



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA**

**CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL**

**“DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE BIOGÁS EN EL RELLENO  
SANITARIO DE TLALNEPANTLA, EDO. DE MÉX.”**

**TESINA**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA**

**PRESENTA:**

**ING. LÓPEZ HERNÁNDEZ MYRNA JANNETE**

**ASESOR:**

**M.I. CRISTIAN EMMANUEL GONZÁLEZ REYES**



**CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX 2018**

**FEBRERO 2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



## PENSAMIENTOS

Tu mente siempre te recuerda lo malo, lo difícil, lo negativo. Recuérdale tú a ella tu grandeza, tu pasión y tu fortaleza.

Jorge Álvarez Camacho

Lo que se esconde detrás de ti y lo que está por delante, palidece en comparación con lo que se encuentra dentro de ti.

Ralph Waldo Emerson

Tus actuales circunstancias no determinan donde puedes ir; se limitan a determinar por dónde empezar.

Nido Quibein



## AGRADECIMIENTOS

A mis padres. Por brindarme todo su apoyo incondicional tanto moral como económico a lo largo de mi vida y en los años de carrera de licenciatura y especialidad.

A mi hermano Ellioth, por ser mi pilar en la vida y nunca dejarme caer.

A mis hermanos, Ruth y Rogelio por brindarme buenos consejos, estar siempre a mi lado en las buenas y en las malas.

A mi amigo, compañero, pareja, guía, Jonathan por brindarme su amor y apoyo para seguir adelante en los momentos más difíciles.

A mis amigos que se fueron y los que llegaron después; a los buenos y malos momentos ocurridos en esta etapa.

Así como al Proyecto PAPIIT 2017 - IA108017 titulado: “Uso de aeronaves no tripuladas y percepción remota para el monitoreo de biogás en rellenos sanitarios” el cual me brindó la oportunidad de realizar y desarrollar mi investigación para el presente trabajo.

A la UNAM, la facultad de ingeniería, y especialmente a mi director de tesis Cristian González Reyes, por su guía y amistad brindada.



## Contenido

<b>RESUMEN</b> .....	8
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	9
1.1 Objetivo general .....	11
1.2 Objetivos particulares .....	11
1.3 Alcances y limitaciones .....	11
1.4 Justificación .....	11
<b>2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO</b> .....	12
2.1 Localización .....	12
2.1.1. Generación y Sistema de Recolección.....	13
2.1.2. Estudios de composición química .....	15
2.1.3. Bitácoras de operación y disposición .....	17
2.2. Visitas de reconocimiento .....	18
2.2.1. Determinación del metano en campo .....	19
2.2.2 Descripción del equipo utilizado .....	21
2.2.3. Descripción de la metodología.....	23
2.3 Datos climáticos .....	24
2.3.1. Precipitación.....	25
2.3.2. Temperaturas .....	25
2.3.3. Clima.....	25
2.3.4. Dirección y velocidad del viento .....	25
2.3.Siniestros y eventos extraordinarios.....	25
<b>3. DISPOSICIÓN PREVIA Y FUTURA DE RESIDUOS</b> .....	26
3.1. Datos históricos.....	26
3.2. Vida útil .....	27
3.3. Proyección de la disposición .....	28
3.4. Zonas a las que da servicio el RST .....	28
3.5. Tendencias en la disposición .....	28
<b>4. UBICACIÓN ESPACIAL DEL RST</b> .....	28
4.1. Límites geográficos del RST .....	29
4.2. Distribución de celdas, obras e instalaciones en el RS.....	29



4.3. Tipos de cobertura de las celdas .....	30
4.4. Comparativos de altura de los RS dispuestos .....	30
5.1 Marco teórico .....	35
5.1.1. Gases de efecto invernadero .....	35
5.1.2. Biogás .....	37
5.1.3. Generación de biogás en un RS.....	38
5.1.4. Captación de biogás .....	38
5.1.5. Aprovechamiento potencial del biogás.....	39
5.2. Generación potencial de metano teórica .....	40
5.2.1 Metodología CHONS .....	40
5.2.2. Metodología Tchobanoglous.....	45
<b>5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>47</b>
6.1. Resultados del modelo teórico .....	47
6.2. Resultados del MMB .....	47
6.3. Análisis comparativo .....	52
<b>7.CONCLUSIONES.....</b>	<b>54</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>56</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 RELLENO SANITARIO IDEAL .....	8
FIGURA 2 LOCALIZACIÓN DEL MUNICIPIO DE TLALNEPANTLA .....	12
FIGURA 3 DATOS GEOGRÁFICOS DE TLALNEPANTLA .....	12
FIGURA 4 TIPOS DE RUTAS DE RECOLECCIÓN. ELABORACIÓN PROPIA TOMADA DE APUNTES.....	13
FIGURA 5 RECOLECCIÓN PROMEDIO .....	14
FIGURA 6 CROQUIS DE LOCALIZACIÓN DEL RS .....	15
FIGURA 7 PROMEDIO DE LA COMPOSICIÓN DE SUBPRODUCTOS .....	16
FIGURA 8 TOTAL POR CELDA .....	17
FIGURA 9 VISTA DE CELDA 3 RS TLALNEPANTLA (VISITA A CAMPO) (1) .....	18
FIGURA 10 VISITA A CAMPO, LOCALIZACIÓN DE PUNTOS (2) .....	19
FIGURA 11 MEDICIÓN EN CAMPO (3).....	19
FIGURA 12 COMPARACIÓN DE VELOCIDAD DEL VIENTO MÁXIMA Y MÍNIMA (ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE CAMPO). 21	
FIGURA 13 COMPARACIÓN T° C MÁXIMA Y MÍNIMA (ELABORACIÓN PROPIA .....	21
FIGURA 14 ANEMÓMETRO.....	22
FIGURA 15 COMPONENTES DEL WEST .....	22
FIGURA 16 GPS.....	23
FIGURA 17 WEST SYSTEM , TERMÓMETRO Y ANEMÓMETRO (EQUIPO UTILIZADO).....	24
FIGURA 18 PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN.....	24
FIGURA 19 TOMADA DE (EL UNIVERSAL EDOMEX 2013) – NOCHE.....	26
FIGURA 20 TOMADA DE (EL UNIVERSAL EDOMEX 2013)- DÍA SIGUIENTE .....	26
FIGURA 21 GRÁFICA DEL HISTORIAL DE DISPOSICIÓN DE RESIDUOS. (ELABORACIÓN PROPIA) .....	28
FIGURA 22 RELLENO SANITARIO.....	29
FIGURA 23 PLANO GENERAL DE DISTRIBUCIÓN .....	29
FIGURA 24 DETERMINACIÓN DE LA COBERTURA DE SITIO. ADAPTADO DE PROYECCIÓN GOOGLE EARTH .....	30
FIGURA 25 PLANO DEL RST TOMADO DE (DISEÑO DE RS TLALNEPANTLA 2016) .....	33
FIGURA 26 PLANO DEL RST SIN RESIDUOS TOMADO DE (DISEÑO DE TLALNEPANTLA ) .....	34
FIGURA 27 GASES DE EFECTO INVERNADERO.....	35
FIGURA 28 TIPO DE ATMÓSFERA .....	36
FIGURA 29 GRÁFICA DE GASES DE LA ATMÓSFERA Y SU CONTAMINACIÓN (ELABORACIÓN PROPIA) .....	36
FIGURA 30 ESQUEMA POZO DE VENTEO (ELABORACIÓN PROPIA) .....	39
FIGURA 31 DIMENSIONAMIENTO DE UN POZO DE VENTEO (ELABORACIÓN PROPIA) .....	39
FIGURA 32 PROYECCIÓN Y RECUPERACIÓN DEL BIOGÁS .ADAPTADA DEL MMB .....	51



## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 TIPOS DE RECOLECCIÓN (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE INFORMACIÓN DEL MUNICIPIO) .....	14
TABLA 2 COMPOSICIÓN DE LOS RSU MUESTREADOS EN EL FRENTE DE TRABAJO. ....	16
TABLA 3 TONELAJE POR SUBPRODUCTO TOMADO DE (MIA PROACTIVA TLALNEPANTLA 2011) .....	17
TABLA 4 BITÁCORA DE TRABAJO DE CAMPO .....	20
TABLA 5 (IZQUIERDA) DATOS RECOPIADOS EN CAMPO (ELABORACIÓN PROPIA - VELOCIDAD) .....	20
TABLA 6 (DERECHA) DATOS RECOPIADOS EN CAMPO (ELABORACIÓN PROPIA -TEMPERATURA) .....	20
TABLA 7 VOLUMEN DISPUESTO DE RESIDUOS DESDE SU APERTURA HASTA EL 2016.....	27
TABLA 8 TASA DE CRECIMIENTO DE LA DISPOSICIÓN. ELABORACIÓN PROPIA .....	27
TABLA 9 TIPO DE COBERTURA (ELABORACIÓN PROPIA CON INFORMACIÓN RECABADA) .....	30
TABLA 10 DETERMINACIÓN PROMEDIO DE LA DIFERENCIA ENTRE NIVELES. (ELABORACIÓN PROPIA) -A .....	31
TABLA 11 DETERMINACIÓN PROMEDIO DE LA DIFERENCIA ENTRE NIVELES. (ELABORACIÓN PROPIA) – A IZQUIERDA Y BDERECHA.....	32
TABLA 12 PROYECCIÓN DE EMISIONES DE GAS METANO DE LOS RELLENOS SANITARIOS MUNICIPALES: 2005-2020 (EN MTCO <sub>2</sub> EQ) .....	38
TABLA 13 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS SUBPRODUCTOS. TOMADO DE (MIA PROACTIVA TLALNEPANTLA 2011) .....	41
TABLA 14 CLASIFICACIÓN POR DEGRADACIÓN ORGÁNICA. ADAPTADA DEL (MIA PROACTIVA TLALNEPANTLA 2011) - RÁPIDA .....	42
TABLA 15 CLASIFICACIÓN POR DEGRADACIÓN ORGÁNICA. ADAPTADA DEL (MIA PROACTIVA TLALNEPANTLA 2011)- LENTA	42
TABLA 16 FRACCIÓN ORGÁNICA .ADAPTADA DE (TCHOBANOUGLOUS, GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS, VOL. 1, 1994).....	42
TABLA 17 COMPOSICIÓN DE LAS CATEGORÍAS DE RÁPIDA Y LENTA DESCOMPOSICIÓN. ADAPTADA DE (TCHOBANOUGLOUS, GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS, VOL. 1, 1994) .....	43
TABLA 18 CONDICIONES ESTÁNDAR PREESTABLECIDA .....	45
TABLA 19 TABLA RESUMEN DE LA GENERACIÓN TEÓRICA DE BIOGÁS. ....	49
TABLA 20 TABLA DE PROYECCIÓN MMB .....	50
TABLA 21 COMPARATIVA DE RESULTADOS – MODELO TEÓRICO .....	52
TABLA 22 CONCENTRACIONES DEL MMB .....	52





## ABREVIATURAS

RST	Relleno sanitario Tlalnepantla
RS	Relleno sanitario
RO	Residuos Orgánicos
RSU	Residuos sólidos urbanos
RSD	Residuos sólidos domésticos
MMB	Modelo Mexicano del biogás
Lo	Cantidad teórica del metano
$CH_4$	Metano
$CO_2$	Dióxido de carbono
US EPA	Agencia para la protección del ambiente de los EEUU
IA	Impacto ambiental
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
P	Precipitación
T	Temperatura
PEA	Población económicamente activa
SCS ENGINEERS	Program Landfill Methane Gut reach
INCREMI	Ingeniería para el control de residuos municipales e industriales
F	Factor de ajuste por incendio
N	Nitrógeno
Ar	Argón
GEI	Gas de efecto invernadero
PPb	Partículas por partes por billón

## RESUMEN

Entre las fuentes antropogénicas más importantes de  $CH_4$  a escala mundial se encuentra la ocasionada por la descomposición de la fracción orgánica de los residuos sólidos en su disposición final. (Rosa, Edwardl, Muricio, & Bacellis, Julio 2013).

En esta investigación se abarcan los siguientes apartados.

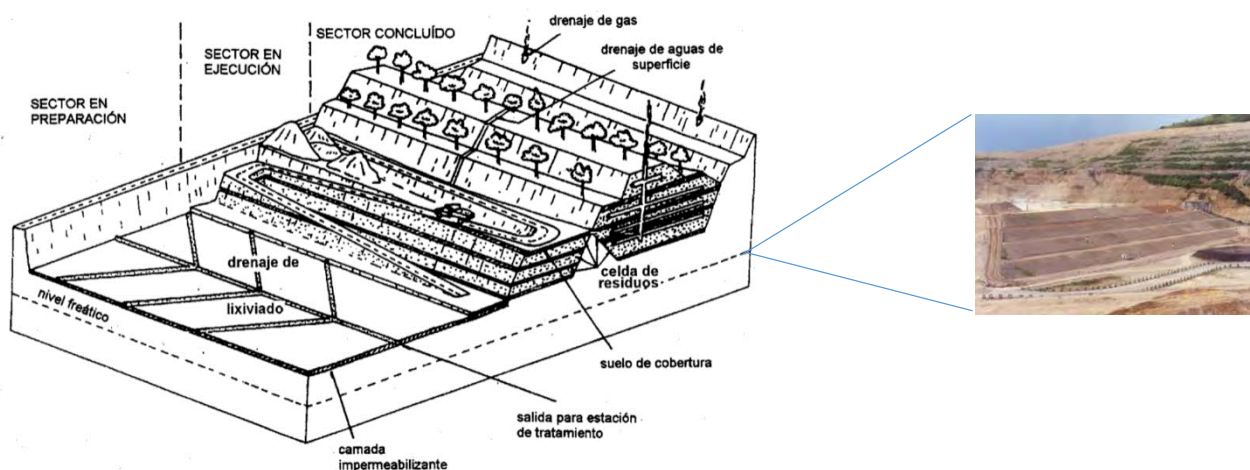
En el capítulo uno se describe de manera general y particular el porqué de la investigación, justificación del estudio.

En el capítulo dos se encuentra la descripción de la zona donde se ejecuta el estudio; información proporcionada por VEOLIA, así como datos climatológicos, siniestros y trabajo en campo.

El capítulo tres, analiza la disposición de los residuos a partir de datos históricos para la determinación de la vida útil; considerando información proporcionada por VEOLIA para proyectar de manera futura.

En el capítulo cuatro se presenta el análisis espacial del relleno sanitario (RS), considerando límites geográficos, distribución interna y diseño del mismo, y características de tipo descriptivas, como el tipo de cobertura. En la *Figura 1*, se presentan los elementos necesarios de un RS ideal.

En los capítulos cinco y seis se desarrollan y analizan las metodologías utilizadas para la determinación teórica del biogás: métodos de Tchobanougous y el modelo mexicano del biogás (MMB).



*Figura 1 Relleno Sanitario Ideal*

*Fuente: Guía de diseño de rellenos municipales*



## 1. INTRODUCCIÓN

Una de las primeras prácticas utilizadas para la disposición final de residuos sólidos generados por los centros urbanos fue su mezcla con el suelo, lo cual favorecía la presencia de nutrientes necesarios para los procesos fotosintéticos de los organismos autótrofos. Inicialmente esta práctica no implicaba impactos severos al ambiente, sin embargo, conforme a la cantidad y calidad de los residuos fueron evolucionando los efectos adversos se presentaron.

Con el paso de los años, la inclusión de elementos sintéticos, materiales metálicos, residuos de la construcción y algunos de lenta o difícil degradación provocaron que la disposición en suelo no fuera viable. Se requirió ante esta problemática, la implementación de mecanismos alternativos que involucraran un menor impacto visual; mitigando la generación de olores, permitiendo la captación y tratamiento de los productos de la degradación de los residuos. Actualmente, uno de los métodos utilizados para la disposición de residuos es un relleno sanitario (RS).

Un RS es una obra civil que encapsula, mediante el uso de materiales de baja permeabilidad la degradación de los residuos orgánicos, así como permite la salida controlada de los sus productos: lixiviados y biogás

El biogás es uno de los productos de la degradación de residuos orgánicos (RO) en condiciones anaerobias; se compone de distintos gases, principalmente de  $CH_4$ ,  $CO_2$  y otros: hidrógeno, sulfuros y trazas de otros gases. (Estévez S. Giraldo E., 2001). La proporción de estos gases está en función de la caracterización de los residuos dispuestos, de los factores climáticos del sitio y del tiempo transcurrido desde la disposición en el RS hasta su degradación.

Si se disponen RO de rápida degradación en mayor medida, la cantidad de biogás generado suele ser mayor. Por otra parte, la presencia de humedad favorece a la degradación de los residuos, ya que este factor está involucrado en la reacción de degradación.

