



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
UNIDAD TICOMÁN**

**“ESTIMACIÓN DE METANO EN TRES RELLENOS SANITARIOS  
EN EL ESTADO DE MÉXICO A TRAVÉS DE IMÁGENES  
SATELITALES”**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN GEOCIENCIAS Y ADMINISTRACIÓN DE LOS  
RECURSOS NATURALES

PRESENTA:

ERICK DE ÁNGEL LARA HERNÁNDEZ

DIRECTORES:

DR. DANIEL ROMO RICO

DR. FACUNDO JOAQUÍN MÁRQUEZ ROCHA

CIUDAD DE MÉXICO, DICIEMBRE DE 2018



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*CARTA CESION DE DERECHOS*

En la Ciudad de México, el día 30 del mes de noviembre del año 2018, el (la) que suscribe Erick de Ángel Lara Hernández alumno(a) del Programa de Maestría en Geociencias y Administración de Recursos Naturales, con número de registro A160672 adscrito(a) a ESIA Unidad Ticomán, manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Daniel Romo Rico (Director) y Dr. Joaquín Facundo Márquez Rocha (Director externo) y cede los derechos del trabajo intitulado Estimación de metano en tres rellenos sanitarios del Estado de México a través de imágenes satelitales, 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 permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección sun.versatile@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Erick de Ángel Lara Hernández

---

Nombre y firma



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTORES DE TESIS

Ciudad de México, a 12 de marzo de 2018

El Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIA Ticomán en su sesión Ordinaria No. 2 celebrada el día 22 del mes de febrero conoció la solicitud presentada por el(la) alumno(a):

<u>Lara</u>	<u>Hernández</u>	<u>Erick de Ángel</u>							
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre (s)							
Con registro: <table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td>A</td><td>1</td><td>6</td><td>0</td><td>6</td><td>7</td><td>2</td></tr></table>			A	1	6	0	6	7	2
A	1	6	0	6	7	2			

Aspirante de: Maestría en Geociencias y Administración de los Recursos Naturales

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:  
"Estimación de metano en tres rellenos sanitarios del Estado de México a través de imágenes satelitales"

De manera general el tema abarcará los siguientes aspectos:  
Estimar el potencial de metano de tres rellenos sanitarios del Estado de México  
Interpretar imágenes satelitales de los rellenos sanitarios  
Co-relacionar los datos obtenidos entre los tres rellenos sanitarios

2.- Se designan como Directores de Tesis a los Profesores:  
Dr. Daniel Romo Rico (Interno) y Dr. Facundo Joaquín Márquez Rocha (Externo)

3.- El trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesina será elaborado por el alumno en:  
Fuentes bibliográficas, medios electrónicos y trabajos de investigación de referencia.  
que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente hasta la aceptación de la tesis por la Comisión Revisora correspondiente:

Directores de Tesis

\_\_\_\_\_  
Dr. Daniel Romo Rico

\_\_\_\_\_  
Dr. Facundo Joaquín Márquez Rocha

Aspirante  
  
\_\_\_\_\_  
C. Erick de Ángel Lara Hernández

Presidente del Colegio  
  
\_\_\_\_\_  
Ing. Francisco Javier Escamilla López





# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 19:00 horas del día 29 del mes de noviembre del 2018 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIA Ticomán para examinar la tesis titulada:  
"Estimación de metano en tres rellenos sanitarios del Estado de México a través de imágenes satelitales"

Presentada por el alumno:

Lara  
Apellido paterno

Hernández  
Apellido materno

Erick de Ángel  
Nombre(s)

Con registro: 

A	1	6	0	6	7	2
---	---	---	---	---	---	---

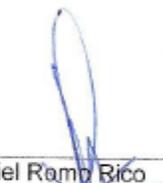
aspirante de:

MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y ADMINISTRACION DE LOS RECURSOS NATURALES

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Daniel Romo Rico

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Facundo Joaquín Márquez Rocha

  
\_\_\_\_\_  
M. en C. Gabriel Baltierra Jasso

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Julie Roberge

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Francisco Estrada Godoy

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Arturo Ortiz Ubilla



UNIDAD TICOMÁN  
SECCION DE ESTUDIOS  
DE  
POSGRADO E INVESTIGACION

## **AGRADECIMIENTOS**

Principalmente a mis padres y hermano por el apoyo e impulso que me han brindado durante los lapsos más difíciles y de manera constante; el agradecimiento se refleja en acciones y momentos de complacencia en común.

A Eduardo Saucedo que me ha ofrecido su amistad por años, pero sobretodo, el apoyo necesario y suficiente para poder lograr y concluir este trabajo.

Al Dr. Francisco Estrada y al M. en C. Gabriel Baltierra por sus ideas y aportaciones sustanciales en este trabajo; así como a los Doctores Daniel Romo y Facundo Joaquín quienes ofrecieron su apoyo constante en el desarrollo de la investigación.

A los ingenieros Fabián Aguilera y Omar Bailey que forman parte de este trabajo y más aún, de la trayectoria en mi formación del posgrado como buenos amigos y compañeros.

## ÍNDICE

ACRÓNIMOS.....	8
RESUMEN .....	10
1. INTRODUCCIÓN .....	12
1.1 OBJETIVOS .....	13
1.2 HIPÓTESIS.....	13
2. ANTECEDENTES.....	14
2.1 GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS EN MÉXICO.....	15
2.1.1 SITUACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO Y EL ESTADO DE MÉXICO .....	16
2.2 SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL .....	17
2.2.1 CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO DE LOS RS .....	18
2.3 RESIDUOS SÓLIDOS.....	20
2.3.1 PROCESAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS .....	21
2.3.2 PROCESO DE DEGRADACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS .....	22
2.3.3 RED DE RESIDUOS SÓLIDOS DEL VALLE DE MÉXICO (RRSVM).....	23
2.4 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN RELLENOS SANITARIOS .....	24
2.4.1 CÁLCULOS DE EMISIONES DE BIOGÁS EN SDF .....	27
2.4.2 MODELO MEXICANO DE BIOGÁS.....	28
2.4.3. MANEJO DEL BIOGÁS GENERADO EN SDF .....	36
2.5 PROYECCIONES DE GENERACIÓN DE BIOGÁS .....	38
2.6 MÉTODOS DE MEDICIÓN Y PREDICCIÓN DE METANO EN RS .....	39
2.7 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA .....	41
2.7.1 PERCEPCIÓN REMOTA.....	42
2.7.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SATÉLITE UTILIZADO.....	43
2.7.3 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LA TIERRA (LST).....	45
2.8 ÁREAS DE ESTUDIO .....	47
2.8.1 CUAUTITLÁN IZCALLI.....	47
2.8.2 ATIZAPÁN DE ZARAGOZA .....	49
2.8.3 TLALNEPANTLA DE BAZ.....	53
3. METODOLOGÍA Y RESULTADOS.....	57
3.1 RS CUAUTITLÁN IZCALLI.....	57

3.2 RS ATIZAPÁN DE ZARAGOZA .....	61
3.3 RS TLALNEPANTLA DE BAZ.....	64
3.3.1 FUENTES DE INFORMACIÓN .....	66
3.3.2 PREPROCESAMIENTO .....	68
3.3.3 PROCESAMIENTO.....	70
3.3.4 MODELO PARA ESTIMACIONES DE <i>CH<sub>4</sub></i> .....	89
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	90
4.1 IMPACTO POBLACIONAL CON LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN SITIO .....	90
4.2 COORDENADAS GEOGRÁFICAS DE LOS SITIOS .....	91
4.3 GENERACIÓN DE GEI EN RS .....	93
5. CONCLUSIONES .....	94
5.1 RECOMENDACIONES .....	96
ANEXO .....	97
ÍNDICE DE TABLAS .....	98
ÍNDICE DE FIGURAS.....	99
6. REFERENCIAS .....	102
DIRECCIONES DE INTERNET .....	105

## ACRÓNIMOS

<b>SIGLAS</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
AGV	Ácidos grasos volátiles
BTU	Unidad térmica Británica
CDMX	Ciudad de México
CH4	Metano
COCEF	Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza
CO2	Dióxido de carbón
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONAPO	Consejo Nacional de Población
DOC	Carbono Orgánico Degradable
DOF	Diario Oficial de la Federación
DOCF	Fracción de Carbono Orgánico Degradable
DRL	Degradación de residuos muy lenta
DRML	Degradación de residuos moderadamente lenta
DRMR	Degradación de residuos moderadamente rápida
DRR	Degradación de residuos muy rápida
ETM+	Enhanced Thematic Mapper
EUA	Estados Unidos de América
FORSU	Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos
GEI	Gases de efecto invernadero
GIZ	Agencia de Cooperación Internacional Alemana
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
IIE	Instituto de Investigaciones Eléctricas
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático
LGEEPA	Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
LGPGIR	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
LST	Temperatura superficial del sitio
M2M	Mercado de Metano
MCF	Factor de corrección de metano
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
MSS	Multispectral Scanner System
MtCO2e	Millones de Toneladas de CO2 equivalentes
NASA	Agencia espacial norteamericana
ND	Nivel digital
NE	Método de normalización de Emisividad
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica

PNPGIR	Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
PR	Percepción remota
PROFEPA	La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente de México
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
RS	Rellenos Sanitarios
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
RRSVM	Red de Residuos Sólidos del Valle de México
SCS	Stearns, Conrad & Schmidt
SDF	Sitios de disposición final
SEDEMA	Secretaría de Medio Ambiente
SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIG	Sistema de Información Geográfico
SIGAM	Sistema de Gestión Ambiental de Medellín
SW	Método Split Window
TB	Temperatura de Brillo
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
USEPA	Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México

## RESUMEN

En las últimas décadas se ha generado el interés de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en diferentes países combatiendo el cambio climático; a partir del Protocolo de Kioto, en los años noventa, se han generado diversos estudios en atención los factores que originan estos gases, en particular el dióxido de carbono y metano.

Diversos estudios señalan que alrededor del mundo, en las grandes ciudades, se tiene la preocupación sobre la generación, manejo y disposición final de los residuos sólidos que aumentan de forma exponencial conforme al crecimiento de sus pobladores. Esto conlleva, el uso de rellenos sanitarios para la compactación de la fracción orgánica apeándose a las normas de operación de su manejo y del sitio.

Para la estimación de la generación de gases que emiten estos sitios, se realizan técnicas de muestreo dependiendo la infraestructura del relleno sanitario, así como sus pozos de venteo (o chimeneas) que comúnmente son encendidos para transformar el biogás en dióxido de carbono, que es un contaminante con relación menor a 21 veces que el metano.

En este estudio se presenta una metodología empírica que se apoya en las estimaciones y proyecciones de generación de biogás (con el Modelo Mexicano de Biogás 2.0), y los cálculos de la temperatura superficial a través de imágenes satelitales tomadas con la banda de infrarrojo térmico a través de un periodo de cinco años.

Los resultados obtenidos con las imágenes satelitales y algunas muestras en sitio, presentan una correlación con los datos de temperaturas superficiales y la generación de biogás en uno de los sitios, los cuales permiten generar escenarios óptimos para el empleo de sensores remotos como herramienta principal, así como la precisión en los cálculos de estimaciones de metano.

Palabras clave: Modelo Mexicano de Biogás 2.0, Rellenos Sanitarios, Biogás, Metano, Percepción remota

## **ABSTRACT**

In recent decades there has been interest in reducing greenhouse gas emissions in different countries fighting climate change; From the Kyoto Protocol, in the nineties, several studies have been conducted in attention to the factors that cause these gases, in particular carbon dioxide and methane.

Several studies indicate that around the world, in large cities, there is a concern about the generation, management and final disposal of solid waste that increases exponentially according to the growth of its inhabitants. This entails the use of sanitary landfills for the compaction of the organic fraction, adhering to the operation norms of its management and the site.

For the estimation of the generation of gases emitted by these sites, sampling techniques are carried out depending on the infrastructure of the sanitary landfill, as well as its venting wells (or chimneys) that are commonly lit to transform biogas into carbon dioxide, which is a pollutant with a ratio less than 21 times that of methane.

This study presents an empirical methodology based on the estimations and projections of biogas generation (with the Modelo Mexicano de Biogas 2.0), and the calculations of the surface temperature through satellite images taken with the thermal infrared band. through a period of five years.

The results obtained with the satellite images and some on-site samples correlate with the data on surface temperatures and the generation of biogas in one of the sites, which allow generating optimal scenarios for the use of remote sensors as a main tool, as well as the precision in calculations of methane estimates.

Keywords: Mexican Model of Biogas 2.0, Landfills, Biogas, Methane, Remote Perception

## 1. INTRODUCCIÓN

La disposición definitiva de los residuos sólidos representa hoy en día uno de los problemas más importantes que afectan en términos ambientales las ciudades más pobladas de México y el mundo. La generación de residuos per cápita en la Ciudad de México y la zona Metropolitana oscila entre 1 y 1.5 kilogramos por día (*Kg /día*), lo cual demanda un manejo eficaz en su recolección, gestión, almacenamiento y disposición final en los espacios adecuados para su manejo y aprovechamiento de los mismo.

En el país, el sistema más adecuado y comúnmente empleado es el tiradero a cielo abierto, aunque en los últimos 20 años se han implementado en grandes ciudades los rellenos sanitarios (RS), los cuales permiten seleccionar y aprovechar la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos con la intención de degradarlos en celdas compactadas debajo del suelo y así aprovechar (mediante su manejo adecuado) el gas generado por este proceso.

En su mayoría, los RS se han convertido en tiraderos a cielo abierto, y si éstos no están controlados, generan gases de efecto invernadero (GEI) lo cuales son participes de las alteraciones del cambio climático, así como problemas de contaminación en áreas forestales y cuerpos de agua por lixiviados. Sin embargo, es posible recuperar o aprovechar el biogás generado en estos sitios para convertirlos en energía a través de su incineración o la transformación energía eléctrica.

Para poder cuantificar el biogás generado en estos sitios, comúnmente se emplean metodologías y herramientas tecnológicas *in situ*, las cuales ofrecen las variables necesarias para el emplear el Modelo Mexicano de Biogás 2.0 y así obtener el biogás que puede ser aprovechado para la generación de energía eléctrica. Aunado a ello, la literatura actual nos permite emplear la percepción remota (PR) como una herramienta adicional, la cual se encuentra en constante mejora para obtener datos más precisos y poder realizar estudios históricos únicamente con las coordenadas geográficas de los sitios.

En el presente estudio se realiza una correlación entre los datos estimados por el Modelo Mexicano de Biogás 2.0 y el uso de imágenes satelitales, quienes ofrecen información de la temperatura superficial del sitio (LST) y los pozos de venteo, con lo cual es posible realizar estimaciones y análisis del gas metano ( $CH_4$ ) que es posible aprovechar en el tiempo de vida de los Rellenos Sanitarios.

El resultado de este trabajo muestra escenarios óptimos para continuar con líneas de investigación y así mismo incentivar, perfeccionar y hacer uso eficiente de las herramientas con sus metodologías en las áreas involucradas. Los datos permiten realizar una valoración y reflexión en cuestiones económicas, ambientales y energéticas, ya que el aprovechamiento de estos recursos como fuente alterna de energía tiene un gran potencial en ciudades con grandes poblaciones que se enfrentan a la generación exponencial de residuos por año.

## 1.1 OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Estimar la generación de metano anual en tres rellenos sanitarios correspondientes a tres municipios contiguos de Estado de México, determinando la correlación de datos de muestreo *in situ* con el cálculo de temperaturas superficiales a través de imágenes satelitales.

### OBJETIVOS PARTICULARES

1. Obtener las coordenadas geográficas de los Rellenos Sanitarios y de sus pozos de venteo para determinar las temperaturas superficiales de cada zona de estudio a través de la percepción remota.
2. Estimar la generación y recuperación de Biogás recabando las variables necesarias de los Rellenos Sanitarios para emplear el Modelo Mexicano de Biogás 2.0.
3. Aplicar el modelo empírico para estimar promedios mensuales y anuales de emisión de  $CH_4$  en los Rellenos Sanitarios.
4. Evaluar las correlaciones resultantes de la LST de los Rellenos Sanitarios con el sensor Landsat-7 y los valores obtenidos en campo para evaluar el potencial de esta herramienta en la estimación de gases de efecto invernadero.

## 1.2 HIPÓTESIS

La generación anual de metano ( $CH_4$ ) en Rellenos Sanitarios se puede estimar y correlacionar con la información de las bandas térmicas del sensor ETM+ (satélite Landsat-7) y datos de muestreo *in situ*.

## 2. ANTECEDENTES

Las primeras investigaciones en este campo comenzaron en Estados Unidos al iniciarse la década de los setenta y a partir de los ochenta muchos países iniciaron programas que alentaban la utilización del gas proveniente de los rellenos sanitarios (Lawson, 1989).

La contaminación ambiental generada por los residuos sólidos urbanos (RSU) como GEI, es una problemática a nivel mundial; es por ello que se han desarrollado mecanismos alternativos que incentivan la reducción y el aprovechamiento de los gases generados por la descomposición de la materia orgánica. Dos GEI principales que conforman el biogás del relleno, son el metano y dióxido de carbono ( $CO_2$ ), siendo el primero 20 a 21 veces más contaminante que el segundo (Bitrán & Asociados, 2006).

En México, la problemática de la disposición final de residuos ha aumentado considerablemente en las últimas décadas ante los incrementos demográficos en áreas urbanas, así mismo se ha demostrado el interés en el desarrollo de políticas públicas para su manejo adecuado considerando cuestiones ambientales y de salud para la población. Como resultado de estos sitios, se tiene en gran medida la contaminación de los suelos y aguas de los territorios de almacenaje, generando con ello investigación en áreas económicas, sociales y energéticas.

