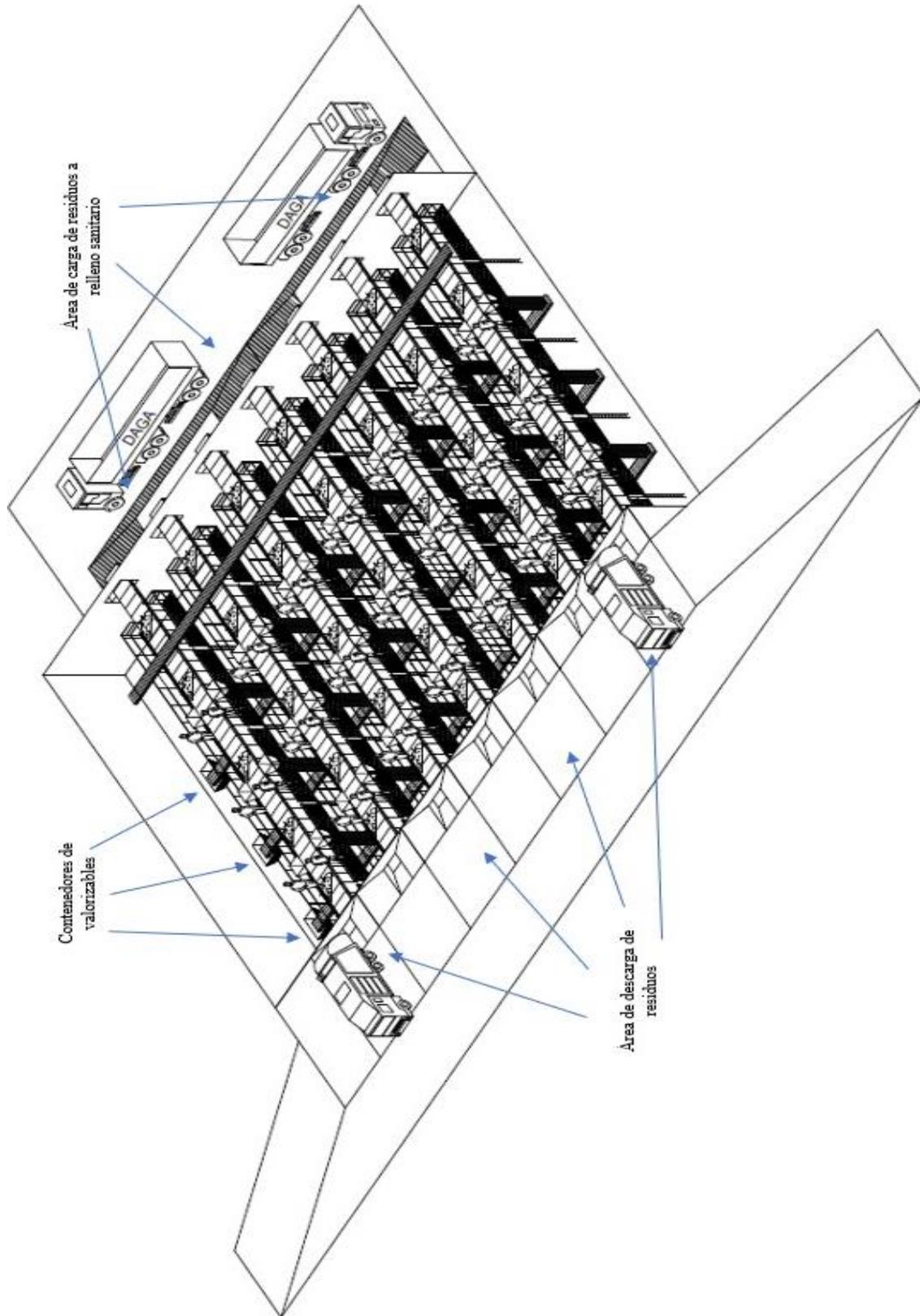


Figura 3.7b Propuesta del proceso de la planta clasificadora.  
Fuente: Elaboración Propia.

### Capítulo 3 Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos

Para un mayor detalle de la Figura 3.7b véase el Anexo 6.

Como se puede observar, la planta clasificadora es la encargada de remover los residuos valorizables de los RSU, para generar beneficios económicos y operacionales. A esta área se le debe considerar como el último y más importante filtro del proceso.

Los RSU están compuestos de distintos tipos de materiales orgánicos e inorgánicos en distintas proporciones, las cuales dependen de varios factores, como son: la época del año, el nivel socioeconómico, las actividades productivas que se practican la zona y su demografía. La composición promedio de los RSU se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Composición general de los RSU.

Componentes de los RSU	
Algodón	Material ferroso
Cartón	Papel
Cuero	Pañales
Envases de Cartón encerado	Plástico rígido y de Película
Fibra dura vegetal	Poliuretano
Fibras sintéticas	Poliestireno expandido
Hueso	Residuos alimenticios
Hule	Residuos de jardinería
Lata	Trapos
Losa Cerámica	Vidrio de color
Madera	Vidrio transparente
Materiales de Construcción	Otros

Fuente: F. J. Colomer Mendoza y A. Gallardo Izquierdo, *Tratamiento y Gestión de Residuos Sólidos*, México 2010

Como se muestra en el Capítulo I, la Figura 1.10 da la composición de los RSU generados en México, la cual indica que solo el 38% son residuos orgánicos y en segundo lugar corresponde a “otros” es el 22%; lo cual indica que el 60% de la basura son residuos no valorizables, por lo que deberán ser llevados a un sitio de disposición final, sin embargo, el 40% restante debe ser seleccionado para su posible valorización.

Por lo que se podría asumir que la composición de los RSU recibidos en el sitio de manejo integral propuesto tendrán una composición similar a lo mencionado anteriormente, como se muestra de manera cuantitativa y cualitativa en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Composición Cuantitativa y Cualitativa de los RSU que llegaran al sitio de disposición final.

Año	Producción Total de RSU ton/hr	RSU que se dispondrán al Relleno ton/hr	Cartón y papel ton/hr	Vidrio ton/hr	Mat. Ferrosos ton/hr	Plástico ton/hr	Aluminio ton/hr
2020	89.97	53.98	11.70	5.40	1.80	6.30	10.80
2025	118.07	70.84	15.35	7.08	2.36	8.26	14.17
2030	155.00	93.00	20.15	9.30	3.10	10.85	18.60
2035	203.59	122.15	26.47	12.22	4.07	14.25	24.43
2040	267.52	160.51	34.78	16.05	5.35	18.73	32.10
2045	351.70	211.02	45.72	21.10	7.03	24.62	42.20
2050	462.57	277.54	60.13	27.75	9.25	32.38	55.51

Fuente: Elaboración Propia.

### Capítulo 3 Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos

Por otro lado, esta información es útil para diseñar las bandas de transferencia de RSU, ya que conociendo la composición de los RSU por año también se puede conocer las toneladas por hora que llegarán a la planta clasificadora. A continuación, se muestra la Tabla 3.5 con los datos obtenidos del cálculo de RSU por ton/hora de forma cualitativa y cuantitativa.

Tabla 3.5 Cantidad de RSU que se recibirán por hora en la planta clasificadora.

Municipio/Año	2020 ton/hr	Relleno ton/hr	Cartón y papel ton/hr	Vidrio ton/hr	Mat. Ferrosos ton/hr	Plástico ton/hr	Aluminio ton/hr
Almoloya de Juárez	6.56	3.93	0.85	0.39	0.24	0.05	0.79
Amanalco	0.87	0.52	0.11	0.05	0.02	0.06	0.10
Atlacomulco	3.66	2.20	0.48	0.22	0.07	0.26	0.44
Ixtapan del Oro	0.22	0.13	0.03	0.01	0.00	0.02	0.03
Ixtlahuaca	5.49	3.29	0.71	0.33	0.11	0.38	0.66
Lerma	5.51	3.30	0.72	0.33	0.11	0.39	0.66
Metepc	8.06	4.84	1.05	0.48	0.16	0.56	0.97
San Felipe del Progreso	4.76	2.85	0.62	0.29	0.10	0.33	0.57
San Mateo Atenco	2.73	1.64	0.35	0.16	0.05	0.19	0.33
Santo Tomas de los Plátanos	0.33	0.20	0.04	0.02	0.01	0.02	0.04
Temoaya	3.86	2.32	0.50	0.23	0.08	0.27	0.46
Tenango del Valle	3.14	1.89	0.41	0.19	0.06	0.22	0.38
Toluca	31.50	18.90	4.09	1.89	0.63	2.20	3.78
Valle de Bravo	2.38	1.43	0.31	0.14	0.05	0.17	0.29
Villa Victoria	3.77	2.26	0.49	0.23	0.08	0.26	0.45
Zinacantepec	7.14	4.29	0.93	0.43	0.14	0.50	0.86
Total	89.97	53.98	11.70	5.40	1.80	6.30	10.80

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el total de residuos recibidos de la planta clasificadora, se propone que la planta tenga la capacidad inicial de **90 ton de RSU/h.**

De acuerdo con esta capacidad se tendrán.

Alimentación de RSU por banda: **15 ton/h.**

De esta forma.

Número de bandas: **6 bandas.**

Que serán suficientes para realizar el trabajo de transporte para la separación de RSU, mientras que una banda deberá tomarse como reserva o *backup*, esto para el caso de mantenimiento o eventualidades que se presenten en el proceso de clasificación.

Para la separación de residuos valorizables se debe contar con bandas transportadoras adicionales para cada tipo de residuo, es decir se deberán considerar tres bandas transportadoras y una banda magnética. Cada banda transportará los siguientes valorizables:

- Papel y Cartón: periódico, cartón corrugado, Kraft, bond y plegadizo. Capacidad de la banda 11.70 ton/h.
- Vidrio: traslucido, tintado. Capacidad de la banda 5.40 ton/h.
- PET: polietilen tereftalato, polietileno de alta densidad y polietileno de baja densidad. Capacidad de la banda 1.80 ton/h.
- Material ferroso y aluminio: lata de hojalata, lata de refresco y cerveza, cobre y varillas. Capacidad de la banda magnética de 10.80 ton/h.

**Dimensionamiento de bandas y contenedores.**

Para dimensionar los recipientes de recolección de residuos sólidos valorizables y las bandas transportadoras, la densidad de estos es un valor fundamental, ya que la densidad representa el volumen ocupado por una masa de residuos, lo que significa por sus unidades,  $kg/m^3$ . Entre más compactados se encuentren los residuos valorizables, mayor espacio disponible tendrán los contenedores, para este trabajo no se considera la compactación, pero en un futuro se debería tomar en cuenta. En la Tabla 3.6 se pueden observar los residuos valorizables que se consideraron para separación, su variación de densidad típica.

Tabla 3.6 Densidad de los Residuos Valorizables.

RESIDUOS VALORIZABLES	VARIACIÓN ( $kg/m^3$ )	VALOR TÍPICO ( $kg/m^3$ )
Papel y Cartón	42 – 131	75
Plásticos	42 – 131	65
Vidrio	160 – 481	196
Ferrosos	50 – 160	89
Metales	65 – 1,151	280
RSU	70 – 440	290

Fuente: Elaboración propia con datos de Gestión Integral de los Residuos, [https://www.ambientum.com/enciclopedia\\_medioambiental](https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental)

Las bandas transportadoras encargadas de llevar los RSU a través de la planta deberán tener dimensiones suficientes para la cantidad de residuos que se reporta en la Tabla 3.6. La cantidad de RSU que una banda puede transportar está dada por el volumen contenido en la superficie de la banda detenida, es decir: largo (L), ancho (A) y espesor (S) de los RSU apilados.

Para el ancho de la banda, se tomará en cuenta el aspecto ergonómico de trabajo, es decir, el ancho de la banda será el adecuado para que los operadores puedan cubrir toda el área de la banda, sin necesidad de comprometer su integridad física, la Figura 3.8 muestra el área de trabajo recomendada para una persona.

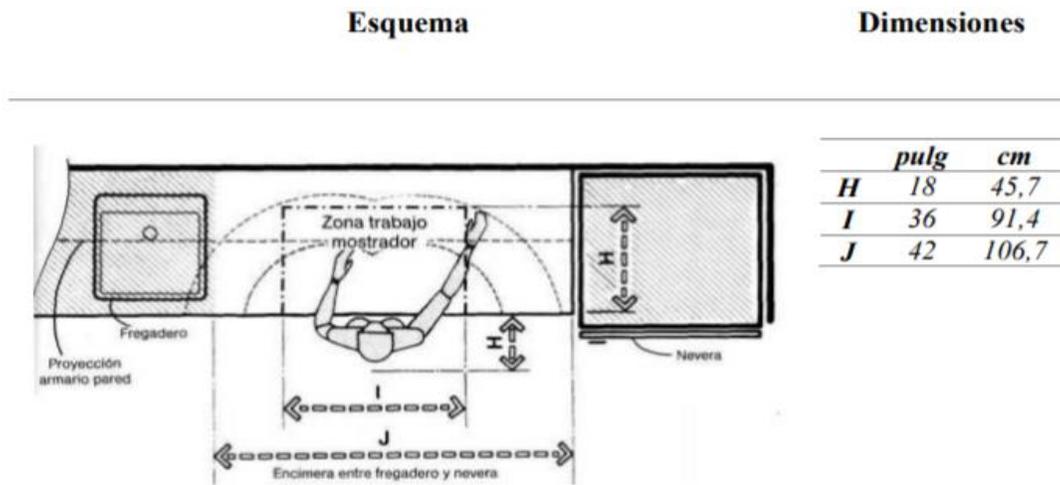


Figura 3.8 Espacios horizontales antropométricos para un banco de trabajo.

Fuente: Ormaza E. (2015). Diseño de una planta clasificadora de residuos sólidos urbanos para la empresa pública municipal mancomunada del pueblo Cañari de los cantones. P. 100

Por lo que se recomienda un **ancho de la banda transportadora de un metro** y que tenga un operador de cada lado, cumpliendo de este modo la necesidad ergonómica.

Respecto al espesor de los residuos que puede llegar a tener la pila de basura transportada está dado por una relación matemática (E., 2015), del flujo masico de RSU esperado entre el producto de la velocidad de la banda por la densidad de los RSU y el ancho efectivo de la banda. Los valores recomendados para la velocidad de transporte de residuos (permitiendo una sencilla separación de los RSU) van de: 0.075 m/s a 0.25 m/s para este trabajo se considera un valor de 0.1 m/s y una densidad de los residuos de 290 kg/m<sup>3</sup>.

Por lo tanto, la ecuación es la siguiente

$$S_{RSU} = \frac{Q_b}{V_b * \rho_{RSU} * A_b} \quad \dots (1)$$

Donde:

$S_{RSU}$ : espesor de la carga de RSU sobre la banda detenida (m)

$Q_b$ : flujo másico de residuos a transportar en la banda (kg/h)

$V_b$ : velocidad de la banda (m/h)

$\rho_{RSU}$ : densidad de los RSU (kg/m<sup>3</sup>)

$A_b$ : ancho efectivo de la banda (m)

Sustituyendo los valores del sistema en la ecuación se obtiene

$$S_{RSU} = 0.1436 \text{ m} = 14.36 \text{ cm}$$

Por último, la longitud de la banda estará dada por la velocidad de esta y de acuerdo con el balance de materia y los datos de densidad de los residuos la longitud se puede calcular como una función del volumen. De modo que la ecuación es la siguiente:

$$V_T = L * A * S_{RSU} \rightarrow L = \frac{V_T}{A * S_{RSU}} \quad \dots (2)$$

Donde:

$V_T$ : volumen de RSU transportado (m<sup>3</sup>/h)

$L$ : longitud de la banda (m)

$A$ : ancho de la banda (m)

$S_{RSU}$ : espesor de la pila de RSU (m)

El volumen de RSU por unidad de tiempo estará dado por la ecuación (3),

$$V_T = \frac{Q_b}{\rho_{RSU}} \quad \dots (3)$$

$$V_T = \frac{15,000 \frac{kg}{h}}{290 \frac{kg}{m^3}} = 51 \frac{m^3}{h}$$

Sustituyendo los valores del sistema se obtiene la **longitud necesaria de L=360.19 m**. Una banda de dicha longitud no se adapta a las medidas con las que cuenta la planta clasificadora, por lo que de acuerdo con las dimensiones de la nave se propone una banda de 100 m, con una velocidad de 0.1 m/s, a la cual se le alimentarán 5,000 kg cada 17 min, de modo que en el periodo de 51 min se logre satisfacer el flujo másico de residuos a transportar requeridos.

Para el caso de los contenedores, conociendo la densidad de los residuos valorizables, se puede realizar el cálculo del volumen por hora que serán necesario satisfacer con un contenedor. A continuación, se realiza el cálculo para el papel y cartón. Posteriormente en la Tabla 3.8 se mostrará el volumen necesario para cada valorizable.

- 1.- De acuerdo con la Tabla 3.5 se producirán 11.70 ton/h de papel y cartón.
- 2.- La densidad típica de este residuo es de  $75 \text{ kg/m}^3$ .
- 3.- Es necesario convertir las toneladas a kilogramos para unificar unidades, por lo que,

$$11.70 \frac{\text{ton}}{\text{h}} * \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} = 11,700 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

- 4.- Para calcular el volumen se utiliza la siguiente ecuación

$$Fv = \frac{Q_v}{\rho_{\text{papelycarton}}} \quad \dots (4)$$

Donde:

$Fv$ : flujo volumétrico del valorizable ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

$\rho_{\text{papelycarton}}$ : densidad del valorizable ( $\text{kg/m}^3$ )

Sustituyendo

$$Fv = \frac{11,700 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 156 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

- 5.- Para obtener la cantidad tiempo es necesario dividir la velocidad a la que las bandas transportadoras de separación manual de RSU operaran, para un diseño homogéneo se toma como referencia la velocidad mencionada con anterioridad.

Conociendo la longitud de la banda de 100 m se debe calcular teta ( $\theta$ ), utilizando la siguiente ecuación

$$\theta = \frac{L}{v} \quad \dots (5)$$

Donde:

$\theta$ : tiempo (s)

$L$ : longitud (m)

$v$ : velocidad (m/s)

Sustituyendo

$$\theta = \frac{100 \text{ m}}{0.1 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1000 \text{ s}$$

$$\theta = 0.28 \text{ h}$$

Para calcular el volumen sin unidades de tiempo es necesario multiplicar el volumen (V) por teta (Θ), de acuerdo con la ecuación

$$V = Fv * \theta \quad \dots (6)$$

Donde:

V: volumen del contenedor (m<sup>3</sup>)

Fv: flujo volumétrico (m<sup>3</sup>/h)

Θ: tiempo (h)

Sustituyendo

$$V = 156 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * 0.28 \text{ h}$$

$$V = 46.38 \text{ m}^3$$

Este valor indica que la banda transportadora de residuos da una vuelta en 0.28 horas lo que equivale aproximadamente a 17 min, y que para satisfacer la necesidad de separación para el caso del papel y cartón la banda transportadora deberá girar aproximadamente 3 vueltas y media por lo que en cada vuelta se deberán almacenar 46.38 m<sup>3</sup>.

Para el caso de los demás valorizables se deberá realizar el mismo calculo considerando la misma velocidad y esto equivale que también se utilizará el mismo tiempo. En la Tabla 3.7 se muestra el flujo volumétrico que tendrá cada banda de valorizable y en la Tabla 3.8 se encuentran los resultados del volumen de cada valorizable.

Tabla 3.7 Flujo Volumétrico de los Residuos Valorizables

RESIDUOS VALORIZABLES	VOLUMEN EN m <sup>3</sup> /hora
Papel y Cartón	156
Plásticos	96.92
Vidrio	27.55
Ferrosos	20.22
Metales	38.57

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3. 8 Volumen que ocuparán los Residuos Valorizables.

RESIDUOS VALORIZABLES	VOLUMEN EN $m^3$
Papel y Cartón	46.38
Plásticos	27.13
Vidrio	7.71
Ferrosos	5.66
Metales	10.8

Fuente: Elaboración Propia.

Los contenedores que se proponen usar para los valorizables son de  $30 m^3$ , que son los más grandes en el mercado, por lo que sus especificaciones son las siguientes:

- **Largo Interior:** 6 m
- **Ancho Superior:** 2.45 m.
- **Altura Interior:** 2.20 m.
- **Puerta** trasera de libro con cierre de seguridad superior e inferior, siendo el superior de un diseño especial para su fácil manipulación desde el suelo. Conformado en redondo macizo de 20 mm. Bisagras de acero de gran resistencia.

Para una correcta gestión de residuos valorizables se necesita etiquetar y pintar los contenedores de acuerdo con la guía de identificación de residuos que propone la SEMARNAT, como se muestra a continuación en la Figura 3.9 y la Figura 3.10 muestra el tipo de contenedor que se usará:



Figura 3.9 Etiquetas para contenedores.

Fuente: Guía de Diseño para la Identificación Gráfica del Manejo Integral de los Residuos Sólidos Urbanos, 2015, Figura, Recuperado de <https://www.gob.mx/residuos-solidos/articulos/guia-de-diseno-para-la-identificacion-grafica-del-manejo-integral-de-los-residuos-solidos-urbanos>.



**Figura 3.10** Contenedores para los Residuos Valorizables.

*Fuente: Tegui Contenedores, 2019, Figura, Recuperado de: [elcomercio.pe/mundo/actualidad/10-rellenos-sanitarios-grandes-mundo-fotos-noticia-476486](http://elcomercio.pe/mundo/actualidad/10-rellenos-sanitarios-grandes-mundo-fotos-noticia-476486)*

### **Higiene y seguridad industrial en la planta clasificadora.**

Debido a la naturaleza de las operaciones el personal operativo se encontrará expuesto a riesgos físicos y biológicos, principalmente, si bien se sabe que es inevitable que los accidentes sucedan, se puede prevenir la frecuencia con que estos ocurren y también mitigar los daños que estos pueden llegar a ocasionar. La manera de lograr esto, es mediante la concientización del personal expuesto, que es la primera barrera de protección, la segunda barrera es la capacitación constante y la autoinspección entre compañeros de trabajo, por último, proveer equipo de protección personal que funja como última barrera de protección.

De acuerdo con la NOM-017-STPS-2008 en su punto 5.2 dice que es necesario identificar y analizar, los riesgos de trabajo a los que están expuestos los trabajadores por cada puesto de trabajo y área del centro laboral. Esta información deberá contener al menos: tipo de actividad que desarrolla el trabajador, tipo de riesgo de trabajo identificado, región anatómica por proteger, puesto del trabajo y equipo de protección personal requerido. Por lo que en esta tesis se realizará un análisis de riesgo a lo que están expuestos los trabajadores de la planta clasificadora, y se darán medidas que mitiguen los riesgos laborales existentes.

En las Tablas 3.9, 3.10, 3.11 y 3.12 se muestran los análisis de riesgo de las cuatro principales tareas a realizar en la etapa de clasificación de RSU, que son: inspección, descarga, clasificación y carga de RSU, respectivamente. Los análisis mostrados son lo básico que se requiere de acuerdo con la ley de trabajo para poder comenzar operaciones, revisiones y mejoras se deberán realizar, de acuerdo con la experiencia adquirida en el transcurso de las operaciones, para así tener una prevención de accidentes más acertada.

### Capítulo 3 Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos

Tabla 3.9 Análisis de riesgo de la inspección de RSU .

<b>ANÁLISIS DE RIESGO</b>			
<b>INSPECCIÓN DE RSU</b>			
<b>PARTE 1 INFORMACIÓN GENERAL DE LA ACTIVIDAD.</b>			
1.- Describa la actividad que se evalúa.			
Inspeccionar los camiones que contienen RSU a la entrada del Sitio integral de manejo de RSU			
2.- Se requiere entrenamiento especializado de Higiene y Seguridad para esta actividad (En caso de afirmación especifique)			
Informar a los operadores los riesgos a los que se encuentran expuestos en la operación. Informar a los operadores como es la forma correcta de usar el Equipo de Protección Personal, así como la importancia del uso de este.			
<b>PARTE 2 ANÁLISIS DE TAREAS.</b>			
No	Tarea específica	Riesgo	Acción mitigante
1	Abrir bolsas de residuos	1.-Tomar bolsas con vidrio u objetos punzocortantes. 2.-Contacto con sustancias cáusticas y corrosivas.	Uso de guantes resistentes a líquidos y cortaduras
2	Retirar residuos de manejo especial	Caída de objetos pesados a los pies	Uso de botas de seguridad, con protección en la punta
3	Inspeccionar los camiones de RSU	1 - Contaminación de la ropa 2 - Proyección de fragmentos de residuos	1 - Uso de ropa exclusiva para trabajo, preferente mezclilla 2 - Utilizar lentes de seguridad y respirador contra partículas
4	Mover los RSU o RME pesados	Sobresfuerzo por una mala postura al cargar los RSU	Dar capacitación acerca de los correctos mecanismos de manipulación de cargas
5	Manipulación de RSU	Contraer una bacteria y/o enfermedad cutánea.	Programar visitas trimestrales con el doctor, para prevenir enfermedades, así como proveer un seguro médico de gastos médicos mayores a los trabajadores.

Fuente: Elaboración Propia.

### Capítulo 3 Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos

Tabla 3.10 Análisis de riesgo de la descarga de RSU a la planta clasificadora.

<b>ANÁLISIS DE RIESGO</b>			
<b>DESCARGA DE RSU A LA PLANTA CLASIFICADORA</b>			
<b>PARTE 1 INFORMACIÓN GENERAL DE LA ACTIVIDAD.</b>			
1.- Describa la actividad que se evalúa.			
Descarga de RSU a las tolvas de la planta clasificadora			
2.- Se requiere entrenamiento especializado de Higiene y Seguridad para esta actividad (En caso de afirmación especifique)			
<p>Informar a los operadores los riesgos a los que se encuentran expuestos en la operación.</p> <p>Informar a los operadores como es la forma correcta de usar el Equipo de Protección Personal, así como la importancia del uso de este.</p> <p>Informar a los operadores de los posibles accidentes al momento de realizar maniobras dentro del sitio.</p>			
<b>PARTE 2 ANÁLISIS DE TAREAS.</b>			
No	Tarea específica	Riesgo	Acción mitigante
1	Subir al área de descarga y posicionarse para realizar la descarga de RSU	<p>1.-Caída del camión en la tolva.</p> <p>2.-Atropellamiento o daño al personal o instalaciones</p>	<p>1.- Seguir los señalamientos y las indicaciones del vigía.</p> <p>2.- Colocar un sensor de movimiento al camión en la partera trasera y capacitar a los conductores.</p>

Fuente: Elaboración Propia.

## Capítulo 3 Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos

Tabla 3.11 Análisis de riesgo de la clasificación de RSU.

<b>ANÁLISIS DE RIESGO</b>			
<b>CLASIFICACIÓN DE RSU EN LA PLANTA CLASIFICADORA</b>			
<b>PARTE 1 INFORMACIÓN GENERAL DE LA ACTIVIDAD.</b>			
1.- Describa la actividad que se evalúa.			
Remoción de PET, VIDRIO, PAPEL Y CARTON de los RSU que se encuentran en las bandas transportadoras y el posterior traslado de los valorizables			
2.- Se requiere entrenamiento especializado de Higiene y Seguridad para esta actividad (En caso de afirmación especifique)			
Informar a los operadores los riesgos a los que se encuentran expuestos en la operación. Informar a los operadores como es la forma correcta de usar el Equipo de Protección Personal, así como la importancia del uso de este.			
<b>PARTE 2 ANÁLISIS DE TAREAS.</b>			
No	Tarea específica	Riesgo	Acción mitigante
1	Abrir bolsas de residuos	1.-Tomar bolsas con vidrio u objetos punzocortantes. 2.-Contacto con sustancias causticas y corrosivas.	Uso de guantes resistentes a líquidos y cortaduras
2	Retirar valorizables (PET, vidrio, cartón y papel)	Caída de objetos pesados a los pies	Uso de botas de seguridad, con protección en la punta
3	Estar parado junto a la banda con residuos	1 - Contaminación de la ropa 2 - Proyección de fragmentos de residuos	1 - Uso de ropa exclusiva para trabajo, preferente mezclilla 2 - Utilizar lentes de seguridad y respirador contra partículas
4	Mover el contenedor de valorizables	Sobresfuerzo por una mala postura al cargar el contenedor	Dar capacitación acerca de los correctos mecanismos de manipulación de cargas
5	Manipulación de RSU	Contraer una bacteria y/o enfermedad cutánea.	Programar visitas trimestrales con el doctor, para prevenir enfermedades, así como proveer un seguro médico de gastos médicos mayores a los trabajadores.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.12 Análisis de riesgo de la carga de RSU

<b>ANÁLISIS DE RIESGO</b>			
<b>CARGA DE RSU A LOS CAMIONES CON DIRECCIÓN AL RELLENO SANITARIO</b>			
<b>PARTE 1 INFORMACIÓN GENERAL DE LA ACTIVIDAD.</b>			
1.- Describa la actividad que se evalúa.			
Carga de RSU a las tolvas con dirección al relleno sanitario			
2.- Se requiere entrenamiento especializado de Higiene y Seguridad para esta actividad (En caso de afirmación especifique)			
<p>Informar a los operadores los riesgos a los que se encuentran expuestos en la operación.                      Informar a los operadores como es la forma correcta de usar el Equipo de Protección Personal, así como la importancia del uso de este.                      Informar a los operadores de los posibles accidentes al momento de realizar maniobras dentro del sitio.</p>			
<b>PARTE 2 ANÁLISIS DE TAREAS.</b>			
No	Tarea específica	Riesgo	Acción mitigante
1	Posicionarse para realizar la carga de RSU	1.-Caída de los RSU fuera del área de la caja transportadora 2.-Atropellamiento o daño al personal o instalaciones	1.- Seguir los señalamientos y las indicaciones del vigía. 2.- Colocar un sensor de movimiento al camión en la partera trasera y capacitar a los conductores.

Fuente: Elaboración Propia.

### 3.4 Diseño del relleno sanitario

La disposición segura y confiable de los RSU es un componente importante de la administración integral de residuos. Hoy en día un relleno sanitario se refiere a instalaciones de ingeniería para la disposición de los RSU diseñados y operados para minimizar el impacto a la salud pública y al medio ambiente. Aunque muchos tiraderos y rellenos sanitarios se han construido anteriormente sin tomar en cuenta estos aspectos, las prácticas en los últimos 20 años han cambiado sustancialmente de modo que los rellenos sanitarios construidos recientemente deben apearse a las regulaciones vigentes que el Estado establece, las cuales tienen criterios más estrictos para la protección de los mantos freáticos, del medio ambiente y de la calidad de vida de las personas cerca del relleno, se implementan medidas como: el uso de doble recubrimiento en el fondo del relleno, la creación de la zona de amortiguamiento, entre otras.

La operación de un relleno sanitario se encuentra estandarizada e independientemente de la técnica de construcción del relleno sanitario que se seleccione se deberán tomar en cuenta las mismas etapas de operación (Tchobanoglous et. al, 2002), las cuales se ilustran en la Figura 3.11 mediante un diagrama de bloques, según lo observado durante la visita a las instalaciones esta de la empresa SIMEPRODE.

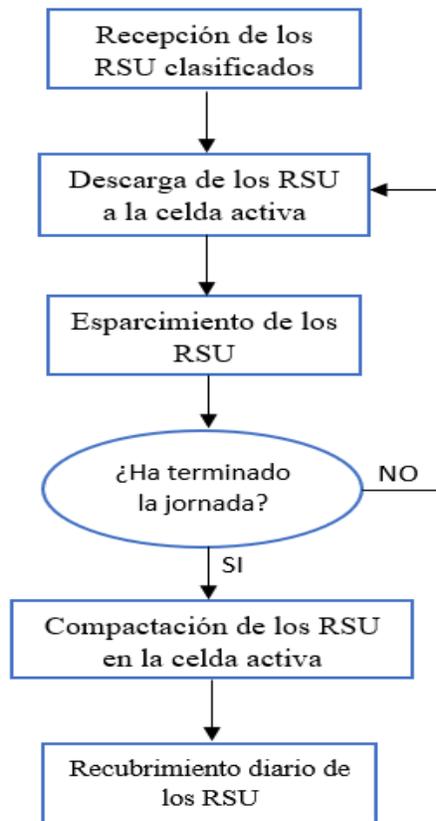


Figura 3.11 Diagrama de Bloques de la operación del relleno sanitario.  
Fuente: Elaboración propia

En el aspecto de diseño del relleno, se consideró a G. Tchobanoglous, con su libro Handbook of Solid Waste Management el cual menciona en el Capítulo 14 titulado “*Landfilling*”, que se deben considerar nueve aspectos importantes a la hora de diseñar un relleno sanitario:

1. Consideraciones para el diseño del relleno sanitario;
2. Descripción de la técnica de relleno sanitario y sus implicaciones ambientales;
3. Cobertura diaria y final de las celdas del relleno sanitario;
4. Características estructurales y asentamientos del relleno sanitario;
5. Formación y composición del biogás;
6. Formación, composición y gestión de los lixiviados;
7. Monitoreo de la calidad ambiental;
8. Desarrollo de un plan de operación del relleno sanitario;
9. Clausura y post clausura del relleno sanitario.

Por lo tanto, el presente subcapítulo, cubrirá los nueve rubros de diseño del relleno sanitario.

### 3.4.1 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DEL RELLENO SANITARIO

De acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT-2003, el manual de especificaciones técnicas para la construcción de rellenos sanitarios para RSU y RME y la guía para la implementación, operación y cierre de rellenos sanitarios del Estado plurinominal de Bolivia, los aspectos que deben considerarse para la construcción de un relleno sanitario son:

1. Estudios de generación y composición
  - a. De RSU
    - i. Proyección de la población
    - ii. Producción per cápita
    - iii. Cantidad de RSU
  - b. De lixiviados
  - c. De biogás
2. Cálculo de área requerida para el relleno sanitario
3. Área para infraestructura auxiliar
4. Área de amortiguamiento
5. Capacidad y vida útil del relleno
6. Ubicación del proyecto (uso actual del terreno y sus colindancias)
7. Infraestructura existente
8. Propiedad del terreno en cuestión
9. Características y análisis del sistema ambiental
10. Selección y existencia de material apropiado para cobertura
11. Caminos de acceso
12. Rellenos mancomunados
13. Estudio y evaluación hidrogeológicos
  - a. Evidencia y uso del agua subterránea
  - b. Identificación del tipo de acuífero
  - c. Análisis del sistema de flujo

14. Estudio topográfico
  - a. Planimetría
  - b. Altimetría
15. Estudio geotécnico
  - a. Exploración y muestreo por cada cuatro hectáreas
  - b. Pruebas de permeabilidad
  - c. Localización de bancas de préstamo
16. Determinación de los equipos requeridos
17. Plan de operación

En el capítulo 2 del presente trabajo, se mencionó la información que respalda los puntos 1a, 3 y 5 de las consideraciones mencionadas. Los puntos restantes se trabajarán a continuación considerando que el orden será de acuerdo con el algoritmo de diseño de G. Tchobanoglous (Tchobanoglous et. al, 2002).

### **Cálculo del área requerida para el relleno sanitario.**

Para determinar la superficie necesaria para depositar los RSU es necesario conocer el volumen de residuos que se pretenden disponer y la altura que tendrán las celdas del relleno finalizadas, medidas desde la base de este. Para un relleno tipo celdas excavadas la distancia del suelo natural a la base es de aproximadamente 8 metros y desde el suelo hasta el punto más alto del relleno es de 8 metros, dando una altura del paralelepípedo <sup>(3)</sup> de 16 metros. El valor del volumen de los RSU surge de la relación entre la cantidad de residuos a disponer, dividido por la densidad esperada después de la compactación. Estas relaciones se expresan en las siguientes ecuaciones

$$A_{rell} = \frac{V_{RSU}}{H_{rell}} \quad \dots (7)$$

$$V_{RSU} = \frac{G_{RSU}}{\rho_{RSU}} \quad \dots (8)$$

Donde:

$A_{rell}$ : área necesaria para el relleno sanitario (m<sup>2</sup>)

$V_{RSU}$ : volumen que ocuparán todos los residuos depositados durante la vida útil del relleno sanitario (m<sup>3</sup>)

$H_{rell}$ : altura del relleno sanitario medida desde la base de este, de acuerdo con las recomendaciones de operación (m)

$G_{RSU}$ : masa de RSU generados a depositar durante la vida útil del relleno sanitario (kg)

$\rho_{RSU}$ : densidad esperada de los residuos, una vez compactados dentro del relleno sanitario (kg/m<sup>3</sup>)

De acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT, un relleno sanitario que reciba más de 750 toneladas de RSU al día, como es el caso de la presente propuesta, deberá de tener una densidad de RSU compactados mayor a 700 kg/m<sup>3</sup>, por lo que se tomará un valor teórico de 700 kg/m<sup>3</sup> al momento de compactar, mientras que el valor de la densidad de los RSU estabilizados deberá ser de 800 kg/m<sup>3</sup>.

Según los datos presentados en el Capítulo 2 del presente trabajo y los cálculos que aparecen en el Anexo 5, la cantidad de RSU esperados en el periodo de 2020 a 2050 es de 61,236,537 toneladas de los cuales el 60% será recibido en el relleno sanitario, es decir, al sitio de disposición final ingresarán 36,741,922 toneladas, que de acuerdo con las ecuaciones 7 y 8 y la densidad de los RSU estabilizados ocuparán un espacio de 57,409,253 m<sup>3</sup> para 30 años de operación, incluyendo el material de cobertura diaria, lo cual corresponde a un área necesaria de 3,588,078 m<sup>2</sup>, en el anexo 7 del presente trabajo se encuentran detallados los cálculos realizados para obtener dicho resultado.

El sitio propuesto tiene el área suficiente para satisfacer la capacidad requerida para los 30 años de operación, incluyendo las áreas administrativas y con una pequeña área remanente.

#### **Área para infraestructura auxiliar.**

Este punto se encuentra cubierto, dado el desarrollo del *lay out* del Capítulo 3.1 del presente trabajo.

#### **Área de amortiguamiento.**

El área de amortiguamiento se refiere a la necesidad de plantar vegetación, de rápido y alto crecimiento, alrededor del perímetro interior del sitio integral de manejo de RSU, debido a que ésta permite eliminar los fuertes olores que se emanan al ambiente, así como mitigar la contaminación visual que se tendría con el relleno sanitario, y el riesgo que la basura se vuele fuera de dicho sitio debido a fuertes vientos.

De acuerdo con la NOM-083- SEMARNAT-2003 y la experiencia de varios autores de manuales de operación de diversos rellenos sanitarios, indican que dicha área deberá tener al menos 10 metros de ancho a partir del perímetro del sitio. Como ya se mencionó; la vegetación deberá crecer rápidamente y alcanzar, al menos, la altura del relleno medida desde el suelo natural, por otra parte, dicha vegetación deberá ser compatible con la fauna y flora existente en la región, las especies que cumplen con el criterio mencionado se presentan en la Tabla 3.13a y 3.13b. Según la información, detallada en las Tablas 3.13a y 3.13b, se propone utilizar pino debido a que alcanzan una mayor altura y su tiempo de crecimiento es relativamente menor, en comparación con las especies descartadas.

Cabe mencionar que es necesario un estudio con mayor grado de detalle para determinar la cantidad de pinos a plantar para cubrir el área mencionada. Para el caso de la presente tesis es necesario cubrir con vegetación 79,600 m<sup>2</sup> de área, correspondientes al área de amortiguamiento con 10 metros de ancho.

Por último, es necesario aclarar que además de la zona de amortiguamiento deberá existir una cerca perimetral, que impida el paso al público en general y a fauna nociva al sitio de disposición, además de alumbrado donde se considere necesario.

### **Capacidad y vida útil del relleno.**

Este punto se encuentra cubierto, dado el desarrollo de los balances de materia indicados en el anexo 5 y el capítulo 2 del presente trabajo.

### **Ubicación del proyecto (Uso actual del terreno y sus colindancias)**

Este punto se encuentra cubierto, dado el desarrollo del Capítulo 2 del presente trabajo donde se menciona el terreno, su uso y las actividades socioeconómicas de la zona.

### **Infraestructura existente**

Para el caso del área destinada al sitio de disposición final, no existe ninguna clase de infraestructura existente, sin embargo, para el caso de las estaciones de transferencia, los sitios seleccionados para su construcción son utilizados actualmente como tiraderos a cielo abierto, los cuales no cuentan con infraestructura adecuada.

### **Propiedad del terreno en cuestión**

Los terrenos que conforman el área seleccionada para el sitio son ejidos, actualmente se desconoce quién es el propietario.

### **Características y análisis del sistema ambiental.**

El sistema ambiental se encuentra definido por las propiedades naturales del aire y el agua que se encuentra en el sitio seleccionado, para el sitio de estudio del presente trabajo se considera información de altimetría e hidrografía.

En la Figura 3.12 se muestra la simbología de la carta hidrológica del Estado de México, mientras que la Figura 3.13 muestra los cuerpos de agua (ríos, lagos, presas y acueductos) existentes en la región y dentro del recuadro rojo se delimita el área propuesta. Como se puede observar, el sitio no interfiere con ningún cuerpo de agua permanente e incluso se encuentra a 500 metros del cuerpo de agua superficial más cercano.

La Figura 3.14 muestran los datos de altimetría de la zona de estudio, donde se puede observar el área propuesta (dentro de un recuadro negro) se encuentra en terreno elevado desde donde escurren las aguas pluviales.

### Capítulo 3 Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos

Tabla 3-13a Especies de vegetación de rápido crecimiento compatibles con la flora y fauna existente en la zona.