En la actualidad la identificación de las fuentes de generación de los gases involucrados en el efecto invernadero son de mayor interés. Ante el calentamiento global, el  $CO_2$  resulta ser el mayor contribuyente al efecto invernadero seguido del  $CH_4$ .

Es por ello que para el control de la calidad del ambiente es necesario la realización de una estimación de gases de efecto invernadero, en especial el biogás o gas metano, debido a que este es variable en el tiempo y condiciones climáticas. (Estévez S. Giraldo E., 2001)

Al final de esta investigación se encuentra un comparativo entre la estimación del biogás por el MMB y el modelo propuesto en Tchobanoglous por la caracterización de los RS.



Esta investigación se ha estructurado, de tal forma que permita al lector adquirir un conocimiento general del tema, suficiente para la formación de un criterio propio, para posteriormente poder presentar una conclusión técnica, que respalde dicha postura a base de argumentos y métodos de estudio sólidos.

Para ello se consideró el uso del MMB versión 2.0, metodología desarrollada por SCS Engineers en nombre del Programa Landfill Methane Outreach (LMOP) de la Agencia para la Protección del Ambiente de los EEUU (US EPA), como parte de las actividades en México del programa Methane to Markets (M2M). El Modelo está desarrollado en una hoja de cálculo de Excel; la cual se fundamenta en una representación matemática de orden uno de la degradación de los RO que producen biogás. La hoja requiere que el usuario ingrese información específica de la operación, ubicación y características de los residuos dispuestos.



## 1.1 Objetivo general

Identificar el potencial de generación y recuperación de biogás en el relleno sanitario Tlalnepantla, considerando la edad, composición y cantidad de residuos sólidos dispuestos y proyectando la recepción de residuos hacia el final de la vida útil del relleno.

## 1.2 Objetivos particulares

- 1.- Describir la zona de estudio
- 2.- Analizar la composición de los residuos sólidos dispuestos en el RS.
- 3.- Proyectar la disposición de residuos en el RS.
- 4.- Identificar la distribución de los tipos de cobertura en el RS.
- 5.- Analizar la geometría vertical del RS.
- 6.- Establecer el potencial teórico de generación de biogás.
- 7.- Establecer el potencial de generación de biogás mediante el MMB.
- 8.- Analizar comparativamente los resultados obtenidos.

## 1.3 Alcances y limitaciones

Se explican brevemente a continuación la zona que abarca el presente trabajo de investigación.

### Alcances

- El presente trabajo de investigación abarca únicamente las características del Relleno Sanitario de Tlalnepantla (RST).
- Se realizará una comparativa entre dos modelos teóricos para la determinación de la concentración del  $CH_4$  generado.
- Para el cálculo se utilizará un modelo de uso libre.

### Limitaciones

- La determinación de la generación del biogás en campo depende de factores variables, como lo son la temperatura, humedad, etc. Por lo que los datos obtenidos en el día de su muestreo son particulares de la fecha de muestreo; conllevando que todas las actividades estén sujetas a realizarse el mismo día.
- La determinación del potencial de generación de biogás no considera su calidad, es decir no involucra una calificación de buena, media o baja del biogás captado, determina únicamente el concentrado bruto del producto en un tiempo transcurrido.

## 1.4 Justificación

Los residuos orgánicos generan una gran cantidad de  $CO_2$  y principalmente  $CH_4$ , el cual puede ser aprovechado en la generación de energía eléctrica o cuando menos quemado y así disminuir las emisiones hacia la atmósfera.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Para la generación de biogás se considera necesario identificar el posible impacto ambiental en la zona, por lo que a continuación se describe la zona geográfica en donde se encuentra el sitio de disposición final.

### 2.1 Localización

El municipio de Tlalnepantla se localiza al oriente del Estado de México, sus coordenadas geográficas son 19° 30' y 19° 35' de latitud norte y a los 99° 05 y 99° 15' de longitud oeste.

Posee una extensión territorial de 83.74 km<sup>2</sup>, el cual representa el 0.31% de la superficie del estado; su territorio está dividido en dos zonas, como se puede apreciar en la *Figura 2* y *Figura 3*.

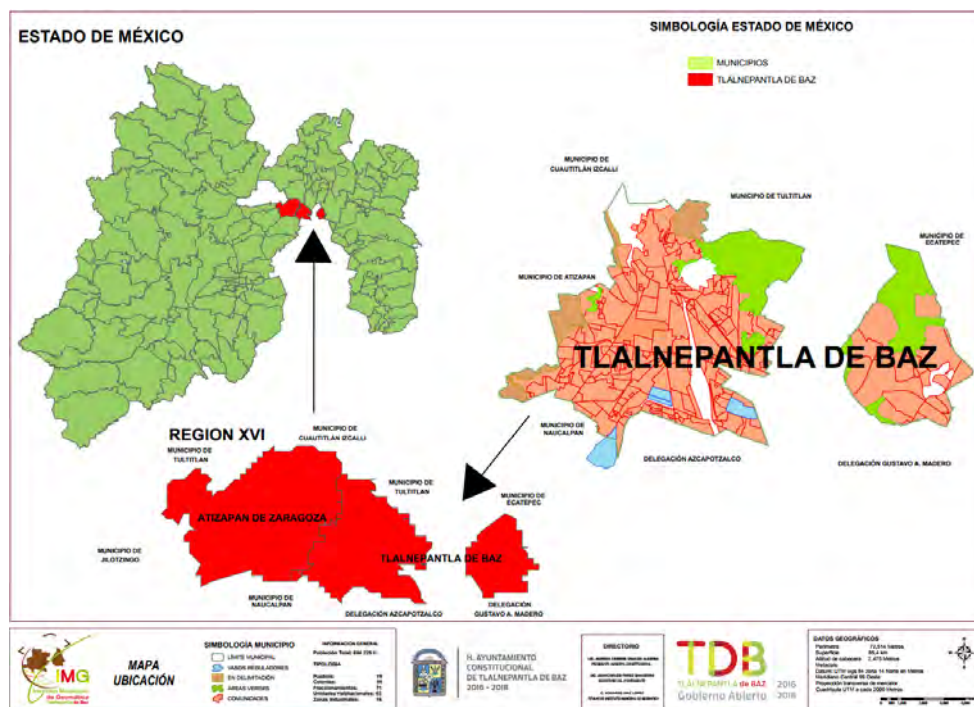


Figura 2 Localización del Municipio de Tlalnepantla

FUENTE : GEOPORTAL H.Ayuntamiento Constitucional De Tlalnepantla de Baz 2019-2018



Figura 3 Datos geográficos de Tlalnepantla

FUENTE : GEOPORTAL H.Ayuntamiento Constitucional De Tlalnepantla de Baz 2019-2018

El municipio de Tlalnepantla está integrado por 19 pueblos, 86 colonias, 31 unidades habitacionales, 73 fraccionamientos y 16 fraccionamientos industriales.

### 2.1.1. Generación y Sistema de Recolección

La generación total de RSU en el municipio es de aproximadamente 740 a 800 ton/día. (PROACTIVA)

El municipio de Tlalnepantla cuenta, con una población de 713,143 habitantes, lo que representa el 6.09% de la población total del Estado de México. ((Censo de Población y Vivienda 2016).

Se estima que la población económicamente activa (PEA) de Tlalnepantla es de 237,649 habitantes (INEGI, 2016). Los datos de los RSD que se generan diariamente en el municipio, han sido aportados por estudios socioeconómicos y técnicos en los se fundamentó este proyecto. El volumen generado *per cápita* es de 1.12 kg/día. Este valor puede extrapolarse hacia los municipios circunvecinos que también son similares a Tlalnepantla.

Un sistema de manejo ideal es el que conlleva a un residuo sólido a su máximo aprovechamiento y tratamiento dentro de un proceso, mientras que en el tradicional solo busca desplazar los RS al sitio de disposición final, ocasionando que su aprovechamiento sea escaso lo que se puede apreciar en la ilustración 4.

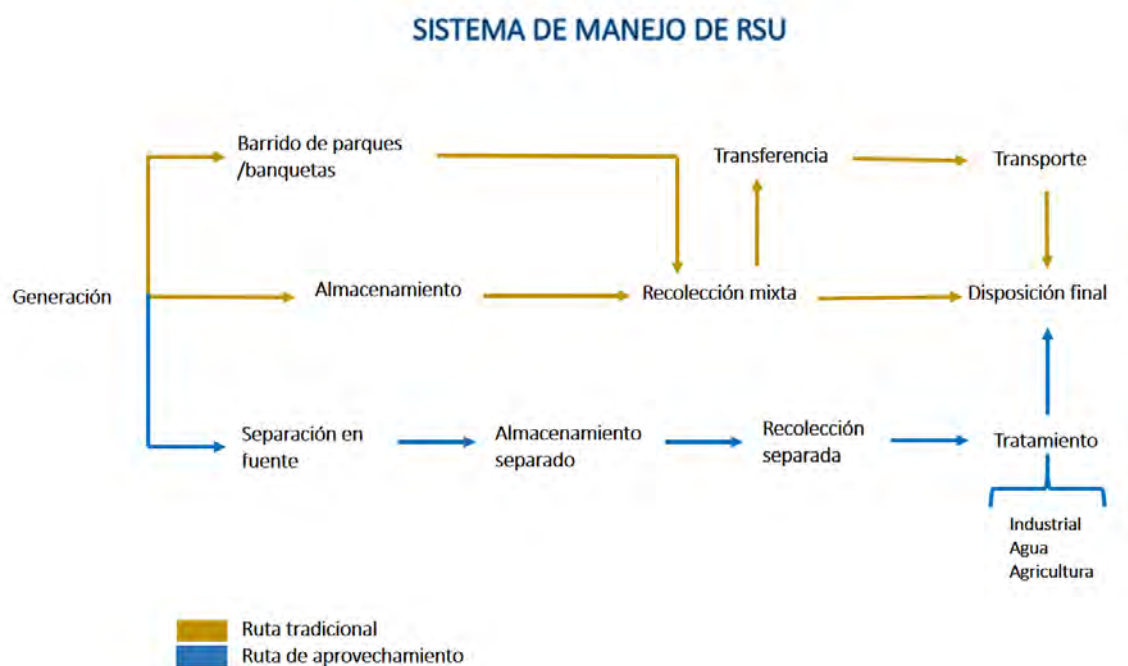


Figura 4 Tipos de rutas de recolección. Elaboración propia tomada de apuntes

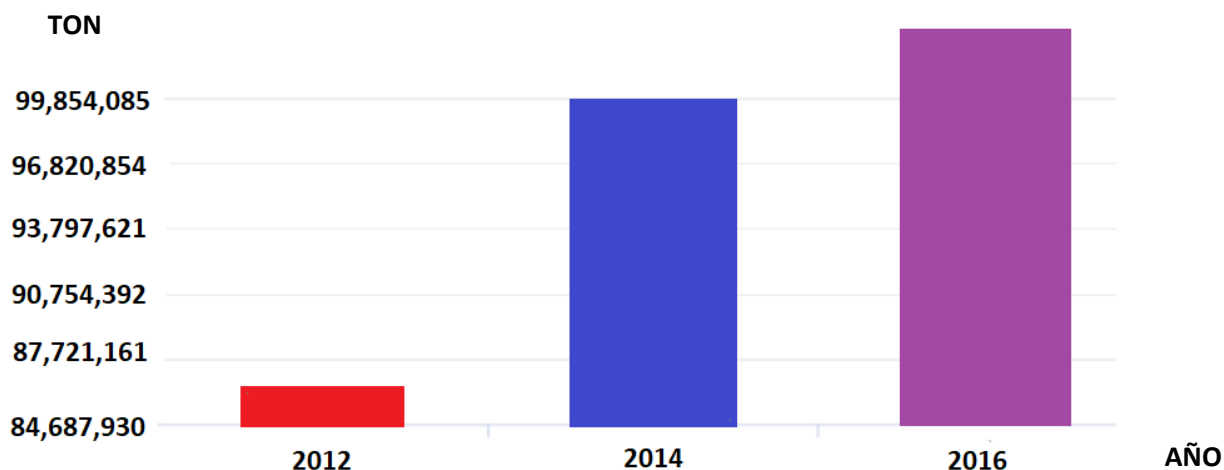
El municipio de Tlalnepantla cuenta con un servicio de recolección mixto; es decir, se utilizan ambas rutas de recolección (tradicional y de aprovechamiento), el cual se encuentra fraccionado en tres sectores: municipal (26%), concesionado (78%) y ejecutado informal (6%).

El servicio concesionado (recolección y disposición final) lo realiza PROACTIVA MEDIO AMBIENTE, la cual pasó absorberse por VEOLIA a la llegada de ésta a México. La cual, renovó el servicio de disposición final en el RST por un periodo de 6 años más, a partir del 2018 hasta el 2024. La frecuencia de recolección efectuada por VEOLIA es de tres veces por semana, con recolección selectiva entre orgánicos e inorgánicos, así como un método de recolección de tipo mixto, como se puede ver en la *Tabla 1* existen en el municipio la Recolección del tipo de puerta a puerta, acera, entrega a los camiones por los habitantes, así como los tiraderos clandestinos.

*Tabla 1 Tipos de recolección (Elaboración propia a partir de información del Municipio)*

TIPO DE RECOLECCIÓN	EXISTENTE	
	Sí	No
Puerta a puerta	X	
Acera	X	
Entrega a los camiones por los generadores	X	
Depósito en contenedores descentralizados		X
Tiraderos clandestinos	X	

La cantidad promedio de recolección por año ha ido en aumento en un 20% a 22% cada dos años, tal como se observa en la *Figura 5*.



*Figura 5 Recolección promedio*

*Fuente: (INEGI Censo Nacional de Gobierno Municipal)*

Parte de las políticas actuales en la CDMX y en el Estado de México, es lograr un máximo aprovechamiento de los residuos a través de las normas estatales de separación y enviar a reutilización la mayor cantidad de los RSU, disminuyendo el envío a disposición final y alargar la vida útil, en el caso del RST de acuerdo a la documentación otorgada por VEOLIA, cuenta con solo 1.5 % de su vida útil.



El municipio de Tlalnepantla actualmente no cuenta con un aprovechamiento total, es decir la implementación de aprovechamiento de los RSU se encuentra en pequeños sectores del municipio, dando lugar a un tratamiento poco formal, en donde solo se separa lo que se puede tener para una valorización económica, sin embargo, el resto se deposita en el RST.

El RST tiene por objeto ser un sitio de disposición debidamente implementado con la infraestructura y tecnología necesarias para proporcionar una mayor distribución a los RSD generados en este municipio y otros municipios vecinos. Como se observa en la *Figura 6*.



*Figura 6 Croquis de localización del RS*

Fuente: MIA PROACIVA

### 2.1.2. Estudios de composición química

Conocer el tipo de residuo sólido que llega a un RS es de alta importancia, debido a que su tiempo de degradación es variable, así como su calidad es decir el estado en el que ingresa él es dependiente de sus características físicas y químicas

#### Caracterización de los residuos

Se consideró la información proporcionada por el personal directivo del RST, particularmente un estudio de caracterización de residuos sólidos realizado en julio del 2015, por la empresa en Ingeniería para el control de residuos municipales e industriales (INCREMI), por solicitud de Proactiva Medio Ambiente. El muestreo y caracterización se realizó en el frente de trabajo, en donde el extracto de los resultados es responsabilidad propia al MIA como se muestra en la *Tabla 2 proyectada proporcionalmente en la Figura 7*.

Tabla 2 Composición de los RSU muestreados en el frente de trabajo.