En julio del 2010, ICMA Latinoamérica inició con el desarrollo del proyecto “Experiencias en Proyectos de Recuperación de Metano de Rellenos Sanitarios Municipales”. El proyecto correspondió a una iniciativa de M2M (Mercado de Metano) de la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (EPA), en conjunción con la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF), para desarrollar una guía en apoyo a los municipios mexicanos en el desarrollo de estudios para evaluar la factibilidad para utilizar el metano generado en los rellenos sanitarios para la producción de fuentes alternativas de energía limpia.

La demanda energética de México aumenta cada año alrededor de un 4% y se cubre principalmente por medio del petróleo, carbón y gas natural. Este país emergente es el noveno emisor más importante de GEI en el mundo, dado que aporta el 1.7% del total de emisiones de GEI a nivel mundial. Actualmente, más del 75% de los mexicanos residen en ciudades. La mayoría de estos 95 millones de habitantes tienen patrones de consumo poco sustentables: cada año generan alrededor de 42 millones de toneladas de residuos. Los residuos urbanos se almacenan principalmente en RS y su aprovechamiento energético ocurre únicamente en casos aislados.

Los estudios realizados en el país para calcular la generación de biogás en RS no han seguido la misma metodología, tampoco han utilizado el mismo modelo matemático, por lo que es importante estandarizar criterios para poder realizar comparaciones válidas respecto a la evaluación de recuperación de biogás (Aguilar et al. 2010). A través de los años se han ido

generando y perfeccionando diversos modelos matemáticos para estimar el potencial de generación de biogás en rellenos sanitarios de México. Modelos para la estimación de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), la versión previa del Modelo Mexicano de Biogás (2003), el Modelo del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC 2006), entre otros, se han empleado durante la última década para prever la generación de biogás.

En este estudio se empleó el Modelo Mexicano de Biogás 2.0, desarrollado por los SCS Engineers de USEPA en el año 2009 que forma parte de las estimaciones de metano. La segunda herramienta principal de la metodología es la percepción remota, la cual se basa en el empleo de la información de imágenes satelitales para obtener información atmosférica y de la superficie terrestre. Pero, pocos estudios se han desarrollado sobre la valoración de emisiones de  $CH_4$  en sitios de disposición final (SDF); el uso de diferentes sensores remotos como son MODIS, ASTER, AVHRR, SCIAMANCHY, AIRS y ETM+ han permitido desarrollar metodologías actuales para obtener información de la superficie como humedales, quema de campos de cultivo, tormentas de polvo, inundaciones, entre otros.

## **2.1 GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS EN MÉXICO**

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 8 de octubre de 2003, faculta en su Artículo 25, a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) para formular e instrumentar el Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (PNPGIR) con base en el Diagnóstico Básico respectivo. Asimismo, la Ley prevé la elaboración y actualización periódica de Diagnósticos Básicos, a fin de conocer la cantidad y composición de los residuos, así como la infraestructura disponible para el manejo de cada uno de los tipos de residuos que considera: urbanos, de manejo especial, peligrosos y minero-metalúrgicos.

En cumplimiento a lo anterior, el primer Diagnóstico Básico se realizó en el 2006, el cual sirvió de base para elaborar el PNGIR para el periodo 2009-2012. A fin de conocer la situación de los residuos en el país hasta el 2012, y en cumplimiento a lo que establece la Ley General, se elaboró el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos.

De acuerdo a la Secretaría de Desarrollo Social, durante el 2010 se generaron en México 40,058 miles de toneladas de residuos sólidos urbanos (SEDESOL, 2011), de los cuales, más del 60% terminaron en rellenos sanitarios.

Estudios han demostrado que la composición de la basura en México varía dependiendo de la región, teniendo un efecto en el poder calorífico, el cual es mayor en los Estados del Centro

como la Ciudad de México (CDMX) y el estado de México con un valor de 14.9  $MJ/Kg$ , a diferencia de los Estados del Sur que poseen valores de 12.7 MJ/kg (Arvizu, 2007).

En el año 2010, se contabilizó en el país la presencia de 186 rellenos sanitarios, en donde los Estados que cuentan con el mayor número de éstos son: Guanajuato, Hidalgo, Nuevo León, Puebla y Tamaulipas (SEMARNAT, 2011). Con base en ello, se estimó un potencial de generación para producción de biogás de 4,982 millones de  $m^3$ .

Actualmente, se cuenta en una base de datos de 245 municipios de alta prioridad (mayor a 50,000 habitantes) con la ubicación de los sitios de disposición final, de los cuales 108 de ellos, tienen una prioridad superior para valorizar los RSU.

### 2.1.1 SITUACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO Y EL ESTADO DE MÉXICO

En México, según la cifra más reciente publicada en el 2015, la generación de Residuos Sólidos Urbanos alcanzó 53.1 millones de Toneladas, lo que representó un aumento del 61.2% con respecto a 2003 (10.24 millones de t más generadas en ese periodo). Si se expresa por habitante, alcanzó 1.2 kilogramos en promedio diariamente en el mismo año (SERMARNAT, 2015).

La Ciudad de México y 35 municipios metropolitanos conurbados del Estado de México forman parte de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), esta zona es considerada como la región que genera mayores volúmenes de residuos sólidos municipales en el país, en primer lugar, el Estado de México seguido de la Ciudad de México. De acuerdo a los datos reportados en el primer informe del año 2017 por la Secretaria del Medio Ambiente del Distrito Federal (SEDEMA), la generación total de residuos en la Ciudad de México durante el año 2016 era de 12,920 Ton/día, producidos por 8,851,080 habitantes con una generación *per cápita* entre 0.86 y 2.44  $Kg/hab/día$  (SEDEMA, 2016). Esta generación total incluye residuos: domiciliarios, comercios, servicios, controlados y diversos (incluyendo la Central de Abasto de CDMX). Para el Estado de México, se tiene el dato de generación de R.S.U. en el año 2012 con la cantidad de 6,798.12 mil toneladas, correspondiente al 16% del total nacional, 6.789 millones de toneladas, de las cuales se integra la problemática de 59 municipios (SEMARNAT, 2014).

Los RS que funcionan con la infraestructura básica son los ubicados en los municipios de Atizapán de Zaragoza y Tlalnepantla, así como 7 tiraderos controlados, los que tienden a convertirse en RS y corresponden a los municipios de Coacalco, Ecatepec, Naucalpan, Nezahualcóyotl, Tecámac, Teotihuacán y Tepotzotlán. Todos ellos con una captación diaria de 3,162 toneladas, que representan 32.1% de la demanda total del valle (CAM, 2010).

## 2.2 SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL

La basura que se acumula o almacena en lugares aislados de las comunidades llamados vertederos o tiraderos a cielo abierto, son considerados sitios de disposición final; en general existen del tipo controlado y no controlado. La diferencia entre ellos corresponde a que en los primeros se toman medidas para evitar alteraciones ecológicas y se utiliza al terreno como medio receptor; con base en el manejo adecuado de residuos en este sitio se habla entonces de un Relleno Sanitario.

Conforme lo establece el Diario Oficial de la Federación (DOF) en el año 2004, un Relleno Sanitario es definido como una obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, con el fin de controlar, a través de la compactación e infraestructura adicionales, los impactos ambientales (NOM-083-SEMARNAT, 2003).

Los Rellenos Sanitarios seguirán siendo la vía de evacuación más atractiva para los residuos sólidos urbanos. Según el lugar, hasta el 95% de los residuos sólidos que se generan en todo el mundo, actualmente se depositan en los SDF (Colmenares-Mayanga & Santos-Bonilla, 2007; El-Fadel et al., 1997; Friedrich & Trois, 2011). Esto incluye abrir sitios incontrolados, así como sus contrapartes controladas con ayuda de infraestructura e ingeniería.

Según Themelis & Ulloa (2007), los SDF se pueden catalogar en dos clases, los que cuentan con un sistema completo de recolección de gases, recirculación de lixiviados, geomembrana, además de que llevan un control completo de entradas de materias; por otro lado, están los que simplemente son tiraderos donde los RSU son depositados sin ningún control o norma que los rijan.

En México, la disposición final de los RSU se rige con base en la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004) con respecto a: Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de RSU y de manejo especial.

De acuerdo con esta norma, existen tres tipos de SDF: Los rellenos sanitarios, los rellenos de tierra controlados y los sitios no controlados, mismos que se describen a continuación:

1. Relleno Sanitario. Es una obra de infraestructura, que aplica métodos de ingeniería para evitar la contaminación del suelo, agua y aire que provocan los residuos, por causa de la generación de lixiviados y GEI, entre otros.
2. Relleno de Tierra Controlado. Es el lugar para la disposición final de los residuos sólidos que no cuenta con la infraestructura propia de un relleno sanitario, pero donde se dan las condiciones mínimas para la compactación y cobertura diaria de los residuos y que cuenta parcialmente con inspección, vigilancia y aplicación de las medidas necesarias para el cumplimiento de las disposiciones establecidas (Robles-Martínez, 2008).

3. Sitio no controlado. Es un sitio inadecuado de disposición final en el cual se depositan los residuos sin ningún control técnico, por lo que recibe el nombre de tiradero a cielo abierto.

Además, la norma categoriza los SDF de acuerdo a la cantidad de toneladas de RSU y de manejo especial que ingresan por día, como se establece en la siguiente tabla (Cárdenas, 2014).

Tipo	Tonelaje recibido por día
A1	Mayor a 750
A2	100-750
B	50-100
C	10-50
D	Menor a 10

*Tabla 1. Categoría de los sitios de disposición final*

Para la selección del sitio se deben considerar los siguientes factores (Jiménez, 2005):

1. Disponibilidad de terreno. Considerando un tiempo mínimo de un año para que sea rentable.
2. Comunicación. Debe de ser de fácil acceso para el transporte de basura y transitable en su interior.
3. Disponibilidad de la tierra. Se requiere material para cubrir los desechos.
4. Condiciones climáticas. No se deben situar en zonas con vientos importantes.
5. Hidrología. No debe haber corrientes de agua ni ser un suelo inundable o poseer un acuífero de cierta calidad.
6. Geología. Se buscarán suelos impermeables que aislen los acuíferos.

Si se respetan las condiciones de operación, en especial, cubrir con tierra diariamente los desechos, un relleno sanitario no produce olores, gases o incendios ni genera ratas.

La descomposición orgánica, que se realiza en el relleno eleva la temperatura entre 65° y 70°C.

## 2.2.1 CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO DE LOS RS

Dentro de las consideraciones ideales de diseño se encuentran (Jiménez, 2001):

- Evitar la contaminación del agua mediante un sistema de impermeabilización compuesto y drenaje que no permita una carga hidráulica mayor de 30cm sobre la membrana

- Contar con una estabilidad adecuada en las zonas más críticas.
- Determinar la capacidad de campo para los residuos sólidos por disponer.
- Calcular la producción de lixiviados (potencial y real)
- Calcular las necesidades de agua para la operación del relleno
- Estimar la producción de biogás
- Dimensionar la estructura hidráulica necesaria para el manejo de los escurrimientos.
- Dimensionar la celda (frente de trabajo).
- Prever el acceso y los desvíos de carga,
- Estimar 0.12 hectáreas (*Ha*) por tonelada (*Ton*) al día para la construcción del relleno sanitario para una vida útil de 10 años.
- Un cargador frontal por cada 300 toneladas de manejo diario de residuos y un compactador por cada 600 toneladas de manejo diario de residuos.

La tabla 2 muestra diversos aspectos que deben considerarse para el diseño y desarrollo de los rellenos sanitarios (Cisneros, 2001).

Ventajas	Desventajas
Cuando hay disposición del terreno es la opción más económica	En áreas muy pobladas el costo se incrementa demasiado por la falta de terreno y transporte.
Es un sistema que no requiere procesamiento	Su localización en zonas residenciales puede ocasionar un fuerte rechazo.
No requiere pretratamientos sofisticados	Requiere mantenimiento aún después de ser cerrado.
Es una operación muy flexible	La producción de metano puede ser un factor de alto riesgo
Se pueden recuperar suelos de mala calidad	Hay necesidad de tratar de lixiviados.

*Tabla 2. Comparativa del diseño de R.S.*

## 2.3 RESIDUOS SÓLIDOS

En general, se tienen diversas definiciones sobre los residuos sólidos, que, dependiendo su fuente de generación, disposición final o aprovechamiento, se especifica su significado. Partiendo del hecho que, un residuo sólido es cualquier material físico desechado, el cual puede o no utilizarse, la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) en su artículo 3º, Fracción XXXI lo define como:

*Cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó.*

Con base en lo anterior, en este trabajo se considerarán a los RSU como los residuos sólidos generados dentro de un área urbana, los cuales se encuentran involucrados con situaciones económicas, sociales y ambientales. Así, la composición de los residuos dependerá de las zonas rurales, semiurbanas y urbanas, lo cual generará diferente, y a la vez particular, información para su estudio.

Como menciona Cárdenas (2014), la generación y composición de residuos es distinta entre regiones, ciudades y países, lo cual varía evidentemente en tiempo y espacio. En un mismo lugar, la composición cambia durante el año, sobre todo la fracción fácilmente biodegradable, representada principalmente por los residuos de alimentos (Robles-Martínez, 2008).

Evidentemente, existe una relación directa entre la generación de RSU y el estatus de la población: estadísticamente, las variables socioeconómicas corresponden a los ingresos y, en consecuencia, el consumo y desecho de productos per cápita, es decir, a mayor riqueza de la población, mayor generación de RSU (Jiménez-Cisneros, 2002).

Con base en los datos de consulta de INEGI y SEMARNAT en el 2015, se obtuvo la figura 1, en la cual se muestra el incremento poblacional del país con una relación directamente proporcional con la generación de sus residuos. En ella puede apreciarse que el crecimiento de generación de residuos es mucho mayor en los últimos años.

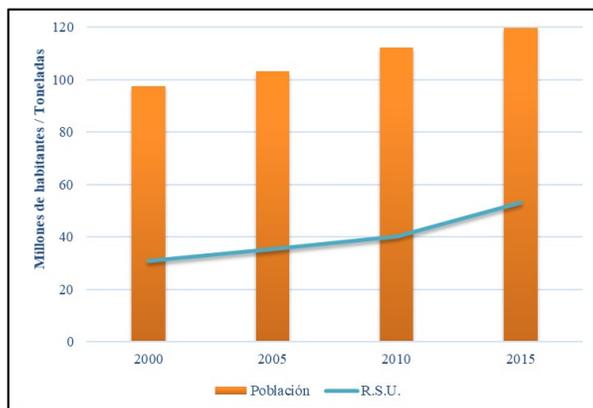


Figura 1. Comparación de los incrementos de la población mexicana y la generación de R.S.U con.

Por otro lado, como resultado de la degradación natural de los residuos sólidos, estos se convierten en corto tiempo en un activo foco de infección, ya que atrae y provoca la proliferación de fauna nociva, causando alteraciones a la salud (Escamirosa-Montalvo et al., 2011). Aunado a esto, las emisiones a la atmósfera de los gases generados de la descomposición anaerobia de la materia orgánica contenida en los RSU, que puede llegar a ser mayor al 50%, colaboran en gran parte al calentamiento global, mientras que los efluentes líquidos pueden llegar a contaminar las aguas subterráneas a los SDF donde se encuentran dispuestos los RSU.

La demanda energética de México aumenta cada año alrededor de un 4% por ciento y se cubre principalmente por medio del petróleo, carbón y gas natural. Este país emergente es el noveno emisor más importante de GEI en el mundo, dado que aporta el 1.7% del total de emisiones de GEI a nivel mundial. Actualmente, más del 75% de los mexicanos residen en ciudades. La mayoría de estos 95 millones de habitantes tienen patrones de consumo poco sustentables: cada año generan alrededor de 42 millones de toneladas de residuos. Los residuos urbanos se almacenan principalmente en rellenos sanitarios y su aprovechamiento energético ocurre únicamente en casos aislados.

### 2.3.1 PROCESAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

Jiménez Cisneros (2005), Señala que el manejo adecuado de los residuos sólidos incluye el control de la generación, almacenamiento, recolección, transferencia, transporte, procesamiento y disposición final. Todos ellos deben ser efectuados bajo criterios que tomen en cuenta cuestiones de salud pública, economía, tecnología, estética, así como la conservación y el uso eficiente de los recursos.

Los objetivos que se buscan mediante el manejo de los residuos son los siguientes:

1. Controlar la diseminación de enfermedades
2. Evitar problemas de contaminación del suelo, agua y aire
3. Optimizar el uso de los recursos mediante el reciclado
4. Mejorar la imagen de las ciudades
5. Organizar y controlar la “pepena” de los residuos sólidos

El manejo metódico de los desechos sólidos se inició en 1930, en Inglaterra. Las técnicas que se contaba en esa época, y que aún subsisten para el manejo de residuos sólidos en algunos países, son:

1. Vertido sobre terreno
2. Vertido al agua
3. Mezclado con el suelo
4. Alimento para animales
5. Recuperación de grasas y aceites

### 2.3.2 PROCESO DE DEGRADACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

Como lo menciona Cárdenas Moreno (2014), la degradación de la materia orgánica de los residuos comienza desde el almacenamiento o transporte, sin embargo, desde el momento en que los residuos son depositados y enterrados, en condiciones de anaerobiosis, se inicia una serie de procesos fisicoquímicos y biológicos que, dependiendo de la composición y de las condiciones ambientales, establecerán la cantidad y calidad de los efluentes (lixiviados y biogás) (Colomer-Mendoza & Robles-Martínez, 2011).

#### Procesos fisicoquímicos

La degradación fisicoquímica no depende solamente de la naturaleza de los residuos, sino también de otros factores como la humedad inicial, el agua (pluvial) percolada y su pH, el grado de fragmentación y compactación de los residuos, la interacción entre las distintas fracciones de residuos y su capacidad de campo.