VEGETACIÓN	REPRESENTACIÓN GRAFICA	TIEMPO DE CRECIMIENTO	TAMAÑO
<b>Oyamel</b>		10 años	25 a 30 m
<b>Ocote</b>		8 años	30 a 35 m
<b>Pino</b>		20 años	45 m
<b>Cedro</b>		Más de 25 años	10 a 20 m

Fuente: Elaboración propia, con información recuperada de:  
<http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM15mexico/municipios/15005a.html>

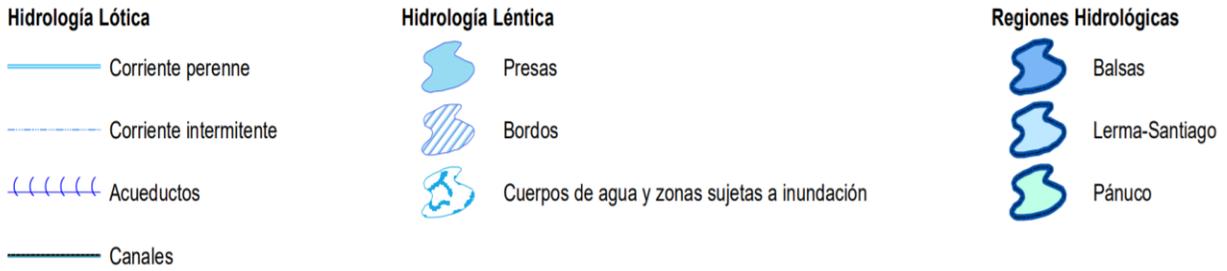
## Capítulo 3 Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos

Tabla 3.13b Especies de vegetación de rápido crecimiento compatibles con la flora y fauna existente en la zona

VEGETACIÓN	REPRESENTACIÓN GRAFICA	TIEMPO DE CRECIMIENTO	TAMAÑO
<b>Encino</b>		Mayor a 10 años en alcanzar su altura final	3 a 40 m
<b>Madroño</b>		5 años	5 a 15 m
<b>Abeto</b>		5 a 7 años	18 m

Fuente: Elaboración propia, con información recuperada de:  
<http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM15mexico/municipios/15005a.html>

## Capítulo 3 Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos



**Figura 3.12** Simbología de la carta hidrológica del Estado de México  
 Fuente: Gobierno del Estado de México, SEDUV Carta hidrológica, (2007). Recuperado de:  
[http://seduv.edomexico.gob.mx/dgau/pdf/plan\\_estatal/D-05.pdf](http://seduv.edomexico.gob.mx/dgau/pdf/plan_estatal/D-05.pdf)



**Figura 3.13** Hidrografía de la zona de interés.  
 Fuente: Gobierno del Estado de México, SEDUV Carta hidrológica, (2007). Recuperado de:  
[http://seduv.edomexico.gob.mx/dgau/pdf/plan\\_estatal/D-05.pdf](http://seduv.edomexico.gob.mx/dgau/pdf/plan_estatal/D-05.pdf)

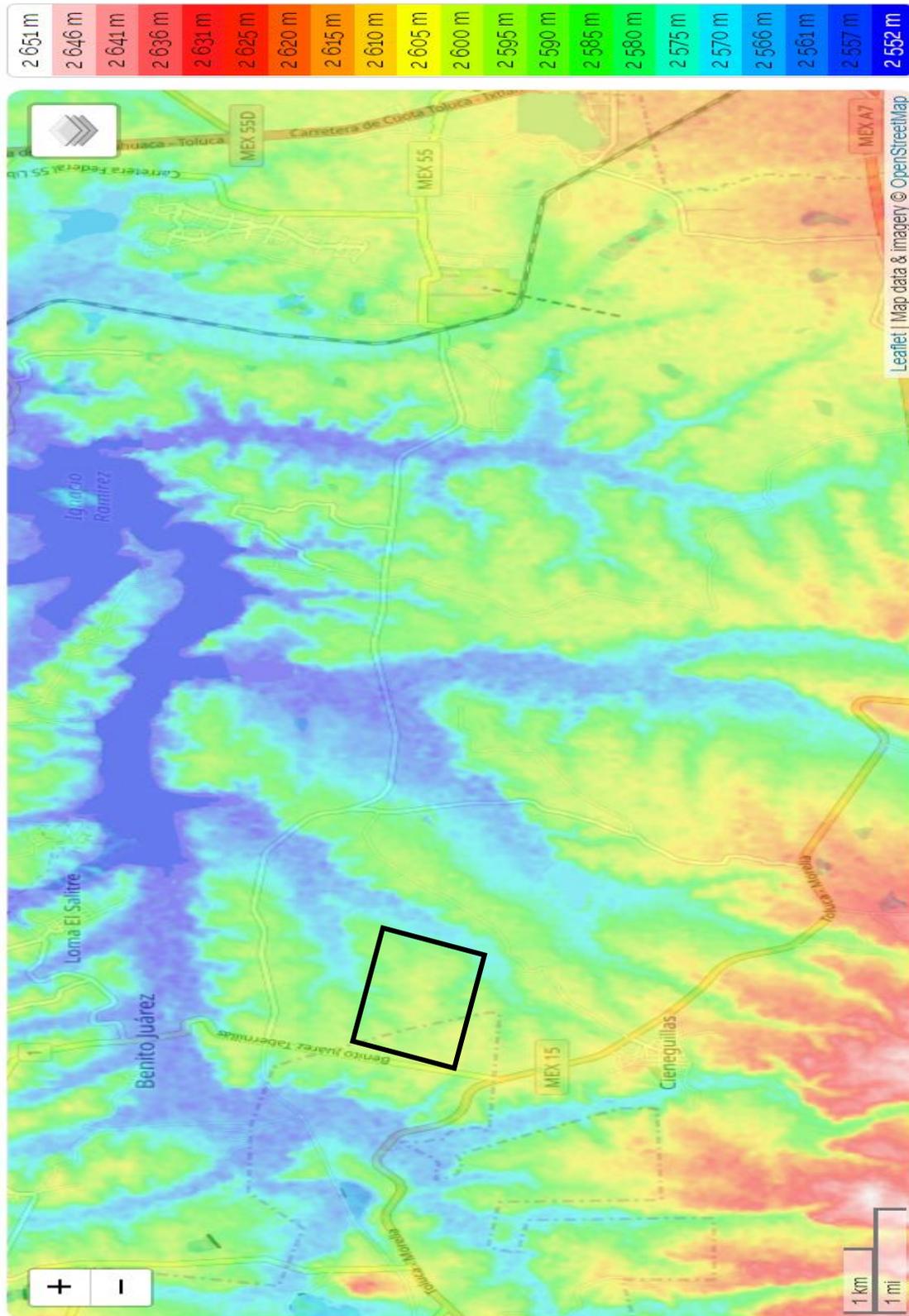


Figura 3.14 Carta de altimetría de la zona de estudio.

Fuente: Topographic- Map, Estado de México Carta de Altimetría, 2019. Recuperado de: <https://es-mx.topographic-map.com/maps/j7lw/Estado-de-M%C3%A9xico/>

## Capítulo 3 Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos

Respecto a los aspectos abióticos del sistema ambiental:

- Clima: el territorio tiene un clima templado subhúmedo, su temperatura promedio oscila entre los 13.5 °C, con una mínima promedio de 3.8 °C y una máxima de 30.1 °C, su precipitación promedio anual mínima en el mes de diciembre de 6 mm y la máxima de 81 mm en el mes de Julio
- Temperatura: en la Tabla 3.14 se pueden observar las temperaturas típicas del municipio de Almoloya de Juárez.

Tabla 3.14 Rango de temperaturas típicas por mes de Almoloya de Juárez

MES	TEMPERATURA PROMEDIO °C	TEMPERATURA MÁXIMA °C	TEMPERATURA MÍNIMA °C
ENERO	10	20	0
FEBRERO	12	21	3
MARZO	13	22	4
ABRIL	14.5	23	6
MAYO	15.5	23	8
JUNIO	15.5	21	10
JULIO	15.5	21	10
AGOSTO	15.5	21	10
SEPTIEMBRE	14.5	20	9
OCTUBRE	13.5	20	7
NOVIEMBRE	11.5	20	3
DICIEMBRE	11.5	19	2

Elaboración propia. Recuperado de: <https://es.weatherspark.com/v/5689/Clima-promedio-en-Villa-de-Almoloya-de-Ju%C3%A1rez-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o#Sections-Humidity>

- Precipitación Pluvial: cómo se puede apreciar en la Tabla 3.15, la temporada con alto nivel de precipitación pluvial comprende de junio a septiembre, mientras que de noviembre a marzo el nivel de precipitación pluvial es mínimo, siendo Julio y febrero los meses con mayor y menor lluvia respectivamente.

Tabla 3.15 Rango de precipitación pluvial típica por mes de Almoloya de Juárez

MES	PRECIPITACIÓN PLUVIAL EN MM
ENERO	9
FEBRERO	5
MARZO	8
ABRIL	15
MAYO	35
JUNIO	68
JULIO	81
AGOSTO	73
SEPTIEMBRE	61
OCTUBRE	35
NOVIEMBRE	8
DICIEMBRE	6

Elaboración propia. Recuperado de: <https://es.weatherspark.com/v/5689/Clima-promedio-en-Villa-de-Almoloya-de-Ju%C3%A1rez-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o#Sections-Humidity>

- **Vientos dominantes:** respecto a la dirección de los vientos en la escala de *Beaufort*, señala vientos dominantes en la mayor parte del territorio municipal provenientes de sur a noreste. En el municipio se registra una escasa oscilación térmica, con la temperatura más elevada en el solsticio de verano con régimen de lluvias en verano y una precipitación pluvial en el invierno menor al 5% del total anual.

De modo que el sitio propuesto se encuentra acorde con el sistema ambiental de la zona.

### **Selección y existencia de material apropiado para cobertura**

Dado que el método de construcción del sitio de disposición es de tipo trinchera, el material de cobertura se encontrará disponible y será de tipo: “Sedimentos lacustres, incluyen: conglomerado, arenisca y limonita semiconsolidados, interestratificados con copas de toba, pómez y diatomita; depósitos lacustres de la formación Ixtapatongo” y “Aluvión: grava arena y limos con interestratificación de ceniza volcánica en los valles de México y Toluca y en otras depresiones pequeñas, resultando del bloque de drenaje por actividad volcánica, así como a lo largo de ríos y arroyo”

### **Caminos de acceso**

El sitio seleccionado solo cuenta con un camino de acceso por el lado oeste, la Avenida Benito Juárez, la cual entronca directamente con la carretera federal Toluca- Morelia 15D. Previamente, en el Capítulo 2 se describieron las rutas de comunicación entre los municipios productores de residuos y el sitio de disposición final.

### **Rellenos mancomunados**

Dado que el sitio propuesto dará servicio a más de diez municipios, se recomienda que la gestión y los recursos sean de manera intermunicipal o bien de manera estatal. Es importante que haya un sistema de gestión adecuado para operar de la manera más eficiente el sitio integral de manejo de residuos.

### **Estudio y evaluación hidrogeológicos**

El estudio y evaluación hidrogeológicos indican las propiedades y comportamiento de las aguas subterráneas y superficiales, es de vital importancia dado que uno de los objetivos del sitio es evitar la contaminación del agua. Este tipo de estudios deben realizarse por agencias certificadas, por lo que en el presente trabajo se expresa la necesidad de contar con este, por lo que no se realizará en esta tesis.

### **Estudio topográfico**

El estudio topográfico indica las propiedades de la superficie que servirá como base para colocar las capas impermeables del relleno, es indispensable contar con un buen nivel del suelo y delimitar el área que tendrá cada una de las instalaciones. Este tipo de estudios deben realizarse por agencias certificadas, por lo que en el presente trabajo se expresa la necesidad de contar con este más no se realizara un estudio de este tipo.

### Estudio geotécnico

El estudio geológico indica las propiedades del suelo y subsuelo para servir como cimentación de una obra de ingeniería. Este tipo de estudios deben realizarse por agencias certificadas, por lo que en el presente trabajo se expresa la necesidad de contar con este más no se realizará un estudio de este tipo.

### Determinación de los equipos requeridos

Consultar la Tabla 3.19.

### Plan de operación

Es necesario definir las técnicas con las que se operará el relleno sanitario, más aún, tomando en cuenta que operará en conjunto con cuatro estaciones de transferencia y la planta clasificadora. En el subcapítulo 3.4.5 del presente trabajo, se desarrollará a detalle dicho plan.

### 3.4.2 DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA DE RELLENO SANITARIO Y SUS IMPLICACIONES AMBIENTALES.

Un relleno sanitario está conformado por celdas, una celda es el volumen de material colocado durante un periodo de operación, usualmente de un día, el cual incluye los RSU depositados y el material de cobertura diaria, que consiste en una capa de 15 a 30 cm de espesor compuesta de suelo virgen, composta o arena fundida, las cuales son aplicadas a la superficie operacional del relleno sanitario al final del periodo operativo (Tchobanoglous et al, 2002). La cobertura diaria del relleno sanitario tiene como objetivos: evitar el arrastre de los RSU, reducir los olores y controlar la cantidad de agua que entra al relleno sanitario durante la operación. Un conjunto de celdas que ocupan toda el área activa del relleno sanitario, creando un nuevo nivel de suelo es llamado capa. Típicamente un relleno sanitario deberá estar compuesto de una serie de capas, que en caso de exceder los 15 m de altura deberá contar con “cercas”, que son las encargadas de mantener la estabilidad del relleno sanitario para la colocación de canales superficiales de drenado de agua y de la tubería de recuperación del biogás. El punto más alto del relleno sanitario deberá estar cubierto por una capa final.

También es importante mencionar que el área de la base del relleno sanitario y sus paredes deberán ser cubiertas por un forro de materiales (naturales o sintéticos), los cuales usualmente consisten en capas sucesivas de arcilla compactada y/o material sintético (geomembrana) diseñado para prevenir la filtración de los lixiviados o el biogás. Mientras que la cubierta final se coloca cuando todas las operaciones del relleno han sido completadas y consiste en igual forma en capas sucesivas de arcilla compactada y/o geomembrana diseñadas para prevenir el escape del biogás o la filtración del agua al relleno sanitario.

### Capítulo 3 Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos

En la Figura 3.15 se muestra el diseño que deberá tener la base del relleno sanitario, con las capas mencionadas con anterioridad y adicionalmente se menciona la dirección que seguirán los lixiviados, así como las terrazas inclinadas y las tuberías de drenaje de lixiviados. De igual forma se muestra la inclinación que debe tener la pared del relleno sanitario (Talud).

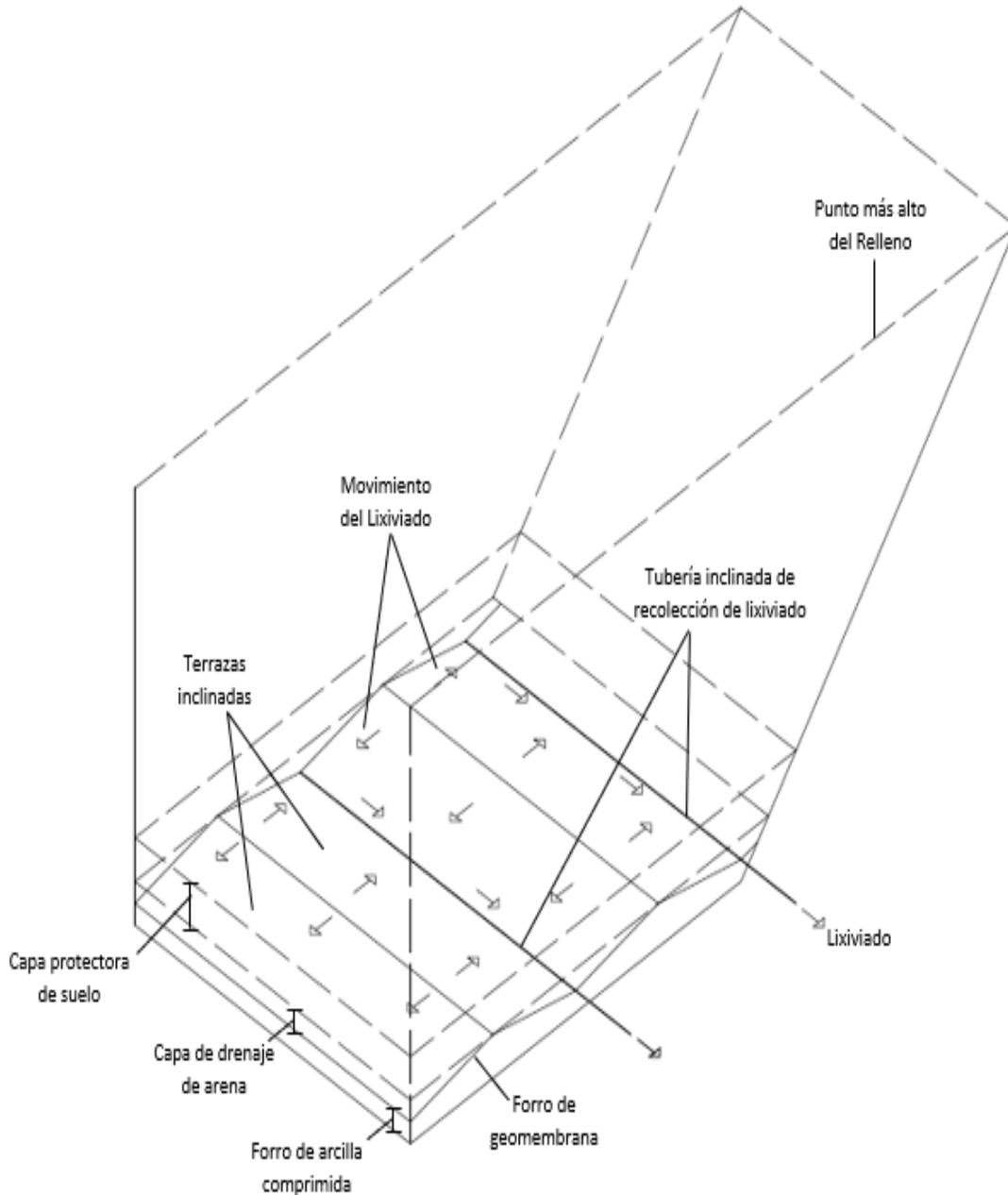
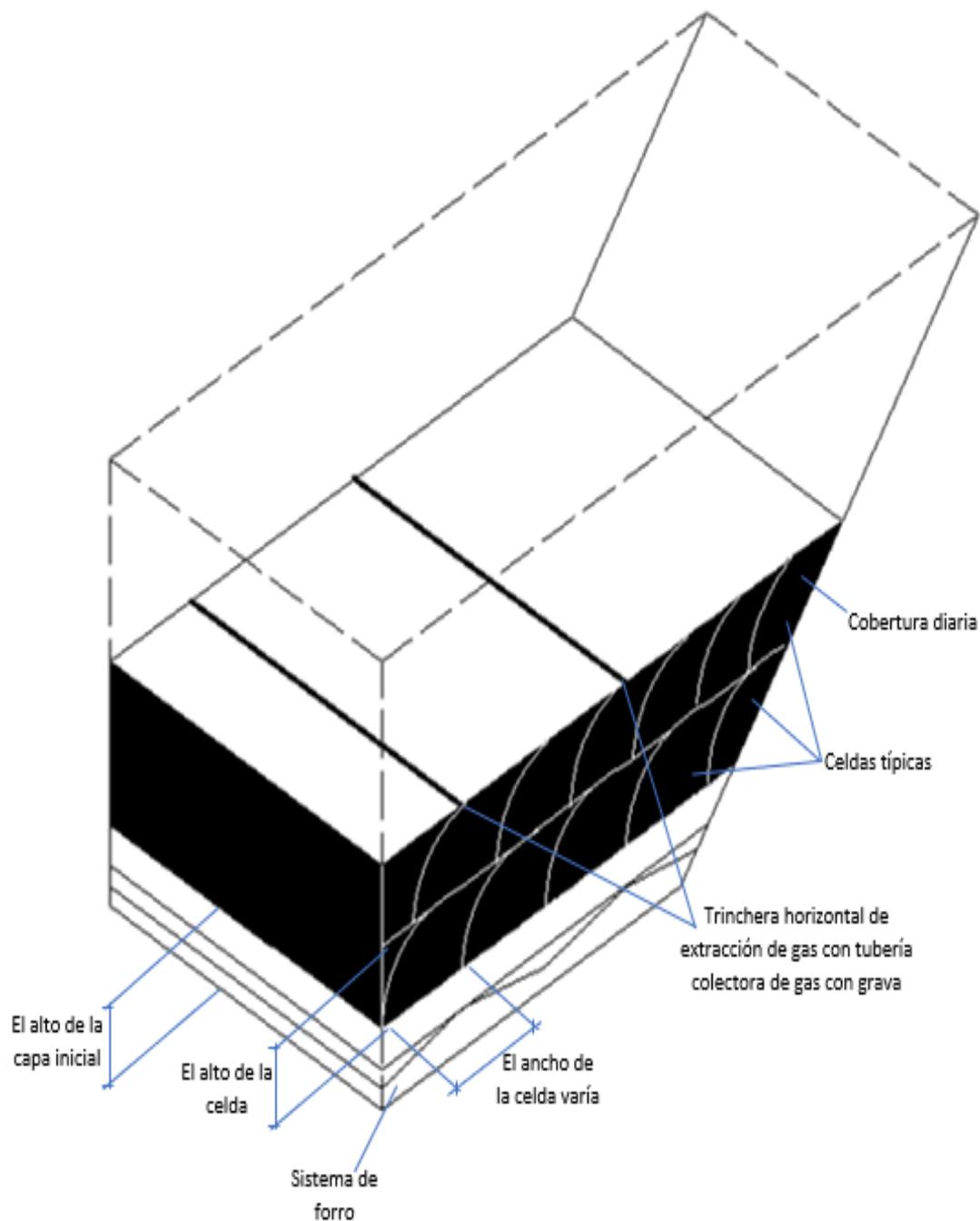


Figura 3.15 Diseño típico de la base de un relleno sanitario.

Fuente: Elaboración propia. Basado en G. Tchobanoglous (1994). *Handbook of solid waste management*, Figure 14.1a

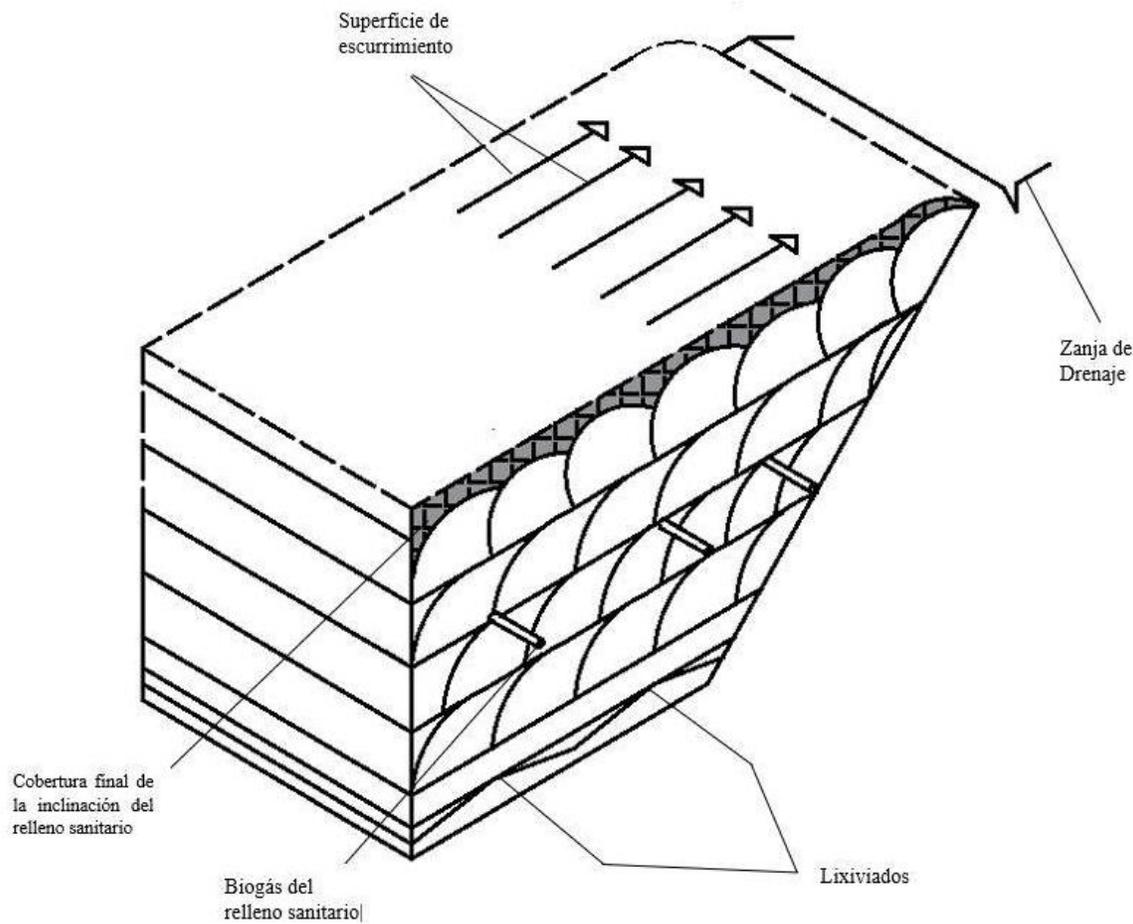
La Figura 3.16 muestra la disposición típica de las celdas durante la operación diaria de un relleno sanitario, junto con la capa de cobertura diaria y trincheras horizontales de extracción de biogás con tubería recolectora de biogás, cubierta con grava. También se puede apreciar que el ancho de la celda varía, mientras que el alto es constante, de modo que al finalizar una capa quede un nuevo nivel de suelo uniforme.



**Figura 3.16** Ilustración típica de las celdas de operación de un relleno sanitario.

Fuente: Elaboración propia. Basado en G. Tchobanoglous (1994). *Handbook of solid waste management*, Figure 14.1b

En la Figura 3.17, se muestra la cubierta final inclinada de un relleno sanitario para el escurrimiento de aguas pluviales, así como la zanja de drenaje de los lixiviados y la ilustración de celdas completamente construidas, incluyendo, la extracción del biogás.



**Figura 3.17** Clausura típica de un relleno sanitario.

Fuente: Elaboración propia. Basado en G. Tchobanoglous (1994). *Handbook of solid waste management*, Figure 14.1c

Existen 3 principales técnicas para la construcción de rellenos sanitarios, las cuales se describen a continuación:

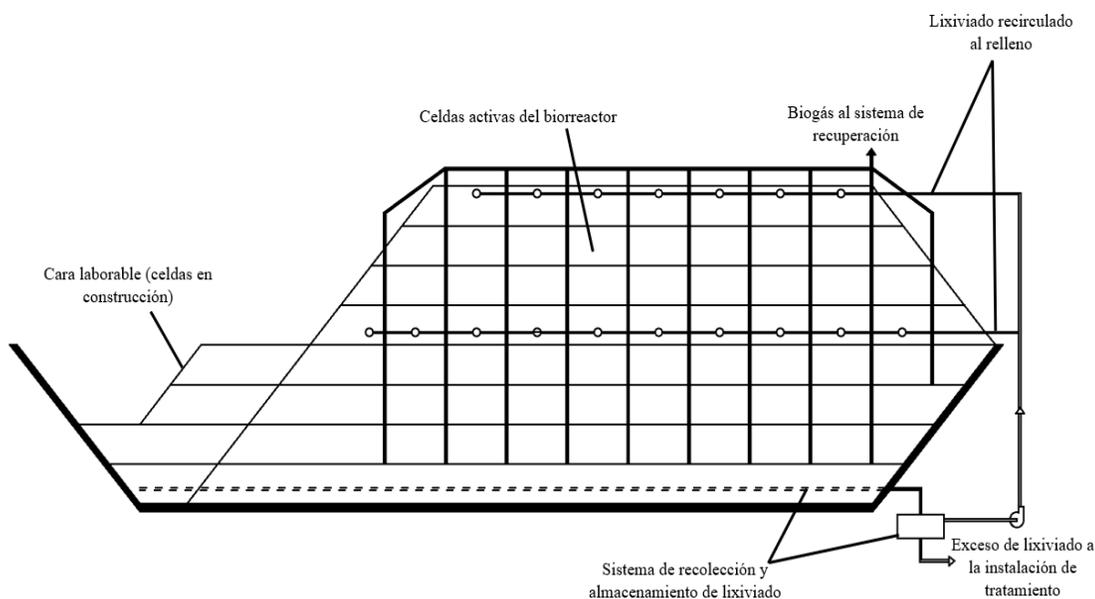
- a) Técnica de la celda excavada: la técnica está adecuada idealmente para áreas con la cantidad de material de cobertura disponible e idóneo en el sitio y además donde el nivel del agua subterránea no se encuentra cerca de la superficie. Típicamente los RSU son colocados en las celdas excavadas en el suelo. El suelo excavado del sitio es utilizado para la cobertura diaria y final del sitio. Las celdas excavadas son típicamente cuadradas por encima de los 300 m de longitud y de largo, con pendiente de lado (el talud) de relación 2:1 hasta 3:1.
- b) Técnica del área: la técnica es utilizada cuando el terreno es inapropiado para la excavación de celdas y las condiciones de agua subterránea son muy cercanas a la

superficie. La preparación del sitio incluye la instalación del recubrimiento y el sistema de gestión de lixiviados y respecto al material de cobertura diario, debe de ser llevado en un camión de algún terreno adyacente o bien de una cantera. En caso de que no exista material de cobertura diaria disponible se puede usar composta producidas de los RSU y desechos de jardinería, arena fundida, o bien de desechos triturados.

- c) Técnica del cañón: cañones, barrancos, canteras abandonadas y presas secas han sido utilizadas como rellenos sanitarios. Esta técnica varía de acuerdo con la geometría del sitio, las características del material de cobertura disponible, la hidrología, la geología del sitio, las instalaciones de control de lixiviado y de gas a utilizar y el acceso al sitio. Típicamente el relleno comienza en la punta del cañón y termina en la boca a modo de prevenir la acumulación de agua detrás del relleno. Los rellenos en cañones y barrancos son llenados en múltiples capas y el método de operación es esencialmente el mismo que los descritos anteriormente, si el suelo del cañón o barranco es razonablemente plano el relleno inicial debe seguir usando la técnica de la celda excavada.

- d) Otros tipos de relleno sanitario: muchas otras configuraciones de rellenos sanitarios se han construido para alcanzar objetivos específicos, por ejemplo: rellenos para los residuos de la construcción y demolición u otros especializados en recibir residuos de fundidoras, industrias del papel, minas o plantas generadoras de energía. Este tipo de rellenos tienen consideraciones únicas de diseño dependiendo de la naturaleza particular del residuo.

Otro tipo de tecnología que se está estableciendo sobre los rellenos sanitarios convencionales es el biorreactor. Un relleno biorreactor es construido y operado de modo que mejore el ritmo de descomposición del material orgánico contenido en los RSU. Los procedimientos de operación se ajustan desde los procedimientos de los rellenos sanitarios convencionales, de modo que inicie rápidamente el proceso de descomposición de los RSU. Las instalaciones de recolección de gas son instaladas inmediatamente después de la construcción de la celda de modo que el gas metano pueda ser recuperado. Además, para acelerar el ritmo de descomposición el lixiviado que fluye desde la base del relleno es recirculado nuevamente al relleno sanitario, de manera que también se pueden utilizar otras fuentes de mezcla como lodos de plantas tratadoras de agua. Otra ventaja de los rellenos sanitarios tipo biorreactor es que reducen el periodo de cuidado post clausura del relleno a un largo plazo, debido a la rápida estabilización de los residuos. La Figura 3.18 muestra el diseño típico de un relleno sanitario tipo biorreactor.



**Figura 3.18** Diseño típico de un relleno tipo biorreactor

Fuente: Elaboración propia. Basado en G. Tchobanoglous (1994). *Handbook of solid waste management*, Figure 14.3

Por lo tanto, para el presente trabajo se propone utilizar el relleno sanitario tipo biorreactor con técnicas de relleno de celda excavada para los primeros 8 metros y área para los siguientes 8 metros de alto, ya que en el caso de la celda excavada se podría contar con disponibilidad de material de cobertura y además este presenta una mayor capacidad, por lo tanto, un mayor tiempo de vida útil. Al utilizar el relleno sanitario tipo biorreactor se pretende aprovechar el biogás generado por los residuos sólidos urbanos.

### **IMPLICACIONES AMBIENTALES QUE CONLLEVAN LOS RELLENOS SANITARIOS.**

Algunas de las preocupaciones más importantes que se tienen son las siguientes:

1. La liberación no controlada de biogás podría migrar fuera del sitio y causar malos olores y otras condiciones potencialmente peligrosas.
2. El impacto de la descarga no controlada del biogás en el efecto invernadero.
3. La liberación no controlada de lixiviado podría migrar e infiltrarse a los mantos freáticos o a los ríos superficiales.
4. La alimentación y reproducción de vectores de enfermedades (como fauna nociva) en rellenos administrados incorrectamente.
5. Los impactos ambientales y a la salud asociados con la liberación de trazas de gases encontrados en rellenos que son liberados por los materiales peligrosos que en el pasado se han colocado en dichos rellenos.

La meta del diseño y la operación de un relleno sanitario es la de eliminar o minimizar los impactos asociados con las preocupaciones anteriormente mencionadas.

### 3.4.3 COBERTURA DIARIA Y FINAL DE LAS CELDAS DEL RELLENO SANITARIO

La cobertura diaria (intermedia) es utilizada para cubrir los residuos colocados diariamente, y tiene como objetivo: mejorar la apariencia estética del relleno sanitario, limitar la cantidad de agua superficial infiltrada y evitar la proliferación de fauna nociva. Es necesario considerar que el método y el material que se utilice para las coberturas intermedias limitara la cantidad de agua superficial que entre al relleno sanitario.

Algunos de los materiales que se recomiendan utilizar para la cobertura intermedia son: amplia variedad de suelos nativos, RSU compostados, residuos de jardinería compostados, residuos de jardinería triturados, residuos de la agricultura, alfombras antiguas, forros sintéticos, geomembranas y residuos de la construcción y la demolición. De los materiales listados solamente los suelos nativos y las geomembranas son los más efectivos limitando la entrada de agua superficial dentro del relleno. Para que la cobertura intermedia funcione correctamente, el material de cobertura debe de ser extendido y compactado apropiadamente para mejorar el escurrimiento de aguas pluviales.

La cobertura intermedia que se propone deberá estar compuesta del suelo nativo en conjunto con residuos de jardinería y residuos de la agricultura, aprovechando sus propiedades de permeabilidad para favorecer la producción de lixiviados y la biodigestión anaeróbica. El espesor que se pretende utilizar es de 25 cm de cobertura intermedia encima de los residuos de una capa terminada.

La cobertura final del relleno sanitario tiene varios propósitos, los cuales son: minimizar la infiltración del agua de lluvia después de que el relleno ha sido completado, limitar la liberación de gases de relleno incontrolada, suprimir la proliferación de fauna nociva, limitar el riesgo de incendio en la zona y proveer una superficie adecuada para la reforestación del sitio. Para alcanzar estos propósitos la cobertura final del relleno sanitario la cobertura final debe cumplir con los siguientes puntos:

- Ser capaz de soportar climas extremos;
- Ser capaz de resistir la erosión del agua y del viento;
- Tener estabilidad contra los desplomes, el agrietamiento y los desplomes de las pendientes;
- Resistir los efectos los diferentes niveles de asentamiento, causados por la liberación de biogás, la compactación de los desechos y de los cimientos;
- Resistir la ruptura debido a la sobrecarga de la acumulación de material de cobertura y el paso de vehículos colectores;
- Resistir las deformaciones causadas por terremotos;
- Soportar alteraciones causadas por componentes del biogás;

- Soportar las interrupciones causadas por plantas, animales excavadores y gusanos e insectos.

Las características generales de una cobertura final se describen a continuación y se muestra su composición en la Figura 3.19. La cobertura final de un relleno sanitario moderno está construida de una serie de capas, de las cuales cada una tiene una función especial.

- La capa subbase de suelo: se utiliza para homogenizar la superficie del relleno sanitario y sirve como base para la capa de barrera, aunque en algunos diseños de cobertura una capa colectora de biogás es colocada debajo de esta subbase para transportar el biogás a las instalaciones de manejo de biogás.
- La capa de barrera: se utiliza para restringir el movimiento de líquidos dentro del relleno sanitario y para liberar el biogás a través de la cobertura.
- La capa de drenaje: se utiliza para transportar el agua pluvial que se percola a través del material de cobertura lejos de la capa de barrera y para reducir la presión del agua en la capa de barrera.
- La capa protectora: es usada para proteger las capas de drenaje de barrera.
- La capa superficial: es utilizada para homogenizar la superficie del terreno y para albergar la vegetación que será utilizada en el diseño a largo plazo de clausura del relleno.

Para el presente trabajo se propone la siguiente configuración de la capa de cobertura final:

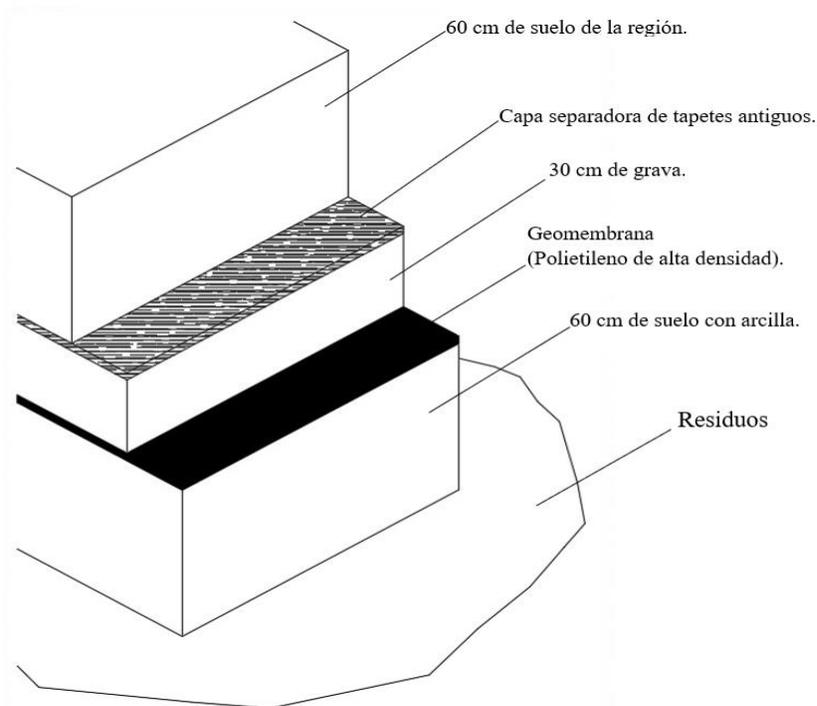
- La capa subbase tendrá un espesor de 0.60 metros, compuesta de suelo nativo y arcilla la cual estará completamente homogeneizada;
- La capa de barrera será la geomembrana la cual está compuesta de polietileno de alta densidad, con 25 mm de espesor;
- La capa de drenaje deberá tener un espesor de 0.30 metros y deberá estar conformada por grava, estará separada por alfombras antiguas, la cual cumple con impedir que se mezcle con la capa superficial, el cual tendrá un espesor de 10 mm.
- La capa protectora las cuales conjuntamente deberán tener un espesor de 0.60 metros, las cuales deberán estar compuestas de suelo de la región.

En la Figura 3.20, se muestra el esquema de la configuración de la capa final, propuesta para el sitio de disposición final.

COMPONENTE	MATERIAL TIPICO
<b>Capa superficial Capa protectora</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suelo de cobertura, disponible localmente o importado.</li> </ul>
<b>Capa de drenaje</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arena, grava o geored</li> <li>• Geotextil separador</li> </ul>
<b>Capa de barrera</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geomembrana</li> </ul>
<b>Capa de subbase</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suelo nativo, compactado y homogéneo.</li> </ul>

**Figura 3.19** Componentes típicos que constituyen la cobertura final de un relleno.

Fuente: Elaboración propia. Basado en G. Tchobanoglous (1994). *Handbook of solid waste management*, Figure 14.29



**Figura 3.20** Configuración propuesta de la cobertura final.

Fuente: Elaboración Propia. Basado en G. Tchobanoglous (1994). *Handbook of solid waste management*, Figure 14. 30a/

### 3.4.4 CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES Y ASENTAMIENTOS DEL RELLENO SANITARIO

Las características estructurales y de los asentamientos del relleno sanitarios deberán ser consideradas en el diseño de los recolectores de biogás y de las instalaciones de drenaje de agua superficial, durante las operaciones de relleno y antes de que se tome una decisión del uso final que se le dará una vez que sea clausurado el sitio de disposición final.

#### Características estructurales.

Cuando los RSU son depositados inicialmente en el relleno sanitario, estos se comportan de una manera similar a otros materiales de relleno. El ángulo nominal de reposo para RSU apilados en un relleno sanitario es aproximadamente una relación 3: 1 (base: altura, respectivamente). Debido a que los RSU tienen la tendencia a deslizarse cuando el ángulo del talud es muy inclinado, se recomienda que las pendientes utilizadas para porciones completadas del relleno sanitario estén dentro del rango de 2.5: 1 hasta 4:1, siendo la relación 3:1 (base=240: altura=80) mayormente utilizada en el campo laboral. Dadas las medidas propuestas para la profundidad del relleno sanitario, la Figura 3.21 muestra la longitud y la altura, en decímetros, y el ángulo que deberán tener los taludes.

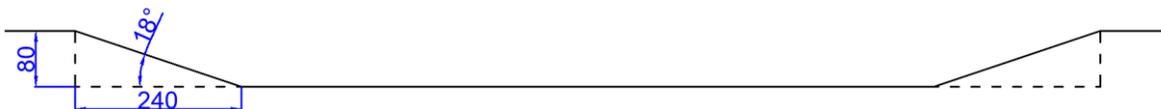


Figura 3.21 Dimensiones del talud propuesto.  
Fuente: Elaboración propia.

Debido a los problemas de deslizamientos de taludes muchos rellenos sanitarios se encuentran cubiertos con algún objeto sólido, como llantas, cuando la altura del relleno excede los 15 metros. Otra función que cumplen estas cubiertas es la de soporte para la instalación de canales de drenaje de agua pluvial y para la colocación de tubería de recuperación de biogás.

#### Sistemas de recubrimiento para RSU.

El objetivo del diseño de los recubrimientos del fondo de un relleno sanitario es minimizar infiltración de lixiviado en la superficie del suelo de bajo del relleno sanitario, para reducir sustancialmente el riesgo de contaminación de agua subterránea. Existen muchos diseños diferentes de este tipo de recubrimientos, para la presente propuesta se elige la siguiente configuración:

Para este tipo de recubrimiento se tienen dos recubrimientos compuestos, comúnmente identificadas como el recubrimiento primario y el recubrimiento secundario. El primario es usado para la colección de lixiviados y el secundario es usado como sistema de detección de fugas y es tomado en cuenta como un respaldo del recubrimiento primario. A continuación, se describe la composición de los recubrimientos respectivamente y en la Figura 3.22 se muestra gráficamente la composición de las capas.

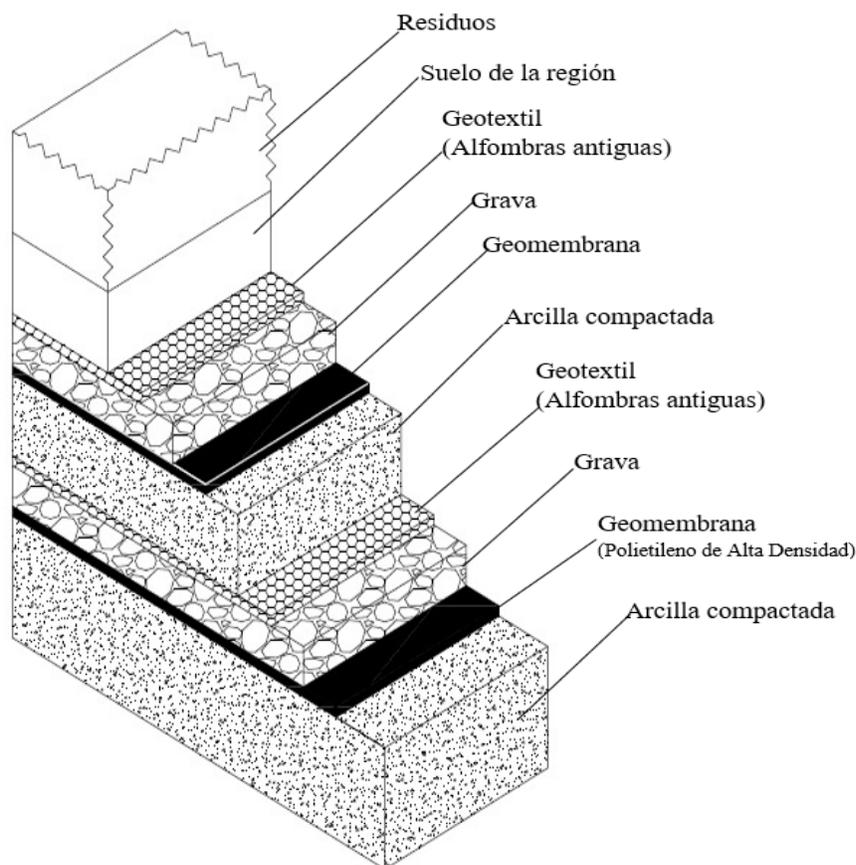
### Capítulo 3 Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos

Para el caso del recubrimiento secundario, deberá estar compuesto por:

- Una capa de arcilla y suelo compactada, con un espesor de 90 cm;
- Una capa de geomembrana la cual deberá estar compuesta de polietileno de alta densidad con un espesor de 25 mm;
- Una capa de grava con un espesor de 30 cm;
- Una capa de geotextil, la cual estará conformada por alfombras antiguas y deberá tener un espesor de 10 mm aproximadamente.