Fuente: Tomado de (MIA Proactiva Tlalnepantla 2011)

SUBPRODUCTO	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	PROMEDIO (%)
Envase de cartón encerado	0.99	0.57	0.9	0.82
Cartón	3.67	2.02	2.92	2.87
Lata de aluminio	0.19	0.62	0	0.27
Lata metálica	0.89	0.92	1.17	0.99
Papel	5.45	4.16	9.	6.38
Higiénico	0	2.9	52 2.69	1.86
Pañal desechable	23.67	11.78	16.98	17.48
Hueso	0	0	1.24	0.41
Plástico	22.04	15.85	14.23	17.37
Poliestireno expandido	1.92	1.81	1.98	1.90
Residuos de alimentos	12.68	10.18	5.9	9.59
Fibra dura vegetal	0	9.99	10.58	6.86
Residuos de jardinería	5.08	5.01	3.29	4.46
Madera	0	13.5	6.83	6.78
Trapo	7.63	5.76	5.82	6.40
Vidrio de color	3.67	3.78	5.07	4.17
Vidrio Transparente	0	1.86	3.02	1.63
Loza y cerámica	0.19	0	0	0.06
Zapatos	2.36	1.3	2.37	2.01
Hule	0	2.81	0	0.94
Otros	8.75	4.25	4.75	5.92
Residuo Fino	0.81	0.92	0.83	0.85
<b>TOTAL</b>				<b>100.0</b>

Fuente: MIA Proactiva

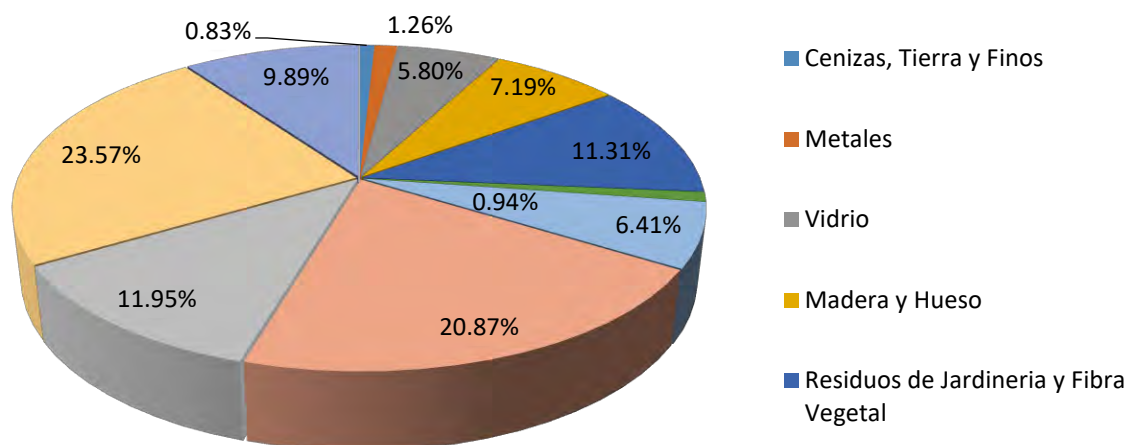


Figura 7 Promedio de la Composición de subproductos

Fuente: Elaboración propia con información tomada de MIA.

Partiendo de la composición de estos residuos, es de utilidad conocer el peso de la muestra, para posteriormente realizar, el cálculo de la volumetría total, tomando como



base las bitácoras de operación y disposición. Se puede concluir de manera desglosada en la *Tabla 3*.

*Tabla 3 Tonelaje por subproducto Tomado de (MIA Proactiva Tlalnepantla 2011)*

Fuente: Propia

Subproducto	% Peso	Tonelada
Residuos alimentos y otros orgánicos biodegradables	23.57	219.19
Papel y cartón	11.93	110.97
Plástico	20.87	194.05
Textiles	6.41	59.61
Hule y cuero	0.94	8.7
Residuos de jardinería y fibra dura vegetal	11.31	105.21
Madera y hueso	7.19	66.87
Cenizas , tierra y finos	0.83	7.7
Otros	9.89	91.97
<b>Total</b>		<b>930</b>

### 2.1.3. Bitácoras de operación y disposición

Durante la operación del RS, los residuos recibidos son extendidos, compactados y posteriormente cubiertos, siendo distribuidos únicamente en celdas preparadas para esta función.

El cálculo de la volumetría de las celdas se realizó de la forma siguiente:

$$800 \frac{\text{t}}{\text{día}} * 365 \text{ días} = 292,000 \frac{\text{t}}{\text{año}}$$

$$(292,000 \text{ t/año}) / (0.75 \text{ t / m}^3) = 389,333.33 \text{ m}^3/\text{año}$$

Se obtiene que cerca de 389,333.33 m<sup>3</sup> /año se están depositando y cubriendo en el RST.

Estableciendo que el volumen total por celda está determinado por:

**389,333.33 m<sup>3</sup> /año, + incremento en generación por aumento poblacional, + material de cobertura.**

*Figura 8 Total por celda*

De esta *Ecuación 1*, se parte para el diseño de cada una de las celdas y su distribución.

Considerando que la fase de operación del RS está dividida en dos etapas:

- Primera Etapa, se opera por debajo de la cota superior del terreno.
- Segunda Etapa, se opera por arriba de la cota del terreno.

A continuación, se explica a detalle cada una de las celdas del RST:

**Celda 1.**

Localizada en la zona noreste de la excavación de la cantera, con una altura prevista para los residuos que será la cota 120, con una capacidad aproximada de 900,000 m<sup>3</sup>

### **Celda 2**

Al sureste de la cantera, con una cota máxima de 120, presentando una capacidad aproximada de 500,000 m<sup>3</sup>.

### **Celda 3**

Será una continuación en altura de las dos primeras celdas hasta enrasar la excavación de la cantera. Tendrá una capacidad de 1, 000,000 m<sup>3</sup>.

### **Celda 4**

Localizada en la parte sur del camino de acceso al área de vertido, apoyada en la celda 2 y en la pared suroeste de la cantera; su capacidad estimada es de 1,250,000 m<sup>3</sup>.

### **Celda 5**

Está caracterizada por otro tipo de operación, la cota del relleno está por encima de la cota del terreno, lo que implica que los caminos de acceso están construidos por encima de las plataformas de los residuos cubiertos. (Compilación, 2010) . Obteniendo por capacidad de esta celda 1, 000,000 m<sup>3</sup>.

La etapa de operación presenta elementos que impactan negativamente, un ejemplo claro son los movimientos de vehículos pesados los cuales benefician a la compactación, pero de manera irregular lamentablemente.

## **2.2. Visitas de reconocimiento**

Se visitó dos veces el RST con el fin de lograr un entendimiento más completo. Como se puede observar en la *Figura 9 y 10*, en el sitio se buscó localizar la media para realizar la medición de la concentración del gas CH<sub>4</sub> .



*Figura 9 Vista de Celda 3 RS Tlalnepantla (Visita a campo) (1)*

FUENTE: Tomadas en sitio



Figura 10 Visita a campo, localización de puntos (2)

#### 2.2.1. Determinación del metano en campo

Durante la visita al RS se buscó localizar la media distancia entre los pozos de venteo para hacer posible la toma de medición del gas  $CO_2$  y  $CH_4$ .

Esta actividad fue realizada por personal capacitado, se obtuvo la captura de los datos con el equipo proporcionado explicado a detalle en el punto 2.2.2, para posteriormente importar a una gráfica general de la celda muestreada para obtener la concentración del gas  $CH_4$  en sitio. Como se observa en la Figura 11 y a Tabla 4.

La brigada conformada por 4 integrantes, capturó las velocidades del viento, así como la temperatura a nivel del suelo y del sitio, a valores máximos y mínimos como se muestra a continuación en la Tabla 5 y 6, tomando como representación de estas en las Figuras 13 y 14.



Figura 11 Medición en campo (3)



Tabla 4 Bitácora de trabajo de campo

Fuente: Elaboración propia a partir de datos registrados en campo

CLAVE			X	Y	Z
RST	1	(1-2)	14Q0319469	2275289	2252
RST	2	(2-3)	14Q0478198	2165300	2350
RST	3	(3-4)	14Q0478211	2165681	2342
RST	4	(4-5)	14Q0478216	2165397	2345
RST	5	(5-6)	14Q0478196	2165408	2348
RST	6	(6-7)	14Q0478170	2165452	2349
RST	7	(7-8)	14Q0478154	2165503	2354
RST	8	(8-9)	14Q0478135	2165478	2356
RST	9	(9-10)	14Q0478134	2165470	2359
RST	10	(10-11)	14Q0478147	2165447	2361
RST	11	(11-12)	14Q0478133	2165425	2355
RST	12	(12-13)	14Q0478140	2165409	2358
RST	13	(13-14)	14Q0478111	2165436	2358
RST	14	(14-15)	14Q0472867	2165507	2355
RST	15	(15-16)	14Q0478077	2165524	2353
RST	16	(16-17)	14Q0470909	2165581	2351
RST	17	(17-18)	14Q0478107	2165646	2349
RST	8	(18-FIN)	14Q0478073	2165705	2356

VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)	
MÁXIMA	MÍNIMA
5.6	3.2
5.6	1.3
6.1	1.6
6.1	4.4
6.1	0.3
6.1	1.9
8.2	3.3
8.2	4.7
9.1	5.3
9.1	4.9
9.1	4.2
9.1	3.8
9.1	2.8
9.1	4.3
9.1	2.9
9.1	3
9.1	2.8
9.1	2.4

TEMPERATURA (°C)	
MÁXIMA	MÍNIMA
38.4	36.8
38.4	39.1
38.4	42.2
38.4	36.8
38.4	36.3
38.4	37.5
38.4	39.6
38.4	36.3
38.4	32.1
38.4	35.8
38.4	34.3
38.4	32.7
38.4	35.3
38.4	27.3
38.4	29.5
38.4	33
38.4	32.7
38.4	27.7

Tabla 5 (izquierda) Datos recopilados en campo (Elaboración propia - Velocidad)

Tabla 6 (derecha) Datos recopilados en campo (Elaboración propia - Temperatura)

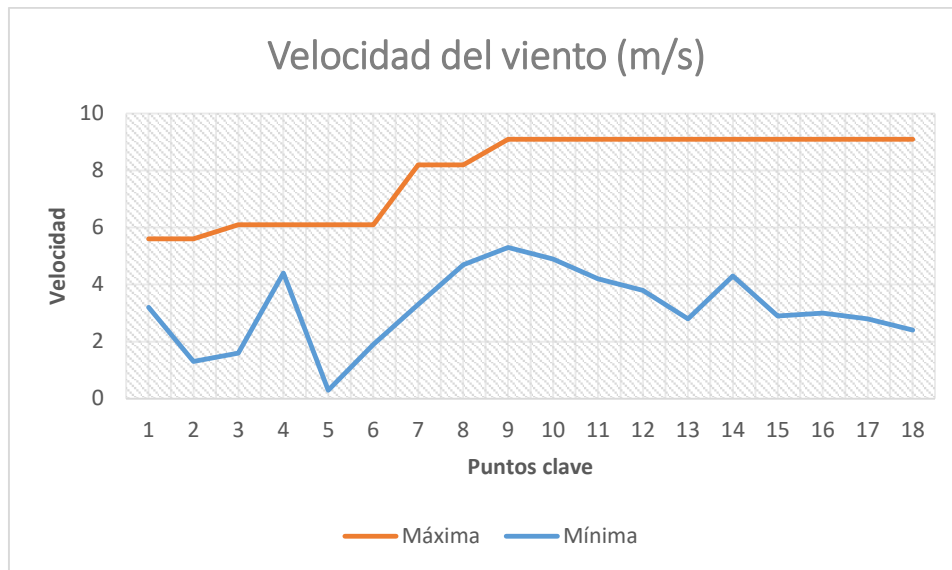


Figura 12 Comparación de velocidad del viento máxima y mínima (Elaboración propia con datos de campo)

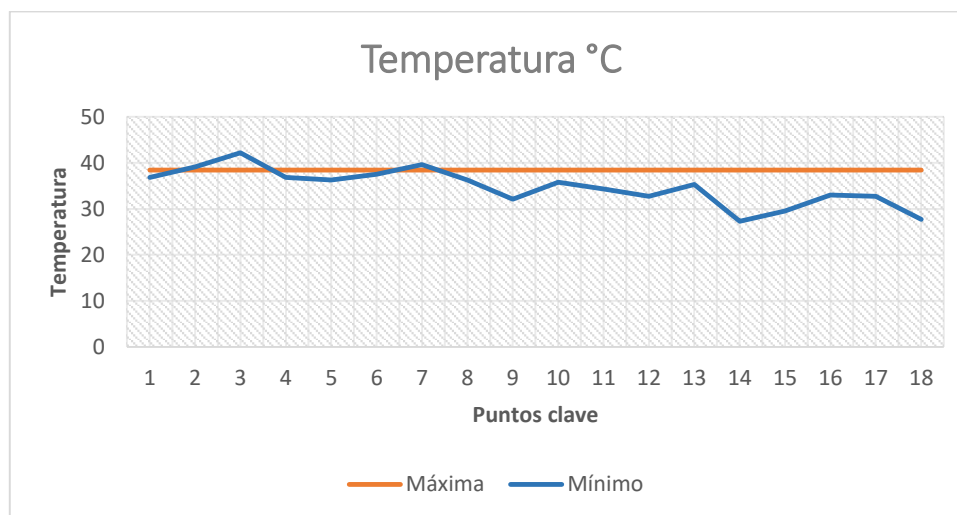


Figura 13 Comparación T° C máxima y mínima (Elaboración propia)

Una vez registrados los datos, el equipo utilizado debe ser descrito junto con su función dentro de esta investigación necesariamente.

### 2.2.2 Descripción del equipo utilizado

El equipo utilizado fue el siguiente:

- Anemómetro: Bastón de aproximadamente 1 m de altura con hélices unidas a un eje central cuyo giro, proporcional a la velocidad del viento, es registrado convenientemente; en los anemómetros magnéticos, dicho giro activa un diminuto generador eléctrico que facilita una medida precisa ver *Figura 14*.

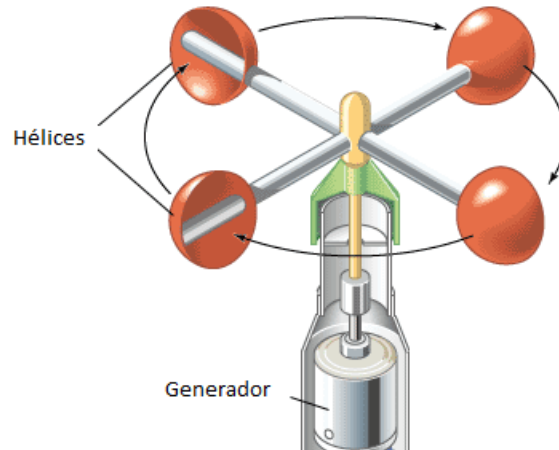


Figura 14 Anemómetro

Tomado de: instrumentaciondinamica2013.blogspot.com

- Detector de cuatro tipos de gases “(West Systems Soil diffse gas flux meter)”
- El detector de cuatro gases está diseñado para ofrecer monitoreo continuo de  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2S$  y EX ( Gases Combustibles ) en el medio ambiente. Su función estándar incluye lecturas pico, registro de datos y la prueba de auto-verificación de operación. En el frente del equipo está la pantalla (LCD), la entrada del sensor, la lectura de la alarma auditiva y el LED de alarma visual, de un lado esta los botones de encendido/selección, pico/no y el interruptor de energía, teniendo a su vez una ventana de comunicación infrarroja. Ver en la Figura 15.

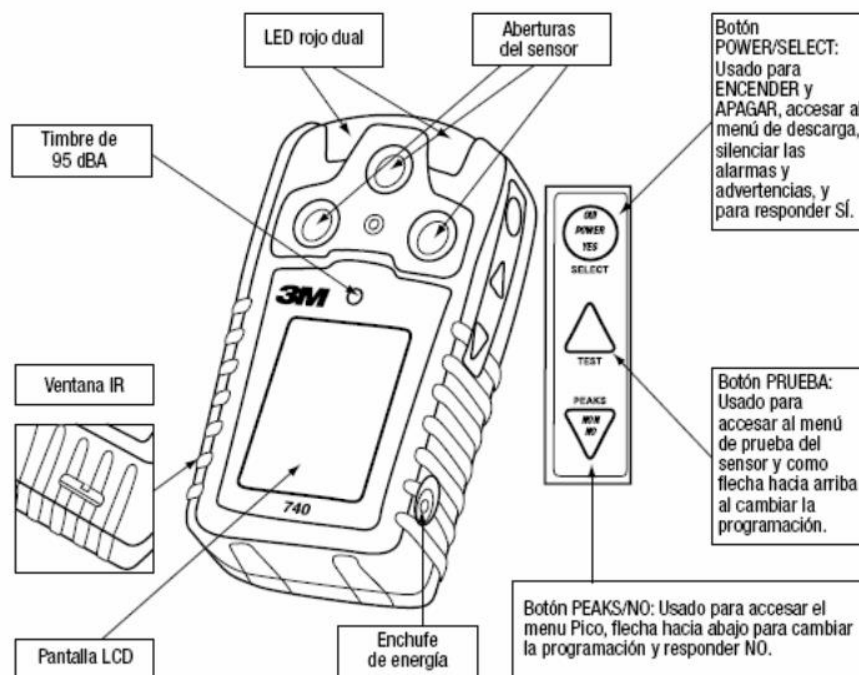


Figura 15 Componentes del WEST

Tomado de: Artículo Argentina SACIFIA –División Salud Julio-2017



- Receptor de GPS . Un GPS está construido por un circuito integrado que incluye filtros digitales, un reloj de tiempo real, un procesador, memoria y un motor de GPS, este último se encarga de buscar las señales de los GPS y calcular la diferencia de tiempo entre los satélites encontrados para determinar el valor de la longitud, en referencia al Meridiano de Greenwich, el valor de la latitud y, por último, el valor de la altitud. Ver *Figura 16*.