#### Procesos Biológicos

La degradación de los RSU por procesos biológicos en un sitio de disposición final, se lleva a cabo en un periodo relativamente largo, cuya duración está en función, al igual que en los fisicoquímicos, de múltiples factores y parámetros, de los cuales dependerán las velocidades de consumo de los diferentes sustratos (los RSU) presentes y la secuencia en que se lleven a cabo.

El consumo total del  $O_2$  causada por un metabolismo aerobio al inicio de la disposición es indispensable para la producción de biogás, donde puede llevarse a cabo la mineralización completa de sustratos biodegradables, conduciendo a las formas oxidadas de los diferentes elementos que constituyen a la materia orgánica, siendo los metabolitos finales: el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), agua ( $H_2O$ ), carbonatos ( $CO_3^{2-}$ ), bicarbonatos ( $HCO_3^-$ ), nitratos ( $NO_3^-$ ), los sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ) y los fosfatos ( $PO_4^{4-}$ ) (Robles-Martínez, 2008).

Una vez que el sistema se encuentra en ausencia de oxígeno atmosférico, la materia orgánica es convertida en productos finales estables y al mismo tiempo el proceso genera biogás, mayormente metano ( $CH_4$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ) (Forster-Carneiro et al., 2012).

En general, el proceso de descomposición de los residuos puede dividirse de cinco etapas (Tchobanoglous et al., 1998), las cuales no se basan en datos observados en laboratorio o en campo, sino que son consideraciones teóricas (Laner, 2011):

- Fase I. Aeróbica. Es una fase relativamente corta, comienza cuando los componentes orgánicos biodegradables son colocados en el relleno sanitario y estos sufren una descomposición biológica bajo condiciones aerobias.
- Fase II. Transición. En esta fase comienza a descender la concentración de oxígeno e inician las condiciones anaerobias, ocurre un proceso de fermentación en el que es o no posible la formación de lixiviados. En caso de que existan lixiviados el pH de esta

fase líquida comienza a caer por el incremento de ácidos grasos volátiles (AGV) y al efecto de las elevadas concentraciones de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) dentro del medio.

- Fase III. Ácida. En esta fase se acelera la actividad microbiana iniciada en la fase anterior con la producción de cantidades significativas de AGV y pequeñas cantidades de gas de hidrógeno.
- Fase IV. Metanogénica. Esta fase se caracteriza por la conversión del ácido acético y el gas de hidrógeno en metano ( $CH_4$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ), la producción de metano alcanza su más alto nivel.
- Fase V. Maduración. Esta fase es mucho menos activa en cuanto a la generación de gases se refiere, viene caracterizada por una disminución de la humedad y la conversión del material biodegradable que anteriormente no estaban disponibles.

Como se observa en la figura 2, la velocidad de generación del gas de RS disminuye significativamente, porque la mayoría de los nutrientes disponibles se han diluido en el lixiviado durante las fases anteriores, y los sustratos que quedan en el medio sólido son de una degradación lenta (Tchobanoglous et al., 1998).

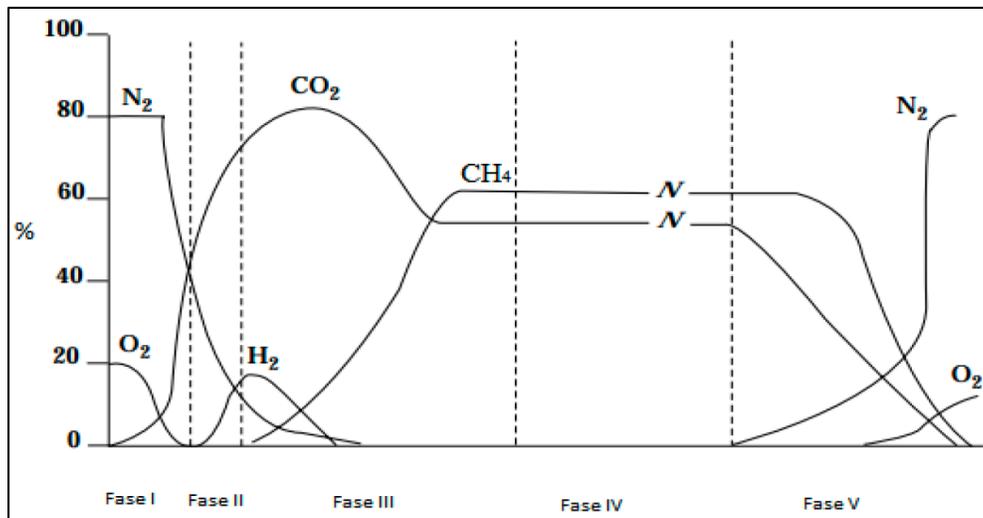


Figura 2. Características de gas generado en un Relleno Sanitario

### 2.3.3 RED DE RESIDUOS SÓLIDOS DEL VALLE DE MÉXICO (RRSVM)

Con el proyecto “Línea base para el análisis de redes sociales de los establecimientos de acopio, tratamiento y reciclaje de los residuos sólidos urbanos en el Distrito Federal y zonas conurbadas del estado de México”, se ha generado una serie de instrumentos de fácil acceso al público, con el fin de hacer posible la consulta sobre el sistema social de generación y disposición final de RSU.

En su base de datos se muestra un mapa donde se da a conocer la ubicación de los SDF del Estado de México y se ha extendido con algunos municipios de los estados de Hidalgo y Querétaro. Al proporcionar un mapa de los SDF se observa el impacto ambiental que generan en conjunto las zonas rurales y urbanas. Para generar ese informe continuo, varias instituciones públicas y privadas en el ámbito social y ambiental obtuvieron la ubicación de la mayor parte de los SDF (rellenos sanitarios, sitios controlados, clandestinos y clausurados) de los Estados mencionados con el propósito de reconocer las geografías sobre las que impactan, y el tamaño del sistema de disposición final que existe en el centro del país. Esta información se levantó entre junio del 2012 y mayo del 2013, y contiene:

1. Un mapa geográfico de la ubicación de los SDF en el Estado de México
2. Aproximadamente 1,500 fotografías que pretenden dar cuenta del estado en que se encuentran los SDF, los tipos de RSU que ingresan, la maquinaria que se opera, así como las personas que laboran en dichos sitios.
3. Un resumen técnico de cada sitio.
4. Fecha y lugar donde fue tomado cada registro
5. Nombre del municipio al cual pertenecen dichos sitios.
6. Conceptos relacionados a vertederos y RSU en forma de palabras clave, que permiten el filtrado por temática.

La herramienta que se utilizó para este levantamiento, llamada ojoVoz que se mencionan en su sitio web, la cual está a disposición del público en general, estudiantes y especialistas del tema. Esta herramienta de código abierto invita a la gente a generar sus propios procesos de monitoreo e incorporarse en este tipo de ejercicios sobre el manejo y evaluación de los RSU que se generan todos los días a nivel nacional.

## **2.4 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN RELLENOS SANITARIOS**

Normalmente, los gases que se han recuperado de un vertedero activo se queman o aprovechan para transformarlos en forma de energía. Este procedimiento se inició en forma comercial en 1988, en Grenoble, Francia donde un sitio de relleno vende a la compañía eléctrica la energía producida. La generación se efectúa a través del metano, lo más puro posible. Cuando el gas obtenido es quemado para producir electricidad se debe tener cuidado de no producir contaminación atmosférica. La siguiente tabla muestra los factores de emisión de diferentes contaminantes para quemadores de gas procedentes de un RS (EPA, 1996).

Contaminante	Factor de emisión	Unidad (Gas quemado)
Partículas suspendidas	$9.21 \times 10^{-5}$	$Kg/m^3$
Bióxido de azufre ( $SO_2$ )	$9.21 \times 10^{-5}$	$Kg/m^3$
Óxidos de Nitrógeno ( $NO_x$ )	$1.54 \times 10^{-4}$	$Kg/m^3$
Monóxido de Carbono (CO)	$5.45 \times 10^{-5}$	$Kg/m^3$

Tabla 3. Factores tentativos de emisión de contaminantes atmosféricos para quemadores de gas producto de R.S.

Los SDF son contenedores que van a durar una gran cantidad de tiempo enterrados y, en gran parte de ese tiempo, estarán produciendo biogás y lixiviados, afectando constantemente su entorno natural; sobre todo, en el caso de los SDF no controlados o controlados deficientemente. La figura 3, publicada en el año 2017 por la revista El Universal, muestra una celda de un RS con recubrimiento para la compactación de residuos y su lixiviación.



Figura 3. Relleno Sanitario Atizapán de Zaragoza Edo. de México

Los lixiviados son una mezcla generada por agua de lluvia y compuestos generados por la degradación de los residuos. Regularmente, en ausencia de un sistema que los contenga (como geomembrana o una alberca de lixiviados) o capas de suelo poco permeables, los lixiviados terminan filtrándose al subsuelo y contaminando mantos freáticos.

Muchos de los SDF se encuentran en zonas frágiles como son reservas naturales, cuencas de escurrimiento, zonas de recarga de acuíferos y/o extracción de agua, socavones de antiguas minas, etc. Debido a esto, el grado de impacto en el medio ambiente, de sustancias como los lixiviados, depende directamente de la forma en como manejamos nuestros RSU.

En esta dirección, una gran cantidad de RSU se depositan en tiraderos a cielo abierto y/o SDF con niveles mínimos de control sobre dichos materiales (incluso, algunos rellenos sanitarios no logran cubrir las normativas ambientales correspondientes). Además de esto, y por el sólo hecho de que una gran cantidad de SDF se ubican sobre cuencas hidrográficas, se genera una dispersión de los compuestos generados por los SDF hacia otras regiones, por lo que el proceso de deterioro de la salud y el medio ambiente se torna exponencial en cualquier plazo.

En lo que respecta al biogás, este se compone principalmente por gas metano ( $CH_4$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ), entre otros gases. En este sentido, dada la gran cantidad de residuos generados y dispuestos en los SDF, existe una continua incorporación de biogás a la atmósfera. De hecho, la disposición masiva de RSU remite directamente a la generación de gases de efecto invernadero GEI como son  $CH_4$  y dióxido de carbono  $CO_2$ , que son considerados, desde el acuerdo del Protocolo de Kyoto (1998), como los principales GEI. En relación con esto, el impacto ambiental causado por la generación de biogás, debido a los RSU depositados en los distintos tipos de SDF, es un problema grave en México, ya que gran parte de estos sitios no cuentan con sistemas de recuperación y/o aprovechamiento del gas.

De acuerdo al Panel Intergubernamental de Cambio Climático de la ONU, el metano es 23 veces más nocivo como gas invernadero que el  $CO_2$ . Es decir, una tonelada de  $CH_4$  contribuye al calentamiento global de la misma manera que 23 toneladas de  $CO_2$ .

En la consulta del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 2015 publicado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climática (INECC) en el año 2018, México emitió 683 millones de Toneladas de  $CO_2$  equivalentes (MtCO<sub>2</sub>e), con respecto al periodo de 1990 al 2015, el gas más relevante que se emite en el país es el  $CO_2$  con 71%, seguido del metano con el 21%.

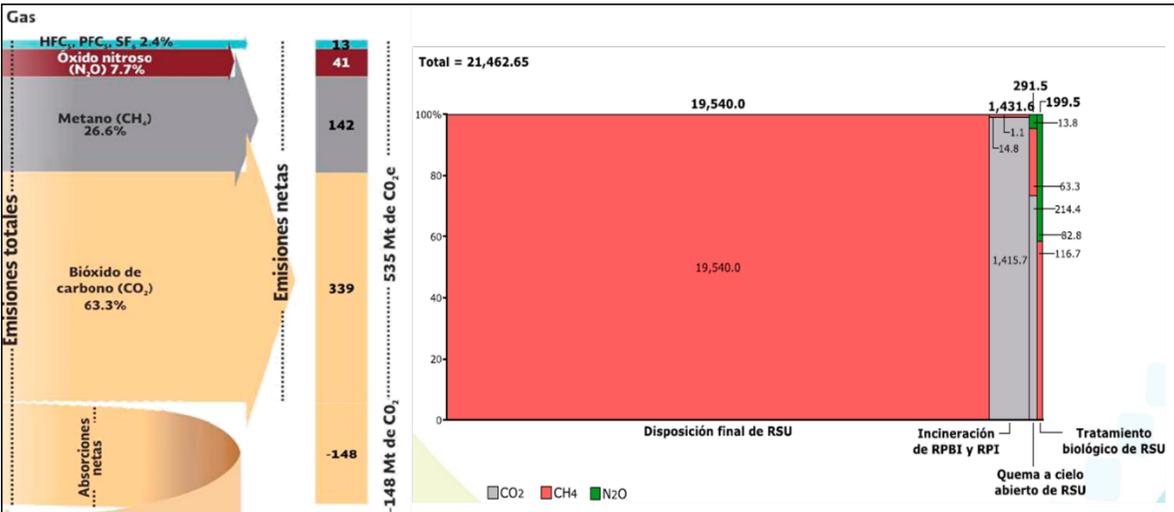


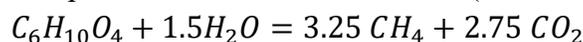
Figura 4. GEI emitidos por diversas fuentes en México durante el periodo 1990-2015

La generación de biogás se encuentra relacionado de forma directa con la materia orgánica presente en los RSU. En países en vías de desarrollo la materia orgánica puede alcanzar hasta 80% del total de la masa de los residuos, mientras que en países desarrollados la cifra puede ser menor al 10%. La siguiente tabla muestra ejemplos de rendimientos obtenidos de producción de  $CH_4$  (Cárdenas, 2014):

Autor y año	País	Rendimiento reportado
(Hartz & Ham, 1983)	EUA	6.25 – 37.5 l $CH_4$ /Kg RSU*año
(Bagchi, 1994)	EUA	1.2 – 7.5 l $CH_4$ /Kg RSU*año
(Kiss-Köfalusi & Encarnación – Aguilar, 2006)	México	223 l $CH_4$ /Kg RSU
(Themelis & Ulloa, 2007)	EUA	50 l $CH_4$ /Kg RSU
(Pascual – Vidal, 2011)	España	350 l $CH_4$ /Kg materia orgánica

Tabla 4. Comparación de producción de biogás en SDF

La composición de la materia orgánica es descrita con la fórmula molecular  $C_6H_{10}O_4$ ; y con base en ella, se determinó un balance de materia para calcular la cantidad máxima de biogás generado durante la descomposición anaerobia de los RSU (Themelis y Ulloa, 2007).



Diferentes autores, mostrados en la tabla 5, han considerado el flujo de biogás de forma directa en SDF mediante diversas técnicas (Cárdenas, 2014):

Autor y año	País	Flujo de Biogás	Tecnología
(Hilger & Humer, 2003)	EUA	5256 $\frac{Kg CH_4}{m^2} hora$	Cámara de flujo
(Spokas et al., 2006)	EUA	0.000803-3.650 $\frac{Kg CH_4}{m^2} año$	Cámara de flujo
(Abichou et al., 2006)	EUA	8.03 – 19.51 $\frac{Kg CH_4}{m^2} * año$	Cámara de flujo *Dependiendo del grosor de la cobertura
(Åkerman et al., 2007)	Reino Unido	0.0876 – 6.132 $\frac{Kg CH_4}{m^2} * año$	Cámara de flujo *Dependiendo del grosor de la cobertura
(I-Chu et al., 2007)	Taiwán	.00073-1.4235 $\frac{Kg CH_4}{m^2} año$	Cámara de flujo
(Sauri-Riancho et al., 2013)	México	540 $\frac{Kg CH_4}{m^2} año$	Cámara de flujo

Tabla 5. Flujos de biogás en SDF de RSU

#### 2.4.1 CÁLCULOS DE EMISIONES DE BIOGÁS EN SDF

Las emisiones de biogás de los rellenos sanitarios son habitualmente calculadas y muy rara vez se miden directamente. El cálculo de emisiones de GEI es una herramienta que se utiliza

para contabilizar o conocer la magnitud del impacto que tiene una actividad determinada sobre el cambio climático, en este caso, la operación de SDF de RSU (IPCC, 2006). La descomposición de los residuos en SDF y el biogás resultante se calculan con la ayuda de modelos que se utilizan para resumir la química muy compleja y la descomposición biológica de estos procesos.

Existen diferentes entidades que han elaborado metodologías para el cálculo de emisiones de GEI provenientes de actividades específicas (Bogner & Scot, 1995; Aguilar-Virgen et al., 2011). El punto de partida para la estimación de las emisiones de GEI provenientes de la eliminación de residuos sólidos es la recopilación de datos de la actividad relativos a la generación, la composición y la gestión de los residuos.

La generación potencial de biogás en RS corresponde a 250 Nm<sup>3</sup> por tonelada de (FORSU) en un lapso de 30 años. A partir de la composición y generación potencial de biogás, se indican las emisiones correspondientes de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S derivados de la degradación de la FORSU en RS (Mc Dougall et al., 2001). Los datos de composición corresponden a los reportados por Themelis y Ulloa (2007), los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Compuesto	Porcentaje volumétrico	Kg gas/ton FORSU
CH <sub>4</sub>	55%	98
CO <sub>2</sub>	44%	216
H <sub>2</sub> S	1%	4

Tabla 6. Composición y generación potencial de biogás en RS a partir de la degradación de la FORSU

#### 2.4.2 MODELO MEXICANO DE BIOGÁS

A través de los años se han ido generando y perfeccionando diversos modelos matemáticos para estimar el potencial de generación de biogás en rellenos sanitarios de México. Modelos para la estimación de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Modelo LandGEM), la versión previa del Modelo Mexicano de Biogás (2003), el Modelo del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC 2006), entre otros, se han empleado durante la última década para prever la generación de biogás.