Para el caso del recubrimiento primario, deberá estar compuesta por:

- Una capa de arcilla y suelo compactada, con un espesor de 61 cm;
- Una capa de geomembrana la cual deberá estar compuesta de polietileno de alta densidad con un espesor de 25 mm;
- Una capa de grava con un espesor de 30 cm;
- Una capa de geotextil, la cual estará conformada por alfombras antiguas y deberá tener un espesor de 10 mm aproximadamente.
- Una capa que deberá estar compuesta de suelo de la región con un espesor 60 cm.



**Figura 3.22** Composición del recubrimiento del fondo del relleno sanitario.

Fuente: Elaboración Propia. Basado en G. Tchobanoglous (1994). *Handbook of solid waste management*, Figure 14. 21c

Los dos componentes críticos de los recubrimientos del fondo del relleno son la capa de arcilla y la capa de geomembrana. Para la capa de arcilla se debe considerar que el material es propenso a presentar agrietamiento si no se mantiene húmedo, por lo que se vuelve crítica la tarea de no permitir que se seque la arcilla cuando se esté colocando. Para asegurar dicha condición, esta capa es colocada en subcapas de 10 a 15 cm con compactación adecuada entre la colocación de capas sucesivas. Esta técnica resulta efectiva limitando la posibilidad de fugas que podrían ocurrir si la capa de arcilla fuera colocada en un solo lote.

Para el caso de la geomembrana se deberá asegurar la compatibilidad química de esta capa y los residuos para evitar fallas en el recubrimiento, también se debe considerar una falla física del material. Se debe tomar en cuenta que la instalación de la capa geo sintética deberá ser acompañada de un programa de aseguramiento de la calidad y control de la calidad. Comúnmente se practica pruebas de fugas en todo lo largo del sistema de geomembrana del relleno sanitario, por último, se deben tomar muestras del material de recubrimiento para realizar pruebas de complemento de las especificaciones de construcción,

#### **Asentamientos del relleno sanitario.**

El asentamiento de un relleno sanitario se refiere a la pérdida de volumen de material de relleno, debido a la descomposición de la materia orgánica en lixiviados y biogás, lo cual causa rupturas en la superficie del relleno sanitario y su cobertura, ruptura y desalineaciones de las instalaciones de recuperación de biogás, agrietamiento de los pozos de lixiviados y biogás e interferencia con el subsecuente uso del relleno sanitario después de su clausura.

En general, no se recomienda la construcción de edificaciones permanentes en rellenos sanitarios clausurados, debido a las características desiguales de asentamiento, los cuales varían aspectos de capacidad de las capas superiores del relleno y los problemas potenciales que pudieran resultar de la migración de biogás, incluso cuando se tienen instalaciones de recolección de biogás.

Una vez que son colocados componentes orgánicos en un relleno sanitario, estos sufrirán un proceso de descomposición, que resultara en una pérdida de masa del 30 al 40%. El ritmo de descomposición está directamente relacionado con la humedad contenida en los desechos, siendo los residuos húmedos los que se descompondrán con mayor velocidad. La pérdida de masa resulta en una pérdida de volumen, el cual se convierte en espacio disponible para rellenar con nuevos residuos. El volumen que se pierde usualmente es rellenado cuando las capas más altas son colocadas subsecuentemente sobre las capas iniciales. La pérdida de volumen y masa continuara aun cuando el relleno sea clausurado.

A su vez la densidad del material colocado en el relleno sanitario aumentará debido al peso de los residuos colocados encima de estos mismos, de modo que la densidad promedio de los residuos en una capa dependerá de la profundidad a la que se encuentra dicha capa. La máxima densidad que pueden alcanzar los residuos sólidos en un relleno sanitario bajo la presión de una pila de residuos sólidos varia de 1,000 kg/m<sup>3</sup> hasta 1,300 kg/m<sup>3</sup>

### Capítulo 3 Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos

---

En la Figura 3.23 muestra la densidad que alcanzarán los residuos estabilizados en función de la presión aplicada debida a las capas de residuos encima de estos y de la densidad que tienen los residuos al momento de su depósito en el relleno sanitario. Para el presente caso de estudio se considera que el valor de la densidad es de  $600 \text{ kg/m}^3$  ( $100 \text{ lb/yd}^3$ ) y utilizando valores de masa de residuos calculados en el Anexo 7 del presente trabajo, el valor es igual a  $8,630,520,000 \text{ kg}$  en un área de  $628,080 \text{ m}^2$  se obtiene un valor de presión de las capas de residuos de  $19.55 \text{ psi}$  ( $\text{lb/in}^2$ ). A continuación, se describe la secuencia de cálculos realizados.

1.- Para conocer la presión se utiliza la siguiente ecuación

$$P = \frac{F}{A_{rell}} \quad \dots (9)$$

Donde:

$P$ : presión (Pa)

$F$ : fuerza (N)

$A_{rell}$ : área del relleno sanitario ( $\text{m}^2$ )

2.- Utilizando la ecuación siguiente se puede conocer la fuerza

$$F = m * g \quad \dots (10)$$

Donde

$m$ : masa (kg)

$g$ : Gravedad ( $\text{m/s}^2$ )

Sí

$$m = 8,630,520,000 \text{ kg}$$

$$g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Por lo tanto

$$\begin{aligned} F &= 8,630,520,000 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \\ &= 8.47 * 10^{10} \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2} = 8.47 * 10^{10} \text{ N} \end{aligned}$$

Entonces

$$P = \frac{8.47 * 10^{10} \text{ N}}{628,080 \text{ m}^2} = 134,855.43 \text{ Pa}$$

Sí

$$1 \text{ Pa} = 0.000145038 \text{ psi (lb/plg}^2)$$

Se obtiene

$$P = 134,855.43 \text{ Pa} * \frac{0.000145038 \text{ psi}}{1 \text{ Pa}} \quad \therefore \quad P = 19.56 \text{ psi}$$

3.- Con el valor obtenido de presión y el valor conocido de la densidad de RSU sin estabilizar, se puede leer la densidad de los RSU estabilizados.

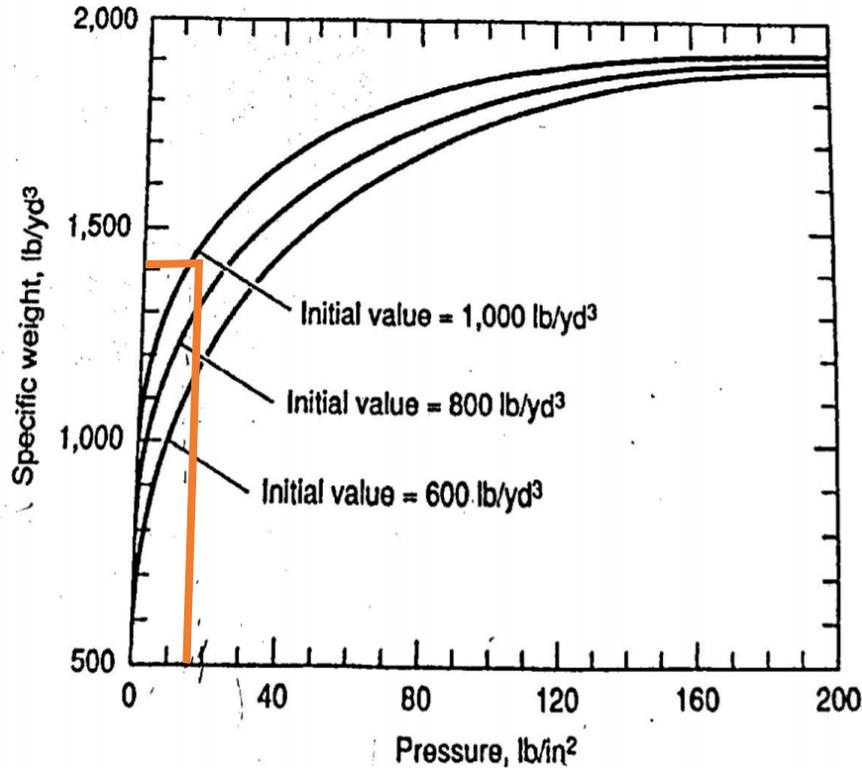


Figura 3.23 Gráfica de peso específico de RSU estabilizados.

Fuente: Elaboración Propia. Basado en G. Tchobanoglous (1994). Handbook of solid waste management, Figure 14.33

4.- Se obtiene un valor de la gráfica de 1,401 lb/yard<sup>3</sup>, realizando el cálculo de conversión de unidades, se obtiene

$$1 \text{ m}^3 = 1.308 \text{ yd}^3$$

$$1 \text{ kg} = 2.2 \text{ lb}$$

Por lo tanto

$$\rho = 1,401 \frac{\text{lb}}{\text{yd}^3} * \frac{1.308 \text{ yd}^3}{1 \text{ m}^3} * \frac{1 \text{ kg}}{2.2 \text{ lb}}$$

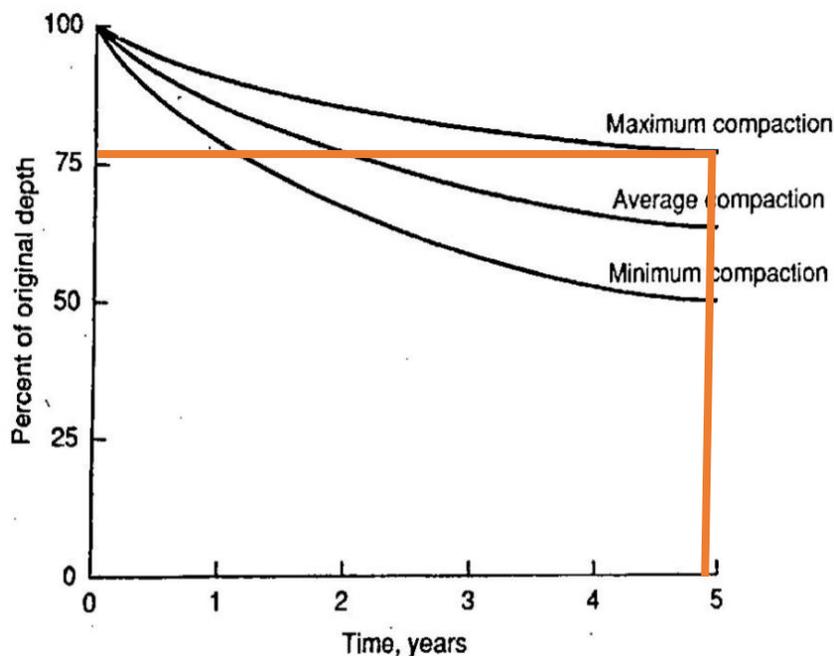
$$\rho = 832.96 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El valor de la densidad de los residuos estabilizados es de 832.96 kg/m<sup>3</sup>, para el presente trabajo para fines prácticos y con base en la recomendación del manual de operación de un relleno sanitarios para RSU y RME se utilizará un valor de 800 kg/m<sup>3</sup>, el cual está dentro del rango del valor obtenido teóricamente.

El incremento la densidad de los RSU es importante debido a que ayuda a determinar la cantidad de residuos que pueden ser colocados en un relleno sanitario y para determinar el grado de asentamiento que se pueda esperar en el relleno después de su clausura.

Respecto a la diferencia de volumen que existirá a causa de los asentamientos en el relleno sanitarios, dependerán de la compactación inicial que se alcance durante el vaciado de los residuos, el grado de descomposición, los efectos debidos al escurrimiento de agua y aire fuera del relleno sanitario y de la altura que alcance dicho sitio. Varios estudios han

encontrado que el 90% de los rellenos sanitarios construidos en los Estados Unidos de América el máximo nivel de asentamiento se alcance dentro de los primeros 5 años. Información representativa del porcentaje de volumen que se podría esperar perder se muestra en la Figura 3.24



**Figura 3.24** Porcentaje de volumen remanente después del asentamiento y compactación del relleno sanitario.  
Fuente: Fuente: Elaboración Propia. Basado en G. Tchobanoglous (1994). *Handbook of solid waste management*, Figure 14.34

De acuerdo con lo que se muestra en la Figura 3.24, en el punto de mayor asentamiento, tomando como referencia el quinto año, y de acuerdo con el valor de compactación máxima, obtenido previamente, se espera que el volumen disminuya un 25%, valor que ya fue considerando en el cálculo del dimensionamiento del área requerida.

### 3.4.5 FORMACIÓN Y COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS

Un relleno sanitario puede ser conceptualizado como un reactor bioquímico, en el cual los residuos sólidos y el agua son los reactantes principales mientras que los lixiviados y el biogás son los productos principales. Los sistemas de control de biogás son empleados para prevenir el movimiento no deseado del biogás hacia la atmósfera y también el biogás recuperado puede ser utilizado para producir energía.

La generación de los principales componentes del biogás ocurre en 5 etapas secuenciales:

1. Etapa 1, es llamada la fase de ajuste inicial, en la cual los componentes orgánicos biodegradables de los RSU comienzan a sufrir descomposición bacteriana, tan pronto como son colocados en el relleno. La mencionada descomposición biológica ocurre en condiciones aeróbicas, debido a que cierta cantidad de aire está atrapada en el relleno sanitario. Cabe mencionar que la principal fuente de organismos aeróbicos y anaeróbicos, los cuales son los encargados de la descomposición de los residuos,

proviene principalmente del suelo que es utilizado como cobertura diaria y final, aunque también se puede utilizar lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales para fomentar la diversidad de crecimiento de la fauna microbiana.

2. Etapa 2, es llamada la fase de transición, en esta fase el oxígeno ha sido completamente agotado y las condiciones anaeróbicas comienzan a desarrollarse. Para saber si el relleno se encuentra en condiciones anaeróbicas es necesario medir el potencial de oxidación. Si dicho potencial se encuentra en el rango de los 50 a 100 MV entonces las condiciones son adecuadas para que la reducción de los nitratos y sulfatos ocurran, mientras que, si el potencial se encuentra en un rango de 150 a 300 MV las condiciones son adecuadas para la producción de metano.
3. Etapa 3, es llamada la fase ácida, es en esta donde la actividad bacteriana iniciada en la etapa anterior es acelerada, debido a la producción de cantidades significativas de ácidos orgánicos y pequeñas cantidades de gas Hidrógeno. Es en esta etapa donde ocurre la biodigestión anaeróbica, la cual, consiste en tres pasos que se dividen en: hidrólisis, acetogénesis-acidogénesis y metanogénesis, se describen a continuación.
  - Hidrólisis: ocurre la transformación enzimática de los componentes de alto peso molecular a componentes de menor peso molecular adecuados para el uso de los microorganismos como fuente de energía.
  - Acetogénesis- Acidogénesis: este segundo paso de la digestión involucra la conversión bacteriana de los componentes resultantes del paso anterior hacia compuestos de peso molecular medio y bajo, tipificados como ácido acético y acetatos de etilo, así como pequeñas trazas de ácido fúlvico, mientras que en forma de gas se producen altas concentraciones de  $\text{CO}_2$  y en menor cantidad  $\text{H}_2$ . El pH del lixiviado frecuentemente cae a un valor de 5 o menor debido a la presencia de los ácidos orgánicos y el efecto de las elevadas concentraciones de dióxido de carbono.
  - Metanogénesis: en este paso un segundo grupo de microorganismos logran obtener el gas metano, mediante la reducción de los acetatos y los ácidos con hidrógeno como reactivo, mientras que la concentración de dióxido de Carbono aumenta. Es aquí donde comienza la cuarta etapa nombrada la fase de fermentación de metano.
4. Etapa 4, llamada fase de fermentación de metano presenta un aumento en el pH debido a la concentración de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ , hacia valores de 6.8 a 8. En cambio, el pH del lixiviado aumentará y la concentración de la Demanda Biológica de Oxígeno ( $\text{DBO}_5$ ), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y el valor de conductividad se verán reducidos.
5. Etapa 5, llamada fase de maduración, esta etapa ocurre después de que el material orgánico biodegradable disponible ha sido convertido a metano y dióxido de carbono. En esta fase el ritmo de producción de metano disminuye significativamente, debido a que solo quedan residuos lentamente biodegradables. Durante esta etapa el biogás este compuesto principalmente de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ , dependiendo de las medidas de

### Capítulo 3 Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos

clausura del relleno pequeñas cantidades de Nitrógeno y Oxígeno podrían ser encontradas.

El proceso descrito anteriormente representa la manera en la que se produce el biogás el cual, dependiendo de la composición de RSU, puede contener: Amoníaco, Dióxido de Carbono, Monóxido de Carbono, Hidrógeno, Ácido Sulfhídrico, Metano, Nitrógeno y Oxígeno. La composición típica cuantificada se muestra en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16 Constituyentes típicos encontrados en biogás.

COMPONENTE	PORCENTAJE (Volumen base seca)
Metano	45-60
Dióxido de Carbono	40-60
Nitrógeno	2-5
Oxígeno	0.1-1
Amoníaco	0.1-1
Ácido Sulfhídrico	0-1
Hidrogeno	0-0.2
Monóxido de Carbono	0-0.2
Componentes traza	0.01-0.6

Fuente: Elaboración Propia. Basado en G. Tchobanoglous (1994). *Handbook of solid waste management*, Table 14.3

En general, la fracción orgánica biodegradable de los RSU puede ser dividida en dos clasificaciones: los residuos rápidamente biodegradables (residuos de comida, papel periódico y una porción de los residuos de jardinería) y los residuos lentamente biodegradables (Caucho, cuero y madera).

Cabe mencionar que el libro de Tchobanoglous, *The handbook of solid waste management* contiene un método para la cuantificación de biogás potencialmente producible, dicho cálculo se realizó y aparece en el Anexo 9 del presente trabajo, sin embargo, en este caso se prefirió tomar el valor que se obtuvo en la visita técnica a SIMEPRODE, debido a que es mejor considerar las condiciones reales ambientales y la caracterización típica de los residuos del caso de estudio.

Por lo tanto, se tomó la decisión de utilizar el Modelo Mexicano de Biogás 2.0, adoptado por SIMEPRODE, para la estimación de producción de gas del relleno, cuyo valor se encontró dentro del rango de los flujos típicos respecto a la visita industrial ya mencionada. A continuación, se presenta dicha estimación.

Se obtuvo el flujo volumétrico que se podría alcanzar en la operación del relleno sanitario en m<sup>3</sup>/h, mediante el Modelo Mexicano, el cual, utiliza un método de estimación independiente que toma en cuenta factores ambientales como lo son la precipitación pluvial, la temperatura de la región, etc. Además, calcula conforme a la composición de los residuos de la región dada, gracias a la base de datos interna con la que cuenta.

El desarrollo de la simulación puede ser encontrada en el Anexo 10, mientras que el valor obtenido por dicho modelo se obtuvo con base en la ecuación que se muestra a continuación

$$Q_{LFG} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0.1}^1 2kL_0 \left[ \frac{Mi}{10} \right] (e^{-kt_{ij}})(MCF)(F) \quad \dots (11)$$

Donde:

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

$i$ : incremento en tiempo de un año

$n$ : (año de cálculo) – (año inicial de disposición de residuos)

$j$ : incremento de tiempo en 0.1 años

$k$ : índice de generación de  $CH_4$  (1/año)

$L_0$ : generación potencial de  $CH_4$  ( $m^3/ton$ )

$Mi$ : masa de residuos dispuestos en el año  $i$  (ton)

$t_{ij}$ : edad de la sección  $j$  de la masa de residuos  $Mi$  dispuestos en el año  $i$  (años decimales)

$MCF$ : factor de corrección para el  $CH_4$

$F$ : factor de ajuste por incendios

El modelo proporciona automáticamente valores para el índice de generación de metano ( $k$ ) y la generación potencial de metano ( $L_0$ ). Estos valores fueron desarrollados usando datos específicos de sitios de disposición final representativos de la república mexicana, basándose en el clima y la caracterización de residuos y la relación entre los valores  $K$  y  $L_0$  observados en sitios de disposición final de Estados Unidos (SCS Engineers, 2009). Los valores de  $k$  varían dependiendo del clima y el grupo de residuos. Los valores de  $L_0$  varían dependiendo del grupo de residuos. El clima está categorizado en cinco regiones basándose en la precipitación media anual promedio y la temperatura de cada región. Para el sitio de disposición final propuesto se consideran los valores para la región 3, “Centro e interior”. El modelo calcula la generación de biogás en un sitio de disposición final, tomando como punto de partida la masa de residuos que se depositan en el mismo ( $Mi$ ). Por lo tanto, el único dato alimentado al modelo fue el de la alimentación anual de residuos, junto con otros 16 rubros que pueden ser consultados en el Anexo 10.

De acuerdo con las consideraciones anteriores y los reportado en el Anexo 10, los valores obtenidos de generación y de recuperación de biogás, para un periodo de 10 años serán respectivamente de

$$Gv_{generado} = 11,805.3 \frac{m^3}{h}$$

Cabe aclarar que el flujo máximo esperado será en el año 2031, dada una eficiencia de recuperación del 80%, cuando se clausure la mega celda 1. Dicho flujo servirá para el dimensionamiento del sistema de recolección y tiene un valor de

$$Gv_{maxrecuperado} = 6,869.4 \frac{m^3}{h}$$

Es necesario aclarar que el 80% recuperado del  $Gv$  generado estará disperso a través de 50 años de producción de biogás, a partir de la primera disposición de residuos.

Como ya se mencionó, el valor del modelo mexicano de biogás versión 2.0, es el más cercano a la realidad, tomando como referencia la producción de biogás del relleno sanitario de SIMEPRODE en salinas victoria con un valor aproximado de 10,695.82 m<sup>3</sup>/h.

### 3.4.6 FORMACIÓN, COMPOSICIÓN GESTIÓN DE LIXIVIADOS.

El lixiviado se define como el líquido que percola a través de los residuos sólidos, y que ha extraído materiales disueltos o suspendidos.

#### Composición del lixiviado.

Cuando el agua percola a través de los residuos sólidos que están siendo descompuestos, ambos, materiales biológicos y constituyentes químicos son llevados o diluidos a la solución de lixiviado.

Debe notarse que la composición química del lixiviado variara enormemente dependiendo de la edad del relleno y de los eventos que hayan sucedido en el relleno sanitario. La Tabla 3.17 muestra la composición típica del lixiviado nuevo, es decir, con menos de dos años de antigüedad.

Determinar el análisis del lixiviado de acuerdo con su edad es complicado, debido a que el lixiviado que está siendo generado en cualquier punto del tiempo es una mezcla del lixiviado derivado de los residuos sólidos de diferentes edades.

Tabla 3.17 Composición típica del lixiviado con no más de 2 años

COMPUESTO	VALOR TIPICO (PPM)
DBO <sub>5</sub>	10,000
Carbón Orgánico Total	6,000
DQO	18,000
Solidos Suspendidos Totales	500
Nitrógeno Orgánico	200
Amoniaco	200
Nitratos	25
Fosforo Total	30
Fosforo disuelto	20
Alcalinidad como CaCO <sub>3</sub>	3,000
pH	6
Dureza de CaCO <sub>3</sub>	3,500
Calcio	1,000
Magnesio	250
Potasio	300
Sodio	500
Cloro	500
Sulfato	300
Metales totales	60

Fuente: Elaboración Propia. Basado en G. Tchobanoglous (1994). Handbook of solid waste management, Table 14.8

### Formación de lixiviados en el relleno sanitario.

Preparar un balance hídrico del relleno sanitario puede estimar la formación potencial del lixiviados. El balance hídrico involucra sumar las cantidades de agua que ingresan al relleno sanitario y restar la cantidad de agua consumida en las reacciones químicas, así como el agua evaporada. La cantidad potencial de lixiviado es la cantidad de agua en exceso de la capacidad de retención de humedad de los residuos. A continuación, en la Figura 3.25 se muestran gráficamente los elementos que componen el balance de agua de un relleno sanitario, y se describen los cálculos a realizar, comenzando con la que se muestra a continuación.

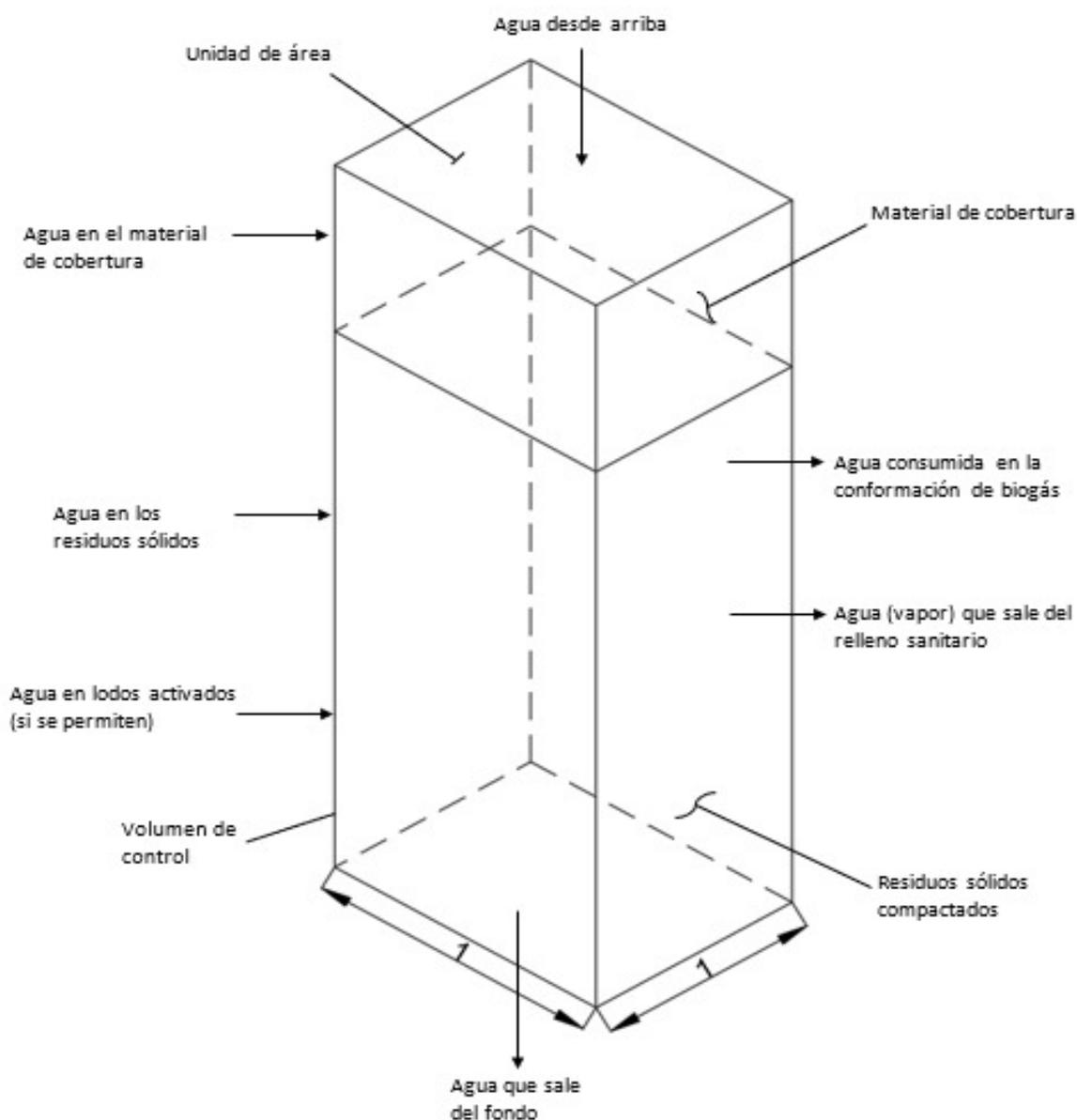


Figura 3.25 Ilustración del balance de agua usado para la evaluación de formación de lixiviados en el relleno sanitario.  
Fuente: Elaboración Propia. Basado en G. Tchobanoglous (1994). *Handbook of solid waste management*, Figure 14.20

$$\Delta S_{SW} = W_{SW} + W_{TS} + W_{CM} + W_{A(R)} - W_{LG} - W_{WV} - W_E + W_{B(L)} \quad \dots (12)$$

Donde:

$\Delta S_{SW}$ : cambio en la cantidad de agua almacenada en los residuos del relleno sanitario ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$W_{SW}$ : humedad de los residuos que ingresan al relleno sanitario ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$W_{TS}$ : humedad en la entrada de los lodos ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$W_{CM}$ : humedad del material de cobertura ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$W_{A(R)}$ : agua de lluvia ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$W_{LG}$ : pérdida de agua en la formación de biogás ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$W_{WV}$ : pérdida de agua como vapor saturado con el biogás ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$W_E$ : pérdida de agua por evaporación en la superficie del relleno sanitario ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$W_{B(L)}$ : agua que sale del fondo del relleno (para la celda colocada directamente encima del sistema de colección de lixiviado; El agua desde el fondo corresponde al lixiviado) ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

Analizando el caso de estudio de la presente tesis, se llega a la conclusión de que el valor de la humedad de agua de los lodos con pretratamiento será nula, debido que no se ingresarán esa clase de residuos en el relleno sanitario. Por lo tanto, la anterior es

$$\Delta S_{SW} = W_{SW} + W_{CM} + W_{A(R)} - W_{LG} \quad \dots (13)$$

Humedad en los residuos sólidos: dependiendo de las condiciones climáticas, el valor se encontrará dentro del rango del 20 al 40% de la masa de residuos.

El valor de humedad típico para los residuos de México es del 37%. Se realizará el cálculo de la humedad para los primeros diez años de operación del relleno sanitarios, es decir, para la primer mega celda del relleno. La ecuación siguiente muestra el método para obtener la variable  $W_{SW}$

$$W_{SW} = W_r * 0.37 \quad \dots (14)$$

Donde:

$W_r$ : el peso de los RSU depositados en la mega celda (kg de RSU)

Por lo tanto

$$W_{SW} = 6,904,415 \text{ ton de RSU} * \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} * 0.37 \frac{\text{kg de H}_2\text{O}}{\text{kg de RSU}} = 2,554,633,550 \text{ kg H}_2\text{O}$$

El valor obtenido corresponde a la cantidad de humedad que ingresara en todo el volumen de residuos en la mega celda 1, por lo que es necesario dividir entre el valor numérico de dicho volumen, que se puede encontrar en el anexo 7, para obtener la cantidad de humedad unitaria, como lo indica la Figura 3.25.

$$W_{SW} = \frac{2,554,633,550 \text{ kg de H}_2\text{O}}{10,049,276 \text{ m}^3 \text{ de relleno}}$$

$$W_{SW} = 254.21 \frac{\text{kg de H}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{ de relleno}}$$

Humedad en el material de cobertura: este dependerá del tipo y la fuente de dicho material y también de la estación de año. La cantidad máxima de humedad que puede contener el

material de cobertura se define con la capacidad de campo. Típicamente los valores para suelo van de un rango del 6 al 12% para arena y 23 al 31% para arcilla.

Para el material de cobertura propuesto, mencionado anteriormente, el cual estará compuesto de arcilla y arena, tendrá una capacidad de campo típica de 35 y 6% respectivamente, obteniendo un valor promedio de capacidad de campo de 21%. Para obtener el valor de  $W_{CM}$  se seguirá la ecuación que se muestra a continuación que involucra la cantidad de material de cobertura a utilizar y la capacidad de campo.

$$W_{CM} = w_{cm} * CC_{CM} \quad \dots (15)$$

Donde:

$w_{cm}$ : el peso de material de cubierta depositados en la mega celda (kg de CM).

$CC_{CM}$ : capacidad de campo del material de cobertura (kg de H<sub>2</sub>O/kg de CM)

Por lo tanto

$$W_{CM} = 1,726,103.75 \text{ ton de CM} * \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} * 0.21 \frac{\text{kg de H}_2\text{O}}{\text{kg de CM}} = 362,481,787.5 \text{ kg de H}_2\text{O}$$

El valor obtenido corresponde a la cantidad de humedad que ingresara en el material de cobertura, debido a su capacidad de campo, en la mega celda 1, por lo que es necesario dividir entre el valor numérico de dicho volumen, que se puede encontrar en el Anexo 7, para obtener la cantidad de humedad unitaria, como lo indica la Figura 3.25

$$W_{CM} = \frac{362,481,787.5 \text{ Kg de H}_2\text{O}}{10,049,276 \text{ m}^3 \text{ de relleno}}$$

$$W_{CM} = 36.07 \frac{\text{Kg de H}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{ de relleno}}$$

Agua de lluvia: la cantidad de agua que entra por la precipitación pluvial depende de la zona donde se construirá el sitio de disposición final, para el caso de la presente tesis presenta un promedio mensual 33.6 mm de lluvia, mientras que el máximo, en el mes de julio, es de 81 mm, valor que se considerará para realizar la estimación de la producción de lixiviados. Lo que es equivalente a 81 litros acumulados en una superficie de 1 m<sup>2</sup> de relleno completado, durante 1 mes.

A continuación, para obtener el valor de  $W_{A(R)}$  solo es necesario, hacer un cambio de unidades por lo que

$$W_{A(R)} = 81 \frac{l}{1 \text{ mes} * 1 \text{ m}^2} * \frac{120 \text{ meses}}{10 \text{ años}} * \frac{1 \text{ kg}}{1 l}$$

$$* W_{A(R)} = 972 \frac{\text{kg de H}_2\text{O}}{\text{m}^2 \text{ de relleno}}$$

NOTA: \*se utilizan unidades de m<sup>2</sup> de relleno a diferencia de los otros valores (m<sup>3</sup> de relleno), dada la naturaleza del agua que entra por lluvia, conceptualmente el valor de área y volumen es el mismo.

Perdida del agua en la formación del biogás: el agua se consume durante la descomposición anaeróbica de los constituyentes orgánicos de la fracción de los RSU, por lo que para obtener el valor de  $W_{LG}$  es necesario realizar los siguientes cálculos:

La cantidad de biogás potencialmente generado, por unidad de volumen de relleno sanitario será, de acuerdo con la ecuación que se muestra a continuación

$$G_{vgenerado} = 11,805.3 \frac{m^3}{h} * \frac{24 h}{1 día} * \frac{365 día}{1 año} * 10 años$$

$$G_{vgenerado} = 1,034,144,280 m^3$$

Por lo tanto

$$n = \frac{PV}{RT} \quad \dots (16)$$

$$n = \frac{1,034,144,280 m^3 * 0.7305 atm}{0.08205 \frac{atm * m^3}{kmol * K} * 293.15K}$$

$$n = 31,600,939.13 kmol$$

Para obtener unidades de masa es necesario calcular el peso molecular promedio del biogás, el cual se obtiene con las fracciones peso de los componentes principales de dicho gas (50% volumen de metano y 50% volumen de dióxido de carbono):

Las fracciones peso serán

$$w_a = \frac{m_a}{m_T} = \frac{m_a}{m_a + m_b}$$

Y, además

$$m_a = n_a * PM_a \quad \& \quad m_b = n_b * PM_b$$

Donde:

*a*: Metano

*b*: Dióxido de Carbono

Obteniendo

$$m_a = 0.5 * 16 = 8 kg \quad \& \quad m_b = 0.5 * 44 = 22 kg$$

Por lo tanto

$$w_a = \frac{8}{8 + 30} = 0.26$$

El peso molecular del biogás es

$$PM_{BioGás} = (0.26)(16) + (1 - 0.26)(44) = 36.72 \frac{kg}{kmol}$$

De modo que la masa de biogás producida en los 10 años de operación de la supercelda número 1, será

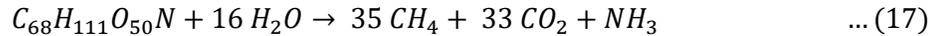
$$G_p = 1,160,386,485 kg \text{ de biogás}$$

Para obtener el valor unitario de la producción de biogás

$$G_P = \frac{1,160,386,485 \text{ kg de biogás}}{10,049,276 \text{ m}^3 \text{ de relleno}}$$

$$G_P = 115.47 \frac{\text{kg biogás}}{\text{m}^3 \text{ de relleno}}$$

Con el valor obtenido y la estequiometría de la ecuación de Tchobanoglous desarrollada en el Anexo 9, se puede obtener la cantidad de agua que se consumirá en la reacción de descomposición de residuos como se muestra a continuación en la ecuación siguiente



Realizando el cálculo para obtener la cantidad de reactivo necesario para que se lleve a cabo la reacción anterior, se tomó como referencia los coeficientes estequiométricos multiplicados por su respectivo peso molecular de cada elemento, por lo que se obtiene

$$C_{68}H_{111}O_{50}N = 1741$$

$$16 H_2O = 288$$

$$35 CH_4 = 560$$

$$33 CO_2 = 1452$$

$$NH_3 = 17$$

Por otro lado, se obtiene la relación que por cada 288 unidades de masa de agua se consumirán 1741 unidades de masa de materia orgánica, es decir

$$\frac{\text{Agua consumida}}{\text{Materia Orgánica}} = \frac{288}{1741} = 0.165$$

Por lo que, para obtener la ecuación para estimar la cantidad de agua consumida por la formación de biogás, estará dada por la ecuación

$$W_{LG} = G_P * 0.165 \quad \dots (18)$$

$$W_{LG} = 115.47 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0.165$$

$$W_{LG} = 19.052 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{ de relleno}}$$

#### Capacidad de campo del relleno sanitario.

El agua que entra al relleno sanitario, que no se consume y que tampoco sale como vapor podría ser retenida dentro del relleno sanitario o salir como un lixiviado. La cantidad de humedad que pueden retener los residuos y el material de cobertura intermedia estará determinada por la capacidad de campo. De modo que dicha capacidad estará definida por la siguiente ecuación

$$CC = FC * w_{srs} \quad \dots (19)$$

Donde:

CC: capacidad de campo del relleno sanitario.

### Capítulo 3 Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos

$w_{srs}$ : peso seco de los residuos sólidos depositados en el relleno sanitario (kg de RSU)

$FC$ : factor de capacidad de campo, el cual se calculará con la ecuación que se muestra a continuación

$$FC = 0.6 - 0.5 \left( \frac{W}{4,536 + W} \right) \quad \dots (20)$$

Donde:

$W$ : peso de sobrecarga de agua calculado a una altura media, de los residuos en el nivel en cuestión (kg de  $H_2O$ ), la cual se calcula con la ecuación siguiente

$$W = W_N + 0.5(w_{srs} + w_{aar}) + w_{mc} \quad \dots (21)$$

Donde:

$W_N$ : peso total de la mega celda (kg de  $H_2O$ )

$w_{aar}$ : peso del agua almacenada en los residuos (kg de  $H_2O$ )

$w_{mc}$ : peso del material de cobertura. (kg de  $H_2O$ )

Por lo tanto

$$W = 8,630,520,000 + 0.5(4,349,782,080 + 2,554,633,920) + 1,726,104,000$$

$$W = 1.380883 \times 10^{10} \text{ kg de } H_2O$$

Y  $FC$  es

$$FC = 0.6 - 0.5 \left( \frac{1.380883 \times 10^{10}}{4,536 + 1.380883 \times 10^{10}} \right)$$

$$FC = 0.1$$

Y  $CC$  es

$$CC = 0.1 * 4,349,782,080$$

$$CC = 434,978,208 \text{ kg de } H_2O$$

Para unificar unidades se debe obtener el valor unitario de la capacidad de campo

$$CC = \frac{434,978,208 \text{ kg de } H_2O}{10,049,276 \text{ m}^3 \text{ de relleno}}$$

$$CC = 43.28 \frac{\text{kg de } H_2O}{\text{m}^3 \text{ de relleno}}$$

Y  $\Delta S_{SW}$  es, de acuerdo con la ecuación número 13

$$\Delta S_{SW} = 254.21 + 36.07 + 972 - 19.05$$

$$\Delta S_{SW} = 1,243.23 \frac{\text{kg de } H_2O}{\text{m}^3 \text{ de relleno}}$$

Por lo tanto, la cantidad de lixiviado está dada por la siguiente ecuación

$$L = \Delta S_{SW} - CC \quad \dots (22)$$

$$L = 1,243.23 - 43.28$$

$$L = 1,199.95 \frac{\text{kg de lixiviado}}{\text{m}^3 \text{ de relleno}}$$

Esta cantidad de lixiviado es para la producción de dicho fluido en los 10 años de operación de la mega celda por unidad de metro cúbico de relleno sanitario, por lo que para dimensionar el sistema de gestión de lixiviado se utilizará el flujo promedio por hora

$$G_L = 1,199.95 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 10,049,276 \text{m}^3 * \frac{1}{10 \text{ años}} * \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}}$$

$$G_L = 137,655.58 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Considerando una densidad estándar para los lixiviados de 950 kg/m<sup>3</sup>

$$G_L = 144.91 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Por lo tanto, la tubería que conducirán el lixiviado deberán tener un diámetro de acuerdo con la ecuación siguiente

$$\phi = \sqrt{\frac{4 * Gl}{\pi * v}} \quad \dots (23)$$

Donde:

$\phi$ : diámetro teórico de la tubería (in)

$Gl$ : gasto volumétrico de los lixiviados (m<sup>3</sup>/h)

$v$ : velocidad del lixiviado máxima = 4 m/s

Por lo tanto, es

$$\phi = \sqrt{\frac{4 * 144.91 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{\pi * 4 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}}}$$

El diámetro teórico es

$$\phi = 0.1317 \text{m} = 5.18 \text{ in}$$

En diámetro nominal de tubería es

$$\phi = 6" \text{ ced. 40}$$

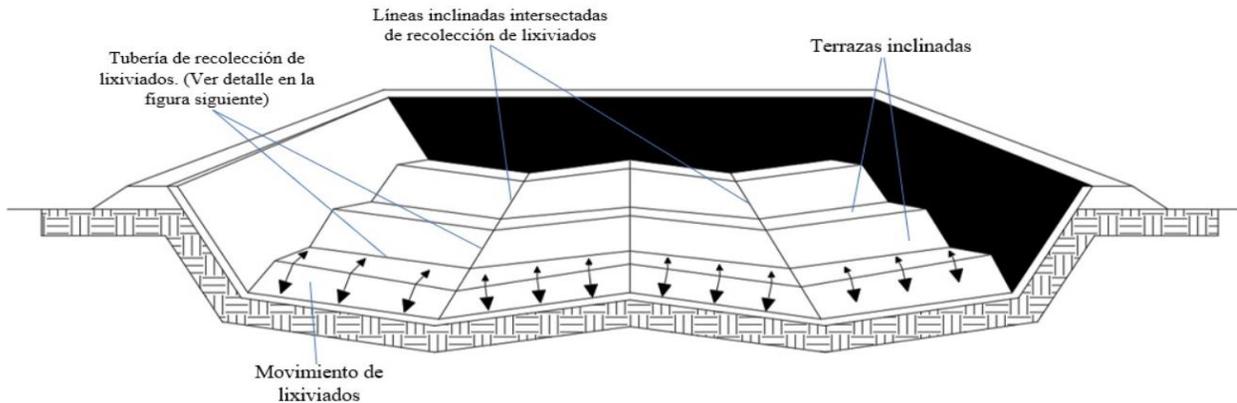
Se propone exista un sistema de recirculación de lixiviados, no para evitar la ausencia de agua en el relleno, sino para aumentar la producción de metano mediante un incremento en la diversidad de microorganismos, ya que estos abundan en los lixiviados. No se podría estimar la cantidad de lixiviados a recircular dado que esto depende únicamente de la calidad del biogás que se extrae del relleno, es decir, si el biogás tiene una baja concentración de metano (<45%) deberán inyectarse lixiviados para fomentar la biodigestión anaeróbica. Por lo tanto, la cantidad de lixiviados a recircular deberá obtenerse durante la operación del sitio.