*Figura 16 GPS*

Tomado de: Artículo Argentina SACIFIA , Julio 2017

- Termómetro de campo  
El termómetro es un instrumento de medida analógico muy práctico y fácil de utilización que permite conocer la temperatura a la que se encuentra el sustrato.

### 2.2.3. Descripción de la metodología

El equipo que se utilizó en campo fue un anemómetro, el cual es un instrumento para medir velocidad del viento (fuerza de viento), ellos miden la velocidad instantánea del viento, pero las ráfagas de viento desvirtúan la medida, de manera que la medida más acertada es el valor medio de medidas que se tomen a intervalos de 10 minutos

Por otro lado, el anemómetro nos permite medir inmediatamente la velocidad pico de una ráfaga de viento.; se tomó medición también con el detector de cuatro tipos de gases “ (West Systems Soil diffse gas flux meter)”, en el cual solo registró el componente  $CH_4$ ; debido principalmente a que es el componente que interesa estudiar para su medición en este proyecto .

Como se puede observar en la *Figura 17*; el proceso fue iniciando con la colocación de la batería para su funcionamiento; posteriormente se comenzó el registro por punto con las siglas RST#1 y así consecutivamente hasta terminar con los puntos de toma de venteo.



Figura 17 WEST SYSTEM , Termómetro y Anemómetro (Equipo utilizado)



Figura 18 Procedimiento de medición

Se observa en la Figura 18 el proceso para calibrar el contenedor, se eleva para posteriormente ser colocado en el suelo.

En la Tabla 4 se usó la nomenclatura RST# para asignar una clave, que significa “Relleno Sanitario Tlalnepantla” punto número 1, para ingresar las latitudes y longitudes dadas por el GPS en campo, el valor de la temperatura, posteriormente colocar el contenedor en el suelo, y así poder obtener la concentración del gas  $CH_4$  emitido en esa área.

Como se observa en la Figura 17, la personal porta herramientas utilizadas para la medición del flujo del viento y la temperatura del suelo, que sirvieron como punto de referencia para la medición de dicho gas.

### 2.3 Datos climáticos

Las condiciones topográficas, climatológicas y de ubicación geográfica hacen del Valle de México una región particularmente sensible a la preservación de la contaminación atmosférica. (Gispert, 2016) ; por este motivo se deben monitorear estos indicadores.



### 2.3.1. Precipitación

La estación seca se presenta desde finales de otoño hasta el cierre del invierno, periodo en el que se observan precipitaciones en conjunto de 50 mm, registrándose en menor cantidad en diciembre y enero con 4.8 y 6.3 mm respectivamente. (Climatológica, 2018)

### 2.3.2. Temperaturas

La estación climatológica de las Arboledas, dentro del mismo municipio de Tlalnepantla cercana al sitio de estudio, tiene registros de más de 18 años de temperaturas por lo que a continuación se describe su comportamiento.

Las temperaturas promedio registradas en la estación climatológica en mención, indican una media anual entre los 12 y 17°C, mientras que en la región, se registra entre 16 y 18°C. (Climatológica, 2018). Esto concuerda con las temperaturas tomadas en campo. Ver *Tabla 6* y *Figura 13*; la temperatura a usar para este trabajo es de 17°C.

Se considera que el régimen térmico es templado, con verano fresco y largo, mientras la temperatura media anual fluctúa entre 12°C y 18°C.

### 2.3.3. Clima

De acuerdo a la localización del área de estudio, el subtipo climático que prevalece es templado subhúmedo, con grado intermedio de humedad, entre 43.2 y 55.0 y con lluvias en verano. (Climatológica, 2018)

### 2.3.4. Dirección y velocidad del viento

En la zona de estudio no se presentan vientos dominantes; los registros indican un estado general de calma a lo largo del año, con breves periodos de alta intensidad, en lo que la velocidad medida es baja, es decir, 1 m/s, como promedio obtenido.

Las condiciones topográficas hacen del Valle de México una región sensible a la contaminación atmosférica, (Gispert, 2016). Esto provocado por las características fisiográficas del Valle de México, el cual está casi en su totalidad rodeado de montañas, factor que incide negativamente en la dispersión de los contaminantes atmosféricos en la zona, contribuyendo con registros por encima de norma de acuerdo al índice IMECA.

De esta manera Tlalnepantla se vio sujeta a un programa para mejorar su calidad de aire dentro de su Municipio, para buscar la eliminación alta de gases tóxicos para la población y la atmósfera.

## 2.3. Siniestros y eventos extraordinarios

Dentro del RST se han presentado incidentes. La generación de biogás, al ser objeto de estudio conlleva su identificación dentro de los registros.

Por otra parte, el MMB incluye un factor de ajuste por incendio (F). En caso de la presencia de incendios, este factor disminuye el potencial de generación ya que, al oxidarse los residuos, se generan cenizas, las que pierden la capacidad de producir biogás. Para eso es necesario calcular este factor se requiere conocer la superficie involucrada en el siniestro.

Para nuestro estudio fue necesario indagar en registros históricos de protección civil para determinar un porcentaje aproximado de los incendios dentro del relleno sanitario.

Los datos proporcionados por Protección civil fue solo un registro de incendio dentro del RST, mientras que a la periferia se han registrado entre 1 y 4 incendios por año.

En el RST se presentó un incendio en el mes de marzo de 2013. Este siniestro involucró, según fuentes periodísticas, una superficie aproximada de 0.2 ha, lo que representa una proporción total de la superficie de 1%. Ver Figura 19.



Figura 19 Tomada de (El Universal Edomex 2013) – Noche

El incendio se registró a las ocho de la noche del día lunes, el cual se logró controlar cerca de las cuatro de la mañana del día martes, en donde las columnas de humo alcanzaron 30 m de altura, lográndose disipar hasta entrando el amanecer. Ver Figura 20.



Figura 20 Tomada de (El Universal Edomex 2013)- Día siguiente

Expertos determinaron que se dio un grave daño al medio ambiente ante las inmensas columnas de humo. Se considera que no hubo lesionados.

### 3. DISPOSICIÓN PREVIA Y FUTURA DE RESIDUOS

Las disposiciones de los RSU dentro del Municipio de Tlalnepantla se han realizado de acuerdo a su localización y cercanía al RST; de la misma manera que la generación por año se ha visto en aumento, por lo que proyectar su generación beneficiará al cálculo de la vida útil del RST.

#### 3.1. Datos históricos

Con base en las bitácoras del ingreso de residuos al RST se conformó la *Tabla 7*, que nos muestra el volumen dispuesto de residuos, desde el año de apertura hasta el 2016. El comportamiento de los últimos 3 años fue elegido para proyectar la cantidad más probable de desechos que se dispondrán hasta el final de la vida útil del relleno sanitario.



Tabla 7 Volumen dispuesto de residuos desde su apertura hasta el 2016

Adaptado de (MIA Proactiva Tlalnepantla 2011)

Año	Toneladas dispuestas	
1998	224,386.20	
1999	316,545.13	
2000	290,389.93	
2001	274,069.83	
2002	276,643.45	
2003	366,918.62	
2004	442,640.90	
2005	404,459.13	
2006	398,592.36	
2007	508,640.12	
2008	329,662.70	
2009	314,634.82	
2010	290,651.40	
2011	323,808.00	
2012	327,948.00	
2013	247,318.00	tc %
2014	250,195.00	1.163
2015	246,211.00	-1.592
2016	250,023.00	1.548
	<b>tc% promedio</b>	<b>0.373</b>

### 3.2. Vida útil

La vida útil de un RS está relacionada con su volumen máximo de almacenamiento. Ésta puede incrementarse al realizar el reciclado de los RSU, reduciendo el volumen de desechos a disponer e incrementa la vida útil de las celdas.

Con el análisis del comportamiento de la disposición, desde año 2013 al 2016, se logró identificar una tasa de crecimiento de la disposición ( $tc = 0.373\%$ ), para posteriormente predecir el comportamiento de la disposición hacia el final de la vida útil del RST, como se observa en la *Tabla 8*.

Tabla 8 Tasa de crecimiento de la disposición. Elaboración propia

Año	TON
2017	251,000.00
2018	251,900.00
2019	252,800.00
2020	253,700.00
2021	254,600.00
2022	255,500.00
2023	256,500.00
2024	257,500.00

La capacidad de un RS debe ser suficientemente grande como para permitir su utilización a largo a fin de que su vida útil sea compatible con la gestión, los costos de adecuación y las obras de infraestructura. Dependiendo directamente de su disponibilidad.

### 3.3. Proyección de la disposición

Con los datos obtenidos se logró una proyección de la disposición general de los residuos, misma que se puede observar en la *Figura 21*, en donde a partir del año 2016 se observa una tendencia lineal.

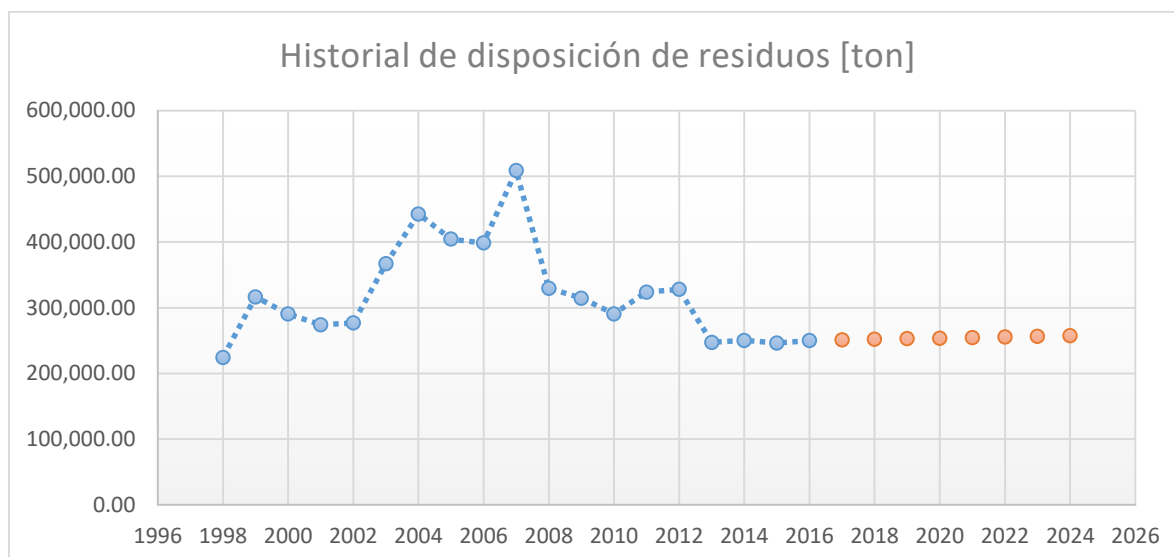


Figura 21 Gráfica del historial de disposición de residuos. (Elaboración propia)

### 3.4. Zonas a las que da servicio el RST

El RST, ubicado en el estado de México, recibe RS provenientes de los Municipios: Ocoyoacac, Huixquilucan, Lerma, Coacalco, Jilotzingo, Cuautitlán, Teoloyuca, Morelos, Naucalpan, además de aquellos que el mismo ayuntamiento genera en labores de jardinería y poda de árboles en áreas públicas. (de Ingeniería, Octubre 2016)

### 3.5. Tendencias en la disposición

El RST ha operado desde el año 1998; se pronostica que lo hará hasta el año 2024, esto debido a que se amplió la concesión a VEOLIA; con un volumen de residuos dispuestos de más de 740 toneladas al día. Durante el año 2016 se recibió un promedio de 95 toneladas diarias de residuos; se han dispuesto cerca de 6 millones de toneladas desde el inicio de su operación.

## 4. UBICACIÓN ESPACIAL DEL RST

Identificar de manera espacial el sitio con sus límites urbanos es de alta importancia para la determinación del potencial de generación, para que a través de esto se puedan apreciar las problemáticas en su distribución de celdas y espacios de zona de oficinas.

#### 4.1. Límites geográficos del RST

Se aprecian a continuación los límites del Relleno de Tlalnepantla en una captura obtenida por Google Earth. *Figura 22.*

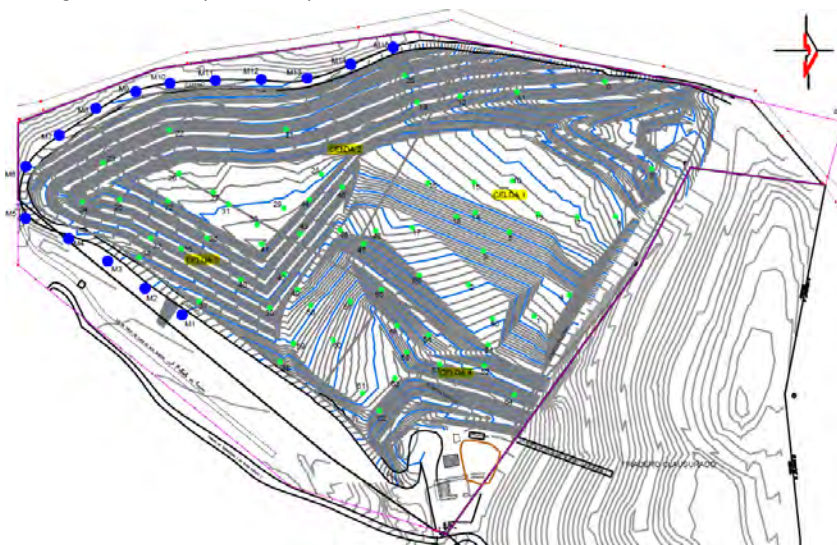


*Figura 22 Relleno Sanitario*

#### 4.2. Distribución de celdas, obras e instalaciones en el RS

Durante la operación del RS, los residuos recibidos son extendidos, compactados y +posteriormente cubiertos, en celdas preparadas para esta función.

A través de la *Figura 23* se puede apreciar la distribución de las zonas de trabajo.



*Figura 23 Plano general de distribución*

- POZO DE VENTILACIÓN DE BIOGÁS
- POZO DE MIGRACIÓN DE BIOGÁS

### 4.3. Tipos de cobertura de las celdas

Para la determinación de la cobertura del sitio se utilizó la plataforma google maps y sus imágenes satelitales, esto fue necesario, ya que el MMB considera esta información para realizar la determinación correspondiente. Ver Figura 24.

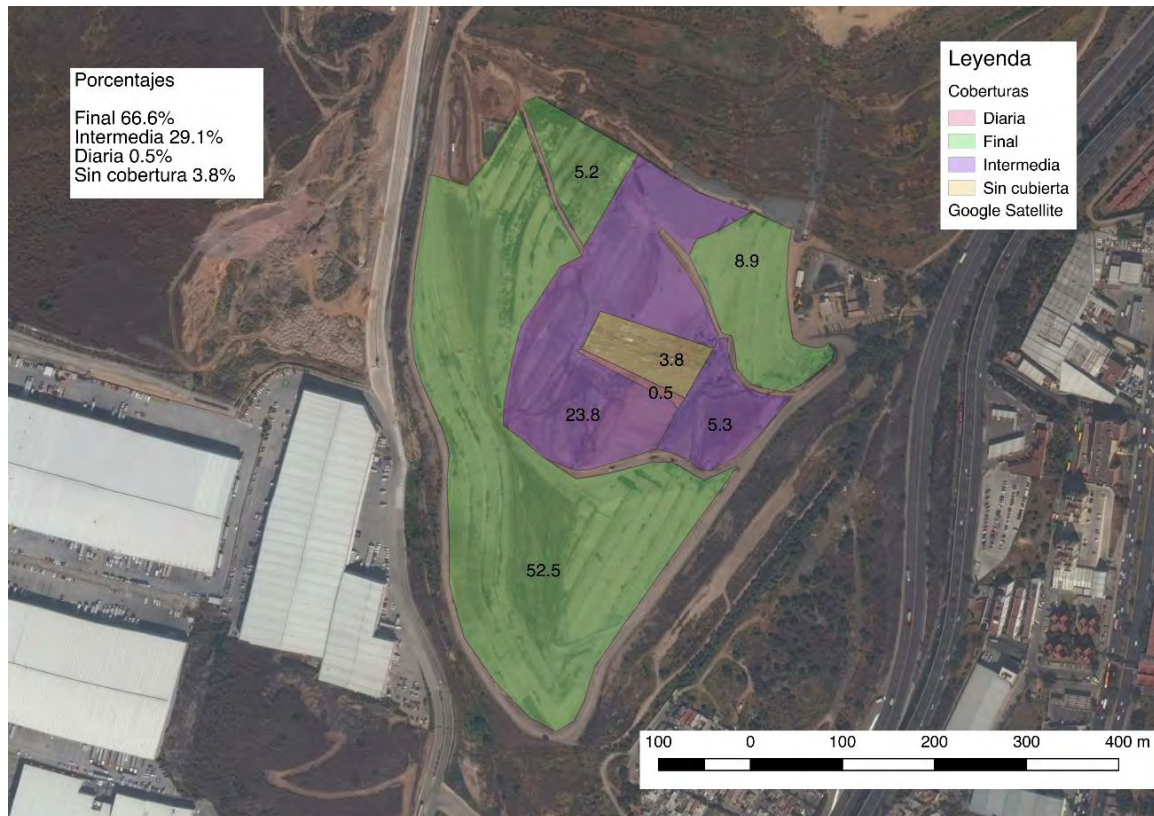


Figura 24 Determinación de la cobertura de sitio. Adaptado de proyección Google Earth

Se digitalizaron las zonas con cobertura de acuerdo a su tipo, tomando a consideración su color de terminación y datos previamente recabados como su inicio de operación. En la *Tabla 9* se puede ver la clasificación a detalle, tomando en cuenta los criterios antes mencionados:

Tabla 9 Tipo de cobertura (Elaboración propia con información recabada)

PARA COBERTURA FINAL	Se digitalizó las zonas donde el talud se viera bien conformado y con vegetación sobre ella, es decir en esas zonas ya no se realiza ningún trabajo.
Para cobertura intermedia	Se digitalizaron las áreas donde la cubierta se veía más “fresca”, es decir, que el color se veía más claro que los otros lugares.
Para lugares sin cobertura	Para este caso solo se digitalizó las zonas donde se veía los desechos al aire libre.
Para lugares con cobertura diaria	Para esta área solo se creó el polígono del área vacía entre el área sin cobertura y cobertura intermedia.