Inicialmente, se desarrolló el Modelo Mexicano de Biogás 1.0 presentado en diciembre del 2003 por SCS Engineers bajo contrato con Landfill Methane Outreach (LMOP) de la EPA. Este modelo se utilizó para estimar la generación de y recuperación de biogás en RS mexicanos. Empleó una estructura del LandGEM modificada con la composición de residuos

de 31 ciudades. Dentro de sus limitaciones se determinó que el modelo asumía una composición de residuos promedio para todo México, se subestimó la constante  $k$  (índice de generación de metano) en climas húmedos y secos y el usuario debía alimentar los datos detallados y evaluar la eficiencia de captura.

Con base en estos aspectos, entre otros más, se desarrolló el nuevo modelo Mexicano de Biogás (2.0), el cual comprende datos de 40 ciudades y refleja cinco zonas climáticas representado 18 estados y la Ciudad de México. Además, asigna una composición de residuos para cada estado empleando cuatro valores de  $k$  como se hace en el Modelo IPCC y provee valores para la generación de metano  $L_o$ . Las regiones climatológicas con sus respectivos estados publicadas en los trabajos de *Methane to Markets* en el año 2009 se muestran a continuación.

1. Noroeste & Norte Central.

Estados: Baja California Norte, Baja California Sur, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Durango, Zacatecas y San Luis Potosí.

Clima Muy Seco, Moderadamente Cálido, Precipitación anual promedio: 306 mm/año y Temperatura media anual: 18.6° C.

2. Noreste

Estados: Nuevo León y Tamaulipas

Clima Moderadamente Seco y Muy Cálido, Precipitación anual promedio: 613 mm/año, Temperatura media anual: 22.3°C

3 Centro

Estados: Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Tlaxcala, Estado de México y Puebla.

Clima Moderadamente Seco y Templado, Precipitación anual promedio: 664 mm/año y Temperatura media anual: 16.6°C\*

4 Ciudad de México

Clima Moderadamente Seco y Templado, Precipitación anual promedio: 635 mm/año y Temperatura media anual: 16.6°C

5 Oeste

Estados: Sinaloa, Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán, Morelos, Guerrero, y Oaxaca.

Clima Moderadamente Húmedo y Cálido, Precipitación anual promedio: 990 mm/año y Temperatura media anual: 21.4°C.

6 Sureste

Estados: Veracruz, Chiapas, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo.

Clima Muy Húmedo y Muy Cálido, Precipitación anual promedio: 1,532 mm/año y Temperatura media anual: 24.1°C

La ecuación de degradación de primer orden, utilizada para el cálculo de generación anual de biogás, fue modificada por la US EPA (United States Environmental Protection Agency),

en el Modelo LandGEM versión 3.02 en el año 2005. Esta ecuación se presenta a continuación (Alexander, A., Burklin, C., Singleton, A., 2005):

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

Donde:

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

$i$  = Incremento de 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 metano (1/año)

$L_0$  = Generación potencial de metano ( $m^3/Mg$ )

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

$t_{ij}$  = Edad de la sección  $j$  de la masa de residuos  $M_i$  dispuestos en el año  $i$  (años en decimales)

MCF = Factor de corrección en metano.

F = Factor de ajuste por incendios.

Con esta ecuación se estima la generación de biogás, tomando en cuenta las cantidades de residuos sólidos acumulados a lo largo de un año. La estimación para más de un año es desarrollada variando la proyección anual. La cantidad de biogás es igual a dos veces la generación de metano calculado. La constitución del biogás que asume el Modelo es de 50% metano ( $CH_4$ ) y 50% de otros gases, incluyendo el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y trazas de otros compuestos (Stege, G., Dávila, J., 2009). La producción y recuperación de biogás se calcula en metros cúbicos por hora ( $m^3/h$ ) y en pies cúbicos por minuto ( $ft^3/min$ ). Además, se estima la cantidad de energía que posee el biogás recuperado en millones de BTU por hora ( $MMBTU/h$ ), la eficiencia de captura, que es la capacidad máxima de la planta de energía, en megavatios ( $MW$ ) y las toneladas de reducción de emisión de  $CO_2$  en (CERs) (Stege, G., Dávila, J., 2009).

Índice de valoración de metano ( $k$ )

El índice de valoración de metano ( $k$ ) determina la generación de metano, producida por la degradación de los desechos de los rellenos sanitarios. El valor de  $k$  está relacionado con el periodo de vida de los residuos, de acuerdo a la ecuación:  $periodo = \ln(2)/k$ . Conforme el valor de  $k$  incrementa, la generación de metano en el relleno también incrementa (Colmenares, W., Santos, K., 2007; Stege, G., Dávila, J., 2009).

El valor de  $k$  depende de algunos factores, como lo es el contenido de humedad dentro del relleno sanitario, que se estima con base en los promedios de las precipitaciones anuales. La disponibilidad de nutrientes para las bacterias generadoras de metano es otro factor, que depende de la cantidad de residuos y la caracterización de los mismos. La temperatura del relleno es constante debido al calor que se genera por las bacterias, excepto en condiciones climáticas frías y rellenos sanitarios poco profundos. Entonces, los valores de  $k$  se basan en los tipos de residuos y el clima (Stege, G., Dávila, J., 2009).

En el Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0 se han asignado valores de  $k$  para las cuatro categorías de degradación: degradación de residuos muy rápida (DRR), degradación de residuos moderadamente rápida (DRMR), degradación de residuos moderadamente lenta (DRML), y degradación de residuos muy lenta (DRL), en cada una de las 5 regiones climáticas de México. Estos valores varían en base a la precipitación promedio anual en el clima de la región donde está ubicado el RS, tipo de residuo y clima (SCS Engineers, 2009).

Categoría de Residuo	Sureste	Oeste	Centro / Interior*	Noroeste	Noroeste / Inferior Norte
DRR	69	69	69	69	69
DRMR	115	126	138	138	149
DRML	214	214	214	214	214
DRL	202	202	202	202	202

Tabla 7. Valores del Índice de generación de metano ( $k$ )

#### Caracterización de los residuos y generación potencial de metano ( $L_0$ )

El valor de la generación potencial de metano ( $L_0$ ) de los residuos describe la cantidad total de gas metano potencialmente producido por una tonelada de residuos degradados y, depende exclusivamente de la composición de los residuos del relleno sanitario. Las unidades de  $L_0$  son metros cúbicos ( $m^3$ ) por tonelada ( $Ton$ ) de basura, su valor va de 6.2 a 270 ( $m^3/ton$ ) (SCS Engineers 2009) y los valores típicos de este parámetro están en el rango entre 125 y 310  $m^3/Mg$  de residuo (ETEISA 2006). La EPA usa un valor típico de 170  $m^3/Mg$  de residuo (World Bank Group 2004).

Los valores de  $L_0$  dependen directamente de las características de los residuos de cada relleno sanitario. En el modelo se utilizan valores predeterminados para cada relleno o datos de las características de sus residuos.

Este parámetro describe la cantidad total de  $CH_4$  potencialmente producida por unidad de masa de residuos cuando ésta se degrada, y depende casi exclusivamente de la composición de los residuos en el RS, en particular de la fracción orgánica presente (ETEISA 2006, IPCC 2006, SCS Engineers 2009, World Bank Group 2004). Su valor se estima con base en el contenido de carbono del residuo, la fracción de carbono biodegradable, y el factor de

conversión estequiométrica (ETEISA 2006). A mayor contenido de celulosa, mayor valor de  $L_0$ .

Con esto se calculan los valores de  $L_0$  para cada uno de los cuatro grupos de residuos orgánicos. Este valor se mantiene constante para las 5 zonas climáticas, con excepción del grupo 2, ya que existen variaciones por el tipo de vegetación (Stege, G., Dávila, J., 2009).

Si se tiene información del sitio, se puede estimar el valor de  $L_0$  empleando la siguiente ecuación de la metodología del IPCC (IPCC 2002 y 2006).

$$L_0 = MCF \cdot DOC \cdot DOC_F \cdot F \cdot \frac{16}{12}$$

Donde:

$L_0$  = Potencial de generación

$MCF$  = Factor de corrección para el metano

$DOC$  = Carbono orgánico degradable (fracción)

$DOC_F$  = Fracción de carbono orgánico degradable asimilado

$F$  = Fracción de  $CH_4$  en el biogás

$\frac{16}{12}$  = Constante estequiométrica.

Factor de corrección de metano (MCF)

Con el factor de corrección de metano se realiza un ajuste de la estimación de la generación de biogás, tomando en cuenta el grado de degradación anaerobio de los residuos. Los valores MCF dependen, principalmente, del tipo de manejo que se le da al relleno sanitario y la profundidad a la que se encuentran los residuos.

Su valor depende de la profundidad y el tipo de RS, como lo definen las prácticas de manejo. La siguiente tabla resume los valores de MCF aplicados por el modelo (IIE 2007, IPCC 2006, Kumar et al. 2004a, SCS Engineers 2009).

Manejo del sitio	Profundidad < 5m	Profundidad ≥ 5m
Sin manejo	0.4	0.8
Con manejo	0.8	1.0
Semi – aeróbico	0.4	0.5
Condición desconocida	0.4	0.8

Tabla 8. Factor de corrección de metano (MCF)

### Carbono Orgánico Degradable (DOC)

Su valor depende de la composición de los residuos, por lo que puede variar de ciudad en ciudad (IIE 2007, Kumar et al. 2004a). Se estima a través de la ecuación

$$DOC = 0.4(A) + 0.17(B) + 0.15(C) + 0.3(D)$$

Donde:

A es el porcentaje de los residuos que corresponde al papel, cartón y los textiles

B es el porcentaje de los residuos que corresponde a los desechos de jardín y de los parques u otros desechos orgánicos putrescibles (excluidos los alimentos)

C es el porcentaje de los residuos que corresponde a los restos de alimentos

D es el porcentaje de los residuos que corresponde a madera y paja.

### Fracción de Carbono Orgánico Degradable $DOC_F$

Esta es una porción de DOC que es convertida en biogás y su estimación es basada en el modelo teórico que varía solo con la temperatura en la zona anaerobia del RESA (IPCC 2002, Kumar et al. 2004a). El valor predeterminado utilizado por la IPCC es de 0.77. No obstante, este factor puede variar de 0.42 para 10°C a 0.98 para 50°C. De hecho, en muchos rellenos profundos (>20 m) las temperaturas que se han registrado son mayores a 50 °C, condiciones claramente anaerobias (IPCC 2002).

$$DOC_F = 0.014T + 0.28$$

Donde:

T es la temperatura en °C

El valor de F se asume en 0.5, debido a que el biogás se compone principalmente en un 50% de  $CH_4$  y un 50% de  $CO_2$  con menos del 1% de otras constituyentes trazas (IPCC 2002 & 2006, Kumar et al. 2004a).

Mediante las citas y las referencias de dichos artículos se llegó a un sitio web de Landfill Methane Outreach Program (LMOP) que ofrece el software libre Municipal Solid Waste Decision Support Tool la cual es una herramienta que permite a las comunidades y otras partes interesadas para evaluar los costos, ventajas y desventajas ambientales del ciclo de vida, y los aspectos sociales de las opciones actuales y futuras que implican un aumento de residuos sólidos municipales.

#### 2.4.2.1 METODOLOGÍA Y SITIOS DE EMPLEO DEL MODELO MEXICANO DE BIOGÁS 2.0

Dentro de los programas y proyectos que realizaron los SCS Engineers de USEPA en el 2009, se presentó la siguiente información recabada *in situ*: De la región 1 y 2 (Noroeste & Norte Central, Noreste) se tienen datos de residuos de 8 ciudades en cada zona. De la región Central se tienen datos de 6 ciudades y de la CDMX de 3 rellenos sanitarios. De la quinta región (oeste) se tienen datos de 5 ciudades. Del Sureste no hubo recopilación de información. Los sitios que se mencionan en sus publicaciones son:

1. Relleno Sanitario de Mérida, Yucatán
2. Relleno Sanitario San Nicolás en Aguascalientes
3. Relleno Sanitario de Ciudad Juárez
4. Relleno Sanitario de Simeprodeso en Monterrey
5. Relleno Sanitario, BP IV. CDMX
6. Relleno Sanitario, Ciénega de Chapala, Michoacán, México
7. Cuatro comunidades (dos urbanas, Mexicali y Ensenada; y dos rurales, San Quintín y Vicente Guerrero) de Baja California, México, el índice de generación de metano ( $k$ ) y el potencial de generación de metano ( $L_0$ )

Por otro lado, en el reporte de las experiencias en proyectos de recuperación de metano de rellenos sanitarios municipales por parte de ICMA-Latinoamérica, en 2011, se tiene el inventario de 19 RS en México que emplean el modelo y realizan el aprovechamiento de metano. Cabe mencionar que los datos pertenecen a rellenos de 5 zonas a excepción de la Ciudad de México que muestra el potencial con resultados favorables para el RS Bordo Poniente etapa IV, cerrado en diciembre del mismo año.

En las memorias de los eventos realizados en México como Encuentro de Expertos en Residuos Sólidos, se tiene información a partir del segundo de ellos, realizado en el 2009 donde se cuenta con publicaciones de investigaciones de Toluca, Michoacán y Ensenada, B.C. Este último empleando la primera versión del Modelo.

En junio de 2010, se presentó un análisis matemático del modelo de degradación con cinética de primer orden, que, a pesar de ser teórico, especializado y aplicado a un caso sencillo, presenta la vinculación con el Modelo de Biogás. A pesar de la precisión que presenta, no se menciona la metodología en campo ni los RS en los cuales se realizó el estudio.

En el año 2011, en el cuarto evento, se presenta el estudio del Bordo Poniente en la Ciudad de México con una propuesta metodológica para la medición y estimación de la temperatura superficial a través de sensores remotos (imágenes satelitales). El estudio presenta muchos datos y variables inestables lo cual deja una brecha entre los objetivos de estudio y resultados. De manera paralela, en el mismo año, se realizó un estudio similar en el mismo sitio el cuál

fue publicado hasta el 2013 mediante un trabajo de tesis nombrado “Estimación de emisiones de metano del Relleno Sanitario Bordo Poniente por medio de imágenes de satélite”. En dicho trabajo se brinda información más detallada de la metodología empleada contrastando los resultados con estudios *in situ*, brindando una nueva metodología, pero, sobre todo, una puerta abierta a la investigación y afinación de la metodología empleada.

Dentro de otros artículos y publicaciones posteriores, que han empleado el modelo, se encuentran en el estado de Hidalgo por parte del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), la Universidad Autónoma de Baja California en el estado de Baja California, Universidad de la Ciénega del Estado de Michoacán Ocampo, y Institute of Environmental Technology and Energy Economics, Hamburg University of Technology, Alemania, en la República Mexicana.

En la base de datos de la Red de Residuos Sólidos del Valle de México, con fecha de consulta de agosto del 2018, se presenta en su información la gráfica de la figura 5 en la que se observa una estimación de la producción de biogás de 95 SDF del Estado de México. Para esto se utilizó el Modelo Mexicano del Biogás 2.0. Dicho modelo, para calcular la cantidad de biogás producido, hace uso de los siguientes elementos:

1. Cantidad de RSU que se depositan en el SDF.
2. FORSU.
3. Región donde se encuentra ubicado el SDF.
4. Vida útil del SDF.
5. Manejo con el cual es operado el SDF.

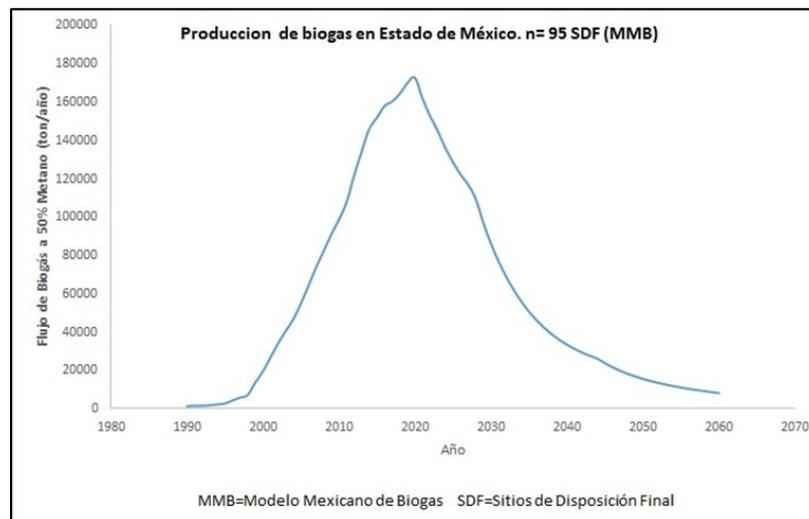


Figura 5. Curva característica de Producción de biogás en un RS

La generación de biogás en un SDF se incrementa conforme avanza la vida de operación del sitio y llega a su flujo máximo de producción al año siguiente al cierre de operaciones del sitio y a su vez se seguirá produciendo biogás en forma decreciente, el Modelo Mexicano de Biogás 2.0 estima que alrededor de 20 a 30 años se seguirá generando biogás en el SDF. Como se observa en la gráfica de la figura 5, la estimación de biogás se encuentra en el periodo de tiempo entre 1990 y 2060, debido a que algunos de los SDF estudiados comenzaron a operar en la década de los 90's. De esta forma, se aprecia un flujo máximo alcanzado en el año 2020 debido a que gran parte de los SDF estarán dejando de operar entre los años de 2015 y 2025, posteriormente la generación de biogás desciende; notando que aún en el 2060 se sigue produciendo el gas. La estimación de la generación biogás, con el modelo Mexicano del Biogás 2.0 arrojó un flujo de biogás de 134,856.86 *ton/año* en el 2013, 173,308.40 *ton/año* para el 2020, 85,388.34 *ton/año* para el 2030 y 13,959.1 *ton/año* para el 2050. El descenso del flujo de biogás después del 2020 se debe principalmente a que la mayoría de los SDF estarán siendo clausurados entre los años 2025 y 2035.