### Sistema de recolección de lixiviados.

Un sistema de recolección de lixiviados comprende el recubrimiento del fondo del relleno, el sistema de recolección de lixiviados, las instalaciones de remoción de lixiviados y las instalaciones de almacenamiento de lixiviados.

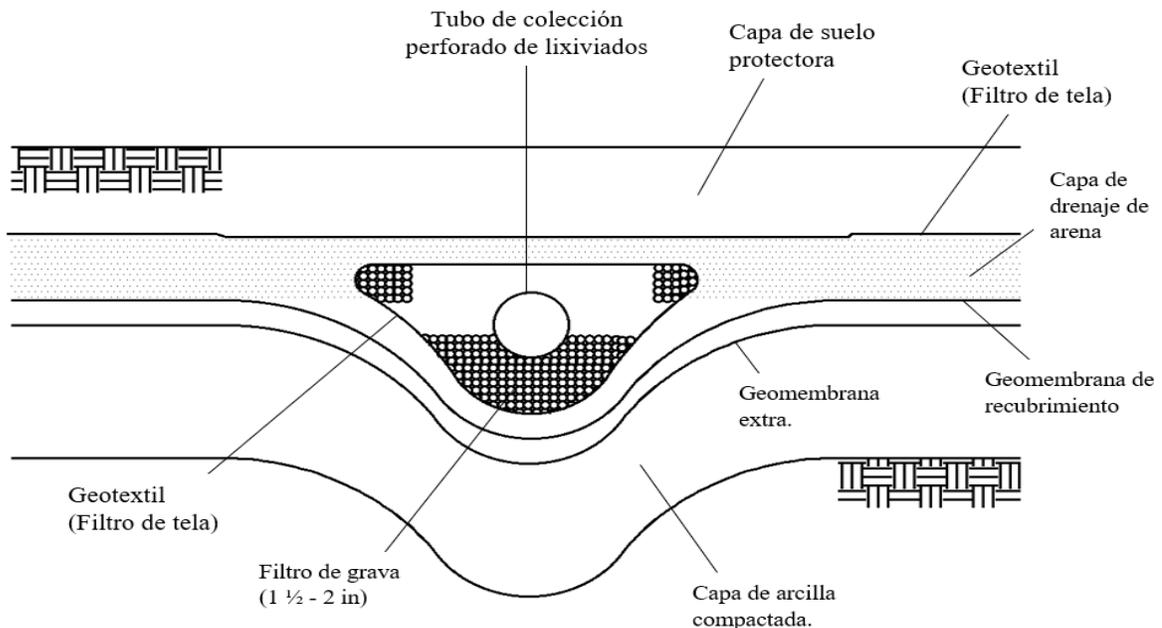
El recubrimiento del fondo del relleno sanitario ha sido tratado a detalle anteriormente como se puede observar en la Figura 3.18.

Las instalaciones de recolección de lixiviados son las encargadas de manejar el lixiviado que se acumula en el fondo del relleno sanitario y usualmente se logra este objetivo mediante el uso de una serie de terrazas inclinadas y un sistema de tuberías de recolección, como se muestra en la Figura 3.26a y la Figura 3.26b



**Figura 3.26 a** Vista general de un sistema de recolección de lixiviados con terrazas inclinadas.

Fuente: Elaboración Propia. Basado en G. Tchobanoglous (1994). *Handbook of solid waste management*, Figure 14.23a



**Figura 3.26b** Detalle del tubo de recolección típico de lixiviados.

Fuente: Elaboración Propia. Basado en G. Tchobanoglous (1994). *Handbook of solid waste management*, Figure 14.23b

### Capítulo 3 Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos

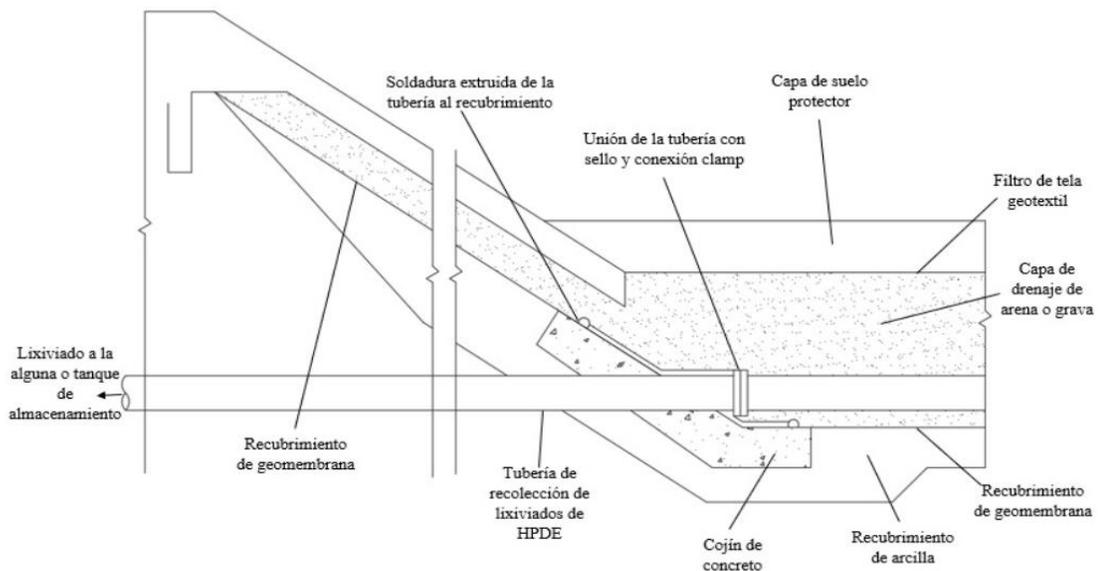
El objetivo del diseño es no permitir que se estanquen los lixiviados en el fondo del relleno de modo de que se creé una cabeza hidráulica en el recubrimiento del relleno.

Instalaciones de remoción de lixiviados consisten en un tubo que pasa a través de lado del relleno sanitario. En este método se debe tener mucho cuidado para asegurarse de que el sello donde el tubo penetra el recubrimiento de la pared del relleno sanitario sea sólido. En la Figura 3.27 se muestra la tubería de recolección de lixiviados que pasa a través del lado del relleno sanitario hasta el sistema de almacenamiento o tratamiento de lixiviados.

Por otro lado, la capacidad del tanque de almacenamiento dependerá del tipo de instalaciones de tratamiento que este disponibles y del ritmo de descarga máximo permitido para las instalaciones de tratamiento. Típicamente, los tanques de almacenamiento de lixiviados están diseñados para retener de uno a tres días de producción de lixiviado en el periodo de máxima producción de lixiviados. En la Figura 3.28 se muestra un tanque de recolección de lixiviados típico.

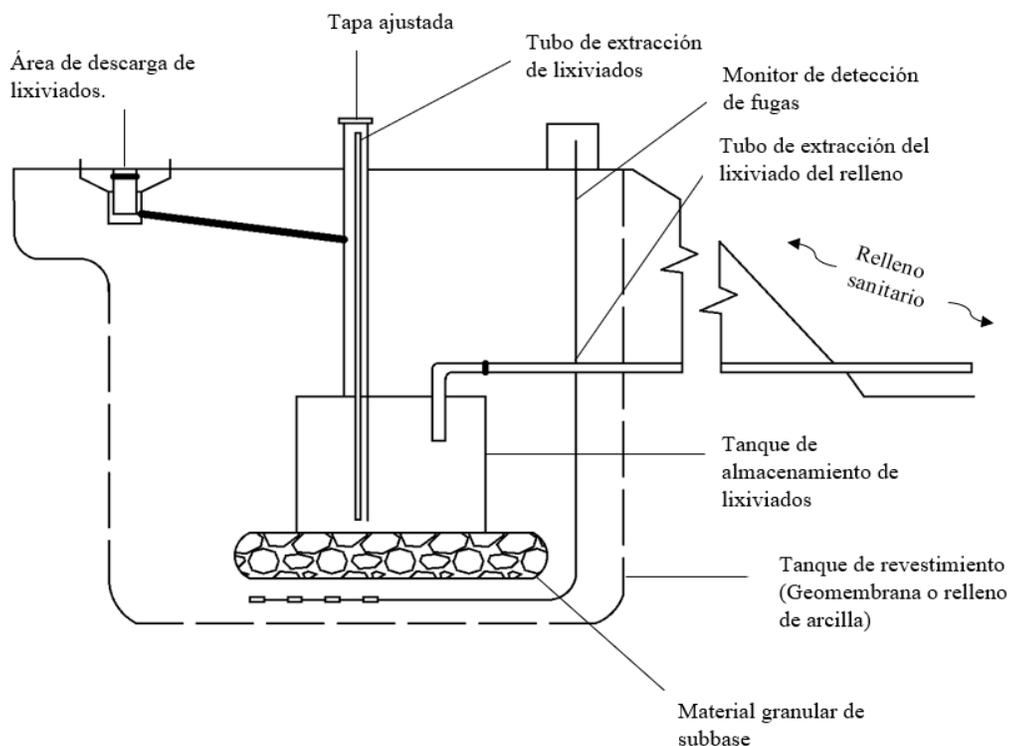
Existen diversos sistemas de extracción de lixiviados, sin embargo, para el presente trabajo se considera las opciones descritas anteriormente, dado que son la mejor opción para el tipo de relleno que se va a utilizar.

El manejo de lixiviados que se pretende utilizar para la presente tesis es una recirculación, ya que este influye en la descomposición del proceso. Cuando los lixiviados son recirculados, los componentes son disminuidos por la actividad biológica y por otras reacciones químicas y biológicas que existen dentro del relleno sanitario, por ejemplo, los ácidos orgánicos simples presentes en los lixiviados se convierten en metano y dióxido de carbono, debido al aumento de pH dentro del relleno sanitario y cuando el metano es producido, los metales son precipitados y retenidos dentro del sitio de disposición.



**Figura 3.27** Sistemas típicos usados para recolectar y remover lixiviados del relleno sanitario.

Fuente: *Elaboración Propia. Basado en G. Tchobanoglous (1994). Handbook of solid waste management, Figure 14. 24a*



**Figura 3.28** Tanque de almacenamiento de lixiviados.

Fuente: Elaboración Propia. Basado en G. Tchobanoglous (1994). *Handbook of solid waste management*, Figure 14.25b

Un beneficio adicional de la recirculación de lixiviados es la recuperación del gas del relleno que contiene metano. Típicamente, el ritmo de descomposición de producción de biogás es mejor en sistemas de recirculación de lixiviados.

Otro método que se pretende utilizar para el manejo de lixiviados es usar un estanque de evaporación de lixiviados, ya que los lixiviados que no son utilizados para la recirculación son evaporados en este estanque, por lo que en la Figura 3.28 se puede considerar una laguna para los lixiviados que no se recirculen, la cual este protegida en sus lados por bardas y en el techo cuenta con una malla tipo mosquitero para evitar entren vectores como lo son: animales rastreros o voladores, a la laguna de lixiviados.

### 3.4.7 MONITOREO DE LA CALIDAD AMBIENTAL

El monitoreo ambiental es conducido en los rellenos sanitarios para asegurarse de que no haya contaminantes liberados por los residuos que pudieran afectar la salud pública y el medio ambiente que rodea al relleno. El monitoreo ambiental se divide en tres categorías, las cuales son: el monitoreo de gases y líquidos en la zona vadosa, el monitoreo del agua subterránea y el monitoreo de la calidad del aire.

Para el presente trabajo, se mencionan a continuación las medidas con las cuales se proponen trabajar el monitoreo ambiental de acuerdo con las tres categorías mencionadas.

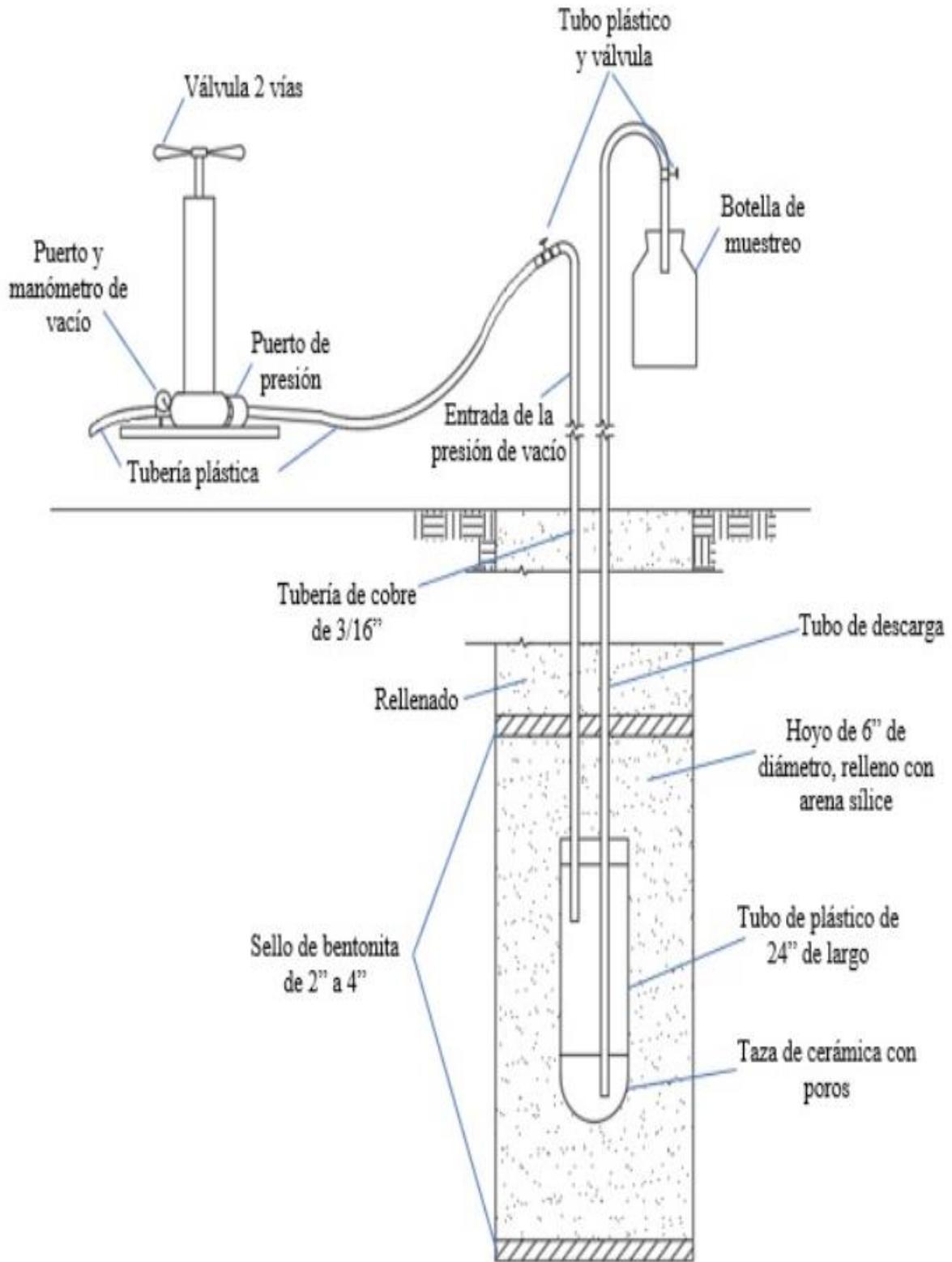
1. Monitoreo de la zona vadosa, se define como la zona desde la superficie del terreno hasta donde se encuentra el agua subterránea. Una característica importante de la zona

vadosa es que los espacios porosos no están llenos de agua, y las pequeñas cantidades de agua que están presentes coexisten con aire. El monitoreo de la zona vadosa en rellenos sanitarios involucra a ambos, líquidos y gases.

El dispositivo propuesto para extraer las muestras de líquidos en la zona no saturada es llamado lisímetro, y se muestra gráficamente en la Figura 3.29. Aunque existen muchas clases de lisímetros para el presente trabajo se propone el tipo copa de cerámica, dado que es el dispositivo más comúnmente usado y que presente facilidad para ser remplazado. El dispositivo consiste un anillo o copa porosa fabricado de material cerámico, el cual está conectado a una sección corta de tubing no poroso, usualmente fabricado de PVC. Cuando la copa es colocada en el suelo los poros de esta se convierten en una extensión del espacio poroso del suelo de modo que la humedad del suelo es llevada a través de los poros de cerámica mediante la aplicación de un vacío.

El monitoreo de gases en la zona vadosa es necesario para detectar movimiento lateral de biogás. Para el presente trabajo se propone una sonda de monitoreo de gases, la cual se muestra en la Figura 3.30 junto con las partes que la componen. La precisión con la cual estas sondas pueden medir la cantidad total de migración del gas desde el sitio debe de ser reconocida. Para el plan de operación del relleno sanitario se debe considerar una programación de monitoreo intensivo en los periodos cuando se esperen altos ritmos de migración de gas. Dicha planeación de monitoreo intensivo deberá estar basada en la descomposición de los residuos, el clima y las condiciones del suelo observadas durante las pruebas de baja frecuencia que están asociadas con los cambios en los ritmos de migración de gas.

2. El monitoreo del agua subterránea es necesario para detectar cambios en la calidad del agua que podrían ser causados por la filtración del biogás y los lixiviados. Se deben instalar pozos aguas arriba y aguas abajo del relleno sanitario para detectar cualquier contaminación del manto acuífero. Para el presente trabajo se proponen pozos de muestreo como se pueden observar en la Figura 3.31 donde también se muestran los componentes de dichos pozos. Es importante recalcar que para obtener una muestra representativa el mismo equipo debe ser utilizado en cada muestreo y el pozo debe ser purgado antes del muestreo. También es de vital importancia que el personal responsable de recolectar y manipular las muestras se apegue a los protocolos para asegurarse de que dichas muestras no se degraden mientras están siendo llevadas al laboratorio, esto incluye mantener las muestras de aguas frías, entregar las muestras al laboratorio de acuerdo con los procedimientos especificados y el manejo adecuado de las muestras una vez que éstas llegan al laboratorio. Adicionalmente el equipo de laboratorio debe estar calibrado utilizando métodos estándar o bien mediante un laboratorio especializado.



**Figura 3.29** Lisímetro de succión de copa porosa para la recolección de muestras líquidas de la zona vadosa  
*Fuente: Elaboración Propia. Basado en G. Tchobanoglous (1994). Handbook of solid waste management, Figure 14.46*

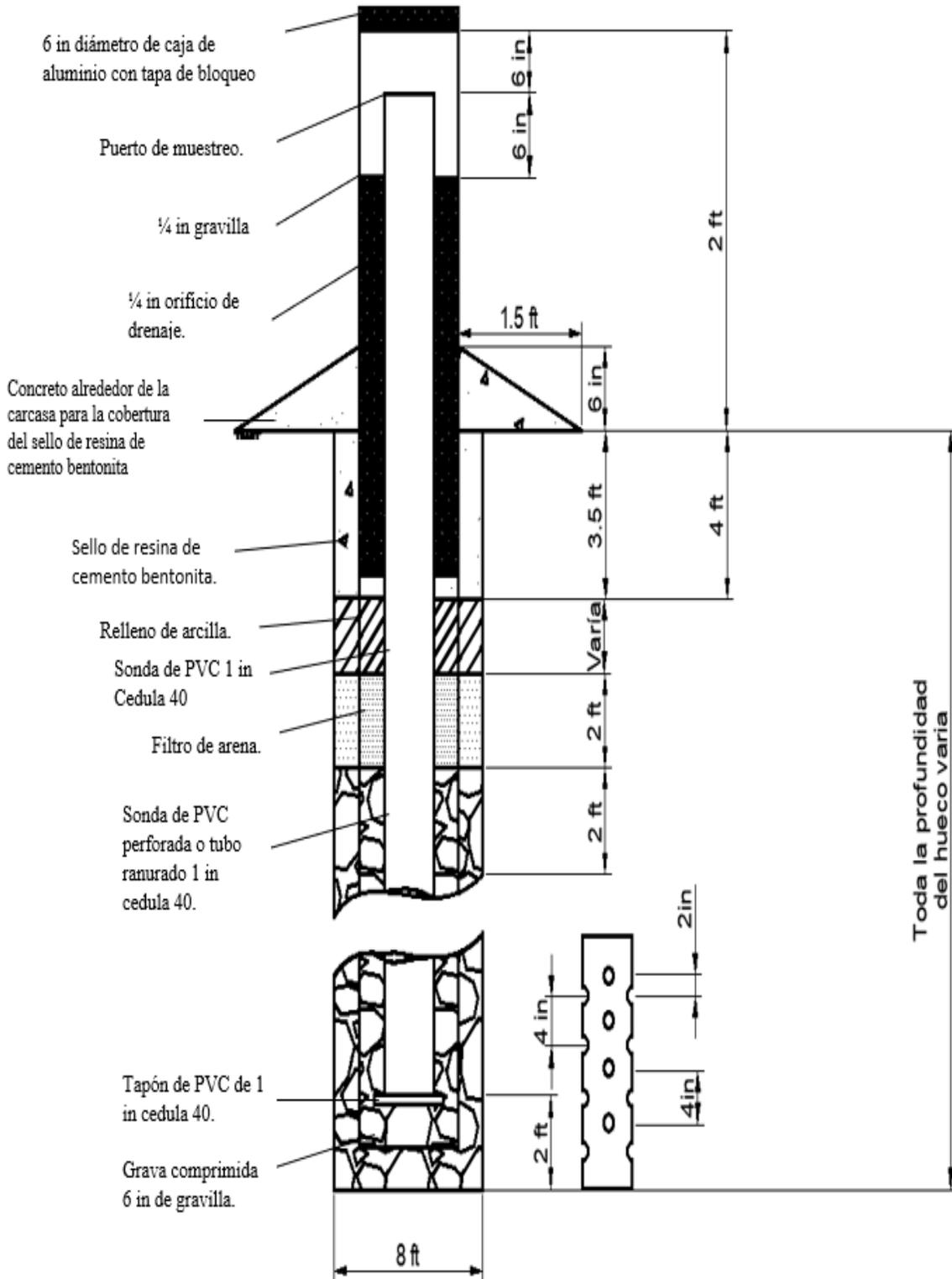


Figura 3.30 Sonda de monitoreo de gas en la zona vadosa.

Fuente: Elaboración Propia. Basado en G. Tchobanoglous (1994). Handbook of solid waste management, Figure 14.47

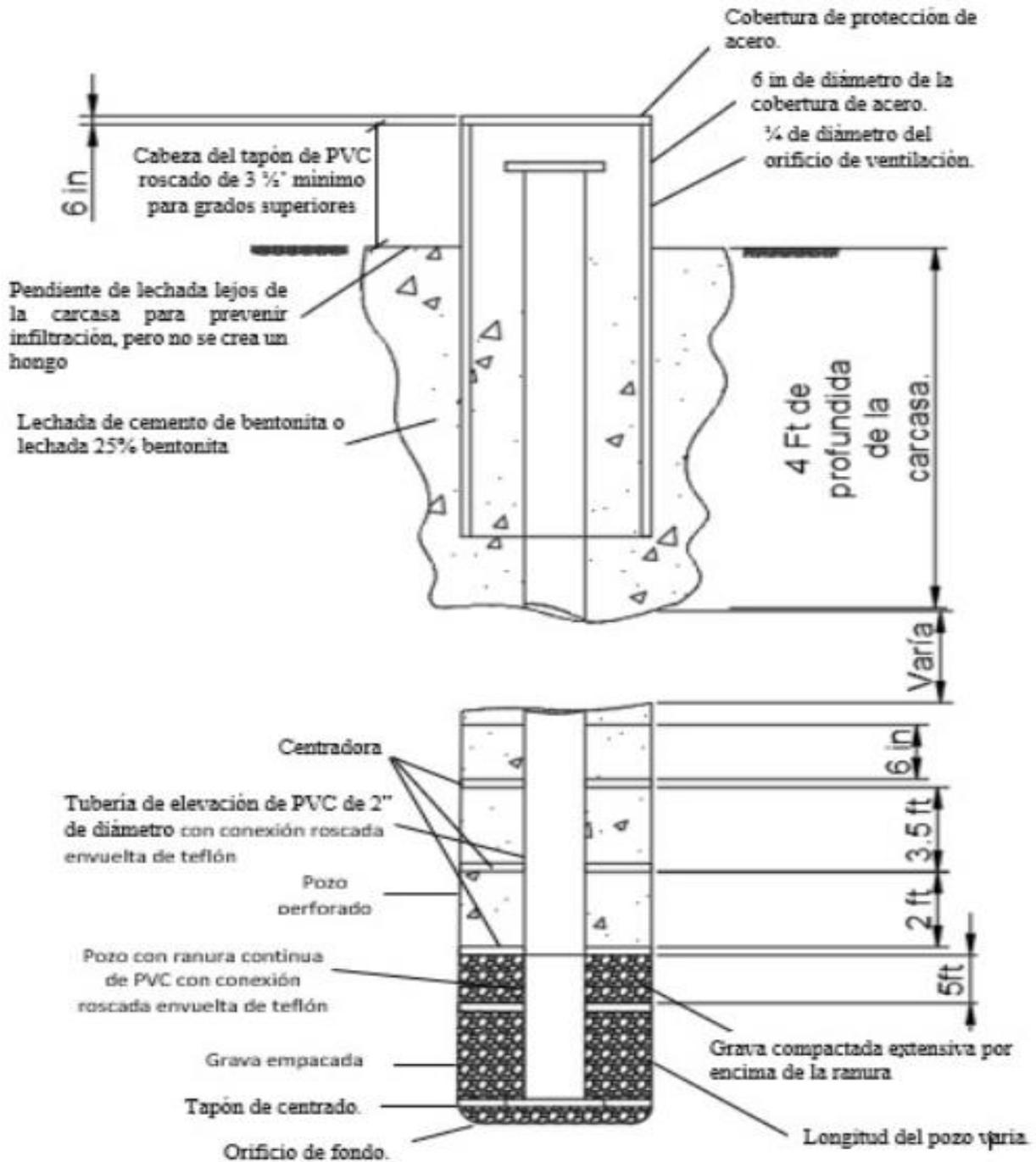


Figura 3.31 Pozo de monitoreo de agua subterránea.

Fuente: Elaboración Propia. Basado en G. Tchobanoglous (1994). Handbook of solid waste management, Figure 14.48

- El monitoreo de la calidad del aire en un relleno sanitario involucra tres partes, las cuales son: el monitoreo ambiental de la calidad del aire en el relleno sanitario y sus alrededores, el monitoreo del biogás extraído del relleno y el monitoreo de los gases producidos por cualquier instalación de tratamiento o de procesamiento de gas. El monitoreo ambiental de la calidad del aire es necesario en los rellenos sanitarios para detectar el posible movimiento de contaminantes gaseosos de los límites del

sitio. Existen tres categorías de dispositivos de muestreo de gas los cuales son: pasivo, captura y activo. Para el presente trabajo se propone el uso del muestreo activo el cual involucra la recolección y análisis de una corriente continua de gas como se muestra en la Figura 3.32, la cual muestra un analizador de biogás instalado en la planta de BENLESA, Nuevo León, México.

El monitoreo del biogás extraído del relleno sanitario se realiza para evaluar la composición del biogás y para determinar la presencia de los componentes traza que podrían ser un riesgo al medio ambiente o a la salud. Para este caso también se utiliza medidores activos, los cuales entregan información en tiempo real que resulta útil para conocer la composición real de biogás y en caso de que la concentración de metano sea baja fomentar la descomposición anaeróbica mediante la inyección de lixiviados a la celda.

El monitoreo de los gases que son producidos por las instalaciones de tratamiento o de recuperación de energía es realizado para determinar el cumplimiento con los requerimientos locales de contaminación del aire. Para este caso también se utiliza medidores activos.

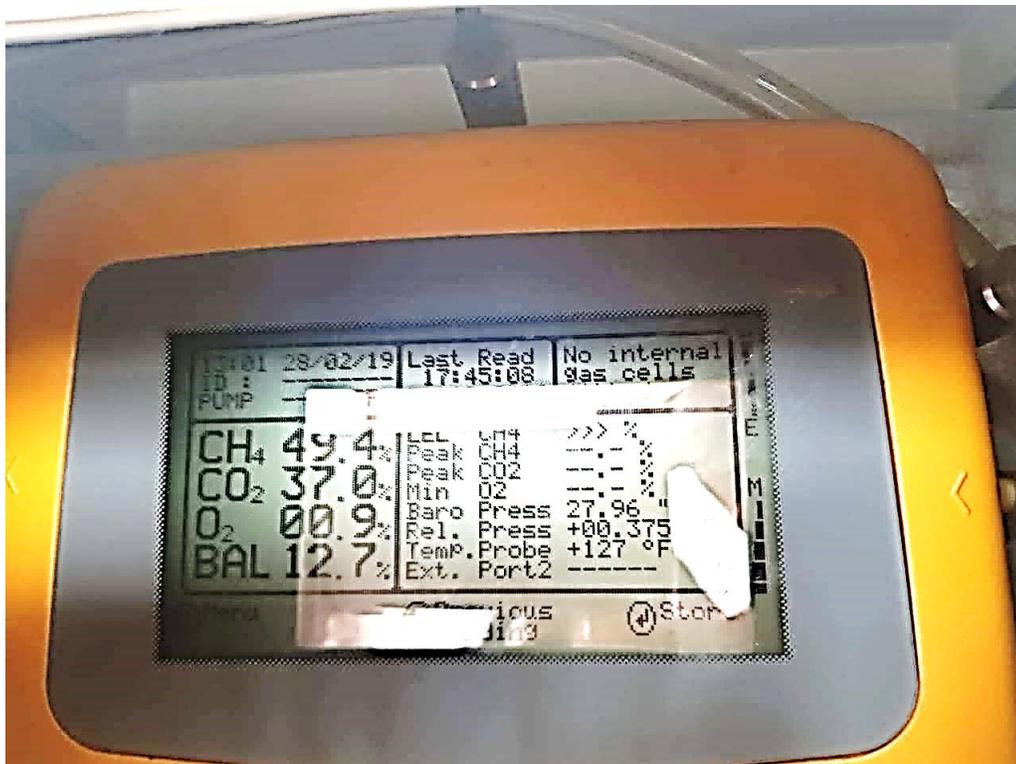
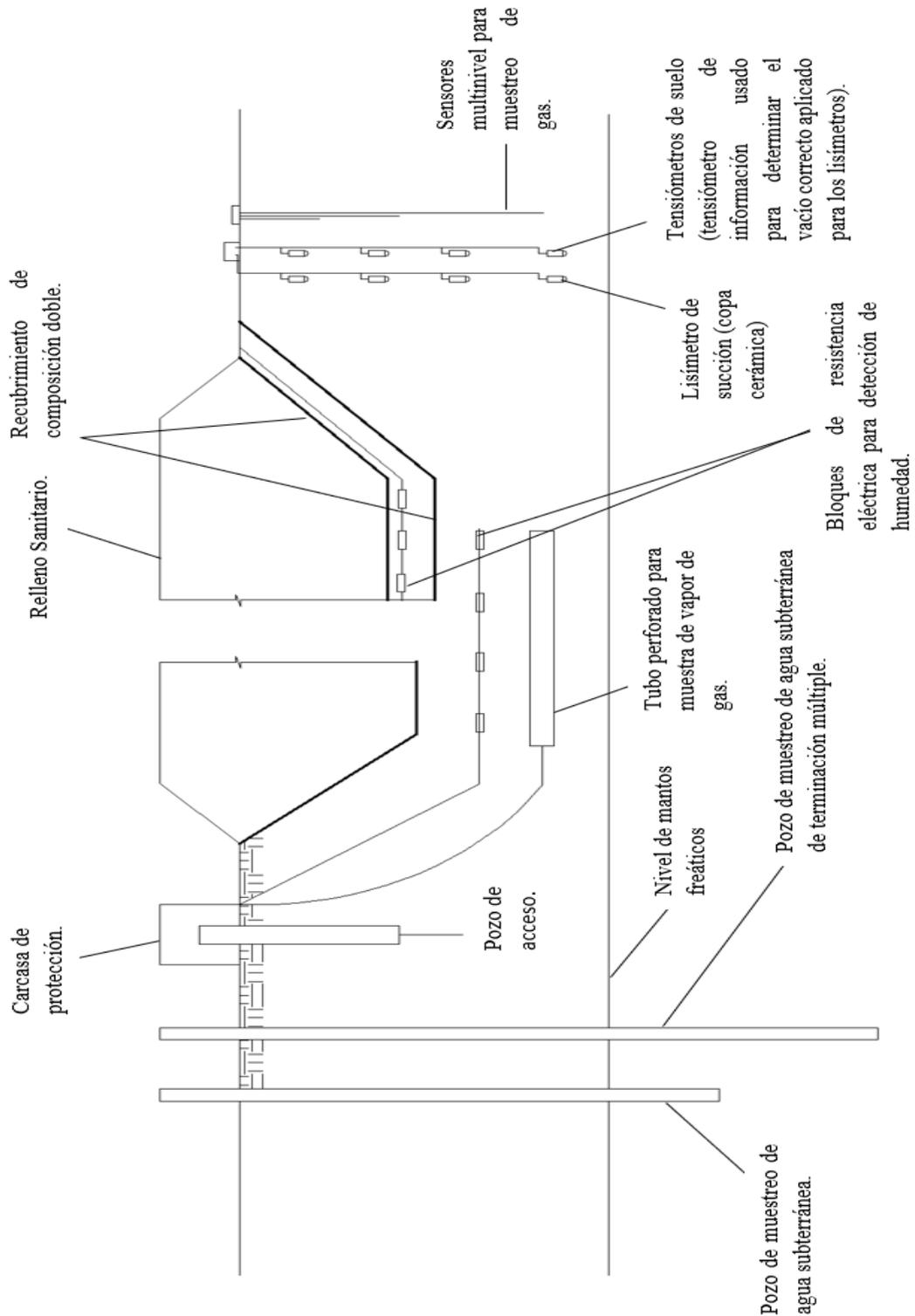


Figura 3.32 Medidor tipo activo de la planta de BENLESA, Nuevo León, México.  
Fuente: Fotografía propia.

En la Figura 3.33 se muestra la disposición típica de los dispositivos de monitoreo ambiental considerados anteriormente alrededor del relleno sanitario para el presente trabajo.



**Figura 3.33** Disposición de los dispositivos de monitoreo ambiental alrededor del relleno sanitario.  
 Fuente: Elaboración Propia. Basado en G. Tchobanoglous (1994). *Handbook of solid waste management*, Figure 14.

#### 3.4.8 DESARROLLO DEL PLAN DE OPERACIÓN DEL RELLENO SANITARIO.

El plan de operación de un sitio de disposición final debe incluir: el desarrollo de una programación del trabajo operativo, un plan de relleno para la colocación de los residuos sólidos, un estimado de los requerimientos del equipo, el desarrollo de registros de operación del relleno y de la información financiera y la inspección de la carga en busca de residuos peligrosos biológicos infecciosos.

Para el desarrollo de la programación del trabajo operativo del sitio de disposición final es necesario considerar la secuencia de llegada de los vehículos recolectores, los patrones de tráfico en el sitio y la secuencia de tiempo que deberá ser seguida en las operaciones de relleno. En este caso se considera que en el primer año de operación para 2,160 ton/día de RSU que llegan de las estaciones de transferencia se estima el tránsito de 5 unidades por hora, de acuerdo con la siguiente ecuación

$$\text{Número de Vehículos} = \frac{M}{CT} \quad \dots (24)$$

Donde:

M: cantidad de residuos (ton/día)

CT: es la capacidad de carga permitida para un *tráiler* de dos ejes (ton/tráiler)

$$\text{Número de Vehículos} = \frac{2,160 \frac{\text{ton}}{\text{día}}}{35 \frac{\text{ton}}{\text{tráiler}}}$$

$$\text{Número de Vehículos} = 62 \frac{\text{tráiler}}{\text{día}}$$

Esta cantidad corresponde a los residuos que llegan al sitio de manejo integral y que descargan en la planta clasificadora, sin embargo, los residuos que llegarán al sitio de disposición final, es decir los que salen de la planta, corresponden al 60% de la cantidad que ingresa es decir 1,296 ton/día, lo que equivale a 3 unidades por hora con un tiempo de descarga en la celda activa de hasta **20 minutos**.

Para el plan de relleno de la mega celda activa primeramente se considera su forma y dimensiones. Como se muestra en la Figura 3.34, el dimensionamiento de la mega celda 1 que corresponde a un área de 646,737 m<sup>2</sup> que, con celdas de 1 metro de altura, 10 metros de ancho y los 309 metros de largo satisfacen la demanda de espacio para los residuos durante los primeros 10 años de operación.

Por otro lado, en la Figura 3.35a se muestra el plan de relleno para el área correspondiente a 30 días de operación, mientras que esta Figura ilustra el relleno de manera vertical. La Figura 3.35b muestra el relleno en 30 días de operación con la primera capa finalizada, por lo que la construcción de las celdas se realiza de manera horizontal. El método que se ocupará

### Capítulo 3 Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos

será el de área mezclado con celda excavada como se mencionó en el principio del presente subcapítulo.

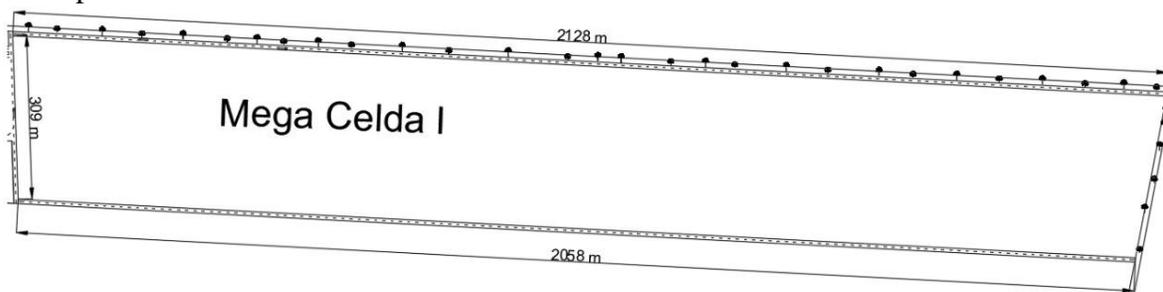


Figura 3.34 Dimensiones de la mega celda 1  
Fuente: Elaboración Propia.

Los requerimientos de equipamiento para el presenta plan de operación se seleccionarán con base en el tamaño y el método de operación del relleno sanitario. Los equipos típicos que se usan en el relleno sanitario incluyen: tractores de orugas, excavadoras, compactadores, grúas y niveladores. Los más usuales son el tractor de orugas el cual con el equipo adecuado puede desarrollar todas las operaciones necesarias en un relleno sanitario. En la Tabla 3.18 se muestra el equipo típico necesario para la operación de un relleno sanitario y en las Figuras 3.36,3.37,3.38 y 3.39, se ilustran estos.

Tabla 3.18 Requerimientos de equipamiento típico para rellenos sanitarios.

Población Aproximada	RSU Diarios (ton/día)	Equipamiento			Accesorios
		Cantidad	Tipo	Tamaño (lb)	
0-20,000	0-50	1	Tractor de orugas	10,000-30,000	Cargador frontal de 1 a 2 yd <sup>3</sup> pala para residuos, pala excavadora.
20,000-50,000	50-150	1	Tractor de orugas	30,000-60,000	Pala excavadora, pala de basura, cargador frontal de 2 a 4 yd <sup>3</sup> y mano de chango.
50,000-100,000	150-300	1 1 1-2	Grúa Camión de agua Tractor de orugas	30,000+	Pala excavadora, pala de basura, cargador frontal de 2 a 5 yd <sup>3</sup> y mano de chango.
100,000	300*	2 2 1-2 1	Grúa Camión de agua Tractor de orugas Compactador de ruedas de acero.	45,000+	Pala excavadora, pala de basura, cargador frontal y mano de chango.

Fuete: Elaboración propia, Basado en G. Tchobanoglous (1994). Handbook of solid waste management, Table 14.18

Nota\*: por cada 500 toneladas de incremento de residuos en la última fila se deberá añadir una pieza de equipamiento de cada uno de los mencionados.

Para el presente trabajo, de acuerdo con la Tabla 3.18, se utilizarán 3 veces la cantidad de equipo indicada, ya que se cuenta con una carga de residuos diarios de 1,296 ton/día.