### 4.4. Comparativos de altura de los RS dispuestos





Tabla 10 Determinación promedio de la diferencia entre niveles. (Elaboración propia) -A

El MMB2.0 requiere información de la altura promedio de residuos. Dado que existe cierta irregularidad, tanto en la base del relleno como en la superficie de la cubierta final, se optó por considerar la mayor cantidad posible de puntos para determinar un promedio de altura de las celdas.

Los puntos considerados corresponden a la ubicación de los pozos de venteo.

Las tablas 10, 11 a y b . muestran la comparativa entre las alturas obtenidas de las curvas de nivel del RST, correspondientes al terreno original y la topografía del 2016.

POZO	NIVEL 2016 (m)	NIVEL ACTUAL (m)	DIFERENCIA (m)
1	2355.8	2332.5	23.3
2	2352.5	2333.8	18.7
3	2357.5	2332.8	24.7
4	2357.8	2330	27.8
5	2362.5	2331.2	31.3
6	2369.5	2332.5	37
7	2367.2	2330	37.2
8	2379.7	2338.5	41.2
9	2375.5	2359	16.5
10	2366.7	2331.5	35.2
11	2375	2334.3	40.7
12	2370	2333	37
13	2366.5	2328	38.5
14	2363.5	2330	33.5
15	2366	2330.5	35.5
16	2364.7	2330.2	34.5
17	2357.3	2331.9	25.4
18	2361.7	2331.1	30.6
19	2367.5	2327.3	40.2
20	2357.2	2339.8	17.4
21	2358.5	2229.5	129
22	2357.5	2337.1	20.4
23	2358.1	2347.5	10.6
24	2358	2350.5	7.5
25	2362	2350.5	11.5

Para determinar la altura se comparó la altura del terreno antes del inicio de la disposición de residuos con la altura en el 2016. La diferencia corresponde con las capas



Tabla 11 Determinación promedio de la diferencia entre niveles. (Elaboración propia) – A izquierda y B derecha

POZO	NIVEL 2016 (m)	NIVEL ACTUAL (m)	DIFERENCIA (m)
26	2358	2344.8	13.2
27	2368.3	2330.9	37.4
28	2367.7	2331.1	36.6
29	2367.2	2330.5	36.7
30	2366.7	2331.8	34.9
31	2367.6	2330.2	37.4
32	2367.5	2331.5	36
33	2355.1	2338	17.1
34	2352	2350	2
35	2357	2343	14
36	2363.2	2338.1	25.1
37	2346.5	2338	8.5
38	2341	2340	1
39	2357.5	2338.7	18.8
40	2356	2339.5	16.5
41	2361.3	2338.8	22.5
42	2355.5	2334.5	21
43	2360	2328.5	31.5
44	2366	2330.4	35.6
45	2359.5	2324.5	35
46	2353.7	2332.1	21.6
47	2352.5	2332.3	20.2
48	2356.5	2331.5	25
49	2349	2337	12
50	2350.3	2334.1	16.2

POZO	NIVEL 2016 (m)	NIVEL ACTUAL (m)	DIFERENCIA (m)
51	2349.2	2334.3	14.9
52	2344	2325	19
53	2341.2	2335.7	5.5
54	2344	2335.3	8.7
55	2339	2335.8	3.2
56	2339.5	2325	14.5
57	2341	2335.2	5.8
58	2345.5	2327.2	18.3
59	2345.5	2337	8.5
60	2341	2324.8	16.2
61	2343	2323.7	19.3
62	2334.5	2323.2	11.3
63	2335.5	2323.7	11.8
64	2340.5	2324.5	16
65	2345	2334	11
66	2354	2334	20
<b>PROMEDIO</b>			<b>24.015</b>

Se sabe que el espesor de residuos es de 0.5 m, con un espesor de material de cobertura de 0.15, de acuerdo a registros de operación del RST. Los resultados se muestran en la Tabla 10.

Se concluye que la altura promedio obtenida es de 24 m. Los planos topográficos (*ilustración 12 y 13*), se tomaron como base para esta determinación de altura promedio. La diferencia de altura mínima fue de 1 m y máxima de 41.2 m.

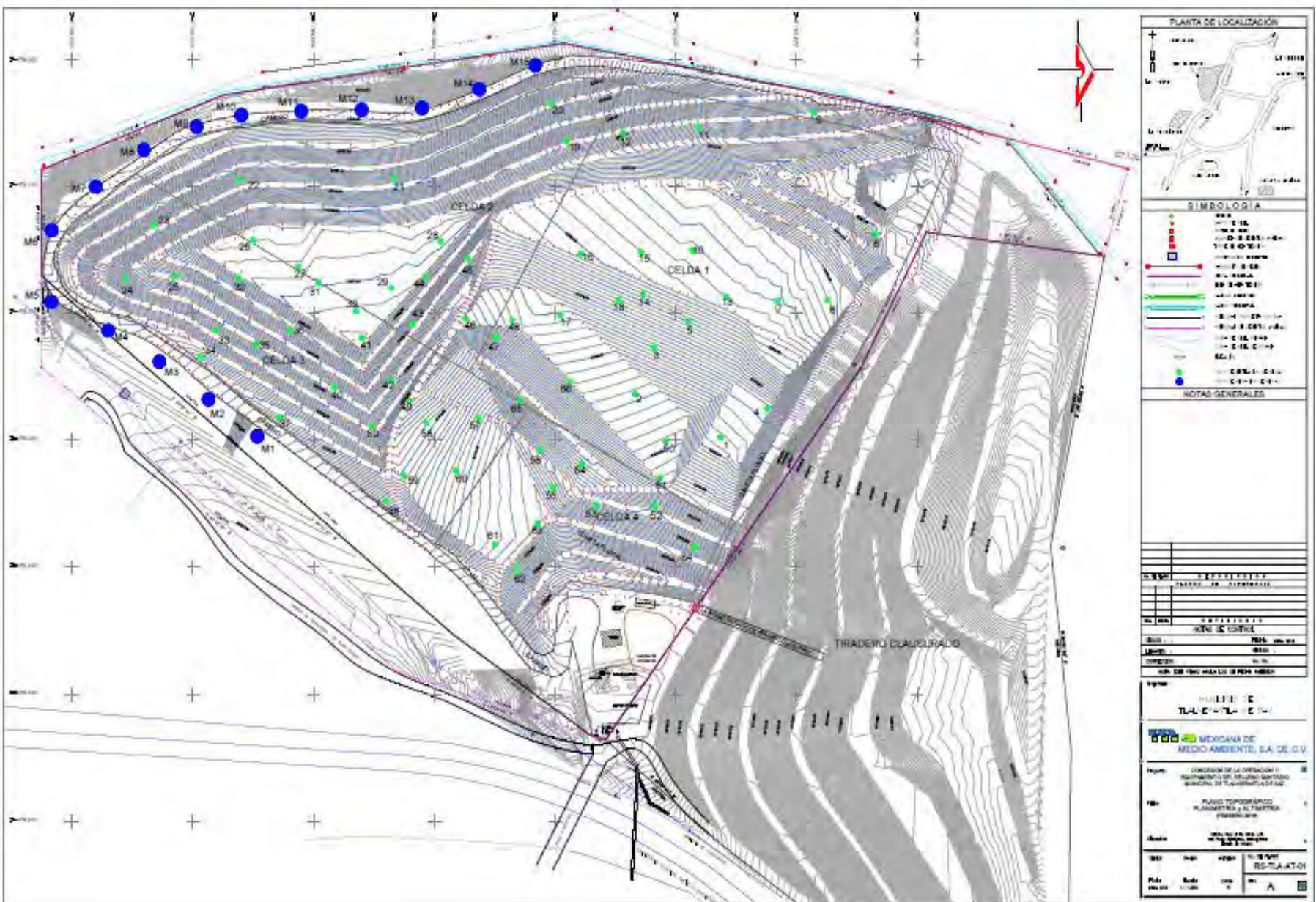
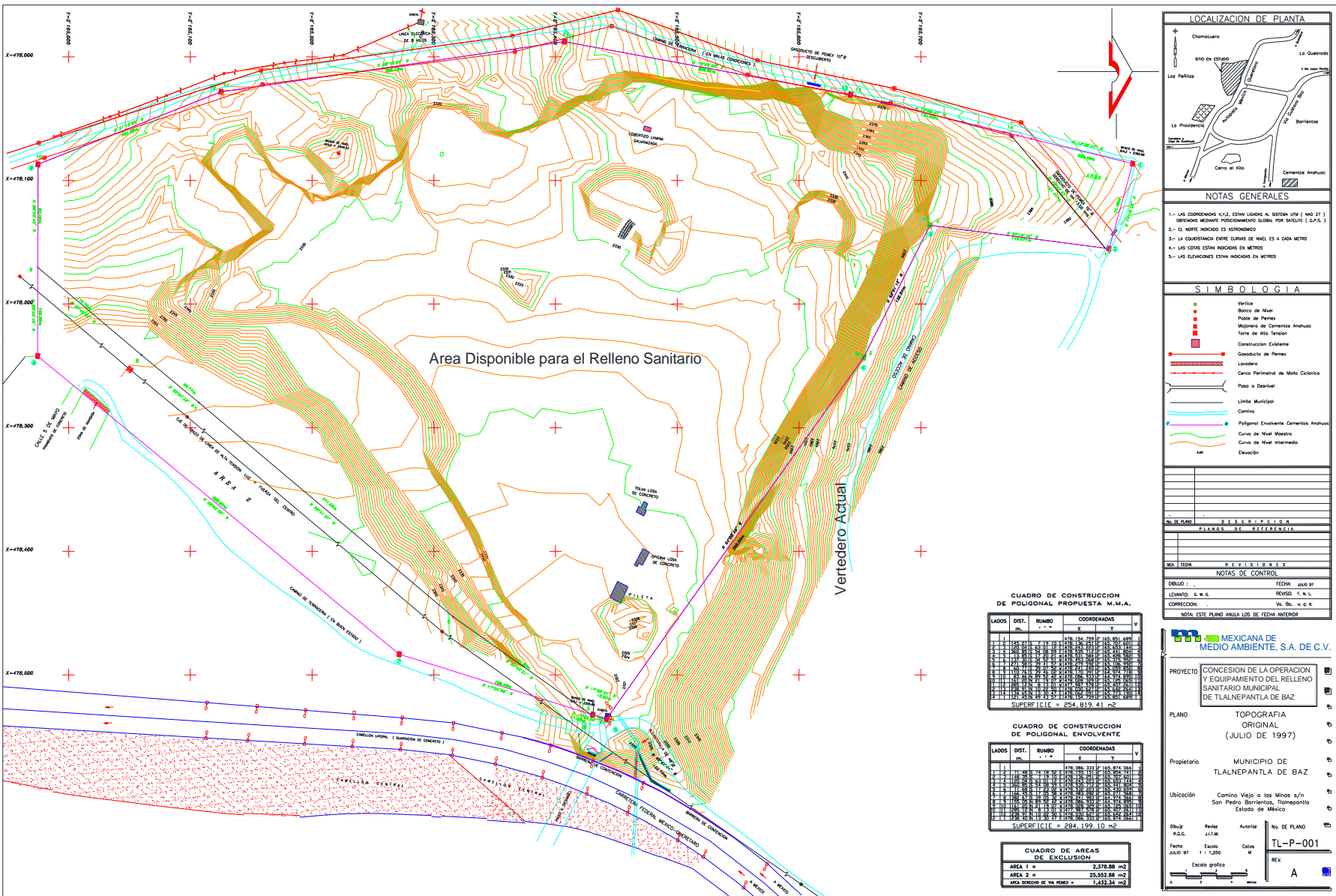


Figura 25 Plano del RST tomado de (Diseño de RS Tlalnepantla 2016)



## POTENCIAL DE GENERACIÓN DE BIOGÁS

El potencial de generación es la cantidad de biogás que se puede obtener a través de la descomposición anaeróbica de la fracción orgánica de los RSU dispuestos en un relleno sanitario, captándola y aprovechándola para generar energía eléctrica que pueda ser consumida.

La atmósfera terrestre, por otra parte, es una capa muy delgada de gases que rodea el planeta Tierra. Esta capa es muy importante, ya que se encuentra compuesta por gases fundamentales para que sea posible el desarrollo de la vida en el planeta. Cualquier gas emitido a la atmósfera, como por ejemplo el emitido por la descomposición de RSU, debe ser cuantificado para evitar riesgos a la salud humana, así como al medio ambiente.

### 5.1 Marco teórico

Entre las distintas formas en las que el hombre por sus acciones dañinas o negligentes daña el Medio Ambiente, una de las más preocupantes y que es objeto de análisis constante es la conocida como Efecto Invernadero, que consiste básicamente en la generación de un incremento en la temperatura de nuestro planeta debido a un fenómeno (Margarita Caballero, 2007).

Se genera fundamentalmente por la aparición de gases en la atmósfera terrestre que no permiten la transferencia e intercambio de la radiación solar generando una retención del mismo evitando que se expida, lo que da como resultado un efecto como sucede con los invernaderos que se emplean en la agricultura para la plantación de especies vegetales.

#### 5.1.1. Gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero se refieren a un mecanismo en el cual la atmósfera de la Tierra sufre un calentamiento como se observa en la *Figura 27* la comparativa entre el efecto natural de los gases con el efecto aumentado por el hombre.



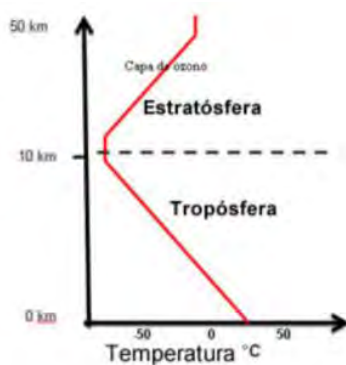
Figura 27 Gases de efecto invernadero

Fuente: Guía para el Aprovechamiento del Gas Metano en Rellenos Sanitarios

La composición química de la atmósfera incluye mayoritariamente dos gases: Nitrógeno en un 70% (N) y oxígeno (O) en un 20%. El 1% restante está formado por diversos gases, entre los cuales se destacan el Argón (Ar) en un 0.9% y ( $CO_2$ ) en un 0.03% aproximadamente. De esta manera se puede apreciar en la *Figura 28* . (Margarita Caballero, 2007)

Dado que los gases de la atmósfera están sujetos a la atracción gravitacional de la Tierra, la mayor densidad de los gases se concentra cerca de la superficie terrestre, en los primero 50 km, en donde se distinguen dos capas. (de Ingeniería, Octubre 2016)

1. La Tropósfera tiene en promedio una altura de 10 km con un 75% de masa total.
2. La Estratósfera tiene en promedio de altura de 50 km con un 24% de masa total



El  $CH_4$  es el segundo gas que más contribuye al efecto invernadero. Desde el principio de la Revolución Industrial, la concentración de metano en la atmósfera se ha duplicado y han contribuido un 20% al incremento del efecto invernadero como se ve en la *Figura 29*.