Cabe señalar que en esta proyección de generación de biogás se tomó en cuenta el incremento en la disposición de RSU que se tiene actualmente, sin embargo, esta seguramente aumentará por el incremento acelerado en la población de los municipios lo que, a su vez, generará: a) mayor tasa de clausura de los SDF ya existentes (por una limitada capacidad de disposición) b) una mayor apertura de nuevos SDF (nuevo espacio para disposición de RSU) Si bien a mayor cantidad de SDF se podrá ver una disminución nominal de biogás, por cada uno de los sitios (por su distribución), en general todo el sistema de SDF experimentará un incremento dramático en la producción de biogás.

#### 2.4.3. MANEJO DEL BIOGÁS GENERADO EN SDF

De acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT-2003 publicada en el DOF en 2014, se debe garantizar la extracción, captación, conducción y control del biogás generado una vez que los volúmenes y la edad de los residuos propicien la generación del mismo y de no disponerse de sistemas para su aprovechamiento conveniente, se procederá a su quema ya sea a través de pozos individuales o mediante el establecimiento de una red con quemadores centrales, además de elaborar un programa de monitoreo de biogás donde se especifiquen los parámetros de composición, explosividad y flujo del biogás (Cárdenas, 2014).

Cárdenas (2014) menciona que es conveniente instalar pozos de captación o chimeneas de drenaje, con un radio de acción de unos 25 metros, que debe ser obtenido a partir de estudios que permitan determinar el radio de influencia de los pozos. Es importante no dejar huecos de captación del gas y considerar un traslape en la determinación del radio de las chimeneas, debido a que el biogás puede acumularse y al ser inflamable, causar explosiones; para tal fin,

el acomodo de los pozos puede establecerse como se ve en la Figura 6 (Colomer-Mendoza & Szantó-Narea, 2011).

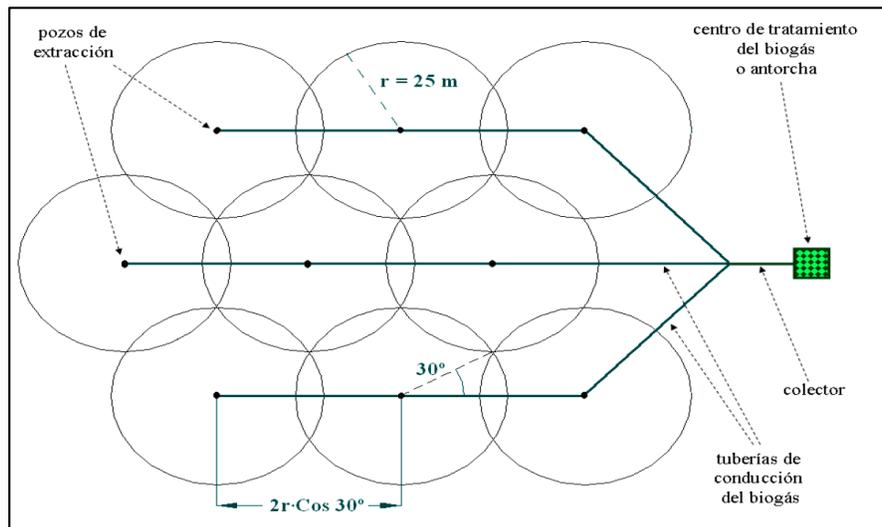


Figura 6. Pozos de captación de biogás y su área de influencia

Existen múltiples maneras de instalar los pozos de captación, generalmente se ancla verticalmente al terreno un tubo de acero hueco y en su interior se introduce una tubería corrugada y ranurada, el espacio que queda entre ambas tuberías se rellena de material muy permeable. A medida que se depositan los RSU y su altura incrementa, se va subiendo consigo el tubo de acero, lo cual permitirá que el biogás generado pase a través de la tubería perforada, ascienda y pueda ser recolectado (Figura 2.7) ( Pozo de .

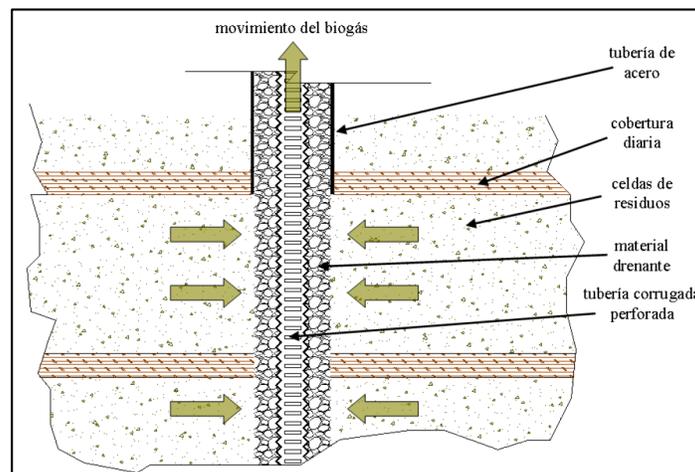


Figura 7. Esquema de instalación de un pozo de captación de biogás en un SDF

## 2.5 PROYECCIONES DE GENERACIÓN DE BIOGÁS

Los GEI son componentes gaseosos de la atmósfera, naturales o antropogénicos, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja térmica (10.4 -12-5 $\mu$ m) emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera y por las nubes. Esta propiedad da lugar al efecto invernadero (IPCC, 2007).

El impacto ambiental causado por la generación de biogás por el depósito de RSU en los distintos tipos de SDF es un problema grave en México, ya que gran parte de estos sitios no cuentan con sistemas de recuperación y/o aprovechamiento del gas, aunado a que entre los principales GEI, según el Protocolo de Kyoto (IPCC, 2007; EPA, 2008), se encuentran el  $CO_2$  y el  $CH_4$  y, aunque no tienen el potencial específico de calentamiento global más alto (Tabla 9), si están presentes en altas cantidades en la atmósfera.

GEI	Potencial de calentamiento global	% de emisiones de GEI
Dióxido de carbono ( $CO_2$ )	1	85
Metano ( $CH_4$ )	23	8
Óxido Nitroso ( $N_2O$ )	296	5
Hidrofluorocarbonos (HFC)	120 – 12 000	2
Perfluorocarbonos (PFC)	5 700 – 11 900	2
Hexafluoruro de azufre ( $SF_6$ )	22 200	2

Tabla 9. Potenciales específicos de calentamiento global y emisiones atmosféricas (Cárdenas, 2014)

### 2.5.1 OPORTUNIDADES DEL BIOGÁS COMO FUENTE DE ENERGÍA

El metano pertenece a la familia de hidrocarburos, es parecido al propano, que es el gas que se utiliza en muchos hogares e industrias, por tener propiedades inflamables, pero se diferencia al tener sólo un átomo de Carbono y 4 de Hidrógeno.

En el marco de los compromisos del Protocolo de Kyoto (1998), y actualmente en el acuerdo de Paris, se promueve la implementación de proyectos que aprovechan el instrumento de incentivo financiero llamado Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), paralelamente el Banco Mundial ha puesto en marcha un programa que reúne a inversionistas de países en desarrollo, creando un mercado para los certificados de reducción de emisiones de carbono conocidos como bonos de carbono. Estos instrumentos permiten que países desarrollados puedan cumplir con sus compromisos de reducción de emisiones, al financiar proyectos de países en vías de desarrollo de captura de GEI, acreditando tales disminuciones como si se hubiesen realizado en territorio propio (Kiss-Köfalusi & Encarnación-Aguilar, 2006). A nivel mundial tiene un significado muy valioso, ya que se beneficia a países en vías de desarrollo con nuevas tecnologías y se ayuda a la conservación del medio ambiente. La compra y venta se realiza entre empresas particulares de los países involucrados.

Como menciona Cárdenas (2014), resulta evidente considerar proyectos que contemplen la disminución de la emisión descontrolada de estos gases generados por los RSU en SDF, según datos del Comité Mexicano para Proyectos de Reducción de Emisiones y Captura de Gases de Efecto Invernadero (COMEGEI, 2007) en México había 9 proyectos MDL sobre la recuperación de metano de SDF, sin embargo, desde 2008, los precios de los Certificados de Reducción de Emisiones de  $CO_2$  (CER, por su nombre en inglés) han bajado 82%, producto de la crisis económica de Europa, que es el mayor comprador de bonos (Astudillo M., 2012).

Debido a la gran cantidad de biogás generado en los SDF, es necesario tomar en cuenta tanto la reducción de emisiones como su aprovechamiento. Por su composición, el biogás es una fuente de combustible, de fácil captura y de uso, con un importante poder calorífico. El contenido de metano en el biogás tiene un alto valor como combustible de entre 18-22  $MJ/m^3$  (Spokas et al., 2006).

La factibilidad de proyectos para el aprovechamiento del biogás en los SDF depende de estimar, con una certidumbre razonable, tanto la producción diaria como la producción acumulativa de  $CH_4$  en el largo plazo (Meraz et al., 2004).

## 2.6 MÉTODOS DE MEDICIÓN Y PREDICCIÓN DE METANO EN RS

Se han reportado numerosos métodos para estimar las emisiones de  $CH_4$  derivadas de RS. Sin embargo, hasta el momento no existe un método estandarizado y reconocido como método de referencia (ONU-HABITAT, 2011). Además, de que no todas las técnicas están disponibles u operan adecuadamente en todos los sitios y a todos los tiempos. Algunas de las principales dificultades en su medición es la variabilidad temporal y espacial de las emisiones, en combinación con el tamaño de los sitios de disposición de RSU (Cárdenas, 2014).

Algunos de los métodos más aplicados se describen brevemente a continuación (Oonk, 2010; Bella, Trapani y Viviani, 2011):

- Monitoreo en campo en sitios puntuales del RS ya sea directamente en superficie y/o bajo el nivel del suelo (a partir de perfiles de concentración en muestras de suelo). Se colectan muestras de suelo y se transportan al laboratorio para determinar su actividad bacteriana metanótrofa.
- Por medio de cámaras estáticas o dinámicas. La primera es la más empleada, permite medir tanto la concentración como los flujos de  $CH_4$  de pequeñas áreas del RS usando en conjunto cromatografía de gases.
- Mediciones micro meteorológicas. Método también conocido como mediciones de correlación de Eddy empleado para determinar emisiones de grandes superficies, en

este procedimiento se valora el flujo de  $CH_4$  en un plano horizontal considerando el promedio del producto de la concentración del  $CH_4$  y el componente vertical de la velocidad local del viento.

- Métodos de balance de masa / mediciones transectas. Incluye mediciones de flujos de  $CH_4$  en un plano o dos planos imaginarios. Estos flujos son el producto de la velocidad del viento y la concentración de  $CH_4$  en cada punto de los planos, mismos que son determinados con equipos analíticos sofisticados.
- Trazadores atmosféricos de plumas móviles o fijas. Se usan trazadores químicos como el  $N_2O$ . Este gas se mezcla con el aire del RS, se da seguimiento a la pluma y se valora la relación entre concentración del trazador y la del  $CH_4$ .
- Modelación matemática generalmente a través de balance de masa de  $CH_4$ . En general los modelos que se han desarrollado requieren asumir consideraciones razonables pero teóricas acerca de la formación y oxidación del  $CH_4$  y debido a que no se valida con datos de mediciones reales en campo, sus estimaciones están sujetas a importantes imprecisiones.
- Percepción remota. Este tipo de método es ubicado en el rubro de valoración cualitativa de  $CH_4$ , la concentración de este GEI se mide en la superficie del RS por medio de información proveniente de métodos ópticos de percepción remota que emplean espectroscopia infrarroja con transformadas de Fourier, la información se visualiza a través de mapas de concentración en los que se identifican zonas de alta concentración y de mayor temperatura que la normal (USEPA, 2007).

Se han realizado considerables esfuerzos para desarrollar métodos que permitan la medición de emisiones de  $CH_4$  procedentes de RS, la tarea actual es confrontarlos para lograr una validación entre ellos. Indudablemente, la calidad del inventario de emisiones depende de la perspectiva para la que será empleado, por ejemplo, los criterios de calidad para el establecimiento de inventarios nacionales de GEI difieren de los criterios demandados por las compañías que manejan los RS o bien de los datos requeridos en el contexto legal cuyo objetivo es verificar el cumplimiento de emisiones límite. Pero, no hay que perder de vista que uno de los objetivos principales de los inventarios de emisiones es la de estimar los promedios anuales de emisión de los RS para toda la extensión de esta fuente de área, por lo que es importante considerar la representatividad del área muestreada. Uno de los retos actuales es estudiar y determinar las imprecisiones de los métodos para mejorarlos y reportar las emisiones de  $CH_4$  dentro de un contexto más apegado a la realidad (Oonk, 2010).

## 2.7 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Por definición, un Sistema de Información Geográfico (SIG) es un sistema de hardware, software y procedimientos diseñados para soportar la captura, administración, manipulación, análisis, modelamiento y representación gráfica de datos u objetos referenciados espacialmente, para resolver problemas complejos de planeación y administración; básicamente, es una herramienta de análisis de información, la cual debe tener una referencia espacial y debe conservar una inteligencia propia sobre la topología y representación (García-Palau, 2005).

En un SIG se usan algoritmos para realizar el análisis y procesamiento de los datos de forma gráfica y alfanumérica, las herramientas que emplean estos algoritmos se basan en el almacenamiento, recuperación y despliegue de datos espaciales de la superficie terrestre.

Como objetivos principales de un SIG, se tiene el almacenamiento, manejo y manipulación de grandes cantidades de datos referenciados para llevar a cabo el análisis de los datos que implican, de manera específica el componente de posición geográfica (INEGI, 2014)

Con respecto al manejo de residuos, los sistemas de información geográficos han sido utilizados para evaluar la localización de SDF (Zamorano et al., 2008; Marín et al., 2012; Gbanie et al., 2013), todos ellos mencionan que la ubicación de SDF debe tener en cuenta una amplia gama de factores territoriales y legales con el fin de reducir los impactos negativos sobre el medio ambiente y que debido a que es un proceso multidisciplinario complejo, requiere de una herramienta de análisis que abarque todos los factores involucrados y una gran cantidad de datos de varias fuentes que proyecte los resultados de manera sencilla.

Zamorano et al. (2008) presentan un método que identifica y clasifica las posibles áreas para la ubicación preliminar del sitio para la ciudad de Granada, España con un arreglo para solucionar los problemas de múltiples criterios, éste método combina SIG con un sistema de toma de decisiones. Marín et al. (2012) utilizan SIG para identificar posibles localizaciones para un SDF en Morelos, México, con base de datos del agua en México (SIGAM).

### 2.7.1 PERCEPCIÓN REMOTA

La PR espacial (o teledetección) permite adquirir imágenes de la superficie de la Tierra y obtener información de ésta desde sensores situados en plataformas espaciales sin estar en contacto físico con los objetos de la superficie terrestre, este método ha evolucionado notablemente en la última década en el monitoreo de la calidad del aire.

Los elementos fundamentales en la PR son: la fuente de energía (energía del Sol que llega a la Tierra o irradiación), el objeto de estudio, el satélite (sensor y la plataforma que lo sostiene) y el sistema de recepción (donde se recibe la información transmitida por la plataforma). Cuando el Sol ilumina la superficie terrestre, una parte de la energía que llega es reflejada, otra parte es transmitida y otra absorbida; de la última se deriva la energía emitida resultado de la ganancia de temperatura. La proporción de energía asociada a cada uno de estos tres fenómenos se relaciona con las propiedades físicas de los objetos. De esta forma, los sensores remotos han sido diseñados para detectar y registrar la información sobre los objetos aprovechando la radiación reflejada o emitida por ellos.

Por otro lado, la atmósfera juega un papel trascendental en este sistema ya que actúa como dispersión selectiva de la radiación electromagnética debido a que los gases y otros elementos que la constituyen influyen sobre la señal que llega al sensor ya que absorben la radiación en determinadas longitudes de onda del espectro electromagnético, y como consecuencia limitan la observación espacial de ciertas bandas del espectro; por lo que las bandas casi transparentes de la atmósfera son llamadas ventanas atmosféricas. Sin embargo, esta dispersión del flujo de energía en la atmósfera genera algunos problemas cuando la información proviene de distintos lugares o pertenece a diferente tiempo de adquisición; por lo anterior es necesario realizar correcciones para no atribuir cambios que en realidad se deben a cambios atmosféricos (Chuvieco, 1996; SAYDS, 2004; Martin, 2008).

Las principales regiones del espectro electromagnético empleadas en PR se describen a continuación (CONAGUA, 2005): 1) Espectro visible ( $0.4 - 0.7\mu m$ ): Puede ser percibida por el ojo humano. Se generan el color azul ( $0.4 - 0.5\mu m$ ), verde ( $0.5 - 0.6\mu m$ ) y rojo ( $0.6 - 0.7\mu m$ ); 2) Infrarrojo cercano ( $0.7 - 1.3\mu m$ ); 3) Infrarrojo medio ( $1.3 - 8.0\mu m$ ): Se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre; 4) Infrarrojo térmico ( $8.0 - 14\mu m$ ): Se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres; 5) Microondas (a partir de  $1mm$ ): De interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la nubosidad.

Como menciona Cortés (2010), los sensores poseen características propias que hacen que, para cierta aplicación, cada uno de ellos sea más apropiado que otros. Dichas características pueden ser agrupadas en las denominadas resoluciones del sensor: espacial, espectral, radiométrica y temporal (SAYDS, 2004).

- Resolución espacial. Se refiere al tamaño del píxel que es la unidad más pequeña que compone la imagen que es captada por el satélite, determina el nivel de detalle de los objetos.
- Resolución espectral. Se refiere al número y longitud de onda de las bandas espectrales que puede diferenciar el sensor. A mayor cantidad de bandas y menor ancho de éstas, aumenta la resolución espectral.
- Resolución radiométrica. Se refiere a la sensibilidad del sensor para detectar variaciones en la cantidad de energía espectral recibida. Dicha sensibilidad se expresa en bits que indica el número de los distintos niveles radiométricos o de intensidad que puede detectar el sensor. Por ejemplo, una resolución radiométrica de 8 bits, equivale a  $2^8 = 256$  niveles digitales (ND), estos valores varían de 0 – 255.
- Resolución temporal. Se refiere a la frecuencia con la que el sensor adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. El ciclo de cobertura está en función de las características orbitales de la plataforma, su velocidad, el ancho de barrido del sensor y las características propias de construcción del sistema.