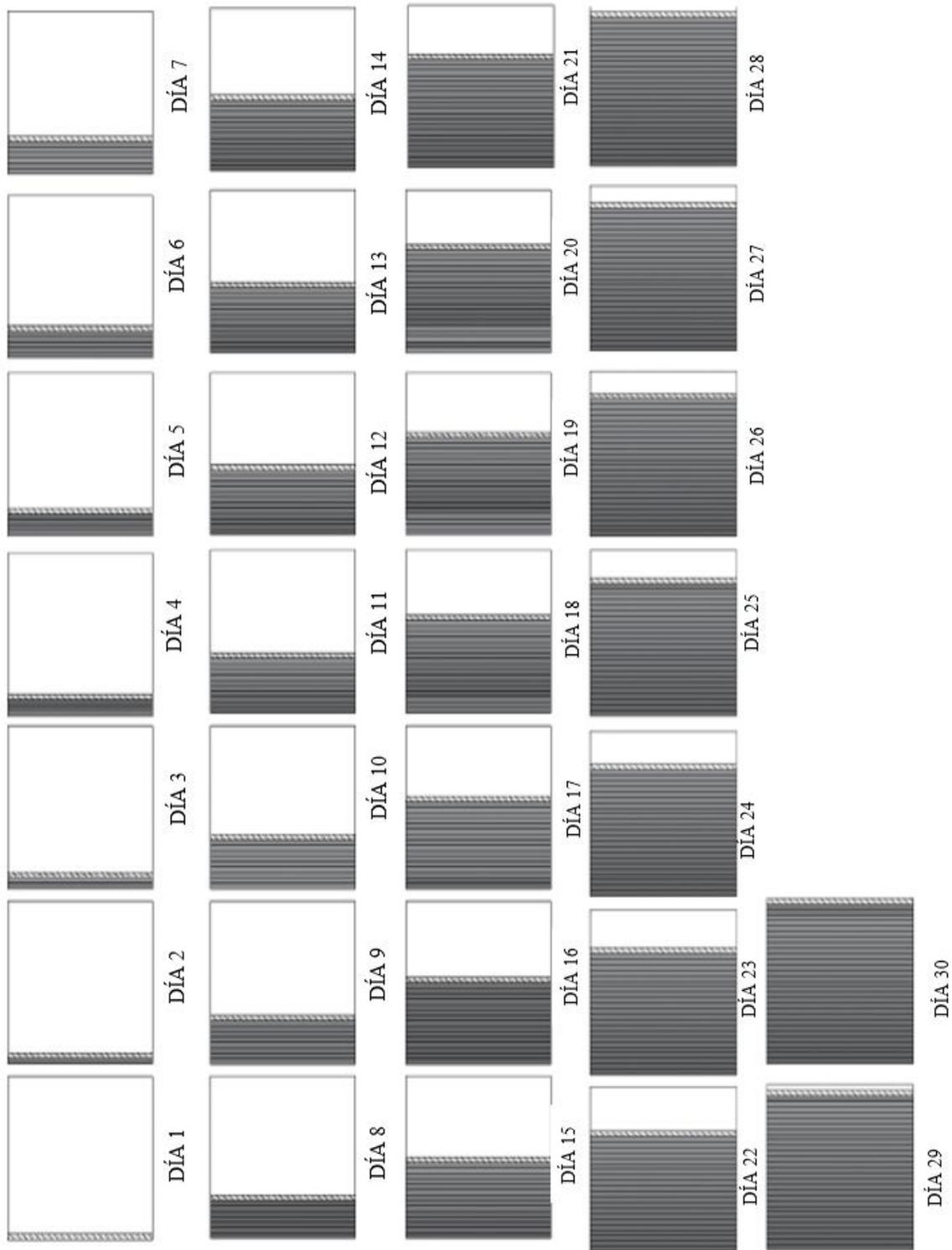


Figura 3.35a Rellenado vertical de residuos con cubierta en 30 días de operación primera capa.  
Fuente: Elaboración Propia.

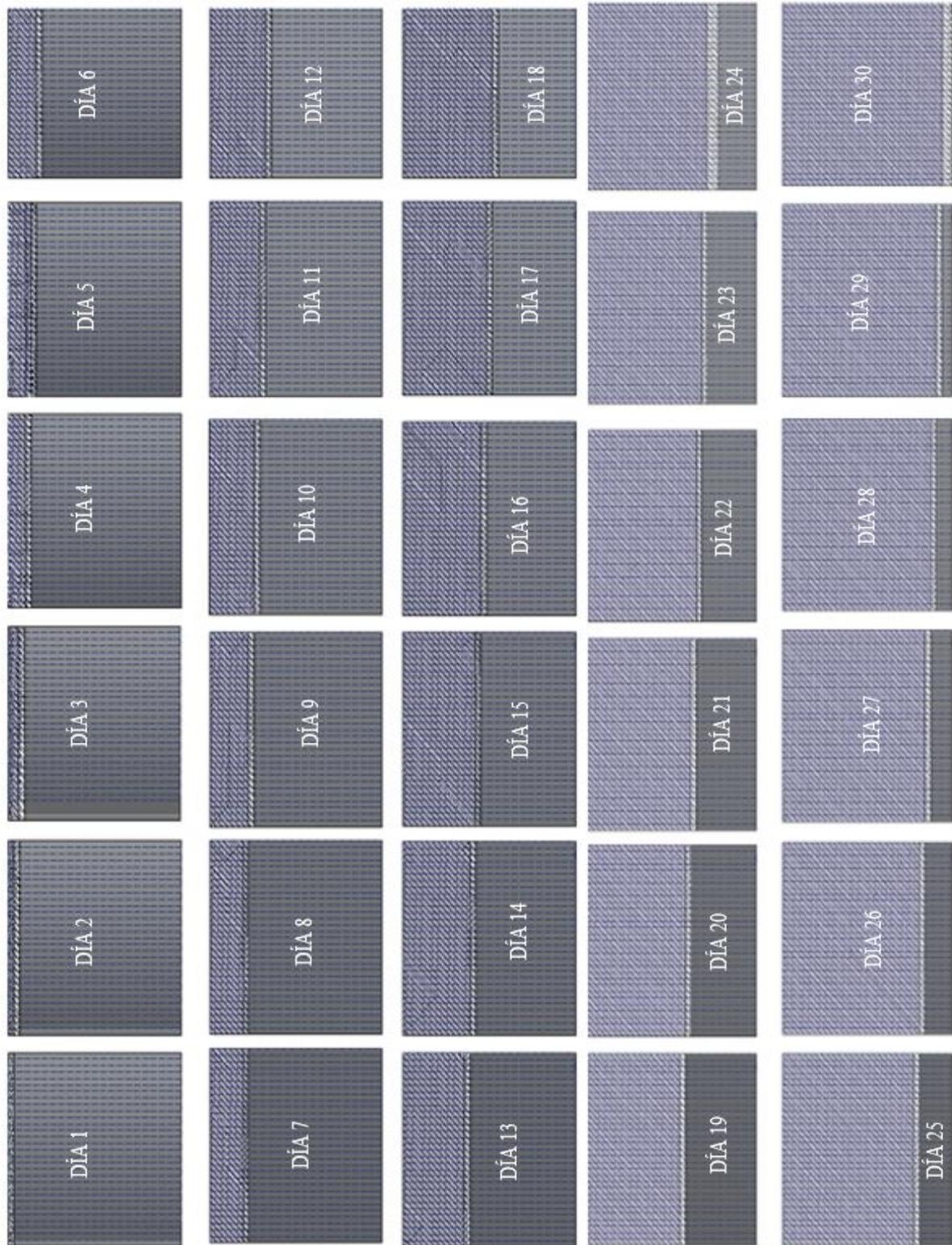


Figura 3.35b Rellenado horizontal de residuos con cubierta en 30 días de operación segunda capa.  
Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 3.36** Ilustración de tractor tipo oruga.

Fuente: FerreyrosCAT, (2019). EQUIPOS. Recuperado de: <http://dev.asixonline.com/ferreyros-wp/equipo/d6t/?parent=1924>



**Figura 3.37** Ilustración de pipa de agua.

Fuente: Pipas de Agua de Oaxaca, (2019). Pipas de agua de agua dulce. Recuperado de: <https://pipasdeaguaoaxaca.com.mx/>



**Figura 3.38** Ilustración de compactador de ruedas de acero.

Fuente: FerreyrosCAT, (2019). EQUIPOS. Recuperado de: <http://dev.asixonline.com/ferreyros-wp/equipo/d6t/?parent=1924>



**Figura 3.39** Ilustración de una grúa, con un accesorio de mano de chango.

Fuente: FerreyrosCAT, (2019). EQUIPOS. Recuperado de: <http://dev.asixonline.com/ferreyros-wp/equipo/d6t/?parent=1924>

Para los registros de la operación del relleno se debe controlar la cantidad de residuos que está siendo dispuesto y el personal encargado de este control deberá llevar un registro de todos los vehículos que ingresan al sitio de manejo integral de residuos. Para este objeto se ha propuesto el uso de las básculas con registro de peso y durante la operación deberá desarrollarse un formato de registro.

En el caso de la inspección de RPBI, se ha mitigado mediante la propuesta de un área designada específicamente para dicha inspección, de igual manera durante la operación deberá desarrollarse un manual que especifique el método correcto para la inspección de los RSU que entran al sitio de manejo integral de residuos.

#### **3.4.9 CLAUSURA Y POST CLAUSURA DEL RELLENO SANITARIO.**

Los cuidados de clausura y post clausura de un relleno sanitario son términos que se utilizan para describir a lo que le sucede a un sitio de disposición final completado. Para asegurarse de que un relleno sanitario será mantenido de 30 a 50 años en el futuro se debe de colocar un fondo monetario específico para que dicho relleno pueda ser cerrado, mantenido y monitoreado apropiadamente durante dicho periodo de tiempo. Por lo tanto, es necesario el desarrollo de un plan de clausura en el cual se defina claramente los requerimientos necesarios para dicha clausura. El plan de clausura deberá incluir el diseño de la cobertura final del relleno y un paisaje para el sitio completado, como se muestra en la Figura 3.40 donde se pueden observar las terrazas construidas durante la operación del relleno sanitario mediante el método del área y por lo tanto los escurrimientos de agua. Otros puntos por cubrir en el plan de cuidado a largo plazo son: el tratamiento y recolección del lixiviado y del biogás y el monitoreo ambiental.

Para el caso de la presente propuesta anteriormente se ha especificado la cobertura final del relleno sanitario (ver Fig. 3.20), y en cuanto al uso del suelo después de la clausura del sitio, está planeado convertirse en un parque nacional donde se forestará con las especies mencionadas en las Tablas 3.13a y 3.13b, debido a que son especies nativas de la región. Por el lado del manejo de lixiviado y biogás se contará con personal operando las instalaciones debido al sistema de recuperación de energía junto con personal de laboratorio encargados del monitoreo ambiental, mediante los equipos de muestreo anteriormente propuestos (ver Figura 3.33).

El cuidado post clausura involucra: inspecciones de rutina en el sitio completado, mantenimiento de la infraestructura y monitoreo ambiental.

Las inspecciones de rutina deberán contar con un programa establecido para monitorear continuamente las condiciones del relleno completado. Los criterios de frecuencia y de acciones correctivas serán establecidos conforme a la operación. El mantenimiento de la infraestructura típicamente involucra el mantenimiento continuo de las instalaciones de drenaje de agua superficial, el calibre de la superficie del relleno, la condición de los recubrimientos y la revegetación, además del mantenimiento al equipo de recolección de biogás y lixiviados. Este mantenimiento estará en función de las inspecciones de rutina.

Estos son todos los aspectos que se deben considerar en el diseño del sitio de disposición final de RSU, sin embargo, la propuesta de la presente tesis incluye el desarrollo un sistema de extracción y purificación de biogás.

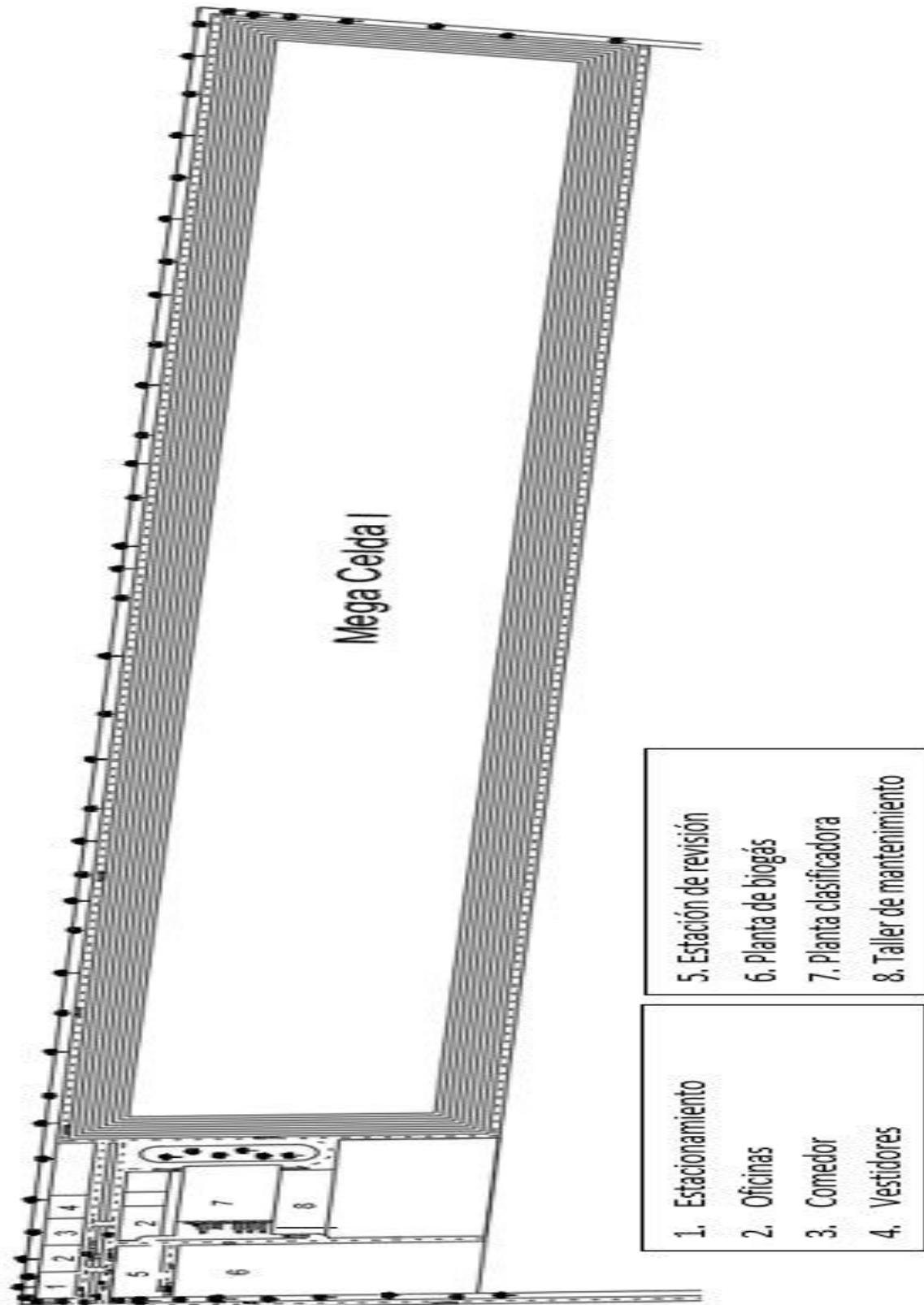


Figura 3.40 Vista de planta de la mega celda 1 completada.  
Fuente: Elaboración Propia.

### 3.5 Extracción y purificación de biogás

#### Extracción de biogás.

Como se ha mencionado anteriormente, la liberación del biogás es controlada para reducir las emisiones a la atmósfera, minimizar la emisión de olores, así como la migración de gas a la superficie y para permitir la recuperación de energía del metano. Existen dos métodos para controlar las emisiones de biogás: el activo y el pasivo. En el presente trabajo se propone el uso de un sistema activo, el cual consiste principalmente la aplicación de un vacío inducido para el control del flujo del biogás.

Existen pozos de extracción de biogás verticales y horizontales, estos han sido usados para la extracción del biogás dentro del relleno, aunque en algunos sitios ambos tipos de pozos son instalados. Otro aspecto importante es el manejo de los condensados que se forman cuando el biogás es extraído, lo cual es un elemento que se debe considerar en el diseño de los sistemas de recuperación de biogás.

Para el presente trabajo se utilizarán los pozos de extracción de biogás verticales, los cuales deben estar separados de modo que sus radios de influencia estén sobrepuestos. Para rellenos sanitarios completados el radio de influencia de un pozo de biogás es algunas veces determinado por la realización de las pruebas de la extracción del biogás en campo. Típicamente un pozo de extracción es instalado con sondas de biogás a lo largo, en distancias regulares desde el pozo, y el vacío dentro del relleno sanitario es medido como un vacío que es aplicado a la extracción del pozo.

Para el caso de rellenos sanitarios con alta profundidad y con una cobertura final compuesta que incluye una geomembrana, se recomienda un espaciado de 45 a 60 m entre los pozos de extracción. Para rellenos sanitarios con una cobertura final de arcilla o suelo, se recomienda un espaciado entre pozos de 30 m para evitar fugas del gas hacia la atmósfera. Siempre es mejor utilizar una geomembrana para evitar que aire (con oxígeno) entre al relleno e interfiera con las bacterias anaerobias y por otro lado evita que haya combustiones espontáneas que resultarían en un incendio interno en el relleno. Por lo que considerando el tipo de cobertura el espaciado entre pozos deberá ser de 45 a 60 m.

Por otro lado, usualmente los pozos verticales son instalados después de que se han completado porciones del relleno sanitario, es decir, antes de la clausura de la mega celda. El diseño de un pozo de extracción típico consiste en un tubo de PVC (Policloruro de vinilo) o de PE (Polietileno), con un diámetro de 4 a 6", el cual estará colocado en una cavidad de 18 - 36" de diámetro. Desde la tercera parte a la mitad del fondo la pared del tubo es perforada y colocada en un relleno de grava, la longitud restante de la cara pared del tubo no es perforada y es cubierta con arena y sellada con arcilla. Los pozos de biogás del relleno sanitario son típicamente diseñados para penetrar el 80% de la profundidad de los residuos en el relleno sanitario debido a que su radio de influencia puede extender hasta el fondo del relleno sanitario.

### Capítulo 3 Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos

La disponibilidad de vacío en la recolección múltiple en el cabezal de los pozos tiene un valor típico de 0.36 PSI (10 in H<sub>2</sub>O). En la Figura 3.41 se puede observar un pozo vertical de extracción típico para la recolección de biogás, mientras que en la Figura 42 se observa una ilustración con la distribución típica de los pozos de extracción, junto con todas las consideraciones mencionadas anteriormente.

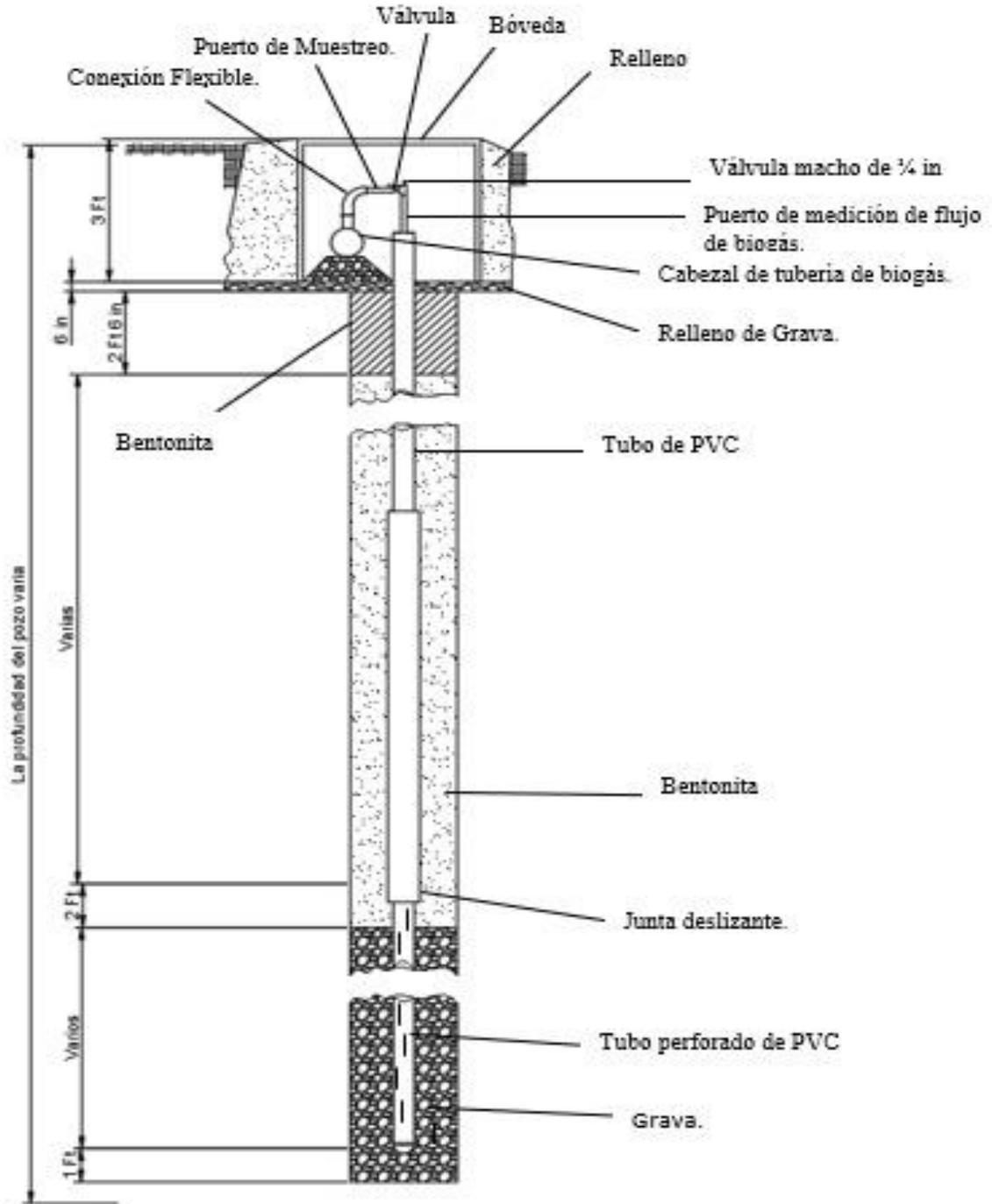
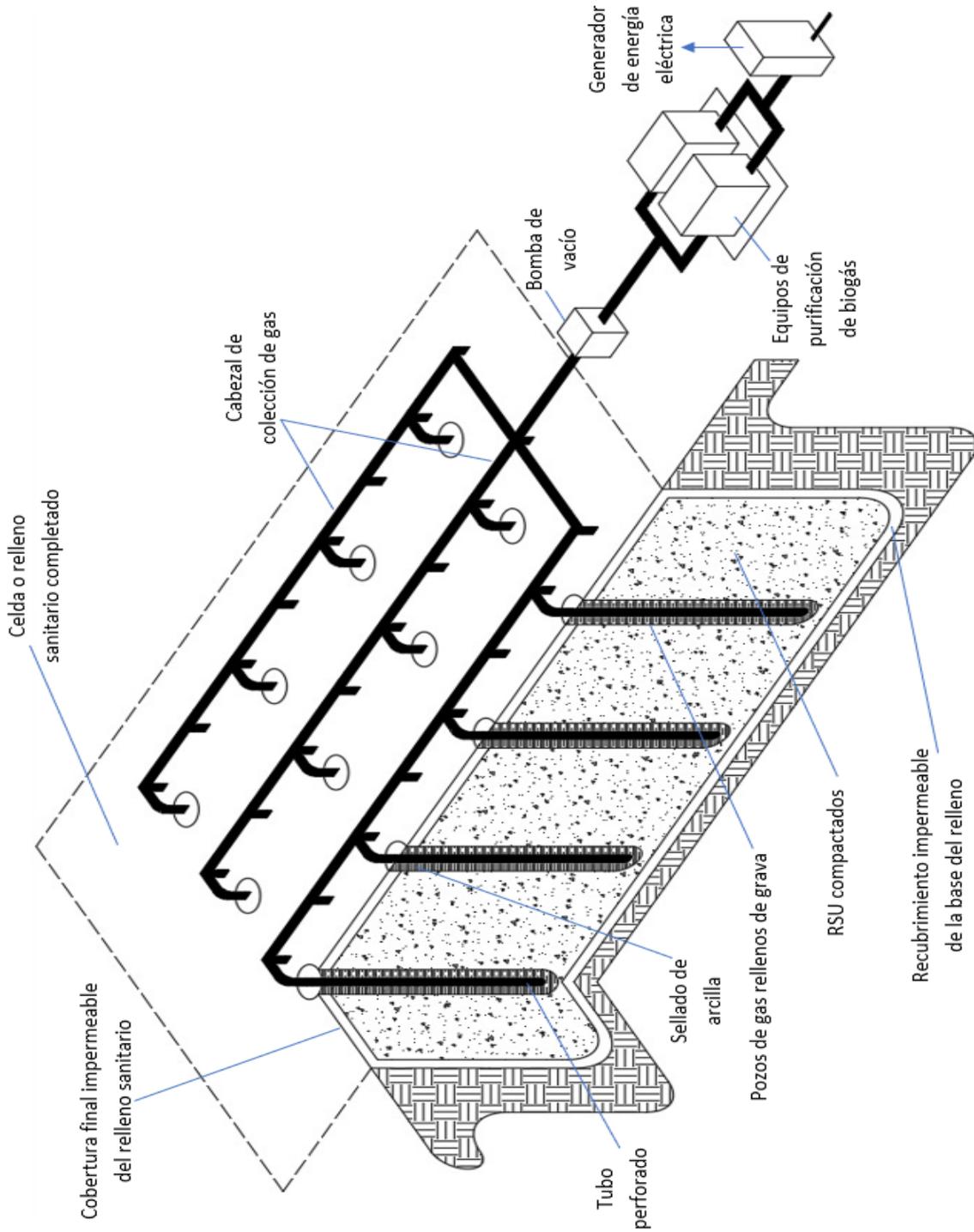


Figura 3.41 Pozo de extracción de biogás típico.

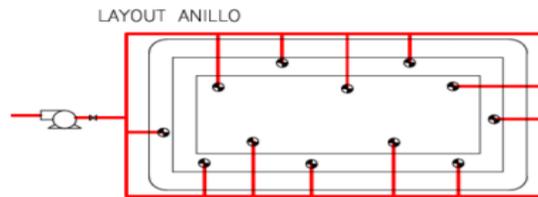
Fuente: Elaboración Propia. Basado en G. Tchobanoglous (1994). Handbook of solid waste management, Figure 14.10



**Figura 3.42** Pozos verticales usados en sistema de recuperación de biogás.

Fuente: Elaboración Propia. Basado en G. Tchobanoglous (1994). Handbook of solid waste management, Figure 14.9

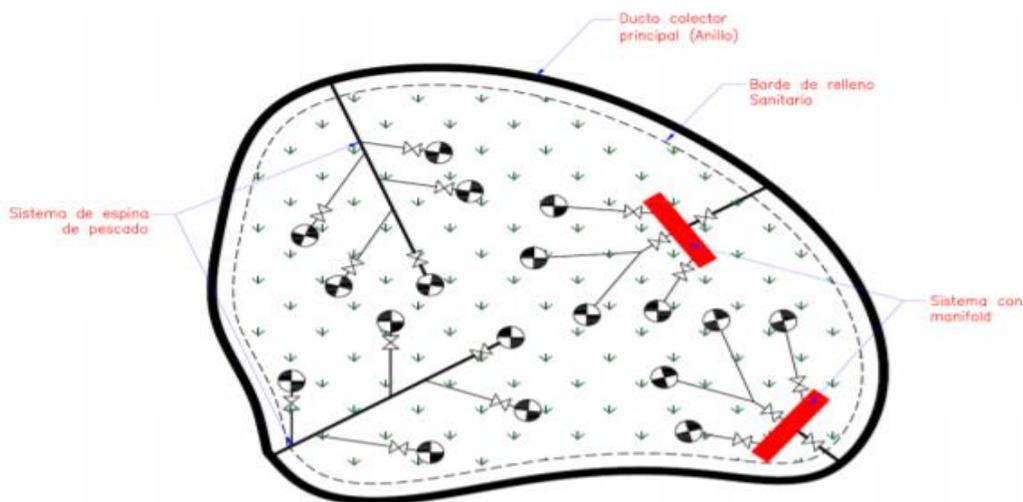
Por lo tanto, de acuerdo con las consideraciones mencionadas anteriormente, la mega celda I deberá contar con 258 pozos de extracción, los cuales tendrán un tubo de 4” de diámetro, tomando en cuenta una distancia de separación entre pozos de 50 m. El sistema de recolección de biogás será tipo de anillo, el cual consiste en un ducto que forma un circuito cerrado entorno al área del relleno sanitario en forma de anillo. Cada pozo posee ductos laterales que conectan directamente con el ducto principal. Aunque esta disposición requiere mayor longitud de tubería otorga redundancia al sistema al proveer más de un camino para el flujo de biogás, lo cual facilita los trabajos de mantenimiento y la solución de problemas en la línea, este tipo de sistema de recolección es normalmente usado para rellenos sanitarios grandes. En la Figura 3.43 se muestra una ilustración de un esquema de configuración tipo anillo.



**Figura 3.43** Configuración del sistema de recolección de biogás tipo anillo.

Fuente: López D. (2016). Modelo para el diseño de sistemas de captación y aprovechamiento de biogás producido en rellenos sanitarios. P. 49.

Por otro lado, los ductos que conectarán al anillo principal con los pozos se construirán mediante un sistema de “espina de pescado”, el cual, conecta un determinado número de pozos mediante ductos laterales que convergen en uno intermedio, que a su vez transporta el biogás hasta el ducto principal. Se selecciona este sistema dado que tiene la ventaja de que cualquier problema puede ser detectado inmediatamente, ya que permite acercarse a cada pozo para balancear el sistema, en la Figura 3.44 se puede observar un esquema de control tipo espina de pescado.



**Figura 3.44** Esquema de control del sistema de recolección tipo espina de pescado.

Fuente: López D. (2016). Modelo para el diseño de sistemas de captación y aprovechamiento de biogás producido en rellenos sanitarios. P. 50.

A continuación, se mencionan las consideraciones del dimensionamiento de la tubería del sistema de recolección de biogás las cuales indican lo siguiente y están basadas en la tesis titulada Modelo para el Diseño de Sistemas de Captación y Aprovechamiento de Biogás Producido en Rellenos Sanitarios.

Para la elección preliminar de los diámetros de ductos, la experiencia práctica sugiere los siguientes valores (Arriaza, 2016) :

- 50 (mm) a 100 (mm) de diámetro nominal para ductos laterales de pozos individuales.
- 300 (mm) de diámetro nominal para ductos que agrupan flujo de varios pozos.
- Más de 450 (mm) de diámetro nominal para ductos principales o anillos.

De acuerdo con las recomendaciones anteriores, el diámetro de la tubería que conecta a los pozos se recomienda que tenga un diámetro de 12” y el material sea de PE, para aprovechar su flexibilidad.

El anillo del sistema de recolección de biogás deberá un diámetro de 18” y una longitud de 2,128 metros, cuando la mega celda I del relleno sanitario sea completada. Esto debido a que se requiere la mínima pérdida de presión debido a la longitud del anillo, siendo este diámetro el único que satisface dicha consideración de acuerdo con la ecuación que se muestra a continuación

$$\Delta P = \frac{f * l * v^2 * \rho}{2 * \emptyset} \quad \dots (25)$$

Donde:

$\Delta P$ : caída de presión (mbar)

$f$ : factor de fricción del diagrama de Moody

$l$ : longitud de la tubería (m)

$v$ : velocidad del gas (m/s)

$\rho$ : densidad del gas (kg/m<sup>3</sup>).

$\emptyset$ : diámetro de la tubería (m)

Para la densidad se ocupa la presión absoluta (presión manométrica – presión de vacío), y la ecuación de los gases ideales, que se muestra a continuación

$$P_{abs} = 0.7305 \text{ atm} - 0.138169 \text{ atm} = \mathbf{0.5923 \text{ atm}}$$

$$\rho = \frac{P_{abs} * PM}{R * T} \quad \dots (26)$$

Donde:

$\rho$ : densidad del gas (kg/m<sup>3</sup>)

$P_{abs}$ : presión absoluta (atm)

$PM$ : peso molecular del biogás (kg/kmol)

$R$ : la constante de los gases ideales (atm\*m<sup>3</sup>) / (kmol\* K).

$T$ : temperatura (K).

$$\rho = \frac{0.5923 \text{ (atm)} * 36.72 \left(\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}\right)}{0.08205 \left(\frac{\text{atm m}^3}{\text{kmol * K}}\right) * 293.15(\text{K})}$$

$$\rho = 0.9042 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Para calcular el factor de fricción de Moody es necesario conocer el número de Reynolds de acuerdo con la siguiente ecuación

$$Re = \frac{v * \phi * \rho}{\mu} \quad \dots (27)$$

Donde:

$Re$ : número de Reynolds (adimensional).

$v$ : velocidad (m/s).

$\phi$ : diámetro interno de la tubería (m).

$\mu$ : viscosidad (Pa\*s)

Para la viscosidad del gas se obtuvo el valor leyendo la siguiente Figura 3.45, la cual solicita datos de peso molecular del gas (PM = 36.72 kg/ kmol) y temperatura (T= 25°C=77°F), obteniendo un valor de 0.0086 cP, equivalente a  $8.6 * 10^{-6}$  Pa\*s.

Para calcular la velocidad se utiliza la ecuación siguiente

$$\phi = \sqrt{\frac{4 * Gv}{\pi * v}} \quad \therefore \quad v = \frac{4 * Gv}{\pi * \phi^2} \quad \dots (28)$$

$$v = \frac{4 * 3,434.7 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right)}{\pi * 0.42865^2 \text{ (m}^2\text{)} * 3600 \left(\frac{\text{s}}{\text{h}}\right)}$$

$$v = 6.61136 \text{ m/s}$$

Por lo tanto, el número de Reynolds es

$$Re = \frac{6.61136 * 0.42865 * 0.9042}{8.8 * 10^{-6}}$$

$$Re = 291,189$$

Con en el número de Reynolds obtenido y el valor de la rugosidad de la tubería de plástico que es aproximadamente 0.0015 mm, se obtiene el valor de la rugosidad relativa, en la ecuación siguiente, y posteriormente se lee el valor del factor de fricción en el diagrama de Moody, en la Figura 3.46 se puede observar la lectura

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\phi} \quad \dots (29)$$

Donde:

$\epsilon_r$ : rugosidad relativa

$\epsilon$ : rugosidad absoluta

$$\epsilon_r = \frac{0.0015 \text{ mm}}{428.65 \text{ mm}}$$

$$\epsilon_r = 3.49 * 10^{-6}$$

Por lo que el factor de fricción del diagrama de Moody es

$$f = 0.0145$$

Así que la caída de presión es

$$\Delta p = \frac{0.0145 * 2,128 \text{ (m)} * 6.6136^2 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 * 0.9042 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)}{2 * 0.42865 \text{ (m)}}$$

$$\Delta p = 1,423.47 \text{ Pa} * \frac{0.01 \text{ mbar}}{1 \text{ Pa}}$$

$$\Delta p = \mathbf{14.23 \text{ mbar}}$$

El valor de caída de presión se encuentra dentro de los parámetros mencionados en “LANDFILL GAS COLLECTION AND TREATMENT SYSTEMS” (US Army Corps of Engineers , 2013) para una máxima caída de presión en el sistema (25 mbar) y máxima velocidad del gas permitida (12 m/s). Es necesario mencionar que, con fines de comprobar los valores obtenidos, se realizó una comprobación del diámetro propuesto mediante un balance de materia – energía, el cual se puede consultar en el anexo 12.

Es necesario aclarar que el flujo de biogás se considera de 3,434.7 m<sup>3</sup>/h que se propone dividir el máximo flujo esperado del anillo recolector de biogás en 2 bombas gemelas conectadas en paralelo con una capacidad de succión máxima de 130 mbar y un flujo máximo de 5,100 m<sup>3</sup>/h. Dichas especificaciones se acoplan a los valores teóricos, mostrados en la Tabla 3.19, y a los valores reales encontrados en la página web del proveedor BUSCH (BUSCH, 2019)

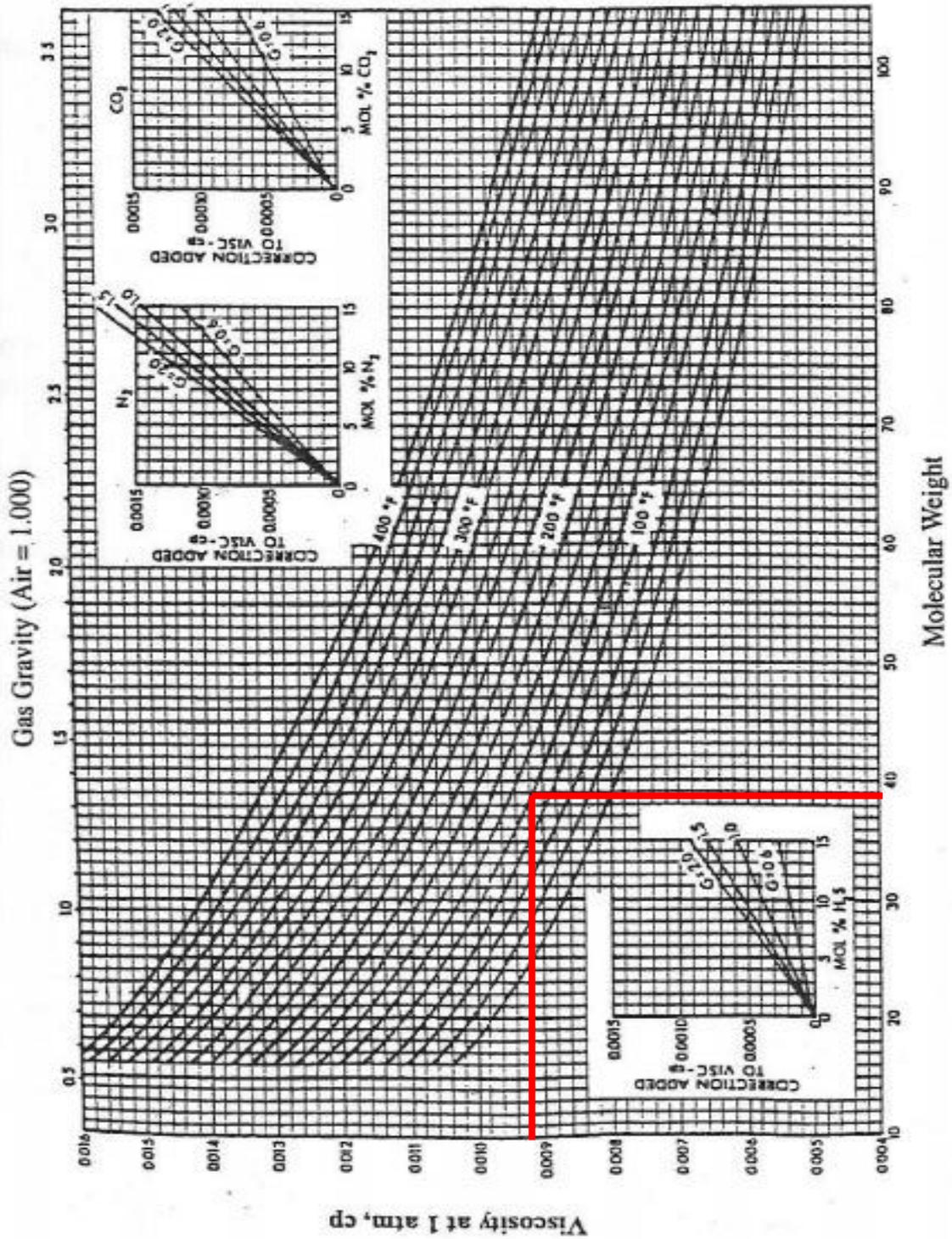


Figura 3.45 Diagrama de viscosidades de gas natural a 1 atm.

Fuente: Pilco A., *Propiedades del Gas natural*, (2014). Recuperado de:

<https://martinfemandezgarcia.files.wordpress.com/2014/02/capitulo-1-propiedades-del-gas-natural.pdf>

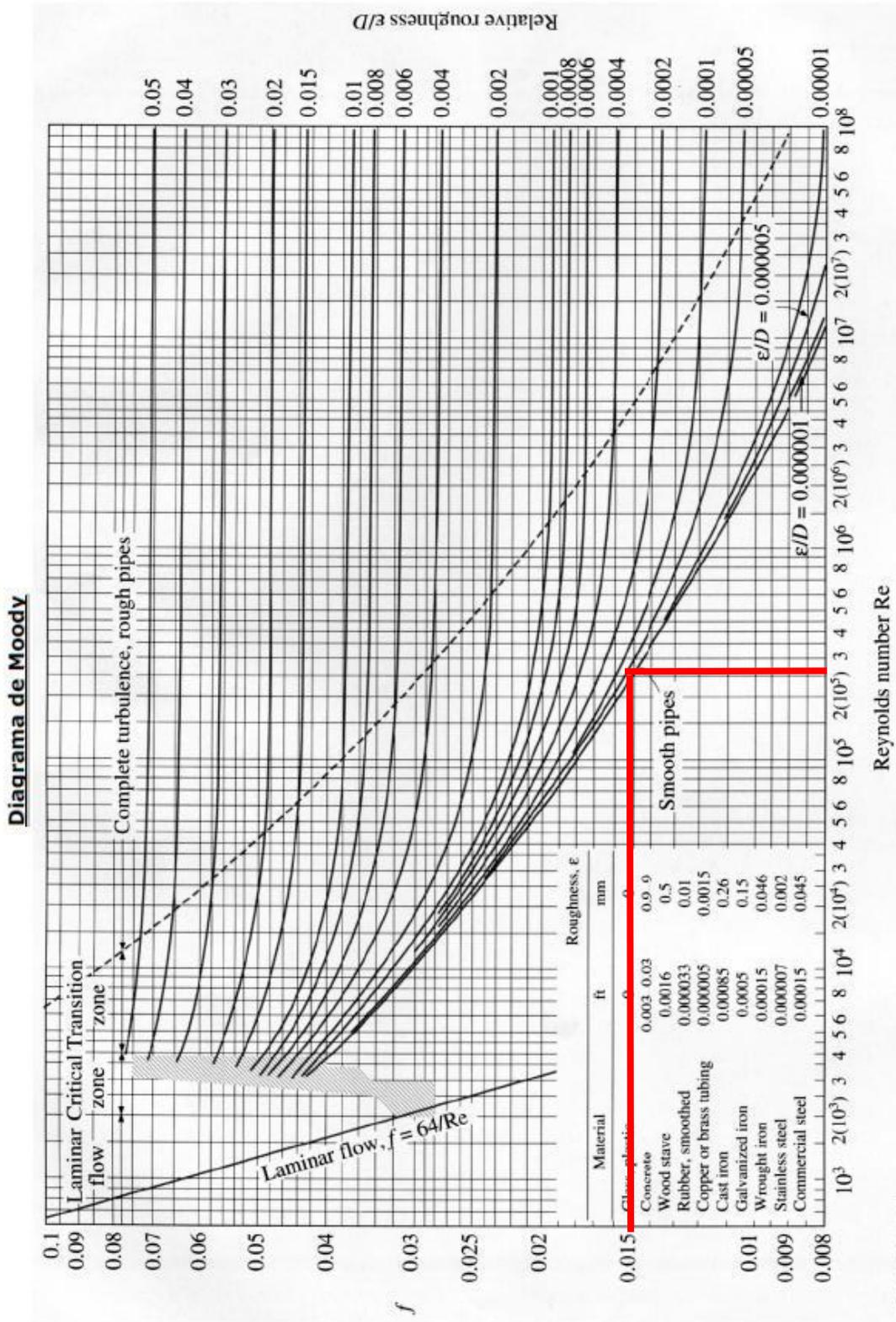


Figura 3.46 Diagrama de Moody para el cálculo del factor de fricción.

Fuente: La guía de física "Diagrama de Moody" (2011) Recuperado de: <https://fisica.laguia2000.com/wp-content/uploads/2011/08/Moody3.jpg>

## Capítulo 3 Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos

Tabla 3.19 Ejemplos de los tipos de compresores y bombas

Tipo	Caudal Nm <sup>3</sup> /h	Aumento de presión mBar	Comentarios
Bomba centrífuga de una etapa	2,000	130	Adecuado para extracción de biogás de relleno sanitario, máquina más común. Es de bajo costo y requiere poca mantención.
Bomba centrífuga de dos etapas	2,000	200	Adecuado para extracción de biogás de relleno sanitario, usado para transportar biogás a un cliente o para propósitos de generación de electricidad.
Bomba de lóbulos	1,000	1,500	Adecuado para impulsar biogás para equipos de generación eléctrica, no admite humedad en el gas.
Compresor rotativo de paletas	1,000	1,000	Adecuado para impulsar biogás para equipos de generación eléctrica, altos costos de operación y mantenimiento
Compresor alternativo	1,000	>50,000	Capaz de elevar grandes presiones, se utiliza para abastecer de biogás a una industria de procesos. Altos costos de operación y mantenimiento

Elaboración propia. Basada en SEPA, (2004), *Guidance on the management of landfill gas*.