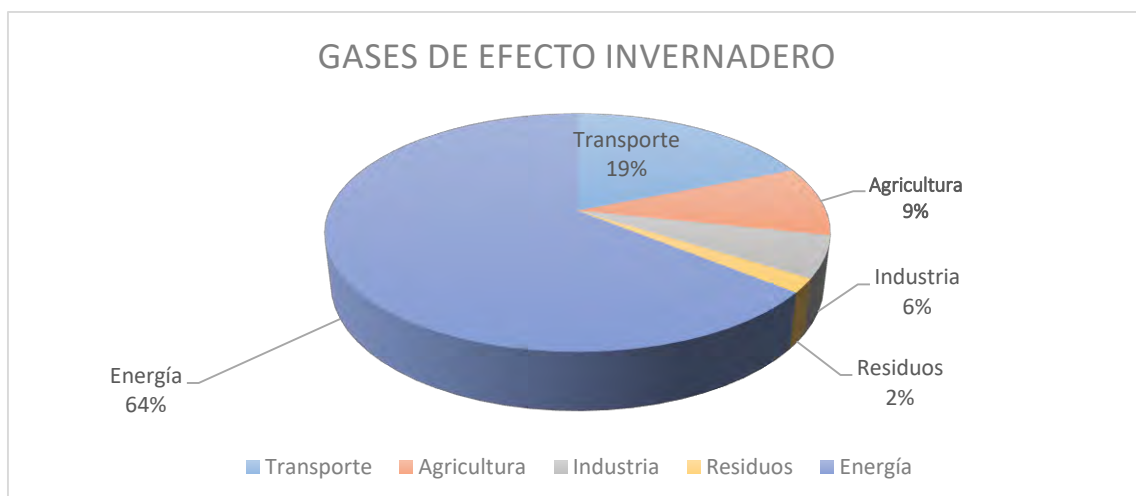
Las fuentes influenciadas por el hombre son minería, quema de los combustibles fósiles, cría de ganado, etc.

*Figura 28 Tipo de atmósfera*

Fuente: Guía para el Aprovechamiento del Gas Metano en Rellenos Sanitarios

En la atmósfera el metano retiene el calor y es 28 veces más efectivo que el  $CO_2$  , siendo su ciclo de vida más breve en 10-15 años.

El metano se crea mediante las bacterias que se alimentan de material orgánico cuando se escasea el oxígeno. (de Ingeniería, Octubre 2016)



*Figura 29 Gráfica de Gases de la atmósfera y su contaminación (Elaboración propia)*



El gas metano producido por los rellenos sanitarios puede ser usado para generar electricidad mediante máquinas, turbinas y otras tecnologías, incluso puede ser refinado e inyectado en las redes de tuberías de gas natural.

### 5.1.2. Biogás

El biogás es un producto que se genera de la descomposición de la materia orgánica. (Margarita Caballero, 2007)

El biogás es un gas combustible que se genera en dispositivos específicos o en medios naturales a partir de las diferentes reacciones de biodegradación que sufre la materia orgánica, que se manifiestan mediante la acción de microorganismos, así como de otros factores en ausencia de aire.

Este gas está formado por un 29% dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), 60 % metano ( $\text{CH}_4$ ), y otros gases, aunque en cantidades menores que los anteriores. El principal es el metano, y es este gas el que sirve como combustible. De esta manera en este trabajo se dirigió el enfoque al metano. (Margarita Caballero, 2007)

El Metano ( $\text{CH}_4$ ) es un hidrocarburo del gas natural, al tiempo de ser un muy potente e importante gas de efecto invernadero (GEI). De los GEI emitidos como resultado de las actividades humanas, para el 2008 el metano se convirtió en el segundo más importante después del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), contabilizando el 14% de las emisiones globales de GEI.

El metano juega un rol central en el calentamiento global derivado del incremento de las actividades humanas. Un ejemplo claro es la concentración global atmosférica de metano que ha ido crecido de un valor pre-industrial de aproximadamente cerca de un 150% de incremento. Según estimaciones, las emisiones de metano están proyectadas para incrementarse 23% para llegar a 7,904 millones de toneladas métricas de dióxido de carbono para 2020. Retomando el origen del metano tiene diversas fuentes, según proyecciones de emisiones de gas metano generado por los rellenos sanitarios municipales en el mundo, las mismas tenderán a incrementarse de 747.4 millones de toneladas métricas de equivalente de dióxido de carbono generadas en 2005 a 816.9 para el año 2020, o un 9.2% de incremento como se muestra en la *Tabla 12* (Margarita Caballero, 2007). (Margarita Caballero, 2007)



Tabla 12 Proyección de emisiones de gas metano de los rellenos sanitarios municipales: 2005-2020 (en MtCO<sub>2</sub>eq)

Fuente: USEPA, 2006. MtCO<sub>2</sub>eq = millones de toneladas métricas de equivalente de dióxido de carbono

País	2005	2010	2015	2020
Estados Unidos	130.6	125.4	124.1	123.5
China	46	47.5	48.8	49.7
México	33.3	35.5	37.4	39.2
Canadá	25.3	27.7	30.7	33.6
Rusia	34.2	33.2	32.2	31.1

### 5.1.3. Generación de biogás en un RS

La generación del biogás en los RS son la tercera fuente antropogénica más grande teniendo un 13% de las emisiones de metano, en los RS los factores principales que tienen influencia en la cantidad de gas emitido, principalmente por la forma de operar el relleno, la construcción del mismo y los tipos de materiales orgánicos depositados. (Rosa, Edwardl, Muricio, & Bacellis, Julio 2013)

En los rellenos controlados, la extracción del biogás se realiza de la siguiente manera:

- Líneas de conducciones: Se conduce el biogás a través de tuberías de polietileno de alta densidad hasta el centro de aspiración y medición.
- Sistema de eliminación de agua: Se usan instalaciones frigoríficas para eliminar la mayor cantidad de vapor de agua que arrastra el biogás.
- Pozos de captación: A través de tuberías de polietileno de alta densidad captan el biogás en pozos.
- Antorcha: Las instalaciones de extracción y aprovechamiento de biogás deben tener una antorcha como medida de seguridad para eliminar el biogás que no se aprovecha.
- Sistema de eliminación de compuestos corrosivos: Se utiliza cuando se detecta que el biogás contiene una cantidad importante de algún compuesto corrosivo

### 5.1.4. Captación de biogás

Los trabajos de captación se realizan mediante una red de procesos, la cual comienza con los pozos de venteo, son construidos al excavar paralelepípedos de aproximadamente 2 x 2 m de base por 1.5 a 2 m de profundidad como se muestra en la *Figura 30*.

En el fondo se extiende una capa de piedra de canto rodado, con un tamaño mínimo de 60 mm. Ver *Figura 31*.



En el centro de la base se coloca un cilindro metálico de 50 cm de diámetro con orificios, el cual se rellenará con la misma calidad de piedra ya indicada. La superficie final se sellará con arcilla o lámina de P.E.A.D. La chimenea se elevará de 2.5m a 3 m sobre la cubierta definitiva.

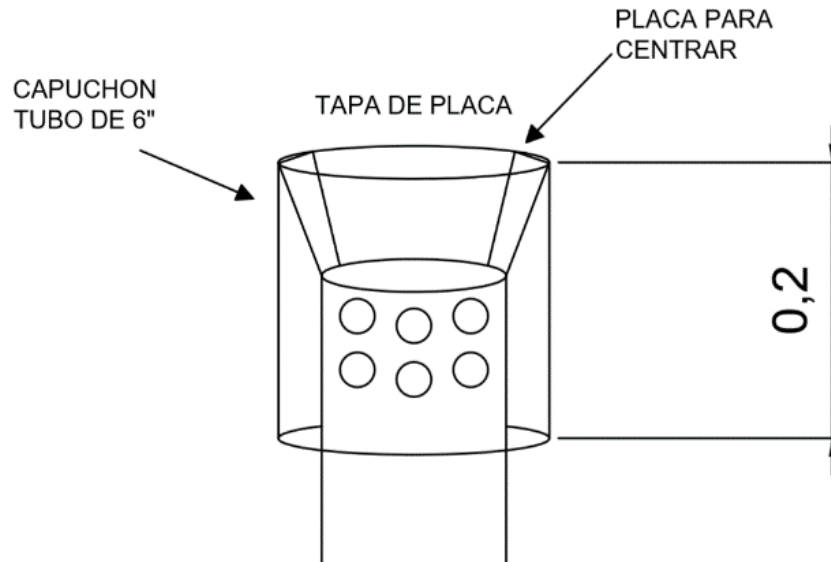


Figura 30 Esquema pozo de venteo (Elaboración propia)

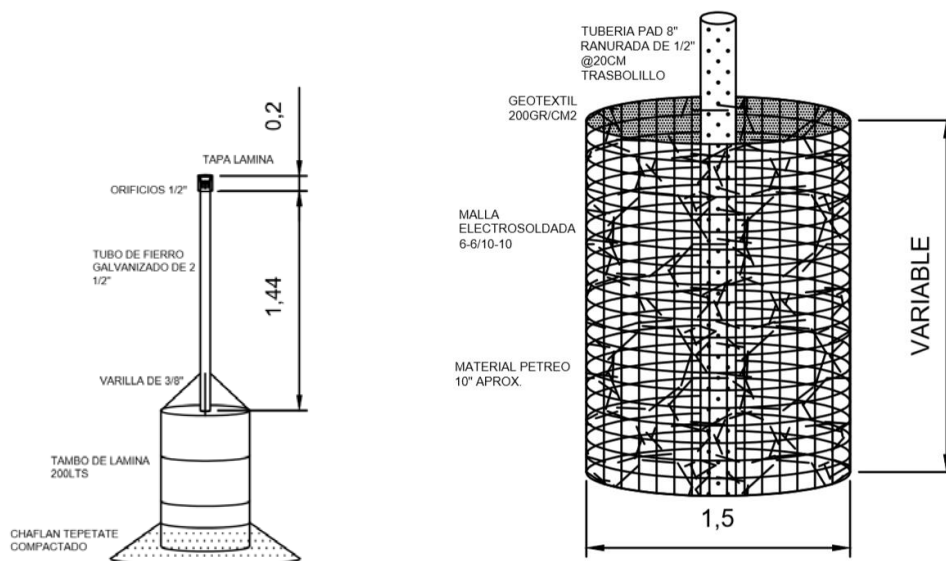


Figura 31 Dimensionamiento de un pozo de venteo (Elaboración propia)

### 5.1.5. Aprovechamiento potencial del biogás

Su aprovechamiento como un combustible puede llegar a ser una importante fuente de energía.

Su aprovechamiento en función de ventajas son las siguientes:

1. Reducción de riesgo de incendios en RS, los cuales tienen altos costos económicos, ambientales y políticos.
2. Al generar su propia energía, el gobierno local puede disminuir sus costos por pago de energía eléctrica
3. Mejora en la calidad de aire y reducción de olores, así como se logra una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, entre muchas otras estas son las más destacables. Ver Figura 16.

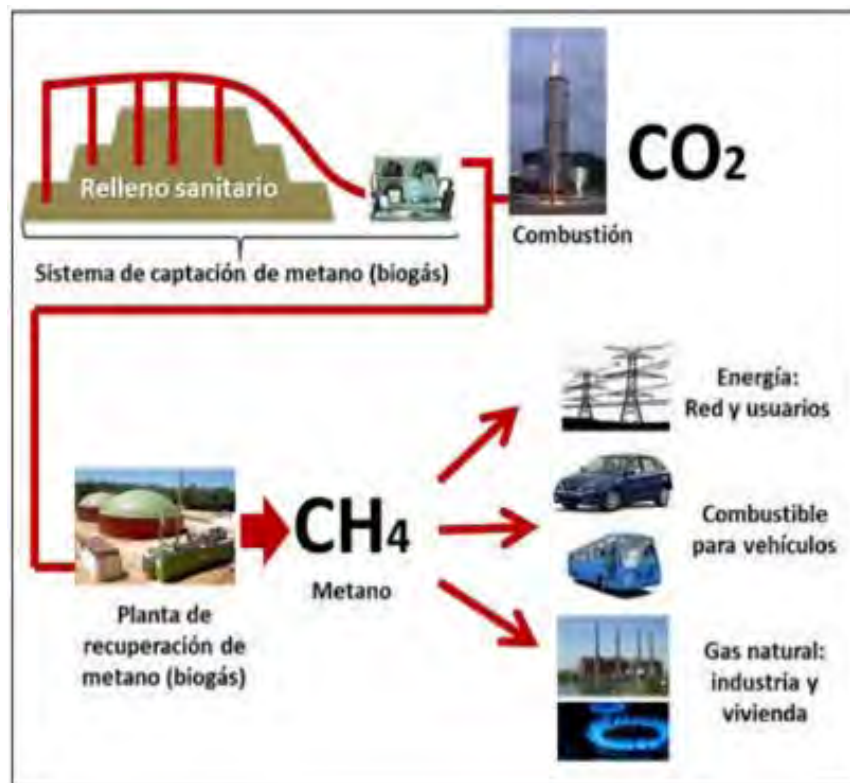


Ilustración 1 Captación y aprovechamiento de metano

Fuente: Adaptación de TECMEC

## 5.2. Generación potencial de metano teórica

Se estima el potencial de generación del biogás teórica, en condiciones estándar como locales; partiendo de una composición de los residuos, considerando principalmente su facilidad de degradación de los RSU.

### 5.2.1 Metodología CHONS

El MMB establece, con base en la precipitación local, la generación potencial de  $CH_4$ , en condiciones ideales de humedad y presencia de nutrientes. Se tiene como finalidad determinar el potencial de generación teórica ( $Lo$ ) basado en la metodología establecida por Tchobanoglous, en su obra Integrated Solid Waste Management. El proceso de cálculo se muestra a continuación (Tchobanoglous, 1994):

La *Tabla 13* que se muestra a continuación incluye las proporciones de cada uno de los elementos que integran a la fracción orgánica en peso seco.



Tabla 13 Composición química de los subproductos. Tomado de (MIA Proactiva Tlalnepantla 2011)

	% COMPOSICIÓN	PESO SECO	COMPOSICIÓN ELEMENTAL					
			C	H	O	N	S	CENIZAS
Residuos Alimenticios	23.57	7.07	3.39	0.45	2.65	0.18	0.03	0.35
Papel	8.24	7.74	3.36	0.46	3.40	0.02	0.01	0.46
Cartón	3.69	3.50	1.54	0.20	1.56	0.01	0.00	0.17
Residuos de Jardinería	4.46	1.78	0.85	0.10	0.67	0.06	0.005	0.08
Plásticos	20.87	20.45	12.27	1.47	4.66	0	0	2.05
Textiles	6.41	5.76	3.17	0.38	1.79	0.26	0.01	0.14
Hule	0.94	0.92	0.71	0.09	COMPONENTES	0.01	0	0.09
Cuero	0	0	0	0	0	0	0	0
Madera	6.78	5.42	2.68	0.32	2.31	0.01	0.05	0.081
Otros inertes	17.98	16.54	4.35	0.49	0.33	0.08	0.03	11.25
<b>TOTAL</b>	<b>92.94</b>	<b>69.216</b>	<b>32.357</b>	<b>3.999</b>	<b>17.412</b>	<b>0.656</b>	<b>0.102</b>	<b>14.684</b>

Esta tabla se elaboró a base de la selección de la rapidez de degradación de los residuos, clasificando en rápida y lenta degradación. Bajo estas condiciones óptimas la tasa de descomposición medida de producción de biogás, alcanza un pico de producción en los dos primeros años, comenzando a decrecer lentamente por periodos de cinco años, hasta los 25 años. (Tchobanoglous, 1994)

Por otra parte, es importante considerar que algunos compuestos orgánicos son de fácil degradación, como lo son los alimentos, inician su descomposición al tercer día de su disposición.