Dentro de este contexto, es importante hablar de Radiancia y Emisividad, unidades de medida comúnmente empleadas en PR para evaluar el flujo de energía de la superficie terrestre detectado por el sensor, ya que dicho flujo tiene una intensidad proveniente de o dirigida a una unidad de superficie y con una dirección determinada (Chuvieco, 1996), estas unidades fueron utilizadas en el presente trabajo.

- Radiancia (L): Indica el total de energía radiada por unidad de área y por ángulo sólido de medida, es considerado un término fundamental en PR porque describe lo que mide el sensor, se mide en watts por metro cuadrado y estereorradián ( $W/m^2sr$ ) (Chuvieco, 1996).
- Emisividad ( $\epsilon$ ): Indica la relación entre la emitancia de una superficie y la que ofrecería un emisor perfecto, denominado cuerpo negro, a la misma temperatura, es un término adimensional, suele expresarse en tanto por ciento o por unidad. Es dependiente de la longitud de onda (Chuvieco, 1996).

### 2.7.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SATÉLITE UTILIZADO

El programa LANDSAT ha sido un proyecto de los años 60 desarrollado por la agencia espacial norteamericana (NASA) dedicado a la observación de los recursos terrestres. El lanzamiento de la serie de satélites comienza en esa época y termina con Landsat 8 con fecha del 11 de febrero de 2013.

El proyecto del satélite Landsat 7 comenzó en 1999, con la participación de tres agencias: la NASA, responsable del desarrollo, lanzamiento del satélite y sector de la Tierra, la NOAA,

encargada de su operación mantenimiento, y la USGS quién recoge, procesa, almacena y distribuye los datos (García, 2000).

Satélite	Lanzamiento (fin de servicio)	Altitud (km)	Periodicidad (días)	Sensor	Banda espectral ( $\mu\text{m}$ )	Resolución espacial (m)
LANDSAT 7	15 /04/1999	705	16	ETM+	1) 0.45-0.52	30
					2) 0.53-0.61	30
					3) 0.63-0.69	30
					4) 0.78-0.9	30
					5) 1.55-1.75	30
					6) 10.4-12.5	120
					7) 2.09-2.35	30
					PAN 0.5-0.9	15

Tabla 10. Características generales del satélite Landsat 7

El satélite Landsat 7 está equipado con el sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) el cual incorpora una banda pancromática (0.5 a 0.9  $\mu\text{m}$ ) con una resolución espacial de 15 m, lo que permite obtener ampliaciones a una escala de hasta 1:25.000.

El sensor MSS (Multispectral Scanner System) es un equipo de barrido óptico-electrónico con un campo total de visión de 11.56 grados, lo que, a la altura orbital del satélite, le permite explorar una franja de terreno de 185 Km, divididos a ambos lados de la vertical de la trayectoria.

Con objeto de acoplar la secuencia de barrido a la velocidad del satélite, el sensor MSS registra seis líneas simultáneamente con cada oscilación del espejo. La radiación recibida por el sistema focal se transmite a un sistema óptico que la descompone en cuatro bandas, y la envía a distintos detectores. Por tanto, el MSS dispone de 24 detectores (6 líneas x 4 bandas), compuestos por foto-diodos de silicio para la banda 7.

Una escena adquirida por el sensor MSS comprende 2.340 líneas de barrido y 3.240 columna por línea. Cada pixel corresponde a una superficie real de 79 m de lado (0.62 Ha), si bien en la transformación digital se le asigna un formato nominal de 57 x 79 m, lo que explica la disimetría final entre el número de líneas y de columnas en la imagen.

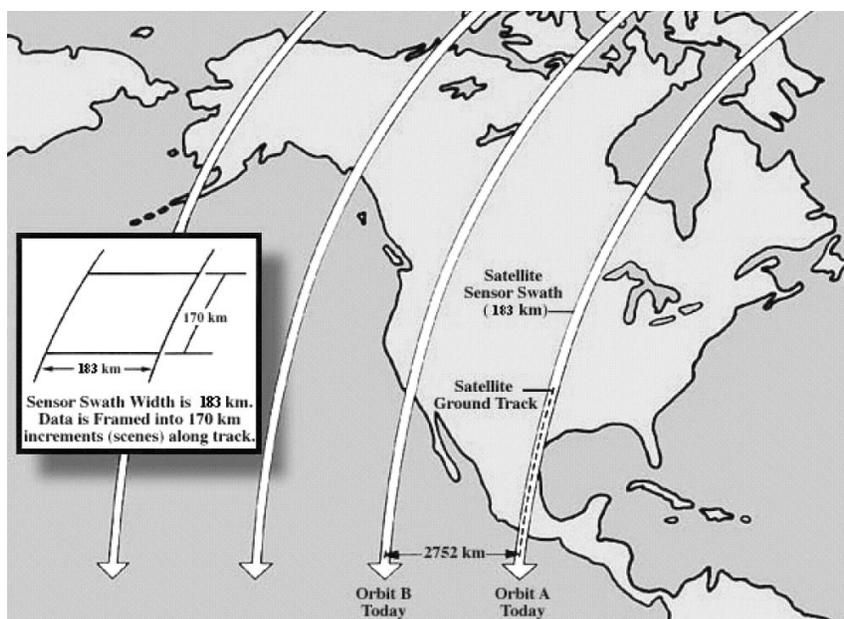


Figura 8. Secuencia de barrido del sensor MSS

### 2.7.3 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LA TIERRA (LST)

Para obtener la LST es necesario corregir la temperatura medida por el sensor (denominada Temperatura de Brillo, TB) de la banda infrarroja térmica, este parámetro ambiental puede ser determinado en grandes porciones de la superficie de la Tierra en diferentes resoluciones espaciales y temporales (Galve et al., 2008; Srivastava, Majumdar y Bhattacharya, 2009).

No obstante, el flujo electromagnético que detecta el sensor se ve afectado por los distintos componentes de la atmósfera. Por ejemplo, la presencia de aerosoles y vapor de agua dispersa de forma selectiva la radiación transmitida entre la superficie y el sensor. En consecuencia, la radiación que recibe el satélite no es la misma que se encuentra en la superficie terrestre que es la que realmente queremos medir. Es importante mencionar que la dispersión atmosférica no es constante en la imagen sino ciertas zonas pueden ser más afectadas que otras, además ésta es dependiente de la longitud de onda y varía entre imágenes (Chuvieco; 1996).

Por tanto, desde un punto de vista teórico, el éxito de un algoritmo para obtener una estimación precisa de la LST depende de:

- la precisión de la consideración de los efectos atmosféricos.
- la precisión de la consideración de los efectos de la emisividad de la superficie.
- la calidad de la banda infrarroja térmica (incluyendo la estabilidad de la función de respuesta espectral, el ruido, la resolución radiométrica y la precisión de la calibración).

Debido a lo anterior el desarrollo de un algoritmo para obtener la LST es complejo. Por un lado, la precisión de las correcciones atmosféricas está limitada por los métodos de transferencia radiativa y la incertidumbre de los coeficientes de absorción de distintas moléculas atmosféricas, especialmente el vapor de agua ya que es el más variable absorbedor en la atmósfera, los coeficientes de absorción y dispersión de aerosoles, así como la incertidumbre de los perfiles atmosféricos. Se conoce que las bandas 20, 22 y 23 son ventanas atmosféricas en el rango de longitud de onda de 3.5 a 4.2 *mm*, también lo son las bandas 29 a 32 en el rango de 8 a 13 *mm*. Sin embargo, la banda 33 que está justo al límite de la última ventana atmosférica mencionada, está afectada por la absorción de ozono, así que esta banda no ayuda a recuperar la LST (Cortés, 2014).

Los principales absorbedores en las bandas térmicas 29, 31, 32 y 33 son el vapor de agua y el  $CO_2$ . Por otro lado, la considerable variación en las emisividades de los diferentes tipos de materiales de la superficie terrestre dificulta tomar un valor preciso de emisividad. A pesar de esto, en medidas de laboratorio de suelos desnudos, Labed and Stoll en 1991 verificaron el efecto del ángulo de observación y mostraron que este efecto es más pequeño en longitudes de onda de 10.6 y 12 *mm* que a 3.7 *mm* (NASA, 1999; Mao et al., 2005; Galve et al., 2008; Zhao et al., 2009), 12 *mm* se encuentra dentro del rango de longitud de onda de las bandas térmicas trabajadas.

Entre los principales métodos para la determinación de la LST se encuentran el Método de Proporción Espectral, el Método de Canal de Referencia, el Método de Normalización de Emisividad (NE) y el Método Split Window (SW).

El Método SW corrige los efectos del ambiente, no obstante, se requiere de una emisividad exacta (Agarwal et al., 2007), dicho método expresa a la LST como una función lineal o cuadrática de la diferencia entre las temperaturas de brillo, con coeficientes constantes válidos local o globalmente. Estos coeficientes se obtienen a partir de la simulación de medidas radiométricas mediante radiosondeos atmosféricos (NASA, 1999; Galve et al., 2008).

El Método NE estima la LST asumiendo una emisividad constante en una de las bandas térmicas, posteriormente dicha temperatura es usada para corregir la emisividad en otra banda térmica, previamente son determinados parámetros atmosféricos (NASA, 1999). En el presente trabajo a falta de datos de otros gases y de perfiles atmosféricos del área de estudio, se utilizó el Método NE para la estimación de la LST.

## 2.8 ÁREAS DE ESTUDIO

En el presente trabajo se mencionarán las características principales de los rellenos sanitarios del Estado de México de los cuales se pretendió realizar el muestreo y la toma de coordenadas geográficas de los pozos de venteo. Cabe mencionar que la fuente de información de los sitios es muy escasa, de lo cual se empleó como principal fuente la red de residuos del valle de México (RRSVM), así como información general de artículos y noticias recientes de diferentes sitios web. La figura 9 muestra los 3 SDF a través de la plataforma de Google Earth y la información de INEGI, 2018.

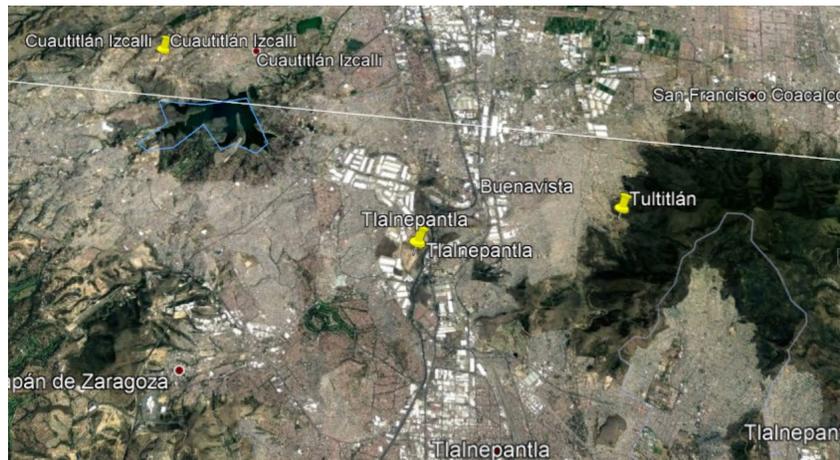


Figura 9. Mapa de Ubicación de los Rellenos Sanitarios en el Estado de México

### 2.8.1 CUAUTITLÁN IZCALLI

El reporte realizado por la RRSVM en el año 2012, se tiene que este RS recibe visitas de PROFEPA y SEMARNAT para cumplimiento de normatividad, se brindan servicios a la Ciudad de México y Estado de México, aunque no brindan servicio al propio municipio.



Figura 10. Imágenes del SDF que muestran el descargue de basura y tipo de suelo. Año: 2012



*Figura 11. Separación de Residuos Sólidos. Imagen de respirador. Año: 2012*



*Figura 12. Laguna de lixiviados sin malla perimetral. Año: 2012*

En una entrevista realizada y documentada en la RRSVM, se indica que se almacena aproximadamente  $80 m^3 \text{ día}^{-1}$  de residuos, de lo cual se proyecta colocar respiradores y quemadores. Su generador de energía eléctrica consume alrededor de 500 litros de diésel semanalmente para iluminación y operación en oficinas.



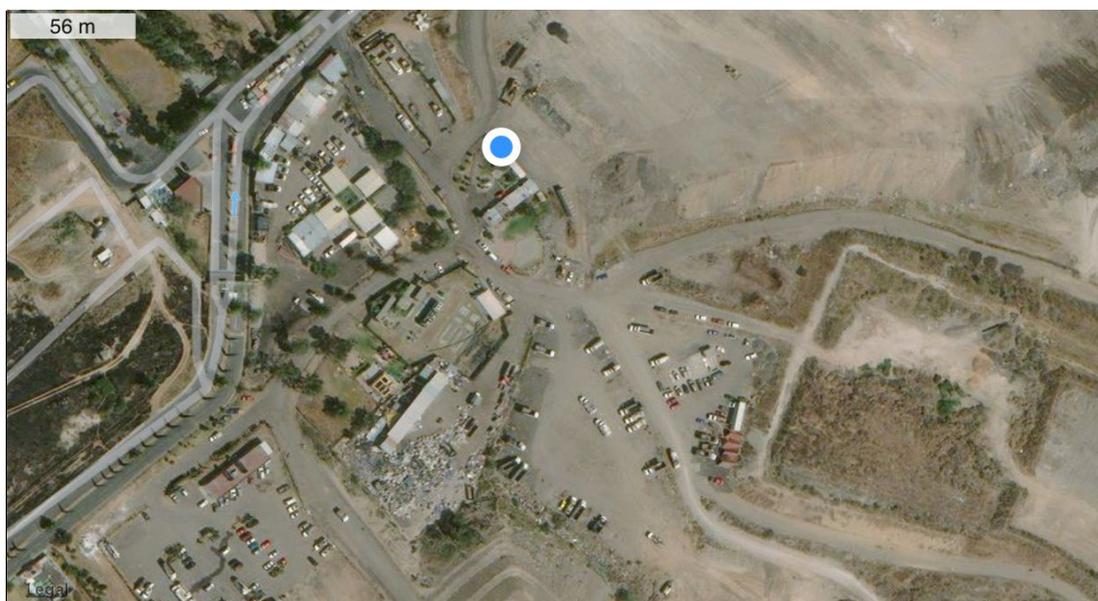
*Figura 13. Camión de transferencia proveniente del Bordo Poniente. Año: 2012*

Se separan a la semana 500Kg de papel y cartón, metales 20Kg, vidrio 300Kg y plásticos duros 100Kg.

## 2.8.2 ATIZAPÁN DE ZARAGOZA

Como se menciona en la RRSVM, de la información recabada en el periodo del 2012 al 2014, el Relleno Sanitario Municipal de Atizapán de Zaragoza denominado “Relleno Sanitario Puerto de Chivos”, se encuentra ubicado en el municipio de Atizapán de Zaragoza en la Carretera Tlalnepantla – Villa del Carbón S/N, Colonia Puerto de Chivos, Atizapán de Zaragoza, estado de México.

Sus coordenadas geográficas son: 19° 35’ 18” latitud norte y 99° 16’ 44” longitud oeste. Limita al Norte y Noreste, con la carretera Atizapán de Zaragoza – Nicolás Romero; por el lado Oeste colinda con el Boulevard Universitario, al Sur, con el camino rural que lleva a la presa San Javier y con la Universidad Autónoma del Estado de México, al Este limita con zona federal.



*Figura 14. Vista superior del RS “Puerto de Chivos” mediante app My GPS Coordinates Pro. Año: 2018.*

La entidad responsable del sitio es el H. Ayuntamiento de Atizapán de Zaragoza y la operación del sitio está a cargo de la Dirección de Servicios Públicos, a través de la Subdirección del Relleno Sanitario.

Este Relleno Sanitario, inició operaciones el 20 de marzo de 1995, es operado por el municipio de Atizapán de Zaragoza, cuenta con una superficie de 39.3 Ha aproximadamente, de las cuales 23.5 Ha son destinadas para la disposición final de RSU, sin embargo, 15.8 Ha de eso forma parte de una barranca.

Se depositan a diario un aproximado de 500 toneladas de RSU, se le estima un 60% de llenado y 10 años de tiempo de vida, realizan la cobertura de los residuos diariamente. Cuenta con las obras y servicios necesarios para su correcto funcionamiento.



Figura 15. Pozo de extracción en la cima del Relleno Sanitario. Año: 2018

El método constructivo del relleno sanitario “Puerto de Chivos” es del tipo trinchera, tiene una extensión aproximada de 39.3 Ha. Inicia operaciones en marzo de 1995 y hasta el año 2005 se contaba con cinco celdas construidas y una en operación. En ese tiempo se estimó que el relleno sanitario tendría un tiempo de vida útil de 11 años 8 meses, sin embargo, a la fecha el relleno sanitario sigue en operación.



Figura 16. Imagen de la cima de la superficie del Relleno Sanitario. Año: 2018

En la siguiente tabla se puede apreciar que del año 1995 al 2005 el relleno tiene un área de  $158,358.82m^2$ , ocupando un volumen de  $3883820m^3$ , de los cuales,  $3408744m^3$  (87%) corresponden a residuos sólidos y el resto a material de cobertura. El total de residuos confinados hasta el año 2005 es de 2045246.46 Toneladas (H. Ayuntamiento de Atizapán de Zaragoza, 2005).