Las bombas gemelas mencionadas anteriormente se proponen sean del modelo Dolphin LG 2680<sup>a</sup> y tendrán las especificaciones mostradas en la Figura 3.47 y la Tabla 3.20, de acuerdo con el sitio web de BUSCH:

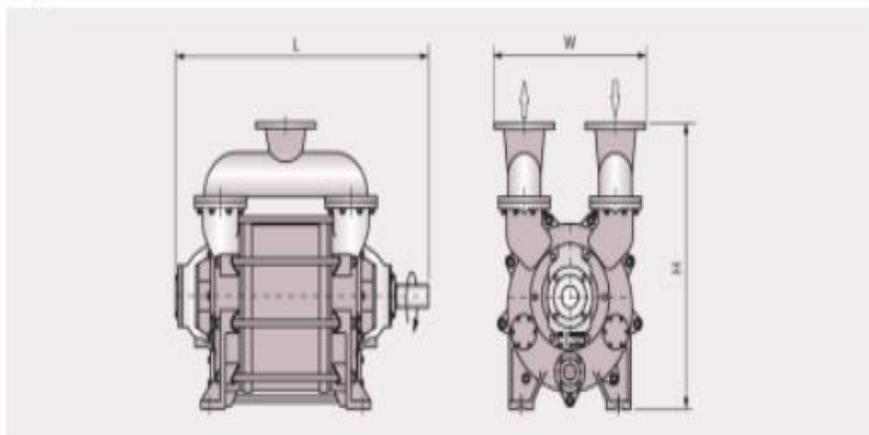


Figura 3.47 Dimensiones (Largo, Ancho y Altura) de la bomba Dolphin LA 5109A.

Fuente: BUSCH "Vacuum Pumps and Systems" (2019). Recuperado de:

<https://www.buschvacuum.com/global/en/products/dolphin/dolphin-lg-lr/dolphin-lg-1910-2680-a?nogeoip>

Tabla 3.20 Información Técnica de la bomba Dolphin LA 5109 A.

Información técnica	Dolphin LA 5109 A
Caudal nominal	4400 – 5100 m <sup>3</sup> /h
Vacío Limite	130 hPa (mbar)
Potencia nominal del motor	110 a 150 kW
Velocidad nominal de rotación	600-700 min <sup>-1</sup>
Nivel de ruido (ISO 2151)	85dB(A)
Peso aproximado	2150kg
Dimensiones (L x W x H)	1790 x 800 x 1400 mm
Succión / Descarga de gas	DN 250 KF /DN 250 KF

Fuente: Elaboración propia. Basado en: BUSCH "Vacuum Pumps and Systems" (2019). Recuperado de:

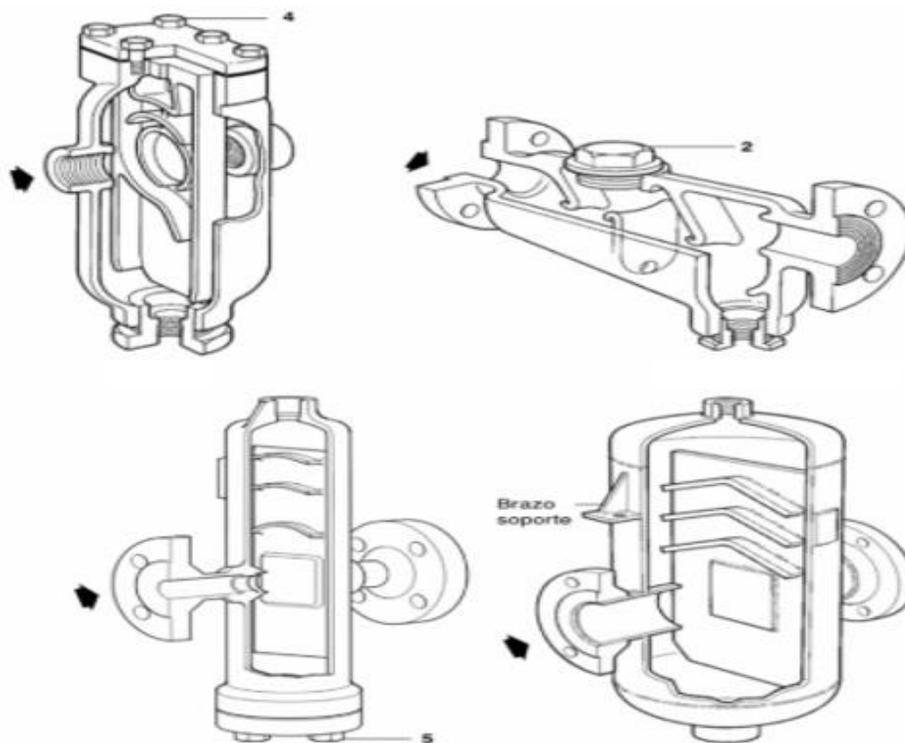
<https://www.buschvacuum.com/global/en/products/dolphin/dolphin-lg-lr/dolphin-lg-1910-2680-a?nogeoip>

Por lo tanto, con las recomendaciones de prediseño presentadas se puede construir el sistema de extracción de biogás que posteriormente pasara a la etapa de purificación. A continuación, se describirán los equipos usualmente recomendados para la ya mencionada etapa de purificación.

#### Purificación de biogás.

Si se pretende emplear el biogás como combustible para la generación de energía eléctrica, como es el caso de la presente propuesta, se debe considerar la especificación de biogás de los generadores de energía. Por lo tanto, se debe recurrir a los métodos ya desarrollados y disponibles para que el biogás pueda ser purificado y presurizado.

Se entiende por purificación del biogás la eliminación del CO<sub>2</sub> y las partículas de humedad suspendidas presentes en el efluente, además de una pequeña cantidad de H<sub>2</sub>S y otros gases traza. Por un lado, para eliminar la mencionada humedad del biogás es necesario utilizar un equipo de separación mecánica que aproveche las propiedades termodinámicas del agua, los comercialmente conocidos condensadores. Se propone un condensador de acero al carbón con internos recubiertos de polipropileno para evitar la corrosión, aunque es necesario realizar la especificación que mejor convenga al sitio.



**Figura 3.48** Separadores mecánicos de humedad, típicos para gases.

Fuente: Spirax Sarco, 2019, "Mantenimiento". Recuperado de: [https://http2.mlstatic.com/separador-de-humedad-de-1-roscada-marca-spirax-sarco-s1-D\\_NQ\\_NP\\_870824-MLM29170262179\\_012019-F.jpg](https://http2.mlstatic.com/separador-de-humedad-de-1-roscada-marca-spirax-sarco-s1-D_NQ_NP_870824-MLM29170262179_012019-F.jpg)

Por otro lado, de acuerdo con el trabajo de Mariana Salazar titulado "Estudio para la producción de biometano en el sistema de transporte público de la Ciudad de México" existen 5 métodos para la purificación: adsorción, absorción física, absorción química, separación

### Capítulo 3 Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos

por membrana y separación criogénica, cada una requiere una etapa de purificación previa en caso de que se obtenga una alta concentración de contaminantes como son: vapor de agua, siloxanos y H<sub>2</sub>S. A continuación, en la Tabla 3.21 se muestra un análisis de ventajas y desventajas de cada una de las técnicas de separación, mientras que en la Tabla 3.22 se muestra el análisis de las ventajas.

**Tabla 3.21** Ventajas y desventajas de los métodos comerciales para la purificación del biogás

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Absorción física con agua	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tecnología madura y desarrollada</li> <li>• Confiable y simple de mantener</li> <li>• No requiere químicos especiales</li> <li>• Logra remoción tanto de CO<sub>2</sub> como de H<sub>2</sub>S</li> <li>• Alto contenido de metano a la (&gt;97%)</li> <li>• Bajos costos de operación y mantenimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere gran demanda de agua incluso con la regeneración</li> <li>• Alta calidad de agua requerida</li> <li>• Problemas de corrosión debido al H<sub>2</sub>S</li> <li>• Limitaciones para remover H<sub>2</sub>S debido a que el CO<sub>2</sub> disminuye el pH de la solución.</li> </ul>
Absorción física con solventes orgánicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El biometano no necesita secado adicional</li> <li>• Alto rendimiento de absorción que en agua (&gt;97%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La regeneración del solvente es compleja si el H<sub>2</sub>S no se remueve primero</li> <li>• El solvente es costoso y difícil de manejar</li> </ul>
Absorción química	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operación a presión atmosférica</li> <li>• Alta eficiencia y velocidad de reacción en comparación con absorción física de agua (&gt;99%)</li> <li>• Remoción total de H<sub>2</sub>S</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solvente difícil de manejar</li> <li>• La descomposición de aminas requiere calor significativo para regenerarse</li> <li>• Problemas de corrosión</li> <li>• Entrada adicional de químico</li> <li>• Residuos químicos requieren tratamiento</li> <li>• Históricamente usado solo par agrandes instalaciones</li> </ul>
Adsorción	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adecuado para flujos pequeños</li> <li>• No se requieren químicos ni generación de calor</li> <li>• Baja demanda de energía</li> <li>• Bajo costo de operación y mantenimiento</li> <li>• Permite la remoción de Nitrógeno y Oxígeno</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto costo de capital (afectado por el número de columnas de la unidad de adsorción)</li> <li>• Bajo contenido de metano a la salida (&lt;97%)</li> <li>• Absorción incompleta (Ejecución de un paso adicional para la remoción de H<sub>2</sub>S)</li> </ul>
Sistemas de membrana	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compacto, fácil de usar</li> <li>• Rápido arranque de operación</li> <li>• Ligerio en peso</li> <li>• Bajo requerimiento de energía</li> <li>• Bajo mantenimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produce una menor concentración de metano con una sola etapa, aunque es posible una alta pureza (Entre 95 - 99%) con múltiples etapas</li> <li>• Se requiere remplazo de membrana (alto costo)</li> <li>• Se debe remover el H<sub>2</sub>S antes del tratamiento</li> </ul>
Separación criogénica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se logran altas purezas de biometano (&gt;99%)</li> <li>• Producción de CO<sub>2</sub> en forma comercial</li> <li>• Mejor tecnología para la producción de gas natural (LNG)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altos costos de inversión de capital</li> <li>• Utiliza muchos equipos de proceso, principalmente compresores, turbinas e intercambiadores de calor.</li> <li>• Requiere de muy bajas temperaturas y altas presiones</li> <li>• Costos de operación y mantenimiento altos</li> </ul>

Fuente: M. Baltazar, "Estudio para la producción de biometano en el sistema de transporte público de la Ciudad de México: Caso de estudio Ruta 1 Izazaga – Tlalpan, (2019)

### Capítulo 3 Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos

Tabla 3.22 Análisis comparativo de las tecnologías de purificación de biogás.

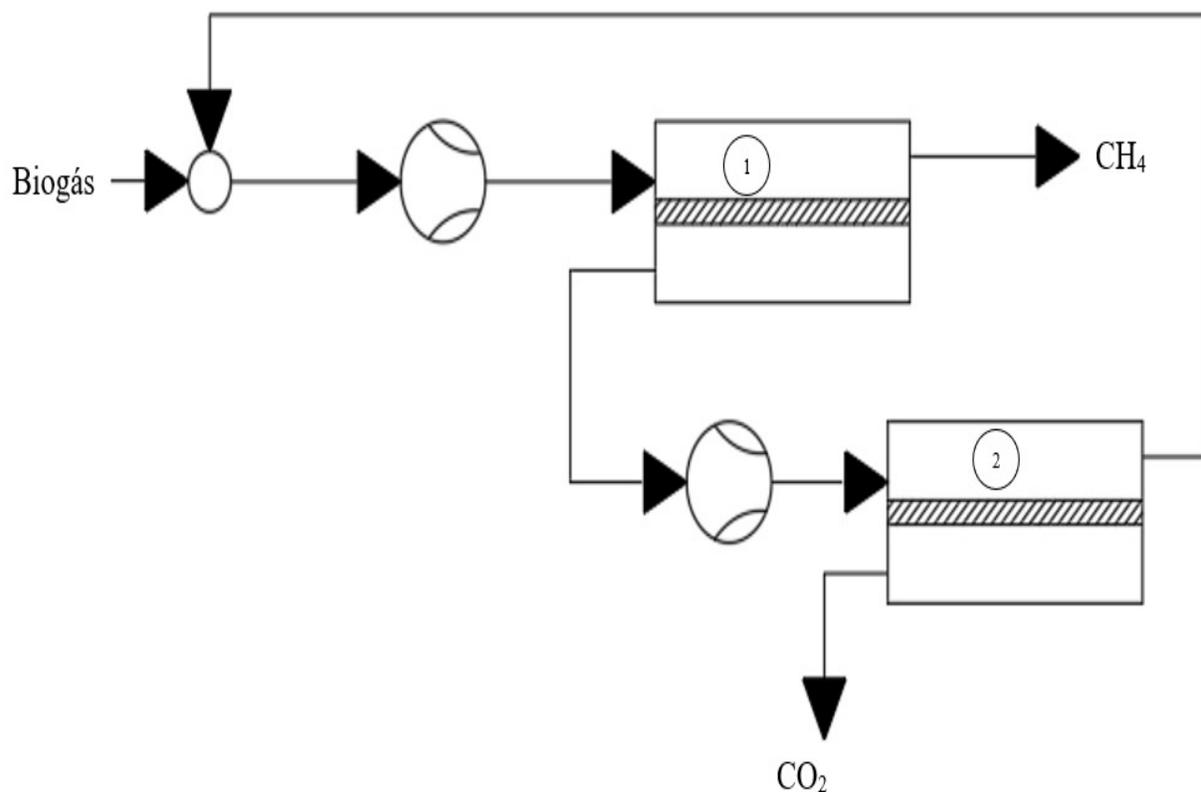
Método	Adsorción (PSA)	Absorción física con agua	Absorción física con solventes orgánicos	Absorción Química con solventes orgánicos	Membranas	Criogénica
Requerimientos de energía kWh/Nm <sup>3</sup>	0.46	0.46	0.49-0.67	0.27	0.25-0.43	0.76
Consumo para el biogás obtenido (kWh/Nm <sup>3</sup> )	0.23-0.30	0.25-0.30	0.2-0.3	0.05-0.15	0.18-0.2	0.76
Consumo para el biogás limpio (kWh/Nm <sup>3</sup> )	Ninguno	Ninguno	<0.2	0.5-0.75	Ninguno	n.e.
Costo (relativo)	Medio	Medio	Medio	Alto	Alto	Alto
Perdidas de Metanos (%)	<4	<2	2-4	<0.1	<0.6	2
Recuperación de Metano (%)	96-98	96-98	96-98	96-98	96-98	97-98
Eficiencia de m metano (Relativo)	Medio	Alto	n.e.	n.e.	Bajo	Alto
Calidad del gas.	Alto	Alto	n.e.	n.e.	Alto	Alto
Pre-purificación	Si	Recomen.	Recomen.	Si	Recomen.	Si
Remoción de sulfuro de Hidrogeno	Posible	Si	Posible	Contaminante	Posible	Si
Remoción de N <sub>2</sub> y O <sub>2</sub>	Posible	No	No	No	Parcial	Si
Presión de operación (bar)	3-10	4-10	4-8	Atmosférico	5-8	80
Presión a la salida (bar)	4-5	7-10	1.3-7.5	4-5	4-6	8-10
Inversión (250 Nm <sup>3</sup> /h) Euros	€ 680,000	€ 265,000	n.e.	€ 353,000	€ 233,000-749,999	€ 908,500
Inversión (Valor relativo) (250 Nm <sup>3</sup> /h)	0.98	1.0	0.91	0.91	0.87	Alto
Costos de operación (Valor relativo)	0.98	1.0	0.99	1.16	0.93	Alto
Mantenimiento	€ 187,250	€ 100,000	n.e.	€ 134,000	€ 81,750	€ 397,500
Costo por Nm <sup>3</sup> de biogás purificado	€ 0.25	€ 0.13	n.e.	€ 0.17	€ 0.12-0.22	€ 0.44
Costo sin sulfuro de hidrogeno	NA	0.13	n.e.	0.17	0.12	NA
Volumen compacto	No	Medio	n.e.	n.e.	Si	No
Emisiones	Medio	Bajo	n.e.	n.e.	Medio	Bajo
Corrientes de residuos	Batch	Continuo	n.e.	n.e.	Batch	Continuo
Químicos requeridos	Agua y O <sub>2</sub>	Agua	Si	n.e.	No	No
No total de ventajas	6	10	2	6	16	8

Fuente: M. Baltazar, "Estudio para la producción de biometano en el sistema de transporte público de la Ciudad de México: Caso de estudio Ruta 1 Izazaga – Tlalpan, (2019)

De acuerdo con los resultados de la tabla anterior, el método que tiene mayor cantidad de ventajas es el de purificación por membranas, por lo que es el método que se propone utilizar en el presente trabajo.

El tipo de membrana recomendada para la presente propuesta es la tecnología de membrana de Poro Gen Corporation, debido a que estas presentan una mayor durabilidad química de la membrana (las membranas no requieren un tratamiento previo especializados para protegerse de componentes agresivos de biogás que pueden causar la degradación de la mayoría de los sistemas de membrana comerciales), el tamaño de módulo de membrana compacto y alta eficiencia de separación de membrana (Baltazar, 2019).

Por otro lado, es necesario definir el arreglo que tendrá el sistema de membranas ya que en la aplicación industrial la purificación con membranas en una sola etapa genera pérdidas de metano entre un 10 y 15% lo que conlleva a una pérdida considerable de ingresos por ello se emplean los arreglos de dos etapas, en donde ya sea el permeado o retentado son recirculados para obtener un mejor porcentaje de recuperación y pureza de metano (Baltazar, 2019). De acuerdo con lo mencionado anteriormente se propone utilizar un arreglo de doble etapa, el cual necesita dos compresores y recicla el retentado del segundo módulo, como se puede observar en la Figura 3.49.



**Figura 3.49** Arreglos de membrana, proceso b).

Fuente: M. Baltazar, "Estudio para la producción de biometano en el sistema de transporte público de la Ciudad de México: Caso de estudio Ruta 1 Izazaga – Tlalpan, (2019)

### Capítulo 3 Diseño preliminar del sitio de gestión integral de residuos

En un estudio desarrollado por Deng y Hägg se analizaron cuatro tipos de arreglo de membrana con el fin de evaluar su desempeño, costos de operación, área específica de la membrana, energía específica y recuperación de metano (Baltazar, 2019). En la Tabla 3.23 se muestran las especificaciones del arreglo de membranas seleccionado.

Tabla 3.23 Análisis de eficiencia de los diferentes arreglos de membrana.

Proceso	Recuperación de CH <sub>4</sub>	Energía específica (kW-h/m <sup>3</sup> )	Área específica (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	Costo de purificación (Euro- h/ m <sup>3</sup> )
Etapas simple	0.855	0.277	1.70	0.228
Doble etapa Proceso a)	0.957	0.318	1.92	0.220
Doble etapa Proceso b)	0.997	0.286	1.69	0.201
Doble etapa Proceso c)	0.973	0.295	1.57	0.206

Fuente: M. Baltazar, "Estudio para la producción de biometano en el sistema de transporte público de la Ciudad de México: Caso de estudio Ruta 1 Izazaga – Tlalpan, (2019)

Para la presente propuesta seleccionó la especificación de la tercera fila "Doble etapa proceso b", mismo arreglo de la Figura 3.48. Por otro lado, esto es acorde porque tiene la mejor ventaja sobre los demás, ya que cuenta con el precio más bajo de purificación, la recuperación más alta y el módulo de área específica más bajo, considerando una permeabilidad 66.67 GPU para el CO<sub>2</sub> y 2.08 GPU para el CH<sub>4</sub> (Baltazar, 2019).

Con esto queda completa la propuesta para el sistema de extracción y purificación de biogás, el cual tiene una especificación suficiente para poder aprovecharse como combustible para la generación de energía o bien como biometano para automóviles.

# Capítulo 4 Beneficios económicos y ambientales de la propuesta.

## 4.1 Beneficios ambientales.

### 4.1.1 Atmósfera

Como ya se mencionó en el Capítulo I del presente trabajo, los contaminantes principales del aire son, el CO<sub>2</sub>, el H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, los HFC, CF<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> y el SF<sub>6</sub>, por lo que en el protocolo de Kioto se dieron a la tarea de idear una manera para reducir las emisiones de estos gases contaminantes a la atmósfera mencionados principalmente en el protocolo de Montreal. Dicha solución consistió en los bonos carbono, cuya definición se dará a continuación (Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C., 2019) .

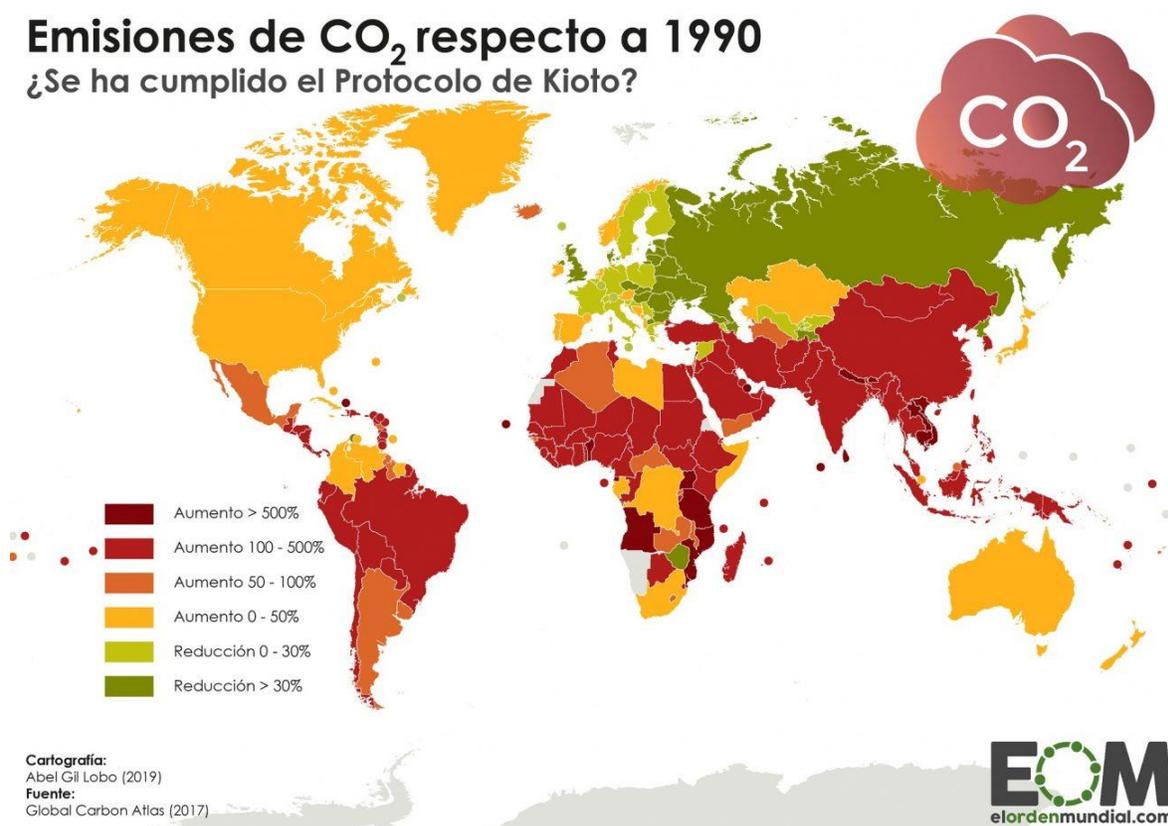
Los “bonos de carbono” es el nombre genérico con el que se denomina a una serie de instrumentos económicos y de mercado, creados para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Entre estos instrumentos están los certificados de reducción de emisiones (CERs por sus siglas en inglés), los cuales son otorgados, mediante el mecanismo de desarrollo limpio (MDL). El funcionamiento del mercado de bonos de carbono se puede explicar de la siguiente manera: el sistema otorga incentivos económicos para que empresas privadas contribuyan a la mejora de la calidad ambiental y se consiga regular la emisión generada por sus procesos productivos, considerando el derecho a emitir CO<sub>2</sub> como un bien canjeable y con un precio establecido en el mercado. Se expiden CERs los cuales se calculan en volúmenes equivalentes a metros cúbicos o toneladas de CO<sub>2</sub> que no fueron emitidos a la atmósfera. Los CERs son otorgados en una cuenta electrónica a favor de los desarrolladores de los proyectos MDL una vez que se hayan realizado las respectivas reducciones. Los CERs generarán elementos comercializables, sujetos a la ley de la oferta y demanda.

Cuando los gobiernos de los países del Anexo B del Protocolo de Kioto destinan dinero para los fondos de carbono gestionados por alguna institución financiera, lo que están haciendo es pagar la opción más barata para cumplir con sus compromisos de reducción de emisiones asumidos. Las llamadas “flexibilidades” del Protocolo de Kioto permiten cumplir esos compromisos de diferentes maneras. Una es reducir directamente las emisiones de CO<sub>2</sub> por parte de los países del Anexo B, sustituyendo sus fuentes de combustible, adquiriendo nueva tecnología amigable con el medio ambiente y/o bajando sus niveles de producción. Otra manera, más barata, es precisamente la que están siguiendo estos países con sus aportes a los “fondos”, haciendo viables proyectos que se instalan en América Latina y el Caribe, y luego comprar sus CERs, en lugar de procesar cambios en sus propios modelos de producción y consumo energético. En realidad, no están reduciendo sus propias emisiones, sino que están compensando las emisiones propias con aquellas evitadas o reducidas por los proyectos antes mencionados. Si tuvieran que reducir sus emisiones en sus propios territorios, deberían gastar

mayores cantidades de flujos monetarios. Entonces, les resulta más barato no cambiar nada de sus modelos de producción y consumo dentro de sus territorios, y aportar algunos millones de dólares para que proyectos que se instalan en la región puedan generar CERs. Luego los mismos son adquiridos por los países del Anexo B, argumentando que se evitaron tantas toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera en esos países, comprando sus certificados y con ellos la posibilidad de seguir generando el CO<sub>2</sub> en sus países. En la Figura 4.1 se puede observar cual es la diferencia de emisiones de CO<sub>2</sub> de cada país respecto a sus emisiones en 1990, de acuerdo con lo mencionado en el protocolo de Kioto, se puede observar que en los países en vías de desarrollo se ha presentado un incremento en la emisiones, mientras que en las potencias mundiales que implementan sistemas enfocados en el cuidado del medio ambiente, entre ellos están los sistemas de manejo integral de residuos, tienen una disminución en sus emisiones de GEI, como lo plantea el protocolo de Kioto.

### Emisiones de CO<sub>2</sub> respecto a 1990

¿Se ha cumplido el Protocolo de Kioto?



**Figura 4.1** Emisiones de CO<sub>2</sub> de los países respecto a las emisiones de 1990.

Fuente: *El nuevo orden mundial* (2019), "Las emisiones de CO<sub>2</sub> desde el protocolo de Kioto. Recuperado de: <https://elordenmundial.com/mapas/emisiones-co2-respecto-1990-protocolo-de-kioto/>

En América Latina y del Caribe generan en conjunto tan solo el 5% de las emisiones de GEI anuales a nivel global. Sin embargo, los efectos del cambio climático son sumamente costosos para la región, por lo que existe una enorme necesidad de implementar medidas que permitan modificar las tendencias actuales de degradación del medio ambiente y los riesgos asociados a este (Plataforma Mexicana de Carbono, 2019).

## Capítulo 4 Beneficios ambientales y económicos de la propuesta

Por lo mencionado anteriormente, México ha considerado la importancia de desarrollar una economía baja en carbono. El cual ha sido expresado mediante compromisos en materia de cambio climático y ha desarrollado numerosas acciones en mitigación y adaptación. Como ejemplo en 2012, el congreso de la unión aprobó la Ley General del Cambio Climático, estableciendo las metas aspiracionales de reducción de emisiones del país a saber: un 30% para 2030 de acuerdo con la línea base de emisiones y 50% de 2050 respecto a las emisiones del 2000.

En México, en 2015 se liberaron 683 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (t CO<sub>2</sub>e ) de gases de efecto invernadero a la atmósfera, de los cuales, el 6.7% (45,761,000 tCO<sub>2</sub>e) corresponden a los generados por los residuos sólidos urbanos, de los cuales solo el 3.2% (21,856,000 tCO<sub>2</sub>e) corresponden a los generados por la eliminación de residuos, de acuerdo con datos del inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero (INECC, 2015).

Por otro lado, la cantidad de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> que se evitará llegue a la atmósfera, se muestra en la Tabla 4.1, la cual, indica la huella de carbono que impactan los residuos depositados en un relleno sanitario además de la cantidad de tCO<sub>2</sub>e que se evitará llegue a la atmósfera, considerando la eficiencia del 80%.

Tabla 4.1 Emisión de GEI en tCO<sub>2</sub>e del relleno sanitario

Año	Cantidad de residuos (toneladas)	Total, de emisiones de CO <sub>2</sub> (tCO <sub>2</sub> e)	Total, de emisiones de CO <sub>2</sub> evitadas (tCO <sub>2</sub> e)
2020	472,879	217,051	173,641
2021	497,324	228,272	182,617
2022	529,159	242,884	194,307
2023	555,674	255,054	204,043
2024	589,978	270,800	216,639
2025	618,714	283,990	227,191
2026	648,534	297,677	238,141
2027	686,781	315,232	252,185
2028	726,555	333,489	266,791
2029	767,912	352,472	281,977
2030	810,906	372,206	297,764

Fuente: elaboración propia con datos de: <http://www.mexico2.com.mx/calculadora.php>

A lo largo de los primero 10 años de operación se evitará la emisión de 2,535,296 tCO<sub>2</sub>e de GEI que es equivalente a 2,535,296 bonos de carbono. Por lo tanto, las emisiones de GEI evitadas en el 2020 reducirían en 0.79% la cantidad de 3.2% de GEI generados por la eliminación de residuos, mencionados en la Figura 1.4a.

### 4.1.2 Recursos Hídricos

Otro beneficio ambiental sería la reducción de contaminación del agua (superficial y subterránea) por la implementación de la presente propuesta debido a la reutilización y tratamiento de los lixiviados, los cuales podrían potencialmente contaminar 100 metros

cúbicos de agua por cada litro de lixiviado (Molina, 2010), por lo que con la implementación de la propuesta se podría evitar la contaminación de 14,491,000 m<sup>3</sup>/h de agua potable.

### 4.1.3 Recursos materiales.

Un beneficio adicional de manera resumida serían las ventajas del reciclaje, la cuales son (Ecología Verde, 2019):

- La preservación de recursos naturales
- Ahorro de energía
- Ahorro de petróleo
- Ahorro económico

Es decir, el reciclaje continúa el ciclo de vida de los residuos valorizables, el cual, en la actualidad, mayormente termina cuando estos materiales llegan a un tiradero a cielo abierto para su descomposición. Sin embargo, día con día se escuchan palabras abstractas relacionadas al reciclaje, pero son los datos concretos los que resultan más impactantes al hablar de ventajas del reciclaje, es por eso por lo que a continuación se muestra una relación de valorizables a productos de uso diario y en la Tabla 4.2 se muestra el impacto que tendría la cantidad de reciclables separados en la planta clasificadora propuesta.

- 8 cajas de cereales (19.2 g cartón / caja) recicladas pueden convertirse en un libro.
- 80 latas de refrescos (15 g aluminio / lata) recicladas pueden convertirse en una llanta.
- 40 botellas de plástico (30 g plástico / botella) recicladas pueden convertirse en un forro polar.
- Fabricar una lata gasta un 95% más de energía que reciclarla.
- Con cada tonelada de papel que se recicla se ahorran 4.100 Kwh.

Tabla 4.2 Beneficio ambiental de los residuos valorizables.

Residuo Valorizable	Cantidad (kg/h)	Posible reciclado
Cartón y papel	11,700	76,171 libros
Metales	1,800	1,500 llantas
Plástico	6,300	7,560 forros

Fuente: Elaboración propia

Es por esto por lo que resulta crítica la etapa de separación de residuos, ya que además del beneficio económico se tiene un beneficio ambiental considerable, como se nota en la tabla anterior.

## 4.2 Beneficios económicos.

Los puntos que se expondrán a continuación son un estimado de los precios que tiene el mercado actual para una cuantificación general, dado que el presente trabajo es una propuesta de prediseño lo único que se pretende es conocer las ventajas económicas más generales que pueden presentar una desviación de la realidad de  $\pm 30\%$ .

Uno de los principales beneficios económicos de la presente propuesta son las ventas de los bonos de carbono creados a partir de las emisiones de CO<sub>2</sub>e, de acuerdo con lo estipulado en

## Capítulo 4 Beneficios ambientales y económicos de la propuesta

el protocolo de Kioto, los cuales tienen un valor mínimo en el mercado de 6 USD, aunque recientemente el gobierno de la CDMX vendió bonos de carbono en 12 USD por unidad (Santiago, 2018). Cabe mencionar que un bono de carbono equivale a una tonelada de CO<sub>2e</sub>, por lo que la presente propuesta tiene un posible aprovechamiento de 2,237,535 bonos de carbono, que, a un precio de 10 USD por bono, que es el precio común de un bono, equivale a una cantidad aproximada de **22,375,350 USD** (aproximadamente 447,507,000 MXN). Otro beneficio considerable es el de la venta de los residuos valorizables, que de acuerdo con los precios del mercado de reciclaje tendrían ganancias como se muestra a continuación en la Tabla 4.3:

Tabla 4.3 Beneficios económicos de los valorizables

Material	Precio unitario (MXN/kg)	Cantidad separada (kg/h)	Beneficio potencial (MXN/h)
Cartón y papel	3	11,700	35,100
Aluminio	20	10,800	216,000
Vidrio	0.8	5,400	4,320
Plástico	4	6,300	25,200

Fuente: Elaboración propia, con datos de: <https://www.capitalmexico.com.mx/metropolitano/valor-basura-cdmx-inorganicos-reciclables-carton-pet-cobre-aluminio/>

Por lo tanto, se tiene un total de: 280,620 MXN/h, es decir 3,928,680 MXN/día y **1,433,968,200 MXN/año** o bien 71,698,410 USD/año considerando la idealidad de la composición de los residuos, mencionada en la Figura 1.10.

El último beneficio económico importante de la propuesta es el aprovechamiento del biogás rico en metano, el cual por el proceso de purificación adquiere características similares a la del gas natural. De acuerdo con los valores obtenidos en el Modelo Mexicano de Biogás, se podría alcanzar una capacidad de recuperación de biogás promedio de 54.1 mm BTU/h desde 2021 hasta 2049. Por otra parte, considerando los precios del gas natural de acuerdo con la Comisión de Regularización Energética se tiene un índice de valor unitario en el mes de Julio de 2019 para la región 6 de México de:  $\frac{2.4389 \text{ USD}}{\text{mmBTU}}$  (Comision Reguladora de Energia, 2019).

$$\text{Generación}_{\text{Biogás}} = 54.1 \frac{\text{mmBTU}}{\text{h}} * \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} * \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} = 473,916 \frac{\text{mmBTU}}{\text{año}}$$

$$\text{Beneficioeconomico}_{\text{Biogás}} = 473,916 \frac{\text{mmBTU}}{\text{año}} * \frac{2.4389 \text{ USD}}{1 \text{ mmBTU}} = 1,155,833.73 \frac{\text{USD}}{\text{año}}$$

Por lo que, a un tipo de cambio de 19.0669 MXN/USD, se tendría un beneficio aproximado de:

$$\text{Beneficioeconomico}_{\text{Biogás}} = 1,155,833.73 \frac{\text{USD}}{\text{año}} * \frac{19.0669 \text{ MXN}}{1 \text{ USD}} = \mathbf{22,038,166.20} \frac{\text{MXN}}{\text{año}}$$

Cabe aclarar que se estima un beneficio promedio anual, el cual puede variar de acuerdo con el flujo de energía recuperada por año que se puede consultar en el Anexo 10 del presente trabajo. Por otro lado, el biogás tiene diferentes formas de ser aprovechado las cuales son: generación de energía eléctrica, biocombustible, quema, por mencionar algunas, sin embargo, es necesario realizar los cálculos pertinentes para discernir sobre la opción que conlleve a mayores beneficios económicos. El alcance de la presente propuesta termina en el

prediseño del sistema de manejo integral de residuos. Uno de los posibles usos que comienza a tomar fuerza en Reino Unido es el uso del biogás como combustible para transporte pesado, como se puede observar en la Figura 4.2.

Estos son algunos de los beneficios económicos directos derivados de la implementación de la presente propuesta, los cuales se expresan con carácter ilustrativo y están sujetos a una desviación del  $\pm 30\%$ .



**Figura 4.2** Camión de distribución de mercancía a base de biometano.

Fuente: EnCamión (2019), "Biogás, el combustible de gran potencial para el transporte pesado". Recuperado de: <https://www.encamion.com/noticia/biogas/estudio/transporte/pesado/camion/encamion>

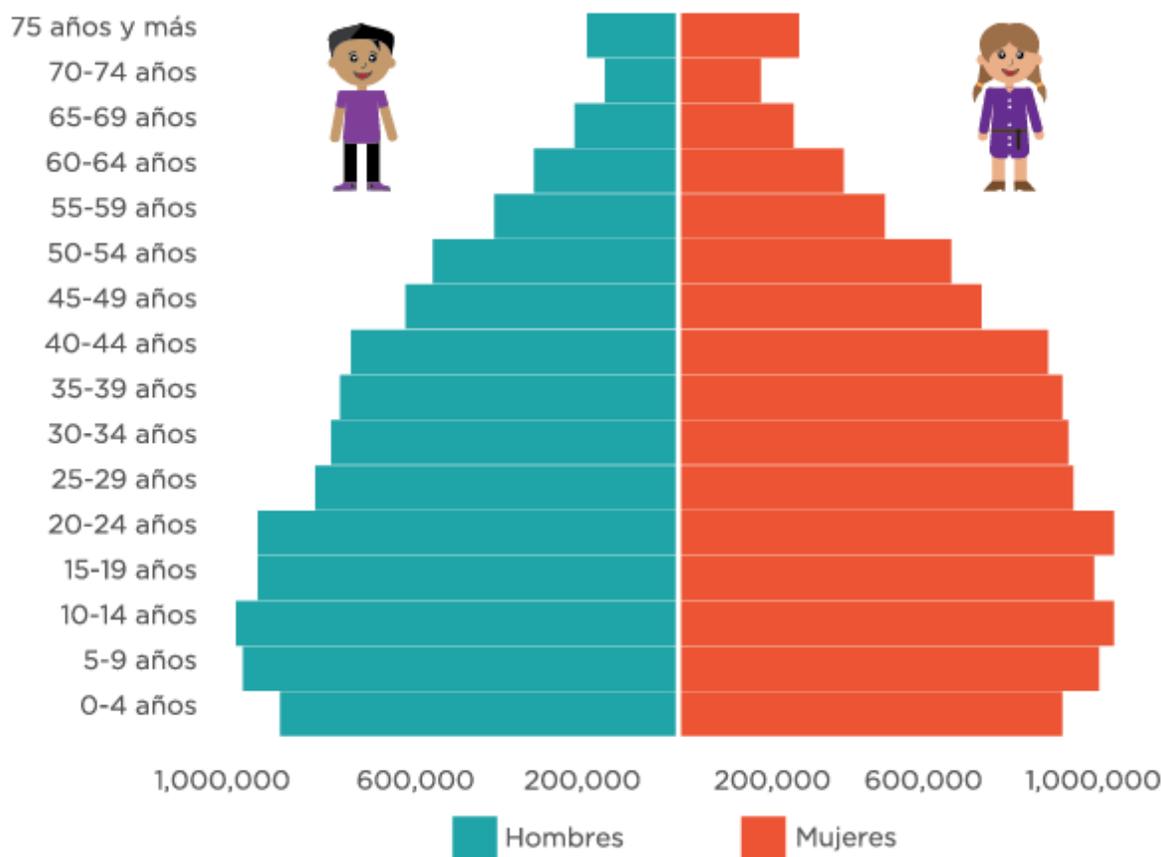
### 4.3 IMPACTO SOCIAL DEL PROYECTO

El principal beneficio social de la presente propuesta es que generaría alrededor de 200 empleos nuevos y se mantendrían los empleos ya establecidos en los depósitos de residuos actuales, por lo que se vería beneficiado el crecimiento de la población económicamente activa, además de ayudar a las personas de bajos recursos, ya que dichos empleos no requieren un alto grado de especialización.

El uso final del suelo del sitio de manejo integral beneficiaría a toda la población mexicana, específicamente a la población del Estado de México, con la creación de un nuevo parque nacional "del Reciclaje", el cual podría estar enfocado en la importancia del reciclaje, el aprovechamiento de la energía y la economía circular, además de contar con museos interactivos enfocados en la temática ambiental. Por otro lado, también se podría contar con espacios especiales para niños y adultos de la tercera edad en donde se desarrollen actividades

## Capítulo 4 Beneficios ambientales y económicos de la propuesta

recreativas de acuerdo con las edades ya mencionadas. En la Figura 4.3 se puede observar la distribución actual de la población por edades.



**Figura 4.3** Distribución de la población por edades en el Estado de México en 2015.

Fuente: COESPO (2015), "Características demográficas, recuperado de: [http://coespo.edomex.gob.mx/caracteristicas\\_demograficas](http://coespo.edomex.gob.mx/caracteristicas_demograficas)

De acuerdo con lo mostrado en la Figura anterior, se puede concluir que para el año 2060, cuando el relleno sanitario se encuentre clausurado la mayor parte de la población será de la tercera edad, siendo un espacio como el que se propone una mejora al entorno estatal.

El construir un parque nacional es recomendable ya que en el área metropolitana de Toluca no existe un parque con el mismo enfoque ya que los parques mayormente conocidos son reservas naturales dedicados principalmente a deportistas, como los son: el parque Bicentenario Metepec, con un área de 97 ha, el parque Alameda 2000 con un área de 113 ha, el parque Sierra Morelos con un área de 648 ha, el parque Bicentenario Metropolitano con un área de 21 ha y el parque Ecológico de Cacalomacán con un área de 626 ha. Siendo así el parque propuesto es innovador en su rama con área de 400 ha que además de tener áreas para realizar el deporte contará con áreas educativas y áreas para que los adultos mayores disfruten al aire libre, todo creado a partir de los desechos. A continuación, en la Figura 4.4 se muestra un dibujo ilustrativo de la posible distribución de las instalaciones a la clausura del sitio de manejo integral.