#### Descomposición Rápida (Degradación de 1 – 5 años)

- Comida
- Papel
- Cartón
- Jardinería ligera (Pasto)

#### Descomposición

##### Lenta (Degradación de 5 – 50 años)

- Piel
- Caucho
- Madera
- Textiles



Tabla 14 Clasificación por degradación orgánica. Adaptada del (MIA Proactiva Tlalnepantla 2011) - Rápida

RÁPIDA DESCOMPOSICIÓN ORGÁNICA						
			COMPOSICIÓN ELEMENTAL % Peso base seca			
COMPONENTES	% COMPOSICIÓN	PESO SECO	C	H	O	N
Residuos Alimenticios	23.57	7.071	3.394	0.453	2.659	0.184
Papel	8.24	7.746	3.369	0.465	3.408	0.023
Cartón	3.69	3.506	1.542	0.207	1.563	0.011
Residuos de Jardinería	4.46	1.784	0.853	0.107	0.678	0.061
<b>TOTAL</b>	<b>39.96</b>	<b>20.107</b>	<b>9.158</b>	<b>1.232</b>	<b>8.308</b>	<b>0.279</b>

Tabla 15 Clasificación por degradación orgánica. Adaptada del (MIA Proactiva Tlalnepantla 2011)- Lenta

LENTA DESCOMPOSICIÓN ORGÁNICA						
			COMPOSICIÓN ELEMENTAL % Peso base seca			
COMPONENTES	% COMPOSICIÓN	PESO SECO	C	H	O	N
Textiles	6.41	5.769	3.173	0.381	1.794	0.265
Hule	0.94	0.921	0.719	0.092	0	0.018
Cuero	0	0	0	0	0	0
Madera	6.78	5.424	2.685	0.325	2.316	0.011
<b>TOTAL</b>	<b>14.13</b>	<b>12.114</b>	<b>6.577</b>	<b>0.798</b>	<b>4.11</b>	<b>0.294</b>

En los resultados anteriores se integró una tabla con los porcentajes de los elementos que integran a la fracción orgánica CHONS, todo esto de acuerdo al tipo de descomposición que presentan.

Tabla 16 Fracción orgánica .Adaptada de (Tchobanougous, Gestión integral de residuos sólidos, Vol. 1, 1994)

lb/mol	C	H	O	N
	12	1	16	14
moles Totales				
Rápida D	0.7632	1.2320	0.5193	0.0199
Lenta D	0.5481	0.7980	0.1550	0.0210

Con base en la masa molecular de cada elemento. Se calculó el número de moles por cada unidad de masa, tanto para lenta como para rápida descomposición. Ver *Tabla 16*.

La obtención de la mol de rápida y lenta descomposición se calcula a partir de valor molar (CHON) entre la sumatoria de valores de las tablas de porcentaje de subproductos).

Considerando el elemento con menor cantidad de moles totales, se toma como uno (1) su proporción, por lo que los demás elementos tendrán una proporción mayor a uno.

Se estima así la cantidad de gas que se puede derivar de una rápida y lenta como se aprecia en la *Tabla 17*.



Tabla 17 Composición de las categorías de rápida y lenta descomposición. Adaptada de (Tchobanoglous, Gestión integral de residuos sólidos, Vol. 1, 1994)

COMPONENTE	Rápida Descomposición	Lenta Descomposición
Carbono	38.30	26.10
Hidrógeno	61.82	38.00
Oxígeno	26.06	7.41
Nitrógeno	1	1

Cada elemento de la tabla anterior se divide entre el número de moles del nitrógeno para obtener cada valor de descomposición.

De esta manera se entra al cálculo teórico de la descomposición establecida en el libro de (Chang, 1999).

### Descomposición orgánica.



Método para la determinación por tipo de descomposición:

- RÁPIDA DESCOMPOSICIÓN  $C_{38.30} H_{61.82} O_{26.06} N_1$
- LENTA DESCOMPOSICIÓN  $C_{26.10} H_{38} O_{7.83} N_1$

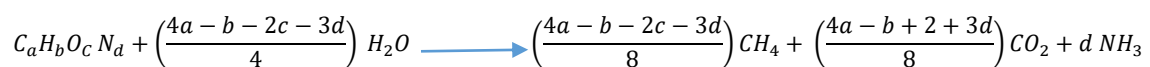
Para poder entrar al balance químico es necesario redondear los valores de mol como se muestra a continuación.

- RÁPIDA DESCOMPOSICIÓN  $C_{38} H_{61} O_{26} N_1$
- LENTA DESCOMPOSICIÓN  $C_{26} H_{38} O_7 N_1$

De esta manera se obtiene la parte de materia orgánica para realizar el balance.



Para el diseño se debe considerar el siguiente método preestablecido:



En este método se sustituyen los valores de acuerdo a su mol para determinar las cantidades exactas por reacción como se expresan en los números de color azul, para posteriormente realizar un balance químico por tipo de reacción.

- RÁPIDA DESCOMPOSICIÓN





- LENTA DESCOMPOSICIÓN



Dentro del Municipio de Tlalnepantla el clima predominante es semiseco y semifrío, por lo cual se toma como temperatura de diseño **17°C**; antes mencionado en el punto 2.3.2; este dato fue extraído de los datos climatológicos (Sistema de calidad y ambiente, 2017)

Para poder calcular la densidad es necesario expresar la temperatura en K, por lo que se realiza una conversión.

$$T = 273 + 17$$

$$T = 290 \text{ K}$$

Para la determinación de las características en el relleno es muy importante conocer las condiciones ideales, para ello se utilizó la ecuación de la atmósfera estándar extraída de (Sotelo, 1997), para la determinación de la presión atmosférica local.

$$\frac{p}{P_0} = (1 - 2.26 \times 10^{-5}z)^{5.256} \dots\dots\dots (1)$$

Se sustituyen los valores por los datos locales, en este caso el nivel del RST; el cual se encuentra en 2235 msnm.

$$P = (1 - 2.26 \times 10^{-5}(2235))^{5.256}$$

$$P_{atm} = 0.7615 \text{ atm}$$

Obteniendo una presión atmosférica local de 0.7615 atm

Al tomar la presión atmosférica y en términos ideales, se calcula la densidad de cada uno de los gases destacados:  $CH_4$  y  $CO_2$  con base en lo establecido en (Chang, 1999).

- METANO

$$d = \frac{PM}{RT} \text{ En donde tenemos que:}$$

P = Peso en mol, M = Presión atmosférica, R = índice establecido y T = Temperatura en kelvin

$$d = \frac{(16 \text{ g/mol})(0.7615 \text{ atm})}{(0.0821 \frac{\text{l*atm}}{\text{k*mol}})(290\text{k})} = 0.5117 \frac{\text{g}}{\text{l}}$$

Por otro lado, se tiene que la densidad se calcula de la siguiente manera:

$$d = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \dots\dots\dots (2)$$



Suponiendo que se tiene 1 mol de  $CH_4$  y la masa es de 16 g/mol. El volumen del gas se puede obtener a partir de la siguiente ecuación:

$$V = \frac{nRT}{P} \dots \dots \dots (3)$$

$$V = \frac{(1 \text{ mol})(0.0821 \frac{l \cdot atm}{K \cdot mol})(290 \text{ K})}{0.7615 \text{ atm}} = 31.2659 \text{ m}^3$$

Por lo tanto, sustituyendo en la ecuación (2) la densidad del metano se determina como:

$$d = \frac{16}{31.2659} = 0.5117 \frac{g}{l}$$

Teniendo 0.5117 g/l como resultado en ambos métodos.

- **DIOXIDO DE CARBONO**

De la misma manera como se determinó con el metano se determina con este gas, obteniendo lo siguiente:

$$d = \frac{(44 \text{ g/mol})(0.7615 \text{ atm})}{(0.0821 \frac{l \cdot atm}{K \cdot mol})(290 \text{ K})} = 1.4072 \frac{g}{l}$$

Teniendo 1.4072 g/l como resultado en ambos métodos. Ver *Tabla 18*.

### 5.2.2. Metodología Tchobanoglous

Esta metodología de forma teórica, permite brindar paso a paso la determinación del cálculo de la generación del biogás, por lo que parte desde las condiciones estándar para posteriormente aterrizarlas en las locales

#### 5.2.2.1 Condiciones Estándar

Son las características que predominan en la zona pese al lapso de tiempo que se estudien.

*Tabla 18 Condiciones estándar preestablecida*

Patm = 0.7515 atm				
Condiciones Estándar				
Metano			Dióxido de Carbono	
Densidad	0.5117	g/l	1.4072	g/l

#### 5.2.2.2 Condiciones Locales

Llevando el estudio a las condiciones locales para determinar los volúmenes de este relleno, se utilizó la ecuación (3) para la determinación del volumen del  $CH_4$  y  $CO_2$  producido respectivamente. Así como los valores de la ecuación CHONS obtenidos en el balance.



Dentro del Municipio de Tlalnepantla predomina el clima que es semiseco y semifrío, cuenta con una temperatura.

**Mínima de 10.3°C Máxima de 27.3 °C**

De la cual se utilizó la temperatura promedio de **17° C**.

Se usará el Método de Tchobanoglous para determinar la rápida o lenta descomposición. A continuación, se sustituyen los valores antes obtenidos en las siguientes expresiones:

$$\text{Metano} = \frac{\text{Valor molar de } CH_4 * \Sigma \text{ Peso Seco}}{\text{Valor del CHON} * \text{densidad}}$$

$$\text{Dióxido de carbono} = \frac{\text{Valor molar de } CO_2 * \Sigma \text{ Peso Seco}}{\text{Valor del CHON} * \text{densidad}}$$

- **RÁPIDA DESCOMPOSICIÓN**

$$\text{Metano} = \frac{(80)(20.107)}{(727)(0.5117)} = 4.32 \frac{m^3}{kg}$$

$$\text{Dióxido de Carbono} = \frac{(792)(20.107)}{(727)(1.4072)} = 15.56 \frac{m^3}{kg}$$

- **LENTA DESCOMPOSICIÓN**

$$\text{Metano} = \frac{(96)(12.114)}{(557)(0.5117)} = 4.086 \frac{m^3}{kg}$$

$$\text{Dióxido de Carbono} = \frac{(660)(12.114)}{(557)(1.4072)} = 10.20 \frac{m^3}{kg}$$

Con los datos obtenidos de la rápida y lenta descomposición se consideran para obtener la cantidad teórica total de la generación de gas de ambos componentes. Como se muestra a continuación.

- **Rápida Descomposición**

$$\frac{Vol}{lb} = \frac{4.32+15.56}{20.107} = 0.989 \frac{m^3}{kg}$$

- **Lenta descomposición**

$$\frac{Vol}{lb} = \frac{4.08+10.20}{12.114} = 1.179 \frac{m^3}{kg}$$

Considerando solo metano, se obtiene la cantidad teórica total de la generación de gas.

- **Rápida descomposición**

$$\frac{Vol}{lb} = \frac{4.32}{20.107} = 0.2148 \frac{m^3}{kg}$$

- **Lenta descomposición**





$$\frac{Vol}{lb} = \frac{4.08}{12.114} = 0.3368 \frac{m^3}{kg}$$

Considerando solo Dióxido de Carbono, se obtiene la cantidad teórica total de la generación de gas.

- Rápida descomposición

$$\frac{Vol}{lb} = \frac{15.56}{20.107} = 0.7738 \frac{m^3}{kg}$$

- Lenta descomposición

$$\frac{Vol}{lb} = \frac{10.20}{12.114} = 0.8420 \frac{m^3}{kg}$$

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con los valores obtenidos es importante concluir en lo que representan en la generación de biogás.

### 6.1. Resultados del modelo teórico

El procedimiento de Tchobanoglous resultó ser uno de los modelos más prácticos en el aspecto de orden y secuencia de la obtención de datos, se puede observar que la descomposición lenta arroja un valor de  $0.84m^3/kg$ , mientras que en la rápida  $0.77 m^3/kg$ , esto puede ser por factores como presentar las mismas características de los residuos, por lo que, al no ser variable, se vuelve predecible la producción en cualquiera de las dos degradaciones.

Los manejos de los valores determinaron la densidad, el volumen total, la presión atmosférica y la conversión de unidades a través condiciones ideales o locales, las cuales ayudaron a la aproximación de datos arrojados por los modelos antes mencionados.

### 6.2. Resultados del MMB

El modelo mexicano del biogás MMB permite la estimación de la generación y recuperación de metano. Lo que representa la base para la evaluación de la factibilidad de los proyectos de aprovechamiento de metano en los sitios de disposición final.

Esta estimación busca establecer un parámetro de la producción diaria, así como la producción acumulativa del metano a largo plazo.

El modelo provee automáticamente valores para el índice de generación de metano (k) y la generación potencial de metano (Lo). Estos valores fueron desarrollados usando datos específicos de RS de México, y la relación entre los valores de k y Lo observados en RS de E.U.



Los valores de  $k$  y  $L_0$  varían dependiendo de la precipitación promedio anual y pueden utilizarse para proyectar la generación de biogás en RS municipales localizados en las diferentes regiones de México. (Aguilar, 2011)

El método utiliza una ecuación de degradación de primer orden que supone que la generación de biogás llega a su máximo después de un periodo de tiempo, antes de la generación de  $CH_4$  (ver ecuación 1)

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

El modelo asume que:

- La composición de residuos promedio aplica para todo México
- No toma en cuenta los efectos del alto contenido de residuos de comida.

Las tendencias del modelo con una sola  $k$  son:

- Sobreestima la generación en climas húmedos
- Subestima generación en climas secos

Las desventajas presentadas por este modelo son las siguientes:

- Los valores de  $k$  están basados en información limitada.

Para su manejo se requiere que el usuario alimente datos detallados. Este evalúa la eficiencia de captura dentro de las tablas, como se muestra en la *Tabla 19*.

Una vez ingresada la información solicitada, el programa arrojó los resultados mostrados en la tabla 19 y 20 e Figura 32. Dichos resultados tuvieron una similitud significativa con los resultados obtenidos con la metodología teórica. La gráfica mostrada en la ilustración 14 incluye resultados abarcando el periodo de 1996 a 2030, proyectando el flujo de biogás de metano a un 50% de tres maneras que son: generación de biogás, recuperación de biogás estimada y la recuperación de biogás actual; esta última no se encuentra representada ya que aún no se ha logrado captar dicho gas en el RST, debido que se encuentra en una etapa de estudios de factibilidad.

En la gráfica generada, se expresan dos tendencias, generación de biogás y recuperación de biogás estimada, las cuales, al observar y compararse en rango, la producción se presenta inicialmente entre 1998 y 2008, con crecimiento constante al 2013 y llegando en un último pico al 2024; las tendencias de los puntos teóricos de mayor producción de biogás se observan en 2008, 2013 y 2024.



Tabla 19 Tabla resumen de la generación teórica de biogás.

Adaptada del MMB

Methane to Markets

Modelo Mexicano de Biogás v.2  
Fecha: Marzo 2009  
Desarrollado por SCS Engineers, para la Agencia de Protección al Aire

PROYECCIONES DE LA GENERACION Y RECUPERACION DE BIOGAS DE RELLENOS SANITARIOS  
PAGINA DE ALIMENTACION

1	Nombre del Sitio:	RELLENO SANITARIO TLALNEPANTLA
2	Ciudad:	CIUDAD DE MÉXICO
3	Estado:	México
4	Región:	Centro/ Interior
5	¿Existen datos de caracterización de residuos específicos al relleno sanitario en cuestión?	SI
6	Año de apertura del sitio:	1998
7	Disposición anual del año mas reciente:	250 Mg
8	Año de disposición (arriba):	2016
9	Año de clausura o año de clausura proyectado:	2024
10	Incremento anual estimado de la disposición:	0.4%
11	Profundidad promedio del relleno sanitario:	24 m
12	Prácticas de diseño y manejo del relleno sanitario:	2
13a	¿Ha habido algún incendio en el relleno sanitario?	SI
13b	Si la respuesta de 13a es "SI", indique el área del impacto en % del total:	1%
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):	1998
15	Porcentaje del área con residuos con sistema de captura:	90%
16	Porcentaje del área con residuos con cubierta final:	57%
17	Porcentaje del área con residuos con cubierta intermedia:	29%
18	Porcentaje del área con residuos con cubierta diaria:	1%
19	Porcentaje del área con residuos sin cobertura:	4%
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?	SI
23b	Si la respuesta de 23a es "SI", ¿esto ocurre solo después de flower?	No
24	Eficiencia de captura estimada:	62%



Modelo Mexicano de Biogás v.2

Fecha: Marzo 2009

Desarrollado por SCS Engineers, para la Agencia de Protección al Ambiente de EEUU



PROYECCIONES DE LA GENERACION Y RECUPERACION DE BIOGAS DE RELLENOS SANITARIOS  
RELLENO SANITARIO TLALNEPANTLA  
CIUDAD DE MÉXICO, México