Celda	Área (m <sup>2</sup> )	Profundidad (m)	Capacidad volumétrica (m <sup>3</sup> )	Metros con residuos <sup>(1)</sup>	Volumen ocupado por residuos (m <sup>3</sup> )	Residuos confinados <sup>(2)</sup> (ton)
1	83,208.85	25	2,080,221.29	22	1,830,594.73	1,098,356.84
2 y 3	32,692.40	24	784,617.60	21	686,540.40	411,924.24
4	11,501.58	24	276,037.92	21	241,533.18	144,919.91
5	16,555.99	24	397,343.76	21	347,675.79	208,605.47
6	14,400.00	24	345,600.00	21	302,400.00	181,440.00
TOTAL	158,358.82	2	3,883,820.57		3,408744.10	2,045,246.46

Tabla 11. A la profundidad de la celda, se le restaron los metros ocupados por el material de cobertura. (2) Se consideró una compactación de  $600 Kg m^{-3}$ .

Los residuos que ingresan al sitio son RSU y de Manejo Especial, en promedio ingresan 500 ton/día de residuos sólidos. Este último dato se obtuvo bajo la metodología de determinación de peso volumétrico conforme la Norma Mexicana NMX-AA-61-1985, cuyo resultado fue de  $225 \text{ Kg}/\text{m}^3$  al momento de que el servicio de recolección recibe los residuos urbanos de los domicilios (H. Ayuntamiento de Atizapán de Zaragoza, 2005).

De acuerdo a la NOM-083-SEMARNAT-2003, los SDF se pueden caracterizar de acuerdo a la cantidad de toneladas de RSU y de manejo especial que ingresan por día, clasificando al relleno sanitario “Puerto de Chivos” como Tipo A1 (Mayor a 100 toneladas al día).



*Figura 17. Residuos sólidos urbanos a cielo abierto. Año: 2018*

La Agencia de Cooperación Internacional Alemana (GIZ, por su nombre en alemán), antes GTZ, realizó la proyección de generación y recuperación de biogás conforme al Modelo Mexicano de Biogás 2.0 iniciando con el año en el que el relleno comenzó a operar, hasta el año 2020 (ver tabla 12). Se determinó que en el año 2005 se generaban  $29.1 \text{ m}^3/\text{min}$  con una eficiencia al 100% del sistema de recolección, lo cual equivale a  $15294960 \text{ m}^3/\text{año}$ .



*Figura 18. Colector de biogás ERM. Año: 2018*

Año	Índice de disposición	Toneladas acumuladas	Generación de Biogás		
			m <sup>3</sup> /min	m <sup>3</sup> /hr	GJ / año
1995	187,000	187,000	0	0	0
1996	187,000	374,000	3.9	233	38
1997	187,000	561,000	7.5	451	75
1998	187,000	748,000	10.9	656	108
1999	187,000	935,000	14.1	848	140
2000	187,000	1,122,000	17.1	1,027	170
2001	187,000	1,309,000	19.9	1,196	197
2002	187,000	1,469,000	22.6	1,353	224
2003	144,000	1,640,000	25	1,501	248
2004	208,000	1,848,000	26.4	1,586	262
2005	198,545	2,046,545	29.1	1,746	288
2006	200,531	2,247,076	31.4	1,883	311
2007	191,455	2,415,213	35.5818182	2,135	353
2008	192,101	2,600,712	38.3905594	1,304	380
2009	192,747	2,786,211	41.1993007	2,472	408
2010	193,393	2,971,710	44.008042	2,641	436
2011	194,039	3,157,209	46.8167832	2,809	464
2012	194,685	3,342,708	49.6255245	2,997	492
2013	195,331	3,528,207	52.4342657	3,146	520
2014	195,997	3,713,706	55.243007	3,314	547
2015	196,623	3,899,205	58.0517483	3,483	575
2016	197,269	4,084,704	60.8604895	3,651	603
2017	197,915	4,270,203	63.6692308	3,820	631
2018	198,561	4,455,703	66.477972	3,988	659
2019	199,207	4,641,202	69.2867133	4,157	687
2020	199,853	4,826,701	72.0954545	4,325	714

*Tabla 12. Proyecciones de generación y recuperación de biogás del R.S. "Puerto de Chivos"*

La información de la tabla 12 fue publicada en el año 2016 por el H. Ayuntamiento de Atizapán de Zaragoza del Estado de México.

### 2.8.3 TLALNEPANTLA DE BAZ



*Figura 19. Báscula de camiones y oficinas del Relleno Sanitario. Años: 2012 (izquierda), 2018 (derecha)*

Como lo señala la RRSVM en el año 2012, este sitio entra en operación en 1998 con la empresa Proactiva Medio Ambiente NNA. Su ubicación es Av. Las minas S/N Col. San Pedro Barriento. C.P. 54010. Posee 28Ha, 16 de ella para residuos, de las cuales se tienen dispuestas 5 millones de Toneladas hasta el año 2012. En esta fecha, el volumen que se recibía era de 900 toneladas/día con cobertura total al 60%. Se comentó en dicha recopilación de información que se estimaba que el cierre del RS era para el 2018 y posiblemente aumentar la concesión para recibir mayor cantidad de residuos los cuales son exclusivos del municipio de Tlalnepantla.

Se reportó que este sitio cuenta con toda la infraestructura marcado por la norma; están muy bien comunicados y ubicados casi en el centro del municipio, aunque están muy cerca de zonas industrial, habitacional y comercial. En cuestiones de operación cubren los residuos diariamente y ofrecen servicio a empresas privadas para la disposición final de Residuos de Manejo Especial. Reciben frecuentemente visitas ya sea por parte del Ayuntamiento y algunas otras escuelas de la zona y universidades como la UNAM y el Metropolitano Veracruzano.

El sitio dispone de 28 trabajadores laborando (2 de ellos mujeres); anteriormente eran 33 personas. Están certificados por la norma 14001 y en proceso de la norma 18000. Las jornadas laborales son de 8 horas con 8 empleados, 3 son mujeres. Tienen programas para reducir el consumo de energía eléctrica: focos ahorradores y eficiencia energética. Tienen el objetivo de reducir el consumo de energía eléctrica al 5% anual.



*Figura 20. Compactación y saneamiento de los Residuos Sólidos. Año: 2012*

En este relleno los encargados llevan años comentando que implementarán ya en forma una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) para el manejo de lixiviados, pero solamente habían implementado un prototipo, el proyecto terminó y ya no cuenta con dicha PTAR. Es la misma situación con los quemadores y proyectos a favor del aprovechamiento del biogás generado. En términos generales, para ser una empresa particular, se observa la falta de más inversión y continuidad en proyectos. Cabe señalar que a pesar de que están en un proceso de certificación no proporcionaron gran cantidad de información importante como cantidades de agua, electricidad, costo de operación total anual.



*Figura 21. Pozo de venteo y basura a cielo abierto. Año: 2012*

Tienen un proyecto para el aprovechamiento de biogás para generación de energía eléctrica. La primera etapa consta de la interconexión de los pozos a un quemador central. La segunda etapa colocar el generador de energía de 1.5MW y entrar a los proyectos de obtención de bonos de carbón.



Figura 22. Compactación de los residuos a través de Tractor D-7, compactador 8-16 y Trascabo 953. Año: 2012

El material de cobertura se recicla para hacer el recubrimiento y así tener una mejor captación en los pozos para extracción de biogás y para que haya mejor infiltración de lixiviados. Tiene 71 pozos de venteo.



Figura 23. Celda acondicionada para reposición de residuos. En época de lluvia se genera  $1.4 \text{ l s}^{-1}$ . Año: 2012

La celda que señalaron que utilizarán posteriormente se inunda por las lluvias, debido a que ya habían colocado la capa impermeable. Con respecto al área saneada, que se observa en la parte superior de la imagen, observamos en el extremo derecho el camino por donde escurre el agua pluvial. De esta forma se evita la infiltración de agua pluvial de los residuos que están confinados en dicha área.

La Información en el periodo 2009 a 2012 del Municipio de Tlalnepantla de Baz que se muestra en sus instalaciones, por parte de la Empresa PROACTIVA señala las siguientes características:

## Relleno Sanitario de Tlalnepantla

- Construcción y operación del relleno Sanitario
  - i. Periodo de concesión: 1 de abril de 1998 al 31 de marzo de 2018
  - ii. Superficie del terreno: 28 ha.
  - iii. Operación: 365 días de 6:00 a 22:00h.
  - iv. Población atendida: 720,000 habitantes.
  - v. Recepción promedio de residuos: 820 ton/día
  - vi. Toneladas dispuestas a la fecha: 4.1 millones de toneladas.

### Aprovechamiento energético del Biogás

- 1ª Etapa. Destrucción térmica del metano
- 2ª Etapa. Uso del biogás para generar energía eléctrica.

### Tiradero Municipal

- Saneamiento y clausura



Figura 24. Maqueta del RS de la empresa PROACTIVA. Año: 2018

Por otra parte, a través de una entrevista realizada al supervisor del sitio por parte del Ayuntamiento, proporciona de forma adicional y “ajena” a lo reportado por medio de la concesionara lo siguiente:

- Capacidad estimada en 1998 con proyección a 2018: 6 millones de  $m^3$  con 4 celdas (fases).
- Estudios en el periodo de 2008 a 2009 proyección de 9 millones de  $m^3$ .
- El 22 de octubre del 2014 se realiza un adendum con proyección de 3 a 5 años más de vida del RS con una capacidad estimada de 9 millones de  $m^3$ .

### 3. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Previo a realizar el muestreo y la toma de coordenadas de los pozos de venteo, se solicitó el acceso a los tres rellenos sanitarios a través de los ayuntamientos correspondientes, señalando el tiempo y las operaciones que se desarrollarían en los sitios. Como respuesta por parte de los municipios, se obtuvo el acceso a dos sitios y proporcionaron la información del tercero al cual no se tuvo acceso. A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos de los RS, con base en la información que se pudo extraer y así mismo la metodología que se aplicó.

#### 3.1 RS CUAUTITLÁN IZCALLI

Se ingresó la carta a la Dirección General de Servicios Públicos en el H. Ayuntamiento de Cuautitlán Izcalli, Estado de México solicitando acceso al Relleno Sanitario municipal para la extracción de la siguiente información:

1. Datos generales del Relleno Sanitario. Información del sitio de disposición final, así como los pozos de venteo.
2. Coordenadas geográficas de los pozos de venteo. Esto se realizará por medio de una aplicación móvil y una unidad GPS.
3. Imágenes. Obtenidas de una cámara digital de los pozos y ubicación de los mismos.

En respuesta de la misma Dirección, se manifestaron los siguientes puntos:

1. En lo que corresponde al numeral número uno, le informo único sitio a responsabilidad de la administración municipal de Cuautitlán Izcalli es el Sitio de disposición final Huilango, ubicado en Av. de las minas s/n Col. La Piedad, ejido de Huilango. Cuenta con una superficie de 133, 188.35 m<sup>2</sup> y 6,911.51 m<sup>2</sup> del camino de acceso, sumando un total de 140, 099.86 m<sup>2</sup>.

Cuenta con las siguientes colindancias.

Al norte con asentamientos irregulares.

Al este con el margen del arroyo San Agustín y hacia el noroeste con asentamientos irregulares y lotes en una longitud aproximada de 200m.

Al oeste con parcelas y lotificaciones

Al sur con parcela

De suroeste a noroeste y posterior al arroyo San Agustín existen parcelas que están comenzando a fraccionarse representando una extensión de la mancha urbana con asentamientos irregulares en distancias aproximadas de entre 200 y 300m.

Se estima que el tiradero inició a mediados de los años 80 como tiradero a cielo abierto tomando como referencia el testimonio de empleados del ayuntamiento

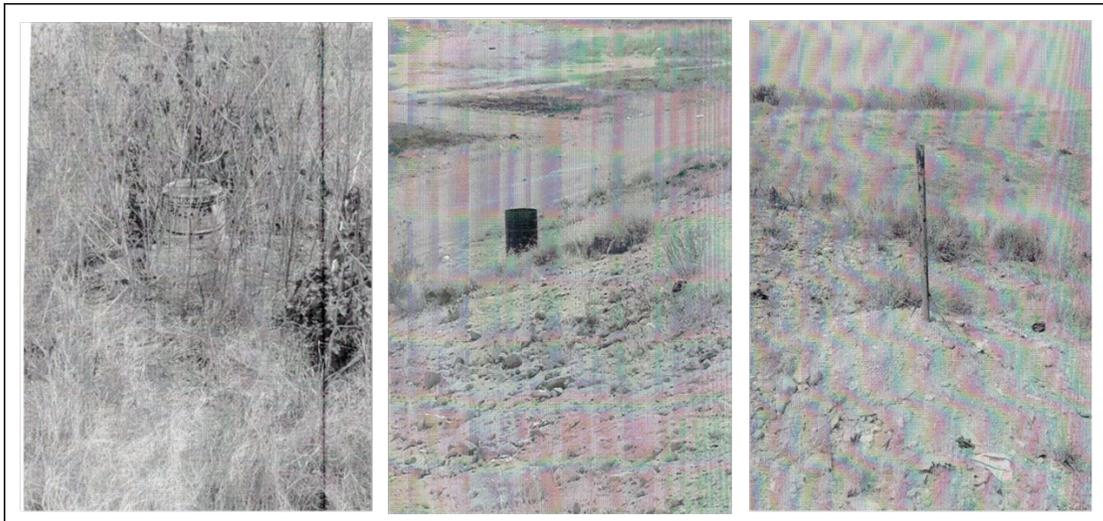
y de habitantes de la zona por lo que debido a su antigüedad ha sido dirigido al menos por ocho administraciones municipales distintas.

El sitio de disposición final dejó de funcionar por haber llegado al término de su vida útil en el mes de junio de 2010, se encuentra en proceso de clausura y saneamiento y se aplica a la norma oficial NOM-083-SEMARNAT-2003. Se adjunta como anexo 1 el plano del Sitio de Disposición Final de Huilango.

Referente a los pozos de venteo, hago de su conocimiento que, en el sitio en comento, se cuenta con ocho, los cuales se pueden ubicar, más sin embargo no se tiene su localización a través de coordenadas topográficas satelitales.

Se agregan adjunta como anexo 2 el plano proyectado de los pozos de biogás emitido en octubre de 2003.

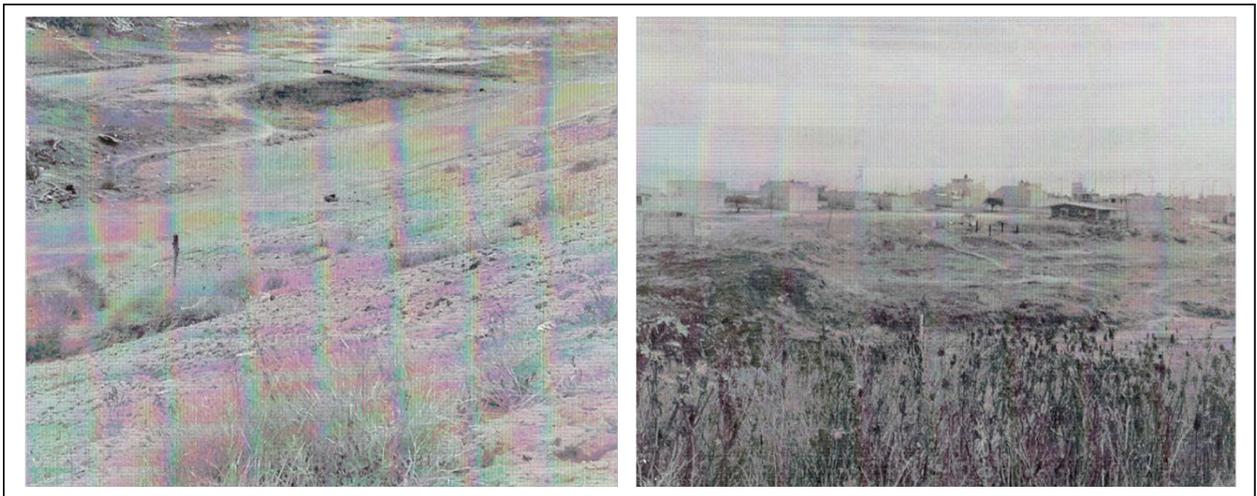
2. En lo que corresponde al numeral número dos, se hace del conocimiento que no se cuenta con la infraestructura técnica necesaria para poder proporcionar las coordenadas geográficas de los pozos de venteo, aun cuando nos indica cómo realizarlo.
3. En lo que corresponde al numeral número tres, le agrego anexo adjunto al presente 9 fotografías en donde se pueden apreciar los pozos de venteo que se encuentran en funcionamiento en el sitio de disposición para su amplio conocimiento.