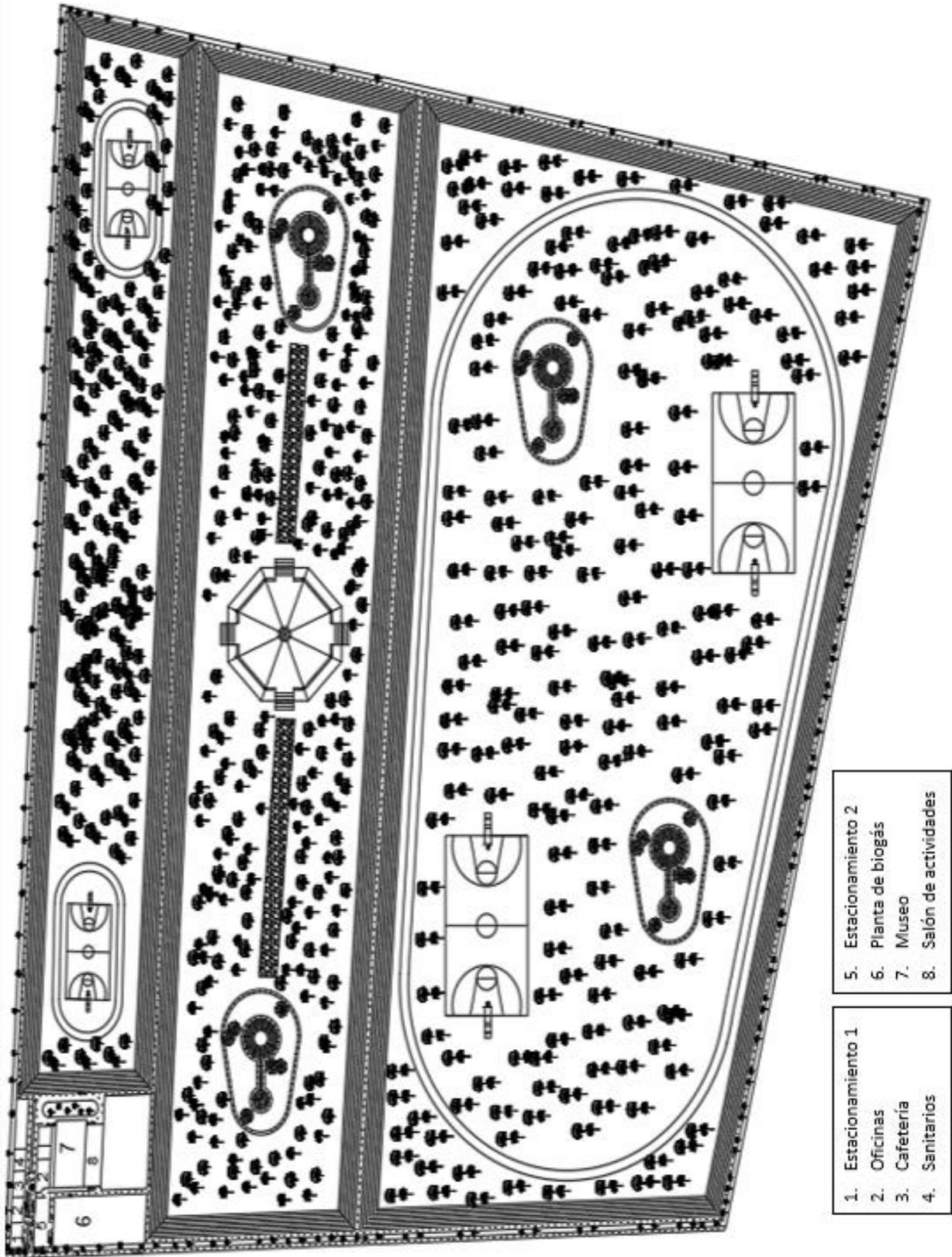


Figura 4.4 Lay out del uso del suelo del sitio de manejo integral de los residuos una vez clausurado

Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

De acuerdo con lo expuesto en la presente tesis, se puede afirmar que con este proyecto se demuestra benéfica la operación de un sitio de manejo integral centralizado mancomunado que dé servicio a un estado, en vez de contar con sitios municipales aislados y no controlados. Por otra parte, no se afectará a la población que actualmente trabaja en la recolección y disposición de residuos, ya que se aprovechará este capital humano y las instalaciones actuales en forma de estaciones de transferencia.

Se encontró que la principal remuneración económica de las instalaciones periféricas de ésta propuesta es la separación de los residuos valorizables en la planta clasificadora, con una cantidad de 35.99 toneladas de valorizables por hora, seguida de la recuperación de biogás. Otro beneficio económico y ambiental importante, independiente de las instalaciones periféricas, es la comercialización de 2,535,296 bonos de carbono que se otorgarían debido a la implementación del sistema de manejo integral de los residuos.

En el cálculo para el diseño del relleno sanitario se planeó en mega celdas, de forma que el área destinada para la disposición de residuos queda dividida en tres etapas. La primera etapa, con un área de 628,080 m<sup>2</sup>, presenta una generación potencial de biogás de 11,805 m<sup>3</sup>/h y una recuperación de 6,869 m<sup>3</sup>/h, durante 30 años, lo cual indica que, aunque la mega celda este calculada para 10 años, la generación comenzará a partir del segundo año de operación y seguirá 20 años más. Por lo que se afirma que es más conveniente dividir un relleno sanitario en etapas porque se puede explotar el biogás previo a la clausura de todo el sitio de disposición final. Cabe mencionar que se realizó el diseño completo de la primer mega celda, asumiendo que es la misma metodología para la dos mega celdas restantes.

Los valores de simulación de aprovechamiento de biogás recuperados en la visita técnica a las instalaciones de SIMEPRODE y realizando una comparación de dichos datos con los obtenidos en el caso de estudio mediante el Modelo Mexicano de Biogás 2.0, resulta que dicho software proporciona una estimación confiable. Por otro lado, se reafirma lo mencionado dentro de la propuesta, que los sistemas de extracción de biogás en los rellenos sanitarios tienen una eficiencia de recuperación del 60-85%.

Es necesaria la implementación de este tipo de sitios de manejo integral de residuos en toda la República Mexicana dado que se reduciría la huella de carbono y traería beneficios económicos y sociales, como lo son la recuperación económica de los valorizables en este sitio, con una cantidad aproximada de 1,433,968,200 MXN por año. Por otra parte, la propuesta para la creación de un parque nacional único en su tipo, a la clausura del sitio de disposición final que beneficiaría a toda la población mexiquense.

Resulta necesario hacer una ingeniería detallada del sistema de manejo integral de residuos sólidos urbanos, que incluya una estimación de costos con una incertidumbre menor al 5% para poder determinar la factibilidad económica de la propuesta. Independientemente de la tesis presentada, este tipo de sitios han sido implementados con éxito en países desarrollados

## PROPUESTA PARA EL CONTROL DE RESIDUOS SOLIDOS URBANOS Y SU APROVECHAMIENTO EN EL MUNICIPIO DE TOLUCA DE LERDO

---

y cabe mencionar que, de acuerdo con la empresa “ElOrdenMundial”, sus emisiones han disminuido de acuerdo con el protocolo de Kioto. Por lo tanto, se comprueba que una administración incorrecta, como la que actualmente se presenta en Toluca, es uno de los principales factores por los que este tipo de sitios se consideran inviables desde el punto de vista económico y ambiental.

La población mexicana, y la humanidad en general, debe tomar la responsabilidad de la generación desmedida de residuos, que ha traído consigo consecuencias ambientales muy graves, se piensa que dicha generación no es el problema real, sino la incorrecta disposición de los residuos generados y la falta de interés en aprovecharlos es por ello por lo que se debe fomentar la creación de iniciativas que, tengan un impacto ambiental y social positivo.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Agencia de residuos de Cataluña. (2016). *Guía práctica para el diseño y la explotación de las plantas de compostaje*. Obtenido de [http://residus.gencat.cat/web/.content/home/lagencia/publicacions/form/GuiaPC\\_web\\_ES.pdf](http://residus.gencat.cat/web/.content/home/lagencia/publicacions/form/GuiaPC_web_ES.pdf)
2. Ambientum. (15 de junio de 2019). *Ambientum*. Obtenido de [www.ambientum.com/enciclopedia\\_medioambiental](http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental)
3. Arriaza, D. Á. (2016). *MODELO PARA DISEÑO DE SISTEMAS DE CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS PRODUCIDO EN RELLENOS SANITARIOS*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
4. Asociación de Murcia Limpia. (2019). *Reciclar vidrio ¿Para qué?* Obtenido de <http://regiondemurcialimpia.es/fracciones-reciclaje/reciclar-vidrio>
5. Atlas D-Waste. (20 de marzo de 2019). *Atlas d Waste*. Obtenido de <http://www.atlas.d-waste.com/>
6. Baltazar, M. P. (2019). *Estudio para la producción de biometano en el sistema de transporte público de la Ciudad de México: Caso de estudio Ruta 1 Izazaga - Tlalpan*. Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional.
7. Bureau of International Recycling. (5 de abril de 2019). *bir.org*. Obtenido de Bureau of International Recycling: <https://bir.org/industry/paper/>
8. BUSCH. (13 de agosto de 2019). *Buschvacuum.com*. Obtenido de Busch Vacuum Pumps and Systems: <https://www.buschvacuum.com/global/en/products/dolphin/dolphin-lg-lr/dolphin-lg-1910-2680-a?nogeoiip>
9. Cengel, Y. (2012). *Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones*. Ciudad de México: Mc Graw Hill / Interamericana Editores, S.A. de C.V.
10. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C. (22 de agosto de 2019). *Bonos de carbono: financiarización del medio ambiente en México*. Obtenido de <http://www.redalyc.org/jatsRepo/417/41744004008/html/index.html>
11. COESPO. (26 de agosto de 2019). *Consejo Estatal de Población*. Obtenido de Secretaría General del Gobierno del Estado de México: [http://coespo.edomex.gob.mx/caracteristicas\\_demograficas](http://coespo.edomex.gob.mx/caracteristicas_demograficas)
12. Comisión Reguladora de Energía. (26 de agosto de 2019). *Gobierno de México*. Obtenido de <http://www.cre.gob.mx/IPGN/>
13. Diario Oficial de la Federación. (28 de enero de 1988). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección Ambiental*. México.

14. Diego, M. G. (15 de mayo de 2019). *EOI*. Obtenido de EOI: <https://www.eoi.es/es/file/18177/download?token=3IHBtZV1>
15. E., O. (2015). *Diseño de una planta clasificadora de residuos sólidos urbanos para la empresa pública municipal mancomunada del pueblo de Cañari de los cantones*.
16. Eco México Social. (15 de marzo de 2019). *EcoMexicoSocial*. Obtenido de <http://ecomexicosocial.blogspot.com/2011/09/esfuerzos-para-no-destruir-la-capade.html>
17. Ecología Verde. (24 de agosto de 2019). *Cuáles son los beneficios de reciclar*. Obtenido de <https://www.ecologiaverde.com/cuales-son-los-beneficios-de-reciclar-66.html>
18. El Eco de Sunchales. (19 de noviembre de 2014). *Avanza el proyecto de construcción de un biodigestor en Sunchales*. Obtenido de <https://elecodesunchales.com.ar/noticia/101884/avanza-el-proyecto-de-construccion-de-un-biodigestor-en-sunchales>
19. El Nuevo Orden Mundial. (3 de julio de 2019). *Emisiones de CO2 respecto a 1990*. Obtenido de ¿Se ha cumplido el protocolo de Kioto?: <https://elordenmundial.com/mapas/emisiones-co2-respecto-1990-protocolo-de-kioto/>
20. EOI. (2007). *Curso de plantas o estaciones de transferencia*. Sevilla: EOI.
21. Eroski Consumer. (2019). *Papel - Cartón*. Obtenido de <http://escuelas.consumer.es/web/es/reciclaje/online/pag0403.php>
22. FerreyrosCAT. (31 de agosto de 2019). *Equipos*. Obtenido de <http://dev.asixonline.com/ferreyros-wp/equipo/d6t/?parent=1924>
23. George, T. (2002). *Handbook of solid waste management*. Davis, California: McGraw Hill.
24. Gobierno de México. (2015). *Guía de diseño para la identificación gráfica del manejo integral de los residuos sólidos urbanos*. Obtenido de <https://www.gob.mx/residuos-solidos/articulos/guia-de-diseno-para-la-identificacion-grafica-del-manejo-integral-de-los-residuos-solidos-urbanos>
25. Gobierno de México. (5 de julio de 2019). *inafed*. Obtenido de [www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM15mexico/municipios/15005a.html](http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM15mexico/municipios/15005a.html)
26. Gobierno de México. (15 de marzo de 2019). *INECC*. Obtenido de Presentación de los resultados del INEEI: <https://www.gob.mx/inecc/articulos/presentacion-de-los-resultados-del-inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero-152782?idiom=es>

27. Gobierno de México. (20 de marzo de 2019). *SEMARNAT*. Obtenido de [semarnat.gob.mx](http://semarnat.gob.mx)
28. Gobierno del Estado de México. (2007). *SEDUV carta hidrológica*. Obtenido de [http://seduv.edomexico.gob.mx/dgau/pdf/plan\\_estatal/D-05.pdf](http://seduv.edomexico.gob.mx/dgau/pdf/plan_estatal/D-05.pdf)
29. Gobierno del Estado de México. (28 de abril de 2019). *EdoMex.gob*. Obtenido de [seduym: http://seduym.edomex.gob.mx/planes\\_municipales\\_de\\_desarrollo\\_urbano](http://seduym.edomex.gob.mx/planes_municipales_de_desarrollo_urbano)
30. Gobierno del Estado de México. (10 de julio de 2019). *EdoMex.gob*. Obtenido de [seduv: seduv.edomexico.gob.mx/dgau/pdf/plan\\_estatal/D-05.pdf](http://seduv.edomexico.gob.mx/dgau/pdf/plan_estatal/D-05.pdf)
31. Gobierno del Estado de México. (18 de abril de 2019). *EdoMex.gob*. Obtenido de [ifomegem: http://ifomegem.edomex.gob.mx/sites/ifomegem.edomex.gob.mx/files/files/Inf%20Geologico%20Minera/Carta\\_Geol%C3%B3gica\\_Edo\\_Mex.pdf](http://ifomegem.edomex.gob.mx/sites/ifomegem.edomex.gob.mx/files/files/Inf%20Geologico%20Minera/Carta_Geol%C3%B3gica_Edo_Mex.pdf)
32. Gonzalez, A. M. (2009). *Diseño de estaciones de transferencia de residuos solidos para el municipio de Atoyac de Álvarez, Benito Juárez y Tecpan de Galeana, Guerrero*. Ciudad de México .
33. GOOGLE. (15 de marzo de 2019). *Google*. Obtenido de [Google Maps: google.com.mx/maps/](http://google.com.mx/maps/)
34. Guerrero, L. O. (2014). *Programa de cálculo para estimar la cantidad de lixiviados generados en Relleno Sanitarios*. Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional.
35. Hernandez S, C. L. (2008). Reflexiones sobre la importancia económica y ambiental del manejo de residuos en el siglo XXI. *Journal of Technology*, 60.
36. INEGI. (19 de septiembre de 2019). *Cuentame Población*. Obtenido de [Población Rural y Urbana: http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur\\_urb.aspx?tema=P](http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur_urb.aspx?tema=P)
37. INEGI. (20 de marzo de 2019). *INEGI*. Obtenido de [www.inegi.org.mx](http://www.inegi.org.mx)
38. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2007). *Planta de conjunto tipo de estaciones de transferencia con descarga indirecta*. Obtenido de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/105/I.html>
39. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (18 de mayo de 2019). *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*. Obtenido de [Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático: http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/105/I.html](http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/105/I.html)
40. K, C. (2013). *Disposición final segura de residuos solidos municipales*. México.
41. La guía de Física. (2011). *Diagrama de Moody*. Obtenido de <http://fisica.laguia2000.com/wp-content/uploads/2011/08/Moody3.jpg>

42. López, D. (2016). *Modelo para el diseño de sistemas de captación y aprovechamiento de biogás producido en rellenos sanitarios*. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
43. Mendoza, C., & Gallardo Izquierdo, A. (2010). *Tratamiento y Gestión de Residuos Sólidos*. México: Universidad Politécnica de Valencia.
44. Molina, T. (24 de marzo de 2010). *Diario Libre*. Obtenido de Actualidad: <https://www.diariolibre.com/actualidad/los-lixiviados-no-se-tratan-JJDL239132>
45. NOM - 083 - SEMARNAT. (10 de octubre de 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*. México.
46. Ostuacan Chiapas. (2019). *Ostuacan, un lugar para unas buenas vacaciones*. Obtenido de <http://ostuacanchiapas.blogspot.com/2011/10/acero-en-proceso.html>
47. Pilco, A. (2014). *Propiedades del gas natural*. Obtenido de <https://martinfernandezgarcia.files.wordpress.com/2014/02/capitulo-1-propiedades-del-gas-natural.pdf>
48. Pipas de agua de Oaxaca. (31 de agosto de 2019). *Pipas de agua de Oaxaca*. Obtenido de <https://pipasdeaguaoaxaca.com.mx>
49. Plataforma Mexicana de Carbono. (23 de agosto de 2019). *MéxiCO2*. Obtenido de <http://www.mexico2.com.mx/medio-ambiente.php?id=5>
50. Procuraduría ambiental y del ordenamiento territorial. (2013). *Diagnostico actual del flujo de RSU que se genera en el Distrito Federal*. Obtenido de [http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/estudios/flujo\\_residuos\\_DF.pdf](http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/estudios/flujo_residuos_DF.pdf)
51. ProMexico. (2015). *Energías Renovables*. Ciudad de México: Secretaría de Economía. Recuperado el 02 de Octubre de 2018, de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/76391/DS\\_Energias\\_Renovables\\_ES.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/76391/DS_Energias_Renovables_ES.pdf)
52. Salamea, E. L. (2015). *Diseño de una planta clasificadora de residuos sólidos urbanos para la empresa pública mancomunada del pueblo cañari de los cantones: Cañar, Biblián, el Tambo y Suscal en el año 2014*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca.
53. Salamea, E. O. (2015). *Diseño de una planta clasificadora de residuos sólidos urbanos para la empresa pública municipal mancomunada del pueblo Cañari de los Cantones: Cañar Biblián, El Tambo y Suscal en el año 2014*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca.

54. Santiago, J. (29 de agosto de 2018). *El Economista*. Obtenido de Gobierno capitalino emite primer bono de carbono forestal:  
<https://www.eleconomista.com.mx/mercados/Gobierno-capitalino-emite-primer-bono-de-carbono-forestal-20180829-0107.html>
55. Scottish Environment Protection Agency (SEPA). (13 de agosto de 2019). *Guidance on the Management of Landfill gas*. Obtenido de [sepa.org](https://www.sepa.org.uk/media/28986/guidance-on-the-management-of-landfill-gas.pdf):  
<https://www.sepa.org.uk/media/28986/guidance-on-the-management-of-landfill-gas.pdf>
56. SCS Engineers. (2009). *Manual del Usuario del Modelo Mexicano de Biogás*. Reston, Virginia.
57. Secretaría de Economía. (22 de enero de 2019). *www.gob.mx*. Obtenido de [www.gob.mx](http://www.gob.mx):  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/76391/DS\\_Energias\\_Renovables\\_ES.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/76391/DS_Energias_Renovables_ES.pdf)
58. Secretaría de Energía. (06 de octubre de 2018). *SENER*. Obtenido de INEL:  
<https://dgel.energia.gob.mx/inel/>
59. Secretaría de Energía Argentina. (23 de enero de 2019). *www.energia.gov.ar*. Obtenido de [www.energia.gov.ar](http://www.energia.gov.ar):  
[https://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro\\_energia\\_biomas.pdf](https://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_biomas.pdf)
60. SEDEMA. (15 de marzo de 2019). *Formato 7*. Obtenido de [formato7.com/se-contabilizan-800-tiraderos-a-cielo-abierto-en-veracruz-sedema/](http://formato7.com/se-contabilizan-800-tiraderos-a-cielo-abierto-en-veracruz-sedema/)
61. SEMARNAT. (2010). *Especificaciones técnicas para el diseño y construcción de biodigestores en México*. Ciudad de México.
62. SEMARNAT. (14 de julio de 2019). *GOB.SEMARNAT*. Obtenido de <https://www.gob.mx/semarnat>
63. SENER. (12 de septiembre de 2018). *Sistema de Información Energética*. Obtenido de Sistema de Información Energética:  
<http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=IE7C01>
64. Sermu Gran. (2016). *¿Sabes que significan los simbolos de los envases de plástico?* Obtenido de <http://www.sermugran.es/sabes-que-significan-los-simbolos-de-los-envases-de-plastico/>
65. Tegui Contenedores. (2019). *Contenedores de basura*. Obtenido de <http://elcomercio.pe/mundo/actualidad/10-rellenos-sanitarios-grandes-mundo-fotos-noticia-476486>

66. The National Academies. (15 de marzo de 2019). *National Academies*. Obtenido de [www7.nationalacademies.org/spanishbeyonddiscovery/ear\\_007545-05.html](http://www7.nationalacademies.org/spanishbeyonddiscovery/ear_007545-05.html)
67. Topographic-Map. (8 de julio de 2019). *Topographic-Map*. Obtenido de <https://es-mx.topographic-map.com/maps/j71w/Estado-de-M%C3%A9xico/>
68. UNEP-GRID-ARENAL. (15 de marzo de 2019). *Efecto invernadero*. Obtenido de Meteorología en red: [meteorologiaenred.com/efecto-invernadero.html](http://meteorologiaenred.com/efecto-invernadero.html)
69. US Army Corps of Engineers . (2013). *LANDFILL GAS COLLECTION*. Washington: DEPARTMENT OF THE ARMY.
70. Weather Spark. (10 de julio de 2019). *WeatherSpark*. Obtenido de <https://es.weatherspark.com/y/5689/Clima-promedio-en-Villa-de-Almoloya-de-Ju%C3%A1rez-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o#Sections-Humidity>
71. Wikipedia. (2019). *Gestión de residuos*. Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/Gesti%C3%B3n\\_de\\_residuos](https://es.wikipedia.org/wiki/Gesti%C3%B3n_de_residuos)

## Anexo 1: Carta geológica del Estado de México.

Fuente: [http://ifomegem.edomex.gob.mx/sites/ifomegem.edomex.gob.mx/files/files/Inf%20Geologico%20Minera/Carta\\_Geol%C3%B3gica\\_Edo\\_Mex.pdf](http://ifomegem.edomex.gob.mx/sites/ifomegem.edomex.gob.mx/files/files/Inf%20Geologico%20Minera/Carta_Geol%C3%B3gica_Edo_Mex.pdf)

En la Figura 1.1 se muestra la carta geológica del Estado de México.

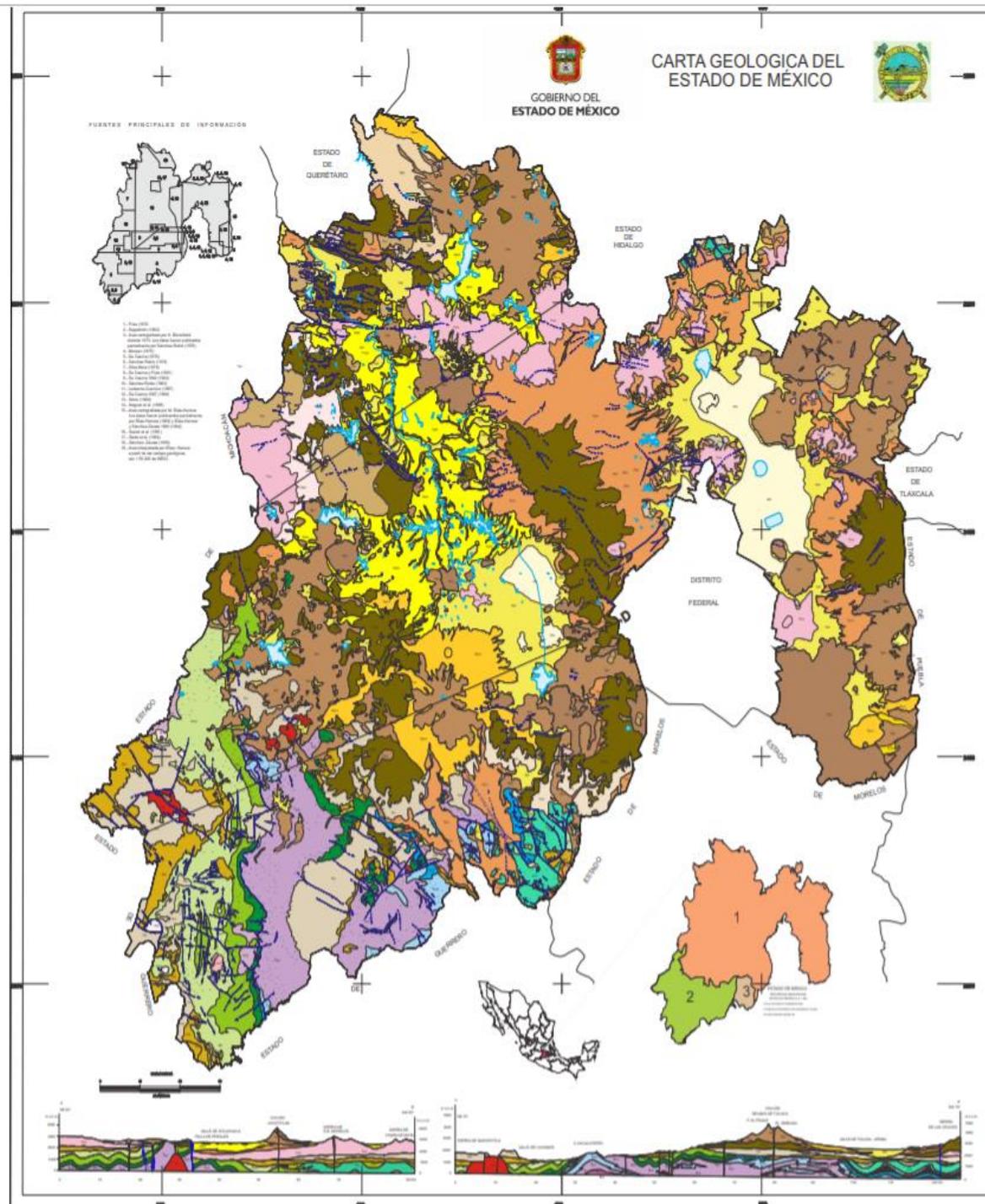


Figura 1.1 Carta geológica del Estado de México.

### Anexo 2: Crecimiento demográfico de los municipios del Valle de Toluca, proyectado al año 2050 utilizando el método geométrico de los métodos estadísticos poblacionales.

Con la Ecuación 2.1 se calcula el crecimiento demográfico:

$$N_t = N_0 * (1 + r)^t \quad \dots (2.1)$$

Donde:

$N_0$  y  $N_t$  : población al inicio y al final del periodo

$t$  : tiempo en años, entre  $N_0$  y  $N_t$

$r$  : tasa de crecimiento observado en el periodo y puede medirse a partir de una tasa promedio anual de crecimiento constante del periodo y cuya aproximación aritmética se calcula con la Ecuación 2.2 la cual es la siguiente:

$$r = \left( \frac{N_t}{N_0} \right)^{\frac{1}{t}} - 1 \quad \dots (2.2)$$

En la Tabla 2.1 se muestra el cálculo de la tasa de crecimiento para cada municipio para cada periodo intercensal, esto para obtener un valor de  $r$  promedio con el cual se realiza la proyección, por otro lado, la Tabla 2.2 muestra la población por municipio del Valle de Toluca en el periodo de 1990 a 2050. Los datos que se muestran de 1990 a 2015 son información obtenida en los censos de población y vivienda, elaborados por el INEGI, mientras que la información del lapso 2020 a 2050 fue obtenida mediante el método geométrico.

**Tabla 2.1 Resultados del cálculo de la tasa de crecimiento para cada municipio de estudio.**

Municipio	r 1995	r 2000	r 2005	r 2010	r 2015	r PROM
Almoloya de Juárez	0.0281	0.0273	0.0267	0.0320	0.0360	0.0300
Amanalco	0.0376	0.0224	-0.0072	0.0237	0.0153	0.0183
Atlacomulco	0.0376	0.0337	0.0028	0.0378	0.0144	0.0253
Ixtapan del Oro	-0.0053	0.0233	-0.0026	0.0089	0.0048	0.0058
Ixtlahuaca	0.0398	0.0136	0.0190	0.0226	0.0160	0.0222
Lerma	0.0394	0.0423	0.0112	0.0501	0.0170	0.0320
Metepec	0.0489	0.0188	0.0106	0.0078	0.0124	0.0197
San Felipe del Progreso **	0.0206	0.0259	-0.1078	0.0391	0.0202	0.0202
San Mateo Atenco	0.0523	0.0198	0.0227	0.0169	0.0080	0.0239
Santo Tomas de los Plátanos	0.0316	0.0080	0.0068	0.0050	0.0122	0.0127
Temoaya	0.0425	0.0264	0.0232	0.0298	0.0290	0.0302
Tenango del Valle	0.0358	0.0351	0.0107	0.0257	0.0207	0.0256
Toluca	0.0297	0.0338	0.0232	0.0186	0.0128	0.0236
Valle de Bravo	0.0562	0.0385	-0.0161	0.0309	0.0130	0.0245
Villa Victoria	0.0178	0.0297	0.0100	0.0393	0.0208	0.0235
Zinacantepec	0.0488	0.0291	0.0225	0.0426	0.0241	0.0334

\*\* El municipio de San Felipe del Progreso presentó un comportamiento anormal en el año 2000 a 2005, por lo que se despreciaron esos datos y el valor de su tasa de crecimiento (r PROM) únicamente corresponde al crecimiento entre 2010 y 2015.

**Tabla 2.2** Resultados de cálculo del crecimiento de la población de los municipios del Valle de Toluca.

Municipio/Año	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Amoloya de Juárez	84,147	96,662	110,591	126,163	147,653	176,237	204,325	236,889	274,644	318,416	369,164	427,999	496,212
Amulaco	15,702	18,885	21,095	20,343	22,868	24,669	27,016	29,586	32,400	35,483	38,888	42,555	46,603
Atzacamalco	54,067	63,018	76,750	77,831	93,718	100,675	114,059	129,221	146,400	165,862	187,912	212,892	241,194
Ixtapan del Oro	5,880	5,726	6,425	6,342	6,629	6,791	6,991	7,197	7,410	7,628	7,853	8,085	8,323
Ixtlahuaca	88,545	107,628	115,165	126,505	141,482	153,184	170,967	190,815	212,966	237,689	265,283	296,079	330,451
Letra	66,912	81,192	99,870	105,578	134,799	146,654	171,667	200,946	235,218	275,336	322,297	377,267	441,612
Metepec	140,268	178,096	195,463	206,005	214,162	227,827	251,170	276,905	305,277	336,555	371,039	409,055	450,967
San Felipe del Progreso	140,834	155,978	177,287	100,201	121,396	134,143	148,228	163,793	180,992	199,997	220,997	244,202	269,844
San Mateo Atenco	41,926	54,089	59,647	66,740	72,579	75,511	84,986	95,649	107,651	121,159	136,361	153,471	172,728
Santo Tomás de los Plátanos	7,068	8,257	8,592	8,888	9,111	9,682	10,313	10,986	11,702	12,465	13,278	14,144	15,066
Temoaya	49,427	60,851	69,306	77,714	90,010	103,834	120,464	139,758	162,143	188,112	218,240	253,195	293,747
Tenango del Valle	45,952	54,789	65,119	68,669	77,965	86,380	98,023	111,235	126,227	143,241	162,547	184,456	209,318
Toluca	487,612	564,476	666,596	747,512	819,561	873,536	981,704	1,103,267	1,239,883	1,393,415	1,565,959	1,759,869	1,977,791
Valle de Bravo	36,135	47,502	57,375	59,902	61,599	65,703	74,156	83,697	94,465	106,619	120,336	135,818	153,292
Villa Victoria	58,566	63,978	74,043	77,819	94,369	104,612	117,510	131,998	148,272	166,553	187,087	210,154	236,064
Zinacantanec	83,197	105,566	121,850	136,167	167,759	188,927	222,660	262,416	309,270	364,491	429,571	506,271	596,666
Total	1,406,238	1,668,693	1,925,174	2,005,379	2,275,660	2,478,365	2,804,240	3,174,359	3,594,920	4,073,020	4,616,782	5,235,513	5,939,879

## ANEXO 3

### Anexo 3: Clasificación de la población económicamente activa de los municipios de interés de acuerdo con el sector económico del trabajo que desempeñan.

En la Tabla 3.1 se muestra la clasificación de la población económicamente activa de acuerdo con el sector primario secundario y terciario.

Tabla 3.1 Clasificación de la PEA.

Municipio	Sexo	PEA	Primarios	Secundarios	Terciarios	No especificado	% Primario	% Secundario	%Terciario	% No específico
Almoloya de Juárez	Total	28,897	5,268	11,572	11,118	939	18.23%	40.05%	38.47%	3.25%
Almoloya de Juárez	Hombres	22,342	4,945	10,518	6,273	606	22.13%	47.08%	28.08%	2.71%
Almoloya de Juárez	Mujeres	6,555	323	1,054	4,845	333	4.93%	16.08%	73.91%	5.08%
Amanalco	Total	4,582	2,198	1,115	1,185	84	47.97%	24.33%	25.86%	1.83%
Amanalco	Hombres	3,699	2,004	1,049	597	49	54.18%	28.36%	16.14%	1.32%
Amanalco	Mujeres	883	194	66	588	35	21.97%	7.47%	66.59%	3.96%
Atzacmulco	Total	22,759	3,588	5,486	13,148	537	15.77%	24.10%	57.77%	2.36%
Atzacmulco	Hombres	15,228	3,176	4,146	7,607	299	20.86%	27.23%	49.95%	1.96%
Atzacmulco	Mujeres	7,531	412	1,340	5,541	238	5.47%	17.79%	73.58%	3.16%
Ixtapan del Oro	Total	1,472	846	236	365	25	57.47%	16.03%	24.80%	1.70%
Ixtapan del Oro	Hombres	1,191	789	214	171	17	66.25%	17.97%	14.36%	1.43%
Ixtapan del Oro	Mujeres	281	57	22	194	8	20.28%	7.83%	69.04%	2.85%
Ixtlahuaca	Total	30,058	4,773	11,206	12,662	1,417	15.88%	37.28%	42.13%	4.71%
Ixtlahuaca	Hombres	20,903	4,336	7,723	7,974	870	20.74%	36.95%	38.15%	4.16%
Ixtlahuaca	Mujeres	9,155	437	3,483	4,688	547	4.77%	38.04%	51.21%	5.97%
Lerma	Total	31,925	1,893	15,760	12,989	1,283	5.93%	49.37%	40.69%	4.02%
Lerma	Hombres	23,113	1,808	12,479	8,016	810	7.82%	53.99%	34.68%	3.50%
Lerma	Mujeres	8,812	85	3,281	4,973	473	0.96%	37.23%	56.43%	5.37%
Metepec	Total	72,668	1,387	21,047	47,118	3,116	1.91%	28.96%	64.84%	4.29%
Metepec	Hombres	46,395	1,285	17,038	26,183	1,889	2.77%	36.72%	56.43%	4.07%
Metepec	Mujeres	26,273	102	4,009	20,935	1,227	0.39%	15.26%	79.68%	4.67%
San Felipe del Progreso	Total	36,724	12,050	12,077	11,642	955	32.81%	32.89%	31.70%	2.60%
San Felipe del Progreso	Hombres	28,494	10,728	11,480	5,739	547	37.65%	40.29%	20.14%	1.92%
San Felipe del Progreso	Mujeres	8,230	1,322	597	5,903	408	16.06%	7.25%	71.73%	4.96%
San Mateo Atenco	Total	20,533	351	10,595	8,948	639	1.71%	51.60%	43.58%	3.11%
San Mateo Atenco	Hombres	14,583	336	8,490	5,361	396	2.30%	58.22%	36.76%	2.72%
San Mateo Atenco	Mujeres	5,950	15	2,105	3,587	243	0.25%	35.38%	60.29%	4.08%
Santo Tomás	Total	1,871	535	429	812	95	28.59%	22.93%	43.40%	5.08%
Santo Tomás	Hombres	1,392	510	393	435	54	36.64%	28.23%	31.25%	3.88%
Santo Tomás	Mujeres	479	25	36	377	41	5.22%	7.52%	78.71%	8.56%
Temoaya	Total	18,210	3,332	4,068	10,310	500	18.30%	22.34%	56.62%	2.75%
Temoaya	Hombres	13,625	3,025	3,302	6,981	317	22.20%	24.23%	51.24%	2.33%
Temoaya	Mujeres	4,585	307	766	3,329	183	6.70%	16.71%	72.61%	3.99%
Tenango del Valle	Total	19,848	6,310	4,599	8,491	448	31.79%	23.17%	42.78%	2.26%
Tenango del Valle	Hombres	14,588	5,839	3,601	4,860	288	40.03%	24.68%	33.32%	1.97%
Tenango del Valle	Mujeres	5,260	471	998	3,631	160	8.95%	18.97%	69.03%	3.04%
Toluca	Total	232,761	5,339	74,392	143,923	9,107	2.29%	31.96%	61.83%	3.91%
Toluca	Hombres	152,752	4,837	59,577	83,201	5,137	3.17%	39.00%	54.47%	3.36%
Toluca	Mujeres	80,009	502	14,815	60,722	3,970	0.63%	18.52%	75.89%	4.96%
Valle de Bravo	Total	16,872	1,786	4,240	10,214	632	10.59%	25.13%	60.54%	3.75%
Valle de Bravo	Hombres	11,523	1,689	3,932	5,549	353	14.66%	34.12%	48.16%	3.06%
Valle de Bravo	Mujeres	5,349	97	308	4,665	279	1.81%	5.76%	87.21%	5.22%
Villa Victoria	Total	17,868	5,581	6,682	4,975	630	31.23%	37.40%	27.84%	3.53%
Villa Victoria	Hombres	14,102	4,982	6,412	2,345	363	35.33%	45.47%	16.63%	2.57%
Villa Victoria	Mujeres	3,766	599	270	2,630	267	15.91%	7.17%	69.84%	7.09%
Zinacantepec	Total	35,386	3,173	13,729	17,159	1,325	8.97%	38.80%	48.49%	3.74%
Zinacantepec	Hombres	26,100	2,985	12,064	10,253	798	11.44%	46.22%	39.28%	3.06%
Zinacantepec	Mujeres	9,286	188	1,665	6,906	527	2.02%	17.93%	74.37%	5.68%

La información fue recuperada del censo de población y vivienda 2000 del INEGI, en los cuestionarios básico y ampliado de dicho censo, donde se detallan las características económicas de cada localidad de los municipios del Estado de México. Dicha información menciona la ocupación principal, como son operadores de máquinas, oficinistas, jefes y

## ANEXO 3 Continuación

supervisores administrativos, trabajadores ambulantes, trabajadores domésticos, entre otros y su sector de actividad económica:

- Primario: Agricultura y ganadería, aprovechamiento forestal, pesca, caza y minería.
- Secundario: Construcción e industrias manufactureras.
- Terciarios: Servicios de electricidad, agua potable, financieros, de seguros, inmobiliarios, alquiler de bienes muebles, profesionales, apoyo a los negocios, educativos, de salud, de asistencia social, esparcimiento, culturales, hoteles, restaurantes, transporte, correos y almacenamiento, además de comercio y actividades de gobierno.

Una vez clasificada la población que realiza las actividades antes mencionadas, se obtuvo el total para cada sector económico y se calculó el porcentaje, para el total, hombres y mujeres.

### **Anexo 4: Proyección de la generación de RSU en los municipios de interés, hasta 2050.**

Se utilizó la Ecuación 4.1 de proyección exponencial para calcular el incremento en la generación de RSU por día por persona, con un aumento de 8% anual, de acuerdo con información de George Tchobanoglous, y multiplicando por la cantidad de población esperada calculada en el Anexo 2.

$$G_t = G_0 * (1 + r)^t \quad \dots (4.1)$$

Donde:

$G_t$ : generación de RSU en el tiempo “t” por día por persona

$G_0$ : Generación de RSU actual por día por persona

t: tiempo transcurrido entre el año de referencia y el año futuro

r: 0.08

En la Tabla 4.1 y 4.2 se muestran las proyecciones de los RSU en unidades de kg/día y Ton/año, respectivamente, calculados con la Ecuación 4.1.

## ANEXO 4

**Tabla 4.1** Proyección de los RSU para cada municipio de interés en kg/día.

Proyección de RSU en Kg/día							
Kg RSU/día*Habitante	0.77	0.89	1.03	1.20	1.39	1.61	1.87
Municipio/Año	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Almoloya de Juárez	157,330	211,457	284,206	381,983	513,398	690,025	927,417
Amanalco	20,802	26,410	33,529	42,566	54,041	68,608	87,102
Atlacomulco	87,825	115,348	151,497	198,974	261,330	343,227	450,789
Ixtapan del Oro	5,383	6,425	7,668	9,151	10,921	13,034	15,555
Ixtlahuaca	131,645	170,329	220,381	285,141	368,930	477,342	617,610
Lerma	132,183	179,372	243,408	330,303	448,220	608,233	825,370
Metepec	193,401	247,177	315,905	403,743	516,005	659,482	842,854
San Felipe del Progreso	114,136	146,208	187,293	239,923	307,342	393,705	504,337
San Mateo Atenco	65,439	85,381	111,399	145,346	189,639	247,428	322,828
Santo Tomas de los Plátanos	7,941	9,806	12,110	14,954	18,466	22,803	28,158
Temoaya	92,758	124,754	167,788	225,665	303,508	408,202	549,011
Tenango del Valle	75,477	99,293	130,622	171,836	226,055	297,381	391,213
Toluca	755,912	984,822	1,283,050	1,671,590	2,177,789	2,837,277	3,696,476
Valle de Bravo	57,100	74,711	97,754	127,904	167,352	218,967	286,502
Villa Victoria	90,483	117,827	153,434	199,803	260,184	338,812	441,202
Zinacantepec	171,448	234,243	320,038	437,256	597,407	816,214	1,115,164
Total	2,159,265	2,833,563	3,720,080	4,886,137	6,420,585	8,440,741	11,101,587

**Tabla 4.2** Proyección de RSU en ton/año.

Proyección de RSU en Ton/año							
Kg RSU/día*Habitante	0.77	0.892641037	1.034815612	1.1996349	1.3907057	1.612209	1.8689921
Municipio/Año	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Almoloya de Juárez	57,426	77,182	103,735	139,424	187,390	251,859	338,507
Amanalco	7,593	9,640	12,238	15,537	19,725	25,042	31,792
Atlacomulco	32,056	42,102	55,296	72,625	95,385	125,278	164,538
Ixtapan del Oro	1,965	2,345	2,799	3,340	3,986	4,757	5,678
Ixtlahuaca	48,050	62,170	80,439	104,076	134,660	174,230	225,428
Lerma	48,247	65,471	88,844	120,561	163,600	222,005	301,260
Metepec	70,591	90,220	115,305	147,366	188,342	240,711	307,642
San Felipe del Progreso	41,660	53,366	68,362	87,572	112,180	143,702	184,083
San Mateo Atenco	23,885	31,164	40,661	53,051	69,218	90,311	117,832
Santo Tomas de los Plátanos	2,899	3,579	4,420	5,458	6,740	8,323	10,278
Temoaya	33,857	45,535	61,242	82,368	110,780	148,994	200,389
Tenango del Valle	27,549	36,242	47,677	62,720	82,510	108,544	142,793
Toluca	275,908	359,460	468,313	610,130	794,893	1,035,606	1,349,214
Valle de Bravo	20,842	27,270	35,680	46,685	61,083	79,923	104,573
Villa Victoria	33,026	43,007	56,004	72,928	94,967	123,666	161,039
Zinacantepec	62,579	85,499	116,814	159,598	218,053	297,918	407,035
Total	788,132	1,034,250	1,357,829	1,783,440	2,343,514	3,080,870	4,052,079

**Anexo 5:**

Siguiendo la misma metodología de cálculo del Anexo 4 se estimó la generación año por año y se calculó el total estimado en 30 años de operación del sitio de disposición final, los resultados se muestran en la Tabla 5.1a y 5.1b.