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 (m³/hr)	Reducción de Emisión Estimadas**	
			(m³/hr)	(pies³/min)	(mmBtu/hr)		(m³/hr)	(pies³/min)	(mmBtu/hr)			(tonnes CH <sub>4</sub> /yr)	(tonnes CO <sub>2</sub> eq/yr)
1998	224,386	224,386	0	0	0.0	62%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1999	316,545	540,931	229	135	4.1	62%	142	84	2.5	0.2	0	445	9,346
2000	290,390	831,321	530	312	9.5	62%	328	193	5.9	0.5	0	1,030	21,629
2001	274,070	1,105,391	775	456	13.9	62%	481	283	8.6	0.8	0	1,508	31,665
2002	276,643	1,382,035	982	578	17.6	62%	609	359	10.9	1.0	0	1,910	40,114
2003	366,919	1,748,953	1,174	691	21.0	62%	728	428	13.0	1.2	0	2,283	47,941
2004	442,641	2,191,594	1,442	849	25.8	62%	894	526	16.0	1.5	0	2,804	58,876
2005	404,459	2,596,053	1,764	1,038	31.5	62%	1,094	644	19.5	1.8	0	3,430	72,028
2006	398,592	2,994,646	2,020	1,189	36.1	62%	1,252	737	22.4	2.1	0	3,927	82,461
2007	508,640	3,503,286	2,249	1,323	40.2	62%	1,394	821	24.9	2.3	0	4,372	91,811
2008	329,663	3,832,948	2,572	1,514	46.0	62%	1,595	939	28.5	2.6	0	5,001	105,027
2009	314,635	4,147,583	2,687	1,581	48.0	62%	1,666	980	29.8	2.8	0	5,224	109,709
2010	290,651	4,438,235	2,781	1,637	49.7	62%	1,724	1,015	30.8	2.9	0	5,406	113,534
2011	323,808	4,762,043	2,846	1,675	50.9	62%	1,764	1,039	31.5	2.9	0	5,534	116,206
2012	327,948	5,089,991	2,944	1,733	52.6	62%	1,825	1,074	32.6	3.0	0	5,724	120,210
2013	247,318	5,337,309	3,042	1,790	54.4	62%	1,886	1,110	33.7	3.1	0	5,914	124,201
2014	250,195	5,587,504	3,053	1,797	54.5	62%	1,893	1,114	33.8	3.1	0	5,935	124,644
2015	246,211	5,833,715	3,070	1,807	54.9	62%	1,903	1,120	34.0	3.1	0	5,969	125,357
2016	250,023	6,083,738	3,086	1,816	55.1	62%	1,913	1,126	34.2	3.2	0	6,001	126,013
2017	251,000	6,334,738	3,109	1,830	55.5	62%	1,927	1,134	34.4	3.2	0	6,044	126,931
2018	251,900	6,586,638	3,134	1,844	56.0	62%	1,943	1,144	34.7	3.2	0	6,093	127,956
2019	252,800	6,839,438	3,161	1,860	56.5	62%	1,960	1,153	35.0	3.2	0	6,146	129,065
2020	253,700	7,093,138	3,190	1,877	57.0	62%	1,978	1,164	35.3	3.3	0	6,202	130,243
2021	254,600	7,347,738	3,220	1,895	57.5	62%	1,996	1,175	35.7	3.3	0	6,261	131,475
2022	255,500	7,603,238	3,251	1,914	58.1	62%	2,016	1,186	36.0	3.3	0	6,321	132,750
2023	256,500	7,859,738	3,283	1,932	58.7	62%	2,036	1,198	36.4	3.4	0	6,384	134,057
2024	257,500	8,117,238	3,316	1,952	59.3	62%	2,056	1,210	36.7	3.4	0	6,447	135,394
2025	0	8,117,238	3,349	1,971	59.8	62%	2,076	1,222	37.1	3.4	0	6,512	136,752
2026	0	8,117,238	3,119	1,836	55.7	62%	1,934	1,138	34.6	3.2	0	6,065	127,358
2027	0	8,117,238	2,914	1,715	52.1	62%	1,806	1,063	32.3	3.0	0	5,665	118,971
2028	0	8,117,238	2,730	1,607	48.8	62%	1,692	996	30.2	2.8	0	5,308	111,460
2029	0	8,117,238	2,564	1,509	45.8	62%	1,590	936	28.4	2.6	0	4,986	104,710
2030	0	8,117,238	2,415	1,422	43.2	62%	1,498	881	26.8	2.5	0	4,696	98,624
2031	0	8,117,238	2,281	1,342	40.8	62%	1,414	832	25.3	2.3	0	4,434	93,118
2032	0	8,117,238	2,158	1,270	38.6	62%	1,338	788	23.9	2.2	0	4,196	88,119
2033	0	8,117,238	2,047	1,205	36.6	62%	1,269	747	22.7	2.1	0	3,979	83,566
2034	0	8,117,238	1,945	1,145	34.8	62%	1,206	710	21.5	2.0	0	3,781	79,404
2035	0	8,117,238	1,851	1,090	33.1	62%	1,148	676	20.5	1.9	0	3,599	75,588
2036	0	8,117,238	1,765	1,039	31.5	62%	1,094	644	19.6	1.8	0	3,432	72,076
2037	0	8,117,238	1,686	992	30.1	62%	1,045	615	18.7	1.7	0	3,278	68,835
2038	0	8,117,238	1,612	949	28.8	62%	1,000	588	17.9	1.7	0	3,135	65,834
2039	0	8,117,238	1,544	909	27.6	62%	957	563	17.1	1.6	0	3,002	63,048
2040	0	8,117,238	1,481	871	26.5	62%	918	540	16.4	1.5	0	2,879	60,452

Tabla 20 Tabla de proyección MMB

Adaptada del MMB



Las columnas en azul (años de proyección y generación de biogás) de la *Tabla 20* extraída del MMB 2.0, nos muestra la concentración en  $m^3$  de biogás producido partiendo de 1998 .

En el periodo de 2013 al 2025 se presenta la mayor generación de biogás (recuadros rojos) comenzando a disminuir gradualmente a partir del 2026; esto es gracias a que la edad del RS se refleja en el tiempo de degradación de los residuos dispuestos en el sitio.

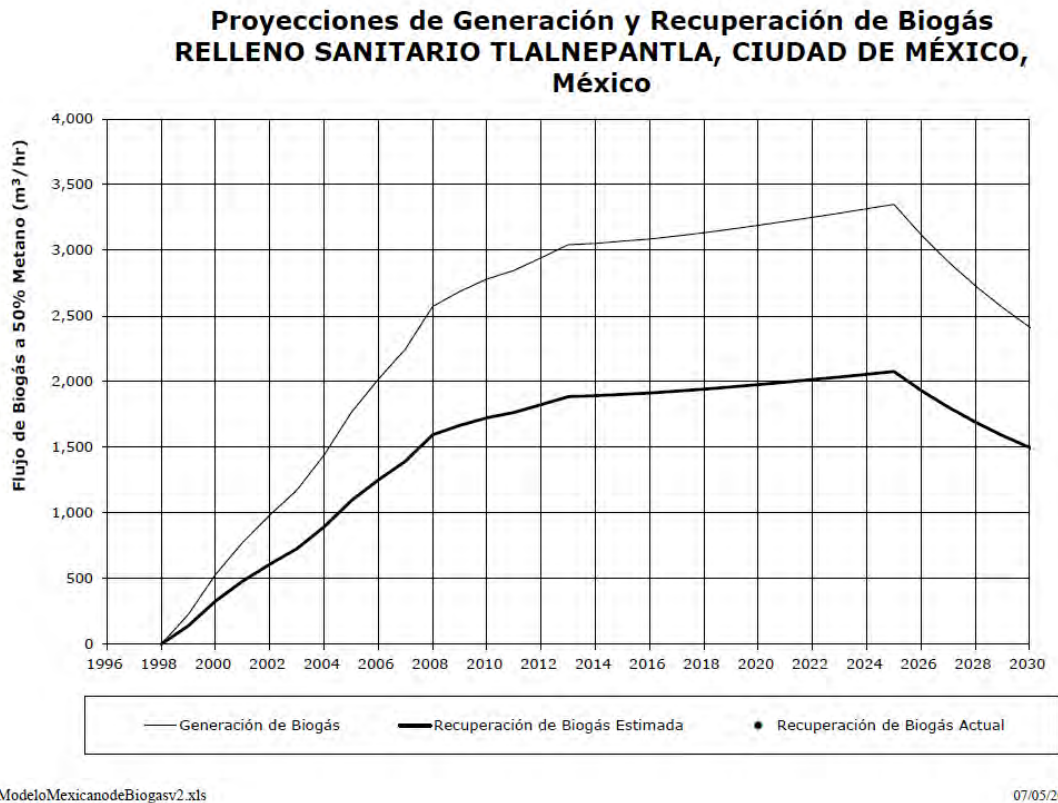


Figura 32 Proyección Y recuperación del biogás .Adaptada del MMB



### 6.3. Análisis comparativo

Se muestra un resumen de los resultados obtenidos por ambos modelos (MMB y los del Tchobanoglous) en las *Tablas 21 y 22* en donde se aprecia claramente los datos arrojados.

Tabla 21 Comparativa de resultados – Modelo Teórico

(Elaboración propia)

Condiciones Locales			
Potencial de generación por unidad de masa ( $m^3/kg$ )		Metano	Dióxido de Carbono
	Rápida Descomposición	4.32	15.56
	Lenta Descomposición	4.086	10.2
	Cantidad - Teórica Total de generación media ( Ambos gases)		
	Rápida Descomposición	0.989	
	Lenta Descomposición	1.179	
	Cantidad Teórica de Metano		
	Rápida Descomposición	0.2148	
	Lenta Descomposición	0.3368	
	Cantidad Teórica de Dióxido de Carbono		
	Rápida Descomposición	0.7738	
	Lenta Descomposición	0.842	

Tabla 22 Concentraciones del MMB

(Elaboración propia)

Potencial de generación por unidad de masa ( $\frac{m^3}{kg}$ )	Cantidad teórica total MMB	
		METANO
	Rápida Descomposición	3.134
Lenta Descomposición	3.086	

La Tabla 21 incluye únicamente los cálculos del Modelo Teórico de Tchobanoglous proyectadas a condiciones locales y clasificadas por el tipo de descomposición lenta o rápida; tomando las siguientes partidas: Condiciones Locales, Teórica Total de generación media, Teórica de Metano y de Dióxido de Carbono.

Esta tabla se establece los valores de ambos gases, siendo componentes básicos del biogás, se observa que tanto en lenta como en rápida descomposición, la concentración de  $CO_2$  es mayor al  $CH_4$ , impactando este último mucho a causa de su grado de toxicidad hacia el medio ambiente.

El segundo apartado de esta tabla muestra la cifra de la generación media de dichos componentes, así como por componente su cantidad teórica de metano y dióxido de carbono, representada en ( $\frac{m^3}{kg}$ ).



Los resultados del modelo teórico en rápida y lenta descomposición arrojados fueron  $4.32 \frac{m^3}{kg}$  y  $4.086 \frac{m^3}{kg}$  respectivamente, mientras que las cifras arrojadas del MMB fueron  $3.134 \frac{m^3}{kg}$  y  $3.086 \frac{m^3}{kg}$  como se observa en la *Tabla 22*.

Los datos que se tomaron como válidos para este estudio fueron los de la *Tabla 22*, es decir los arrojados del MMB. Los resultados del MMB son proyecciones de la generación y recuperación de biogás mucho más exactas y acordes a las condiciones del sitio, es decir considera varios aspectos: localización, año de apertura, disposición anual, clausura del sitio, incidentes, profundidad de la disposición de residuos, los porcentajes de los tipos de coberturas existentes, compactación, afloramientos de lixiviados en caso de lluvias; para posteriormente arrojar con esto dos porcentajes: eficiencia de captura estimada del 62% y del área sin cobertura que en este caso está dado en un 4%, el cual este nos reafirma el tiempo de vida útil restante del RST, ver *Tabla 19*.



## 7. CONCLUSIONES

La investigación en este trabajo se ha elaborado para identificar el potencial de generación y recuperación de biogás en el RST, considerando la edad, composición y cantidad de residuos sólidos dispuestos, para proyectar la recepción de residuos hacia el final de la vida útil del relleno.

La identificación del tipo de degradación y el análisis de las características locales e ideales de la zona con una mayor influencia, beneficia al desarrollo del biogás como lo son para la implementación de nuevas tecnologías para su aprovechamiento en un tiempo a futuro.

La generación de metano en el relleno es incrementada a su vez mal aprovechada, en el mejor de los casos es quemado y en muchas ocasiones liberado a la atmósfera, incrementando factores que propician problemas a la salud y afectaciones al ambiente.

Comparar la metodología (Teórica y MMB) con las mediciones directas en campo propició a una visualización en el rango de error entre ambos, para proveer un análisis de situaciones durante el tiempo de vida útil de un proyecto de esta naturaleza, enmarcando los aspectos más importantes como la selección del diseño o la operación del sitio de disposición.

La realización de este trabajo conlleva una investigación de generación, recolección y su disposición en esta zona debido a su cierre próximo del RST. Ocurrido esto el municipio de Tlalnepantla desarrolló e implementó un programa de concientización y educación ambiental, para toda la población municipal.

Este programa incluye la implementación módulos de información y capacitación a cada colonia que se localiza en el territorio de Tlalnepantla y sus cercanías, la cual se verá beneficiada por el desarrollo de proyecto de RST a través de su disminución de RSU.

El ayuntamiento realiza una intensa campaña de eliminación del concepto RS, para sustituirlo por el de residuo limpio y separado. De esta forma, se pretende concientizar a la población respecto a la conveniencia de llevar a cabo procedimientos modernos de manejo de los residuos, desde la misma fuente individual de generación hasta su disposición final. De esta forma, la cantidad y características de los residuos a confinarse, será respectivamente, menor y exclusivamente no reciclable, favoreciendo el reusó y mayor aprovechamiento de los materiales y el ahorro de la energía. Este programa, contempla hacer del conocimiento general las ventajas que ofrece el sistema de disposición de residuos en relleno sanitario.

El objetivo principal se logró al proveer una evaluación de la factibilidad y los beneficios potenciales al capturar y proponer los diversos usos del biogás generado a través del MMB en donde los datos se tomaron como válidos debido a que son proyecciones de la





generación y recuperación de biogás mucho más exactas en comparación con teórica y los extraídos en campo.

La determinación a través del MMB considerada muchos aspectos: ubicación, año de apertura, disposición anual, clausura del sitio, incidentes, profundidad de la disposición de residuos, etc. Aspectos que no son tomados en cuenta en la modelo de Tchobanoglous.

Además de los beneficios energéticos del uso del biogás, la captura de este ayuda a la reducción de las emisiones hacia el ambiente. Un ejemplo son los contaminantes contenidos en el biogás algunos de ellos son carcinógenos , es decir son agentes físicos, químicos o biológicos potencialmente capaces de producir cáncer al exponerse a tejidos vivos .Tomando de base lo anterior, un carcinógeno es un agente que puede producir una neoplasia, causar otros efectos adversos a la salud como la aparición temprana de tumores. Algunos otros problemas para el bienestar público incluyen el mal olor del biogás y el potencial de migración del mismo dentro y fuera de la propiedad del RS, que podría causar incendios y/o explosiones. Es por ello que su captación se ve mucho más atractiva al tener mayores beneficios.



## 8. BIBLIOGRAFÍA

- (Censo de Población y Vivienda 2016, I. (s.f.).
- Aguilar, V. (2011). *Modelo mexicano para la estimación de la generación de biogás*. Revista académica, México.
- Chang, R. (1999). *Química*. México: Mc Graw Gill.
- Climatológica, E. (2018). *Municipio Tlalnepantla*. Edo. de México.
- climatológica-data-org, E. (2018). *Climatología , Tlalnepantla*.
- Compilación. (2010). *Guía para el diseño, construcción y operación de RS manual*.
- de Ingeniería, I. (Octubre 2016). *Revista Digital Universitaria*. México.
- Estévez S. Giraldo E. (2001). Análisis y comportamiento de compuestos orgánicos volátiles en las emisiones de biogás. *Relleno Sanitario Doña Juana*, 1:4.
- Fundación, C. y. (2017). *Meteorología y Climatología*. México.
- Gispert, I. (2016). *Condiciones climatológicas*. México.
- Inventories, I. ... (2006). *Intergovernmental Panel on Climate Change .Volume 5 (Waste) Tabla 3.1. U.S.*
- Margarita Caballero, S. L. (2007). Efecto Inverdadero , Calentamiento Global y Cambio Climático . *Revista Digital Universitaria*, 12.
- Metheir, M. A. (2008). *Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales*. Obtenido de Jaranillo.
- Rosa, S.-R. M., Edwardl, S., Muricio, G.-M., & Bacellis, R. (Julio 2013). *Superficial Methane Emissions from a Landfill in Merida Yucatán , México*. Ciudad de México: Ingeniería Investigaciones y Tecnología.
- (2017). *Sistema de calidad y ambiente*. Estado de México.
- Sotelo, G. (1997). *Hidráulica General Vol.1*. México D.F.: LIMUSA.
- Tchobanoglous. (1994). *Gestión integral de residuos sólidos , Vol 1*. Madrid: mc graw hill interamericana española.
- Tchobanoglous. (1994). *Gestión integral de residuos sólidos .Vol 1 Madrid Interamericana*. España: Mc graw hill.