**Tabla 5.1a** Proyección de RSU con rango de 1 año en ton/año.

Proyección de RSU en Ton/año	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Kg RSU/día/Habitante	0.77	0.7931	0.816893	0.8413998	0.8666418	0.892641	0.9194203	0.9470029	0.975413	1.0046754	1.0348156	1.0658601	1.0978359	1.130771	1.1646941	1.1996349
Municipio/Año																
Almoloya de Juárez	157,330	166,915	177,083	187,870	199,315	211,457	224,339	238,005	252,504	267,887	284,206	301,519	319,888	339,375	360,049	381,983
Amanalco	20,802	21,819	22,886	24,005	25,179	26,410	27,701	29,055	30,476	31,966	33,529	35,168	36,887	38,691	40,582	42,566
Atzacmilco	87,825	92,746	97,944	103,432	109,228	115,348	121,812	128,638	135,846	143,458	151,497	159,986	168,951	178,418	188,416	198,974
Ixtapan del Oro	5,383	5,577	5,778	5,986	6,201	6,425	6,656	6,896	7,144	7,401	7,668	7,944	8,230	8,526	8,833	9,151
Ixtlahuaca	131,645	138,605	145,934	153,651	161,775	170,329	179,335	188,818	198,801	209,313	220,381	232,034	244,302	257,220	270,821	285,141
Lerma	132,183	140,505	149,351	158,754	168,749	179,372	190,665	202,669	215,428	228,991	243,408	258,732	275,021	292,335	310,740	330,303
Mezapec	193,401	203,127	213,343	224,072	235,341	247,177	259,608	272,664	286,376	300,778	315,905	331,792	348,479	366,004	384,411	403,743
San Felipe del Progreso	114,136	119,931	126,021	132,420	139,143	146,208	153,632	161,433	169,630	178,243	187,293	196,803	206,796	217,296	228,329	239,923
San Mateo Atenco	65,439	69,015	72,786	76,763	80,957	85,381	90,046	94,966	100,155	105,628	111,399	117,486	123,906	130,676	137,816	145,346
Santo Tomas de los Plátanos	7,941	8,283	8,640	9,013	9,401	9,806	10,229	10,670	11,130	11,609	12,110	12,631	13,176	13,744	14,336	14,954
Temoaya	92,758	98,422	104,432	110,808	117,575	124,754	132,372	140,455	149,031	158,132	167,788	178,033	188,904	200,439	212,679	225,665
Tenango del Valle	75,477	79,733	84,228	88,977	93,993	99,293	104,891	110,804	117,051	123,651	130,622	137,986	145,766	153,984	162,665	171,836
Toluca	755,912	796,982	840,284	885,938	934,072	984,822	1,038,328	1,094,742	1,154,222	1,216,932	1,283,050	1,352,760	1,426,258	1,503,749	1,585,450	1,671,590
Valle de Bravo	57,100	60,254	63,582	67,094	70,801	74,711	78,838	83,193	87,788	92,637	97,754	103,153	108,851	114,864	121,208	127,904
Villa Victoria	90,483	95,390	100,563	106,016	111,766	117,827	124,217	130,953	138,055	145,541	153,434	161,755	170,527	179,775	189,525	199,803
Zimicentepec	171,448	182,490	194,244	206,754	220,070	234,243	249,330	265,388	282,480	300,673	320,038	340,650	362,589	385,942	410,799	437,256
Total	2,159,265	2,279,796	2,407,097	2,541,552	2,683,565	2,833,563	2,991,998	3,159,348	3,336,117	3,522,840	3,720,080	3,928,433	4,148,530	4,381,037	4,626,658	4,886,137





### Anexo 7:

Para obtener el área y volumen necesarios para la operación del relleno sanitario, se necesitaron realizar los siguientes cálculos:

1. Los cálculos para la cantidad de residuos sólidos y la generación per cápita han sido previamente explicado en los Anexos 4 y 5.
2. Para la cantidad de residuos acumulados se considera que año con año se almacenan los residuos, por lo que dicha columna es la suma de la cantidad anual de residuos de los años anteriores, adicionando la cantidad del año posterior.
3. Para conocer el volumen de los residuos sólidos se utilizó la Ecuación 7.1 de la definición de densidad:

$$V_{RSU} = \frac{G_{RSU}}{\rho_{RSU}} \quad \dots (7.1)$$

- a. Para la compactación diaria y anual se considera un valor de  $\rho_{RSU}=700 \text{ kg/m}^3$ .
  - b. Para la estabilización anual (RS) se considera un valor de  $\rho_{RSU}=800 \text{ kg/m}^3$ .
4. El material de cobertura necesario se calculó, de acuerdo con el criterio mencionado en el manual de especificaciones técnicas para la construcción de rellenos sanitarios para RSU y RME, con un valor del 25% del volumen que ocuparán los RSU estabilizados (MC).
  5. El valor del Volumen anual necesario (También conocido como volumen efectivo) es la suma de las columnas RS y MC.
  6. Para la cantidad de volumen acumulado se considera que año con año se almacenan los residuos, por lo que dicha columna es la suma del volumen anual de residuos de los años anteriores, adicionando la cantidad del año posterior.
  7. La columna del área necesaria es el cálculo utilizando la Ecuación 7.2 del volumen de un prisma rectangular, se considera el valor del volumen efectivo y una altura de celda de 16 metros:

$$A_{rell} = \frac{V_{RSU}}{H_{rell}} \quad \dots (7.2)$$

Dichos cálculos se realizan para cada año de operación del relleno sanitario, como se muestran los resultados en la Tabla 7.1 siguiente:

# ANEXO 7 Continuación

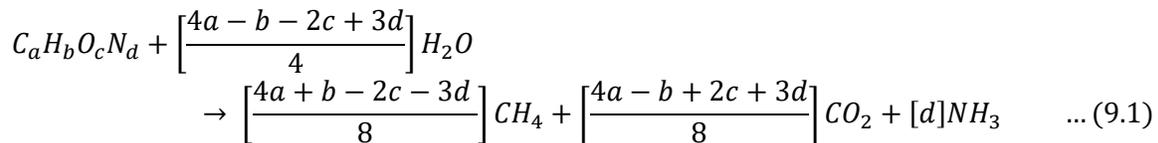
Tabla 7.1 Cálculo del área y del volumen del relleno.

Año	Población	Gen. Per capita Kg/día* habit	Cantidad de Residuos Sólidos			Volumén de Residuos Sólidos			Material de cubierta (MC) M3	RS + MC Anual M3	Área Requerida	
			Diaria Kg	Anual Ton	Acumulada Ton	Compactación		Estabilización Anual (RS) M3			Acumulado M3	M2
						Diaria M3	Anual M3					
0 2020	2,804,240	0.77	2,159,265	472,879	0	3,085	675,541	591,099	147,775	738,873	0	0
1 2021	2,874,537	0.79	2,270,884	497,324	497,324	3,244	710,462	621,655	155,414	777,068	777,068	48,567
2 2022	2,946,649	0.82	2,416,252	529,159	1,026,483	3,452	755,942	661,449	165,362	826,811	1,603,879	100,242
3 2023	3,020,624	0.84	2,537,324	555,674	1,582,157	3,625	793,820	694,592	173,648	868,241	2,472,120	154,508
4 2024	3,096,510	0.87	2,693,964	589,978	2,172,135	3,849	842,826	737,473	184,368	921,841	3,393,961	212,123
5 2025	3,174,359	0.89	2,825,180	618,714	2,790,849	4,036	883,878	773,393	193,348	966,741	4,360,702	272,544
6 2026	3,254,222	0.91	2,961,342	648,534	3,439,383	4,230	926,477	810,667	202,667	1,013,334	5,374,036	335,877
7 2027	3,336,154	0.94	3,135,985	686,781	4,126,164	4,480	981,115	858,476	214,619	1,073,095	6,447,131	402,946
8 2028	3,420,210	0.97	3,317,604	726,555	4,852,719	4,739	1,037,936	908,194	227,049	1,135,243	7,582,373	473,898
9 2029	3,506,446	1	3,506,446	767,912	5,620,631	5,009	1,097,017	959,890	239,972	1,199,862	8,782,235	548,890
10 2030	3,594,920	1.03	3,702,768	810,906	6,431,537	5,290	1,158,437	1,013,633	253,408	1,267,041	10,049,276	628,080
11 2031	3,685,693	1.06	3,906,835	855,597	7,287,134	5,581	1,222,281	1,069,496	267,374	1,336,870	11,386,146	711,634
12 2032	3,778,826	1.09	4,118,920	902,044	8,189,177	5,884	1,288,634	1,127,554	281,889	1,409,443	12,795,589	799,724
13 2033	3,874,391	1.13	4,378,062	958,796	9,147,973	6,254	1,369,708	1,198,494	299,624	1,498,118	14,293,707	893,357
14 2034	3,972,423	1.16	4,608,011	1,009,154	10,157,127	6,583	1,441,649	1,261,443	315,361	1,576,804	15,870,511	991,907
15 2035	4,073,020	1.19	4,846,894	1,061,470	11,218,597	6,924	1,516,385	1,326,837	331,709	1,658,546	17,529,057	1,095,566
16 2036	4,176,240	1.23	5,136,775	1,124,954	12,343,550	7,338	1,607,077	1,406,192	351,548	1,757,740	19,286,798	1,205,425
17 2037	4,280,153	1.27	5,435,794	1,190,439	13,533,989	7,765	1,700,627	1,488,049	372,012	1,860,061	21,146,859	1,321,679
18 2038	4,390,831	1.31	5,751,989	1,259,686	14,793,675	8,217	1,799,551	1,574,607	393,652	1,968,259	23,115,117	1,444,695
19 2039	4,502,349	1.35	6,078,171	1,331,119	16,124,794	8,683	1,901,599	1,663,899	415,975	2,079,874	25,194,991	1,574,687
20 2040	4,616,782	1.39	6,417,327	1,405,395	17,530,189	9,168	2,007,707	1,756,743	439,186	2,195,929	27,390,920	1,711,933
21 2041	4,734,210	1.43	6,769,920	1,482,613	19,012,802	9,671	2,118,018	1,853,266	463,316	2,316,582	29,707,502	1,856,719
22 2042	4,854,713	1.47	7,136,428	1,562,878	20,575,679	10,195	2,232,683	1,953,597	488,399	2,441,996	32,149,499	2,009,344
23 2043	4,978,374	1.52	7,567,128	1,657,201	22,232,880	10,810	2,367,430	2,071,501	517,875	2,589,377	34,738,876	2,171,180
24 2044	5,105,278	1.56	7,964,234	1,744,167	23,977,048	11,377	2,491,667	2,180,209	545,052	2,725,261	37,464,137	2,341,509
25 2045	5,235,513	1.61	8,429,176	1,845,990	25,823,037	12,042	2,637,128	2,307,487	576,872	2,884,359	40,348,496	2,521,781
26 2046	5,369,168	1.66	8,912,819	1,951,907	27,774,945	12,733	2,788,439	2,439,884	609,971	3,049,855	43,398,351	2,712,397
27 2047	5,506,335	1.71	9,415,833	2,062,067	29,837,012	13,451	2,945,811	2,577,584	644,396	3,221,980	46,620,331	2,913,771
28 2048	5,647,111	1.76	9,938,915	2,176,622	32,013,634	14,198	3,109,461	2,720,778	680,195	3,400,973	50,021,304	3,126,331
29 2049	5,791,592	1.81	10,482,782	2,295,729	34,309,364	14,975	3,279,613	2,869,661	717,415	3,587,077	53,608,381	3,350,524
30 2050	5,939,879	1.87	11,107,574	2,432,559	36,741,922	15,868	3,475,084	3,040,698	760,175	3,800,873	57,409,253	3,588,078



## Anexo 9 Generación de Biogás mediante el modelo presentado en Handbook of Solid Waste Management:

Para cuantificar la cantidad potencial de producción de biogás es necesario asumir que toda la materia orgánica presente en los residuos depositados en el relleno tiene una estructura molecular de la forma:  $C_aH_bO_cN_d$  y que los productos serán únicamente gases de metano, dióxido de carbono y amoníaco, de modo que las reacciones que ocurren dentro del relleno sanitario se pueden sintetizar con la Ecuación 9.1 de la forma:



Donde:

$C_aH_bO_cN_d$ : Se utiliza para representar en base molar la composición de la materia orgánica.

Para obtener los subíndices estequiométricos de la ecuación antes mencionada, se debe clasificar los residuos como rápidamente biodegradables o lentamente biodegradables. Dado que los residuos que ingresaran al sitio de disposición final se encuentran libres de materiales lentamente biodegradables, como son: papel, cartón y residuos de jardinería, se consideraran como rápidamente biodegradables. En la Tabla 9.1 se muestra la relación mol de los componentes para los residuos rápidamente biodegradables.

**Tabla 9.1** Relación molar de los componentes orgánicos de la reacción de biogás.

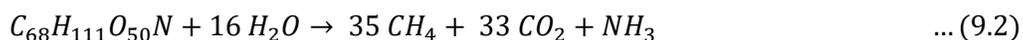
COMPONENTE	RELACIÓN MOL
Carbono	68.5
Hidrogeno	110.5
Oxígeno	50.1
Nitrógeno	1

*Fuente: Elaboración Propia. Basado en Olascoaga L. (2014). Programa de cálculo para estimar la cantidad de lixiviados generados en rellenos sanitarios, Tabla 10*

Hay que notar que la reacción dada requiere la presencia de agua, aquellos rellenos que agotan la humedad disponible dentro de ellos, han sido encontrados en una condición de “momificación”, incluso se puedan observar periódicos muy antiguos que aún son legibles. Por lo tanto, aunque la cantidad total de gas que será producida por los residuos sólidos depende de la estequiometría de la reacción, el ritmo de producción y el periodo de tiempo que tomara lugar la producción de biogás variará significativamente con las condiciones hidrológicas locales y los procedimientos de operación.

Dadas las consideraciones anteriores, a continuación, se describe el procedimiento para estimar la cantidad potencial de biogás, que podría producir el sitio de disposición final propuesto:

De acuerdo con los valores dados en la Tabla 9.1, se obtienen los subíndices y coeficientes estequiométricos de la reacción, como se muestra a continuación en la Ecuación 9.2 con los coeficientes estequiométricos sustituidos:



## ANEXO 10 Continuación

Realizando el cálculo para obtener la cantidad de reactivo necesario para llevar a cabo la reacción anterior, se tomó como referencia los coeficientes estequiométricos multiplicados por su respectivo peso molecular de cada elemento, por lo que se obtiene:

$C_{68}H_{111}O_{50}N = 1741$  unidades de masa  
 $16 H_2O = 288$  unidades de masa  
 $35 CH_4 = 560$  unidades de masa  
 $33 CO_2 = 1452$  unidades de masa  
 $NH_3 = 17$  unidades de masa

De modo que la relación de conversión en unidades de masa de materia orgánica a metano es de:

$$\frac{C_{68}H_{111}O_{50}N}{35 CH_4} = \frac{1741}{560} = 3.1 \frac{kg \text{ mat. org.}}{kg \text{ metano}}$$

Para el presente caso de estudio, la cantidad de metano a producir en la mega celda 1, durante sus 10 años de operación, depende de la cantidad de residuos, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$G_p = 6,904,415,000 \text{ kg RSU} * \frac{kg \text{ metano}}{3.1 kg \text{ mat. org.}}$$

$$G_p = 2,227,230,645.16 \text{ Kg de Metano}$$

G<sub>p</sub>: Biogás producido en el relleno sanitario (kg/m<sup>3</sup>).

Para obtener el valor unitario de producción de metano respecto al volumen de la mega celda:

$$G_p = \frac{2,227,230,645.16 \text{ kg de Metano}}{10,049,276 \text{ m}^3}$$

$$G_p = 221.63 \frac{kg \text{ Metano}}{m^3}$$

Para obtener el volumen de metano que se estima obtener en los 10 años de vida de la mega celda se recurre a la ecuación de los gases ideales.

$$v = \frac{nRT}{P} \quad \dots (9.3)$$

Donde:

n: La cantidad de metano expresada en moles y será:

$$n = 2,227,230,645.16 \text{ Kg de metano} * \frac{1 \text{ kmol Metano}}{16 \text{ kg Metano}}$$

$$n = 139,201,915.3 \text{ kmol de metano}$$

R: Constante de los gases ideales con un valor de  $0.08205 \frac{atm \cdot m^3}{kmol \cdot K}$

T: Temperatura promedio de la región con un valor de 293.15 K

P: Presión barométrica local con un valor de 0.735 atm

Por lo tanto:

$$v = \frac{139,201,915.3 * 0.08205 * 293.15}{0.735}$$

## ANEXO 10 Continuación

---

$$v = 4,555,398,304 \text{ m}^3 \text{ en 10 años}$$

Lo que, en flujo volumétrico promedio de metano, por hora será:

$$Gv = 52,724.41 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Éste valor se desprecia, debido a que la ecuación proporcionada es muy idealista en el sentido de que no considera factores importantes, como, por ejemplo: el rendimiento de los reactivos, la composición de los residuos, el tiempo de descomposición, etc, consideraciones que son fundamentales en el modelo mexicano de biogás. Sin embargo, el modelo de George Tchobanoglous sigue siendo practico para estimaciones del consumo de reactivos simples, como el agua.

### **Anexo 10 : Generación de Biogás mediante el modelo mexicano de biogás:**

El Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0, es utilizado para la estimación de biogás generado y capturado en rellenos sanitarios municipales en México. Éste modelo fue desarrollado por SCS Engineers bajo un contrato con el programa Landfill Methane Outreach (LMOP) de la USEPA. Éste Modelo puede ser utilizado para estimar generación y recuperación de biogás en rellenos sanitarios mexicanos que cuenten o planeen tener un sistema de recolección de biogás.

El modelo está elaborado en una hoja de cálculo en Excel<sup>®</sup> y está basado en una ecuación de degradación de primer orden. Éste modelo requiere que el usuario alimente datos específicos tales como el año de apertura, año de clausura, índices de disposición anual, ubicación del sitio y contestar algunas preguntas referentes a las condiciones físicas pasadas y presentes del sitio. El modelo provee automáticamente valores para el índice de generación de metano (k) y la generación potencial de metano (L0) para cada uno de los estados y estima la eficiencia de captura en base a las respuestas proveídas. Estos valores fueron desarrollados usando datos específicos de clima, caracterización de residuos y prácticas de disposición de residuos de México y estima el efecto de estas condiciones en las cantidades y índices de generación de biogás. También se evaluó información de recuperación de biogás actual en cuatro rellenos sanitarios en México para ayudar en la selección de los valores de k and L0.

A continuación, en la Tabla 10.1 se muestra el desarrollo de la primera hoja del archivo de Excel<sup>®</sup>, denominado “Alimentación”.

Mientras que en la Tabla 10.2 se muestra la segunda hoja, denominada “Disposición y Recup. De Biogás”, la cual muestra resultado de acuerdo con la información alimentada en la hoja previa. En la Tabla 10.2 se observa que la recuperación y por lo tanto la producción de biogás aumenta conforme se siguen disponiendo residuos. Por lo tanto, el mayor año de recuperación de biogás será el de la clausura de la mega celda 1 es decir en el año 2030 y posteriormente decrecerá a un ritmo bajo.

## ANEXO 10 Continuación

En la Tabla 10.3 se puede observar la caracterización de los residuos que se propone, se decidió no utilizar los valores dados por el modelo, debido a que se cuenta con una planta clasificadora por lo que se controla la composición que tendrán los residuos que ingresen al relleno sanitario que serán mayormente orgánicos.

La Tabla 10.4 ilustra la proyección de generación de biogás del relleno sanitario para la mega celda I. Se puede observar un reporte completo que incluye: La disposición anual y acumulada de la celda, la cantidad de biogás generada, la eficiencia del sistema de captura, de acuerdo con el año y el porcentaje de residuos con cobertura final y el flujo de biogás recuperado.

En la Figura 10.1 se puede apreciar la gráfica de proyección de generación y recuperación de biogás a través del tiempo para la mega celda uno hasta el año 2070.

**Tabla 10.1** Cuestionario respondido para la simulación del modelo mexicano de biogás 2.0

PROYECCIONES DE LA GENERACION Y RECUPERACION DE BIOGAS DE RELLENOS SANITARIOS	
PAGINA DE ALIMENTACION	
1	Nombre del Sitio: DAGA
2	Ciudad: Almoloya de Juarez
3	Estado: México
4	Región: Centro/ Interior 3
5	¿Existen datos de caracterización de residuos específicos al relleno sanitario en cuestión? Si
6	Año de apertura del sitio: 2020
7	Disposición anual del año mas reciente: 472,879 Mg
8	Año de disposición (arriba): 2020
9	Año de clausura o año de clausura proyectado: 2030
10	Incremento anual estimado de la disposición: 5.5%
11	Profundidad promedio del relleno sanitario: 16 m
12	Prácticas de diseño y manejo del relleno sanitario: 2
13a	¿Ha habido algún incendio en el relleno sanitario? No
13b	Si la respuesta de 13a es "Si", indique el área del impacto en % del total: 0%
13c	Si la respuesta de 13a es "Si", indique la severidad del impacto del incendio: 1
14	Año de arranque del sistema de captura (actual/estimado): 2021
15	Porcentaje del área con residuos con sistema de captura: 90%
16	Porcentaje del área con residuos con cubierta final: 100%
17	Porcentaje del área con residuos con cubierta intermedia: 0%
18	Porcentaje del área con residuos con cubierta diaria: 0%
19	Porcentaje del área con residuos sin cobertura: 0%
20	Porcentaje del área de residuos con recubrimiento inferior de arcilla/geomembrana: 100%
21	¿Se compactan los residuos regularmente? Si
22	¿La disposición de residuos se hace en una área específica? Si
23a	Existen afloramientos/bordes de lixiviado en la superficie del relleno sanitario? No
23b	Si la respuesta de 23a es "Si", ¿esto ocurre solo después de llover? No
24	Eficiencia de captura estimada: 81%

## ANEXO 10 Continuación

La Tabla 10.1 muestra las respuestas alimentadas al cuestionario del Modelo Mexicano de biogás 2.0, a continuación, se detalla cada una de dichas respuestas.

1. Es el nombre propuesto por los tesisistas del presente trabajo.
2. Es el municipio en el cual se ubica el terreno seleccionado para el sitio de manejo integral de residuos
3. Estado en el que se encuentra dicho municipio, cabe mencionar que el modelo mexicano cuenta con una base de datos que contiene información meteorológica del Estado seleccionado
4. El programa coloca la región automáticamente de acuerdo con el Estado seleccionado
5. Dichos datos existen y son expuestos en las Figuras 1.10 y 1.11 de la presente tesis.
6. Año propuesto para el inicio de operaciones
7. Es la cantidad de residuos proyectada para el primer año de operación de acuerdo con la Tabla..... del Anexo 7
8. Año de disposición actual, se considera el primero
9. Se consideran 10 años de operación dado que es el tiempo que tomará alcanzar la máxima capacidad proyectada para la mega celda 1
10. El modelo considera un crecimiento lineal de la población, a diferencia del método exponencial utilizado en el presente trabajo. Para fines prácticos, se calculó un incremento anual promedio que se apegara a los resultados obtenidos por el método exponencial.
11. Profundidad del relleno sanitario, considerando 8 metros de excavación para el método de trinchera y 8 metros de altura para el método de área, partiendo desde el nivel del suelo original.
12. Las instrucciones del modelo mexicano de biogás mencionan: “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.” Siendo el número 2 para un sitio que compacta mecánicamente y cubre los residuos diariamente, además debe contar con geomembrana en el fondo y se considera profundo, con más de 5 metros. Por lo que es el que mejor describe al sitio de disposición final propuesto en el presente trabajo.
13. a Es un sitio por construirse, por lo que no ha tenido incendios
13. b No aplica
13. c No aplica
14. Se planea comenzar con la recuperación de biogás un año después de comenzada la disposición
15. Se pretende que al menos 90% de la superficie del relleno tenga sistema de captura de biogás
16. A la clausura de la mega celda I toda el área con residuos tendrá cobertura final
17. A la clausura de la mega celda I no existirá ninguna celda activa por lo tanto la cobertura intermedia no se considera
18. A la clausura de la mega celda I no existirá ninguna celda activa por lo tanto la cobertura diaria no se considera

## ANEXO 10 Continuación

19. Éste valor se calcula automáticamente restando 100% menos la proporción de área con cobertura diaria, intermedia y final
20. Como ya se mencionó en la presente tesis, todo el fondo de la mega celda 1 deberá tener el recubrimiento de fondo, cuya configuración se puede consultar en la Figura 3.22 del Capítulo 3, la cual considera la geomembrana y arcilla
21. Se pretende una compactación diaria de los residuos
22. Él área designada para los residuos es la mega celda I
23. a Se considera no existirá esta condición, dado el sistema de recolección de lixiviados propuesto en el Capítulo 3 de la presente tesis
23. b No aplica
24. Éste valor es calculado automáticamente por el modelo, de acuerdo con la información proporcionada

**Tabla 10.2** Disposición y recuperación de biogás estimado para el sitio de disposición final.

<b>DISPOSICION Y RECUPERACION DE BIOGAS</b>						
Año	Disposición de Residuos Estimada (Toneladas Métricas)	Toneladas Métricas Acumuladas	Eficiencia del Sistema de Captura	Recuperación Actual de Biogás (m <sup>3</sup> /hr a 50% CH <sub>4</sub> )	Recuperación de Biogás Estimada (m <sup>3</sup> /hr a 50% CH <sub>4</sub> )	Línea Base de Recuperación de Biogás (m <sup>3</sup> /hr a 50% CH <sub>4</sub> )
2020	472,879	472,879	0%		0	0
2021	497,324	970,203	76%		754	0
2022	529,159	1,499,362	78%		1,484	0
2023	555,674	2,055,036	79%		2,179	0
2024	589,978	2,645,014	79%		2,810	0
2025	618,714	3,263,728	79%		3,415	0
2026	648,534	3,912,262	79%		3,989	0
2027	686,781	4,599,043	80%		4,595	0
2028	726,555	5,325,598	80%		5,144	0
2029	767,912	6,093,510	80%		5,690	0
2030	810,906	6,904,416	81%		6,314	0
2031	0	6,904,416	81%		6,869	0
2032	0	6,904,416	81%		5,977	0
2033	0	6,904,416	81%		5,208	0
2034	0	6,904,416	81%		4,547	0
2035	0	6,904,416	81%		3,976	0
2036	0	6,904,416	81%		3,484	0
2037	0	6,904,416	81%		3,059	0
2038	0	6,904,416	81%		2,691	0
2039	0	6,904,416	81%		2,372	0
2040	0	6,904,416	81%		2,096	0
2041	0	6,904,416	81%		1,857	0
2042	0	6,904,416	81%		1,649	0
2043	0	6,904,416	81%		1,467	0
2044	0	6,904,416	81%		1,309	0
2045	0	6,904,416	81%		1,171	0
2046	0	6,904,416	81%		1,051	0
2047	0	6,904,416	81%		945	0
2048	0	6,904,416	81%		852	0
2049	0	6,904,416	81%		771	0
2050	0	6,904,416	81%		699	0
2051	0	6,904,416	81%		635	0
2052	0	6,904,416	81%		579	0
2053	0	6,904,416	81%		529	0
2054	0	6,904,416	81%		485	0
2055	0	6,904,416	81%		446	0
2056	0	6,904,416	81%		410	0
2057	0	6,904,416	81%		379	0
2058	0	6,904,416	81%		351	0
2059	0	6,904,416	81%		325	0
2060	0	6,904,416	81%		302	0
2061	0	6,904,416	81%		282	0
2062	0	6,904,416	81%		263	0
2063	0	6,904,416	81%		246	0
2064	0	6,904,416	81%		230	0
2065	0	6,904,416	81%		216	0
2066	0	6,904,416	81%		203	0
2067	0	6,904,416	81%		192	0
2068	0	6,904,416	81%		181	0
2069	0	6,904,416	81%		171	0
2070	0	6,904,416	81%		162	0

## ANEXO 10 Continuación

**Tabla 10.3** Caracterización de los RSU que llegaron al sitio de disposición final.

Categoría de Residuo	Datos Específicos al Sitio
Comida	80.0%
Papel y Cartón	0.0%
Poda (jardines)	8.0%
Madera	0.0%
Caucho, Piel, Huesos y Paja	2.0%
Textiles	2.0%
Papel Higiénico	6.0%
Otros Orgánicos	0.0%
Pañales (asume 20% orgánico / 80% inorgánico)	2.0%
Metales	0.0%
Construcción y Demolición	0.0%
Vidrio y Cerámica	0.0%
Plásticos	0.0%
Otros Inorgánicos	0.0%
Porcentaje de degradación muy rápida (1)	80.4%
Porcentaje de degradación moderadamente rápida (2)	14.0%
Porcentaje de degradación moderadamente lenta (3)	2.0%
Porcentaje de degradación muy lenta (4)	2.0%
Total Orgánicos	98.4%
Total Inorgánicos	1.6%
Porcentaje de degradación muy rápida (1)	70%
Porcentaje de degradación moderadamente rápida (2)	40%
Porcentaje de degradación moderadamente lenta (3)	7%
Porcentaje de degradación muy lenta (4)	12%
Residuos en Estados Unidos - % de orgánicos secos	
Lo de degradación rápida calculado	69
Lo de degradación moderadamente rápida calculado	138
Lo de degradación moderadamente lenta calculado	214
Lo de degradación lenta calculado	202

# ANEXO 10 Continuación

Tabla 10.4 Proyección de la generación y recuperación de biogás en el sitio de disposición final.

Año	Disposición (Mg/año)	Disposición Acumulada (Mg)	Generación de Biogás		Eficiencia del Sistema de Captura (%)	Recuperación de Biogás Estimada		Capacidad Máxima de la Planta de Electricidad * (MW)	Línea Base del Flujo de Biogás (m <sup>3</sup> /hr)	Reducción de Emisión Estimadas**	
			(m <sup>3</sup> /hr)	(pies <sup>3</sup> /min)		(pies <sup>3</sup> /min)	(mmBtu/hr)			(tonnes CH <sub>4</sub> /Yr)	(tonnes CO <sub>2</sub> eq/Yr)
2020	472,879	472,879	0	0.0	0%	0	0.0	0.0	0	0	0
2021	497,324	970,203	992	584	76%	754	444	13.5	0	2,364	49,654
2022	529,159	1,499,362	1,902	1,120	78%	1,484	873	26.5	0	4,653	97,720
2023	555,674	2,055,036	2,758	1,623	79%	2,179	1,283	38.9	0	6,834	143,504
2024	589,978	2,645,014	3,557	2,093	79%	2,810	1,654	50.2	0	8,812	185,048
2025	618,714	3,263,728	4,323	2,544	79%	3,419	2,010	61.0	0	10,709	224,893
2026	648,534	3,912,262	5,049	2,972	79%	3,989	2,348	71.3	0	12,509	262,689
2027	686,781	4,599,043	5,744	3,381	80%	4,595	2,705	82.1	0	14,411	302,640
2028	726,555	5,325,598	6,430	3,785	80%	5,144	3,028	91.9	0	16,133	338,793
2029	767,912	6,093,510	7,112	4,186	80%	5,690	3,349	101.7	0	17,844	374,727
2030	810,906	6,904,416	7,795	4,588	81%	6,314	3,716	112.8	0	19,800	415,796
2031	0	6,904,416	8,480	4,991	81%	6,869	4,043	122.7	0	21,542	452,385
2032	0	6,904,416	7,379	4,343	81%	5,977	3,518	106.8	0	18,743	393,604
2033	0	6,904,416	6,430	3,785	81%	5,208	3,066	93.1	0	16,334	343,012
2034	0	6,904,416	5,613	3,304	81%	4,547	2,676	81.2	0	14,259	299,432
2035	0	6,904,416	4,909	2,889	81%	3,976	2,340	71.1	0	12,470	261,860
2036	0	6,904,416	4,301	2,532	81%	3,484	2,051	62.3	0	10,926	229,436
2037	0	6,904,416	3,776	2,222	81%	3,059	1,800	54.7	0	9,592	201,427
2038	0	6,904,416	3,322	1,955	81%	2,691	1,584	48.1	0	8,438	177,206
2039	0	6,904,416	2,929	1,724	81%	2,372	1,396	42.4	0	7,440	156,236
2040	0	6,904,416	2,588	1,523	81%	2,096	1,234	37.5	0	6,574	138,059
2041	0	6,904,416	2,292	1,349	81%	1,857	1,093	33.2	0	5,823	122,282
2042	0	6,904,416	2,035	1,198	81%	1,649	970	29.5	0	5,170	108,570
2043	0	6,904,416	1,812	1,066	81%	1,467	864	26.2	0	4,602	96,635
2044	0	6,904,416	1,616	951	81%	1,309	771	23.4	0	4,106	86,231
2045	0	6,904,416	1,446	851	81%	1,171	689	20.9	0	3,674	77,147
2046	0	6,904,416	1,297	764	81%	1,051	618	18.8	0	3,295	69,201
2047	0	6,904,416	1,167	687	81%	945	556	16.9	0	2,964	62,240
2048	0	6,904,416	1,052	619	81%	852	502	15.2	0	2,673	56,130
2049	0	6,904,416	951	560	81%	771	454	13.8	0	2,417	50,756
2050	0	6,904,416	863	508	81%	699	411	12.5	0	2,191	46,020
2051	0	6,904,416	784	462	81%	635	374	11.4	0	1,992	41,839
2052	0	6,904,416	715	421	81%	579	341	10.3	0	1,816	38,139
2053	0	6,904,416	653	385	81%	529	312	9.5	0	1,660	34,857
2054	0	6,904,416	599	352	81%	485	285	8.7	0	1,521	31,941
2055	0	6,904,416	550	324	81%	446	262	8.0	0	1,397	29,343
2056	0	6,904,416	507	298	81%	410	242	7.3	0	1,287	27,024
2057	0	6,904,416	468	275	81%	379	223	6.8	0	1,188	24,949
2058	0	6,904,416	433	255	81%	351	206	6.3	0	1,099	23,087
2059	0	6,904,416	401	236	81%	325	191	5.8	0	1,020	21,413
2060	0	6,904,416	373	220	81%	302	178	5.4	0	948	19,905
2061	0	6,904,416	348	205	81%	282	166	5.0	0	883	18,543
2062	0	6,904,416	324	191	81%	263	155	4.7	0	824	17,309
2063	0	6,904,416	303	179	81%	246	145	4.4	0	771	16,190
2064	0	6,904,416	284	167	81%	230	136	4.1	0	722	15,172
2065	0	6,904,416	267	157	81%	216	127	3.9	0	678	14,244
2066	0	6,904,416	251	148	81%	203	120	3.6	0	638	13,396
2067	0	6,904,416	237	139	81%	192	113	3.4	0	601	12,620
2068	0	6,904,416	223	131	81%	181	106	3.2	0	567	11,908
2069	0	6,904,416	211	124	81%	171	101	3.1	0	536	11,253
2070	0	6,904,416	200	118	81%	162	95	2.9	0	507	10,650



Modelo Mexicano de Biogás v.2  
Fecha: Marzo 2009

Desarrollado por SCS Engineers, para la Agencia de Protección al Ambiente de EEUU  
DAGA  
Almoleya de Juarez, México



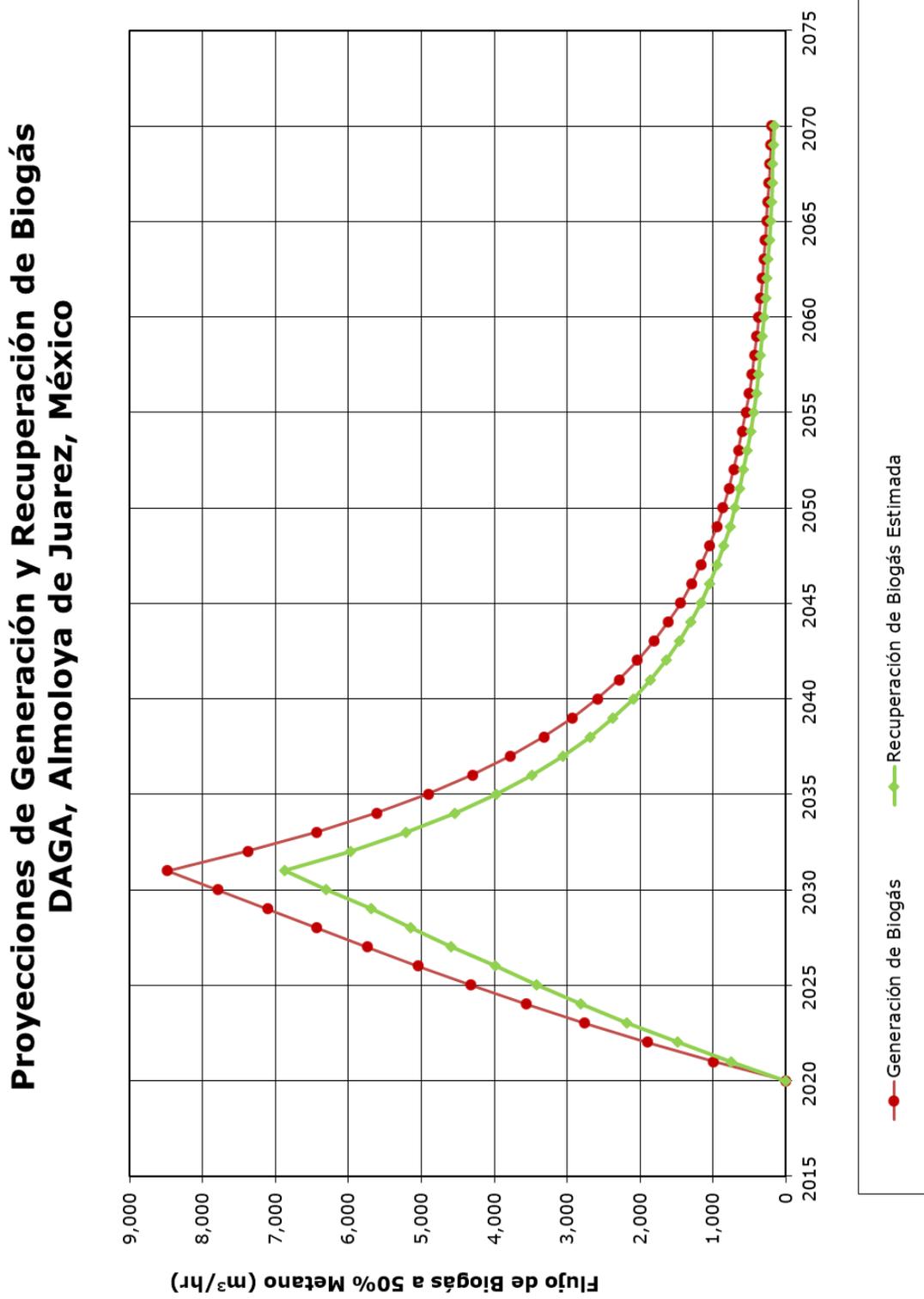


Figura 10.1 Proyecciones de Generación y recuperación de Biogás



**Anexo 12 : Comprobación del diámetro de tubería para la recuperación de biogás mediante un balance de materia y energía**

Se toma la ecuación del balance de energía de Bernoulli y se combina con la ecuación de Darcy – Weisbach en función del gasto volumétrico y se obtiene (Cengel, 2012):

$$\frac{\Sigma F}{Gm} = \frac{f * L}{2 * g_c * \emptyset} * \left[ \frac{Gv}{\left(\frac{\pi}{4}\right) * \emptyset^2} \right]^2$$

Se despeja el diámetro, todas las variables que están dentro del corchete son conocidas, por lo que se puede calcular y expresar como una constante K1

$$\emptyset^5 = \left[ \frac{8 * Gv^2}{\Delta P * \pi^2 * g_c} \right] * f$$

Donde:

$$K1 = \left[ \frac{8 * Gv^2}{\Delta P * \pi^2 * g_c} \right]$$

Con los valores obtenidos en la presente tesis:

$$Gv = 0.9540 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta P = 0.01451 \text{ kgf/m}^2$$

$$g_c = 9.81 \text{ (kg * m)/(kgf * s}^2\text{)}$$

$$K1 = \left[ \frac{8 * (0.9540)^2}{0.01451 * \pi^2 * 9.81} \right] = 5.18$$

Por otro lado, con la definición del número de Reynolds se puede hacer un rearrreglo empleando una expresión de la ecuación de continuidad para tubería circular.

$$Re = \frac{4 * Gv}{\pi * \mu * \emptyset}$$

Se conocer el valor de todas las variables excepto el diámetro, por lo que se tomarán como una constante expresada como K2:

$$K2 = \left[ \frac{4 * Gv}{\pi * \mu} \right]$$

Con los valores obtenidos en la presente tesis:

$$\mu = 8.8 * 10^{-6} \text{ Pa * s}$$

$$K2 = \left[ \frac{4 * 0.9540}{\pi * 8.8 * 10^{-6}} \right] = 138,030.4$$

Por lo tanto, las ecuaciones serán

$$\phi^5 = 5.18 * f \dots\dots\dots 12.1$$

$$Re = \frac{138,030}{\phi} \dots\dots\dots 12.2$$

Para obtener el valor del diámetro se siguió el siguiente procedimiento:

1. Suponer el valor de f
2. Resolver la ecuación 12.1
3. Calcular el número de Reynolds con la ecuación 12.2
4. Determinar la rugosidad relativa
5. Obtener un valor de f calculado por el diagrama de Moody
6. Comparar los dos valores y si existe una diferencia significativa entre ambos valores de fricción, repetir la secuencia de cálculo desde el paso 2.
7. Comprobar el resultado haciendo una comparación con el balance de masa.

Realizando 3 iteraciones se llegó al resultado siguiente

$$f = 0.015 \quad y \quad \phi = 0.59m$$

Realizando la comprobación con el balance de masa mediante la siguiente ecuación

$$Gv = 0.785 * v * \phi^2$$

Dado que la velocidad media máxima aceptada en gases es de 4 m/s, se propone usar dicho valor, por lo que

$$Gv = 0.785 * 4 * (0.59)^2 = \mathbf{1.09 \text{ m}^3/s}$$

El valor del flujo volumétrico es del orden del valor obtenido en el balance de materia, sin embargo, el diámetro es 4 pulgadas más grande, por lo que es necesario aclarar que se deberá tomar en cuenta en la ingeniería de detalle esta variación en el diámetro de la tubería para el control de la velocidad del gas.