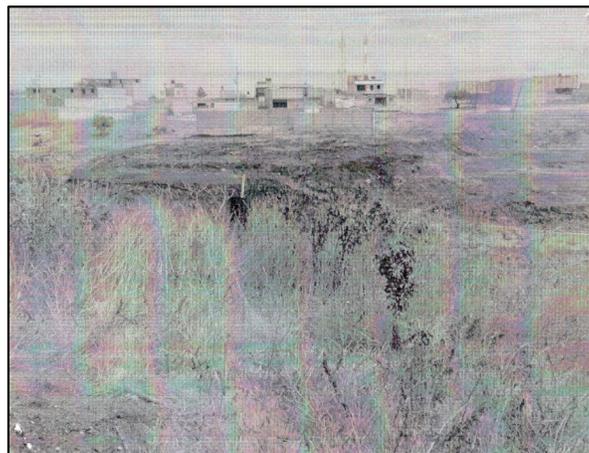
*Figura 25. Imágenes de 3 pozos de venteo en el Relleno Sanitario Huilango*



*Figura 26. Se observa en la foto de la izquierda que no hay división entre el Relleno Sanitarios y las casas aledañas*



*Figura 27. Representación de 2 pozos en sitios distintos del Relleno Sanitario*



*Figura 28. Imagen de pozo de venteo entre el pasto seco*

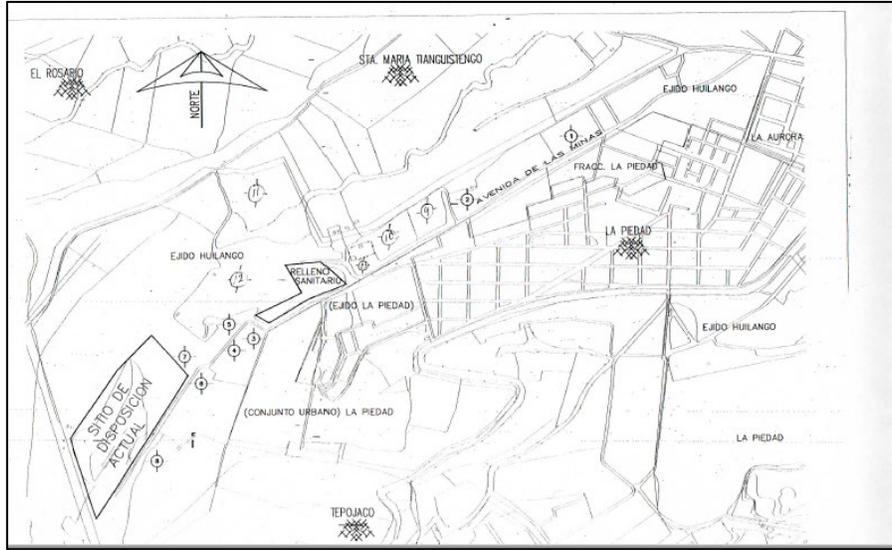


Figura 29. Anexo 1, Mapa de Ubicación del Relleno Sanitario Huilango

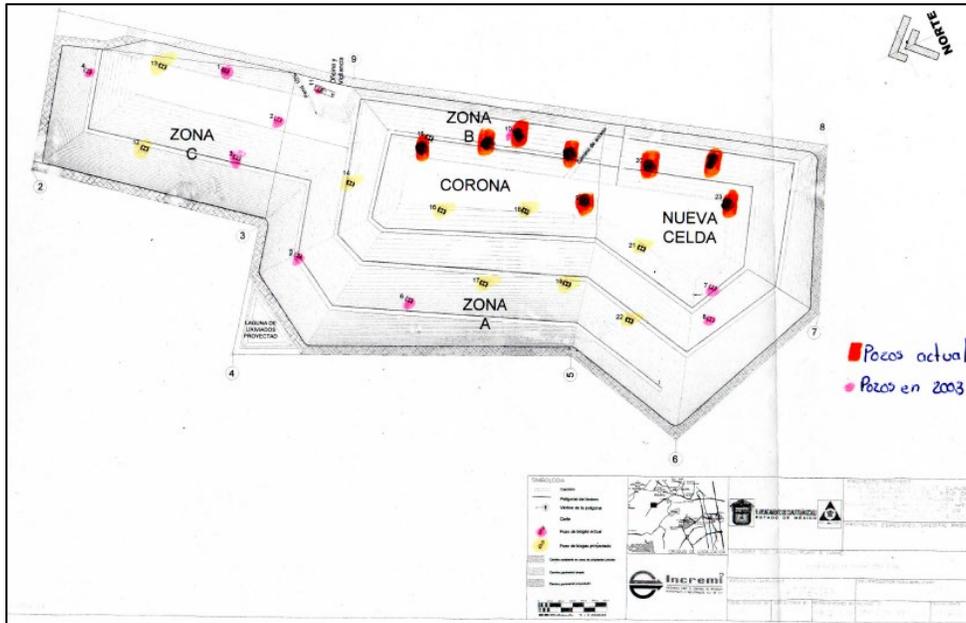


Figura 30. Anexo 2, Mapa de Ubicación de los pozos de venteo en el Relleno Sanitario Huilango

Con base en la respuesta obtenida por parte del ayuntamiento y su información proporcionado, es claro que no fue posible acceder al sitio y por lo tanto no se poder aplicar el muestreo de gas ni tomar las coordenadas geográficas de la zona y sus pozos de venteo.

### 3.2 RS ATIZAPÁN DE ZARAGOZA

En respuesta por parte de la Dirección General de Servicios Públicos del H. Ayuntamiento Atizapán de Zaragoza, se permitió el acceso al Relleno Sanitario indicando ponerse en contacto con el Jefe del sitio.

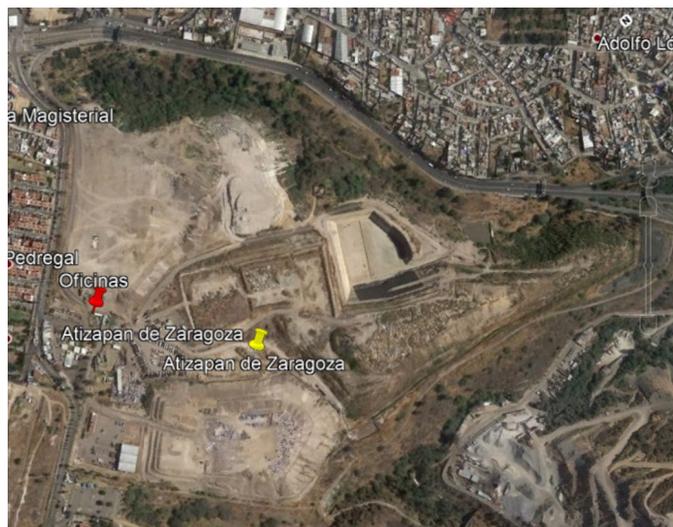


Figura 31. Imagen satelital del Relleno Sanitario “Puerto de Chivos” Fuente: INEGI, Google 2018

El Relleno Sanitario posee 51 hectáreas, se encuentra operando con una antigüedad de 20 años. Los residuos sólidos que reciben es de 500 ton / día de los cuales corresponde el 90% al municipio de Atizapán de Zaragoza y el otro 10% de “lugares aledaños”, información proporcionada por el encargado del SDF.

El Relleno Sanitario se encuentra dividido en 8 celdas de las cuales se obtuvo la información general recabada en la siguiente tabla.

Celdas	Pozos	Tipo de pozo	Profundidad de pozos (m)	Características
1	No tiene			Sitio controlado
2	No tiene			Sitio controlado
3	No tiene			Sitio controlado
4	-			Considerada como celda de emergencia
5	6	Venteo	28 – 30	Considerada como celda de emergencia
6	9	Venteo	28 – 30	Considerada como celda de emergencia
7	14	Extracción	28 – 30	Extracción de Biogás
8	No tiene			Considerada para años posteriores

Tabla 13. Características de las celdas del R.S. con sus respectivos pozos. Fuente: Elaboración propia



*Figura 32. Celdas activas 4 y 6 consideradas de emergencia. Año: 2018*

El acceso brindado correspondió únicamente a la celda 7 la cual posee pozos de extracción de Biogás controlados por parte de la concesionaria “Energreen Atizapán S.A. de C.V.”, empresa proveniente de Monterrey, Nuevo León, la cual se encuentra operando desde el año 2013 en el sitio.



*Figura 33. Vista desde la celda 7: Al fondo se observan las instalaciones de Planta de Biogás Energreen. Año: 2018*

En noviembre del 2016 se realizó la cobertura de la celda 7 con tepetate, retirando los pozos de venteo y colocando 14 pozos de extracción y 2 celdas de almacenamiento y distribución de gas tipo ERM.



*Figura 34. Izquierda: Pozo de extracción de Biogás. Derecha: Colector de Biogás tipo ERM. Año: 2018*



*Figura 35. Izquierda: Pozos de extracción de Biogás. Derecha: Pozos geo referenciados de Celda 7. Año: 2018*

Posteriormente se realizó una cita con la empresa Energreen para solicitar información relacionada con la estimación de flujo anual de metano quienes se negaron a proporcionarla.



*Figura 36. Instalaciones Planta de Biogás Energreen Atizapán. Año: 2018*

Con relación a la información obtenida en la celda 7 de este relleno sanitario y mediante una plática con el personal de la empresa Energreen, se indicó que los pozos de extracción, se perforaron en sitios diferentes a los pozos de venteo que se encontraban inicialmente en esta celda. Debido a lo anterior, si se emplean dichas coordenadas, solo será posible determinar la temperatura superficial del suelo sin considerar el factor de temperatura de los pozos, ya que el gas es aprovechado y no se genera una temperatura particular del biogás obtenido.

### 3.3 RS TLALNEPANTLA DE BAZ

Con base en el Informe 2015 de Plan de Desarrollo del municipio de Tlalnepantla de Baz, se obtuvo que las condiciones geológicas del suelo donde se encuentra ubicado el Relleno Sanitario posee como suelo dominante Leptosol (8.38%) y Phaeozem (0.28%), cuenta con rocas ígneas extrusivas: andesita (7.87%) y volcanso clástico (0.79%). Adicionalmente, las condiciones climáticas reportadas por la estación más cercana del sitio (Aeropuerto Benito Juárez de la Ciudad de México), indican la presencia de clima templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media, y están creciendo sobre terrenos previamente ocupados por matorrales y pastizales (IGECEM, 2014).

El Relleno Sanitario del municipio de Tlalnepantla de Baz, Estado de México, entró en operación en 1998 con la empresa Proactiva Medio Ambiente NNA. Su ubicación es Av. Las minas S/N Col. San Pedro Barriento. C.P. 54010. El Relleno Sanitario posee 28 hectáreas, de las cuales 16 están destinados para la colocación y compactación de residuos. De los estudios realizados en el sitio, se tiene que su tiempo de vida era de 20 años y su capacidad estimada para este año (2018) era de 6 millones de m<sup>3</sup> con 4 celdas (fases). Después, se realizaron estudios en el periodo de 2008 a 2009 y la proyección de capacidad aumentó a 9 millones de m<sup>3</sup>.



*Figura 37. Superficie superior del Relleno Sanitario.*

La metodología empleada se encuentra basada en el cálculo de la temperatura superficial del sitio, la cual puede estimarse mediante percepción remota, el flujo de  $CH_4$  observado, apoyado por el Modelo Mexicano de Biogás 2.0, y los cálculos de estimación de metano basados en casos de estudios de Liu (1996), Agarawal y Garg (2007) y Akumu et al. (2010), quienes consideraron un modelo empírico que asume que los procesos de emisión de  $CH_4$  dependen linealmente de la temperatura ( $E_{CH_4} \sim Temp$ ).

El siguiente diagrama muestra de manera general esta metodología la cual vincula, en su última etapa, los datos observados en campo ( $CH_4$ ), con los cálculos obtenidos de las imágenes satelitales.

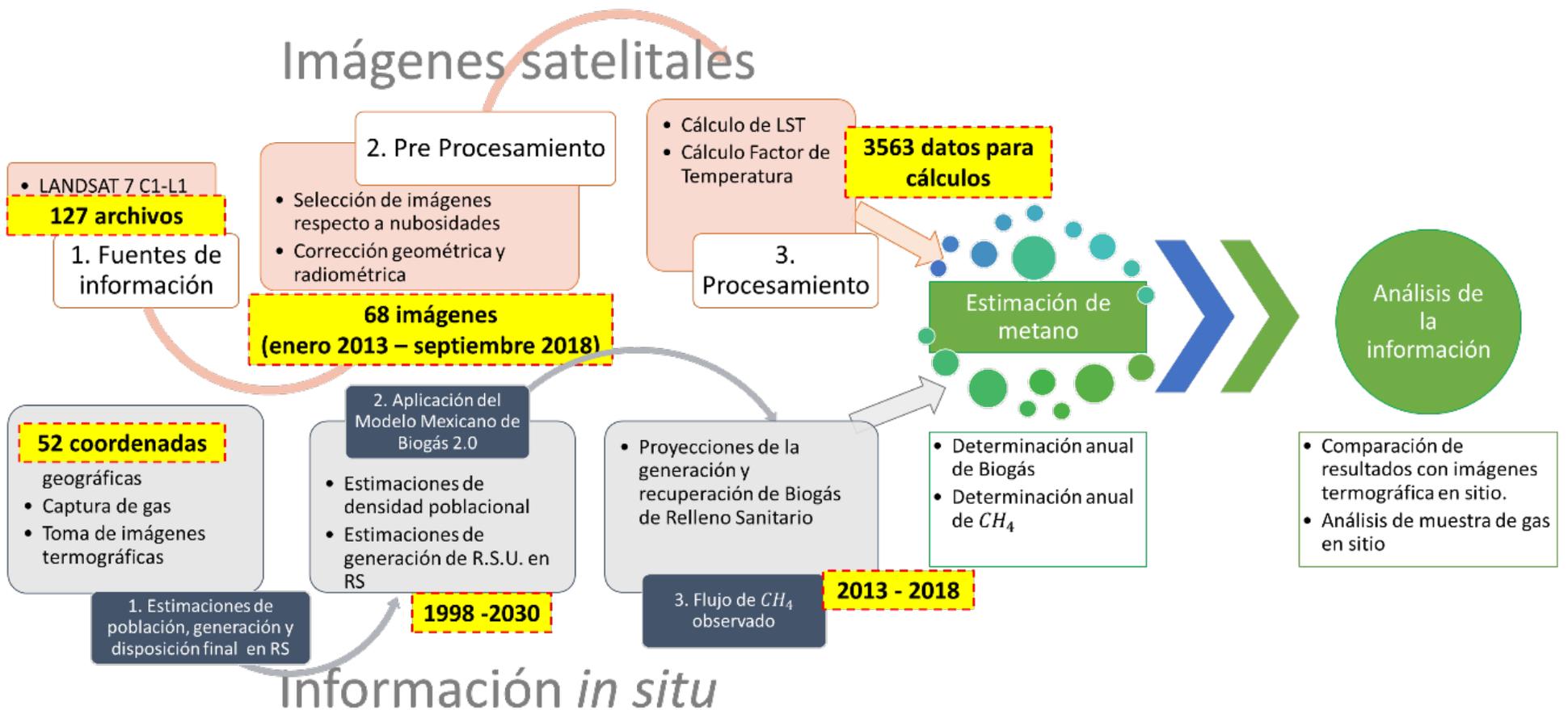
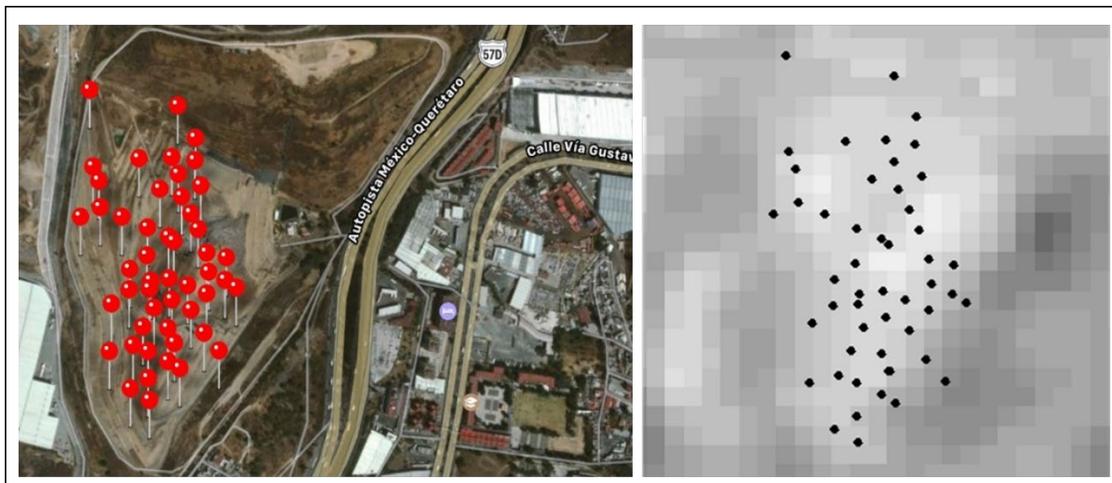


Figura 38. Metodología para estimación de emisiones de metano

### 3.3.1 FUENTES DE INFORMACIÓN

En este estudio se utilizó información obtenida por el sensor Landsat 7 ETM+ con la banda térmica 6, que tiene la capacidad de obtener información térmica de la Superficie de la Tierra. Cuenta con una resolución espacial de 60m, resolución espectral de 10400 a 12500 nm, resolución radiométrica 8 bits/ píxel, dimensiones de (180Km × 185Km) y las imágenes son obtenidas cada 16 días.

Para la identificación geográfica de la zona de estudio, es necesario determinar una cuadrícula determinada por una franja y una fila (Path / Row). Para ello, se ingresó al Relleno Sanitario y se tomaron las coordenadas geográficas de los pozos de venteo (51 en total) con un GPS de bolsillo (GARMIN etrex Legend H) y la aplicación para móvil My GPS Coordinates Pro.



*Figura 39. Ubicación de los pozos de venteo en el Relleno Sanitario. Izquierda coordenada Geográficas, derecha Imagen GeoTiff corregida de enero del 2017*

Debido a que se realizará un análisis histórico de la zona de estudio, se consideraron coordenadas geográficas como referencia de: tres pozos de venteo apagados (sin combustión) de los cuales se extrajeron muestras de gas para llevarlos a laboratorio (ambos con distintas presiones) y un pozo encendido (con combustión), del cual se tomaron imágenes con una cámara termográfica y se contrastarán los datos con los valores obtenidos de las imágenes satelitales. También se consideró una coordenada adicional en el mirador del sitio, esto como referencia de comparación al realizar los cálculos de temperatura superficial de la zona de estudio. Así, en el análisis de datos se tendrán en cuenta cinco coordenadas de referencia las cuales se describen a continuación:

- Mirador: Suelo sin compactación de residuos
- Muestra 1: Pozo apagado sin presión
- Muestra 2: Pozo apagado con presión
- Pozo con presión: Pozo de venteo en medio del relleno sanitario.
- Pozo a cielo abierto: Pozo encendido

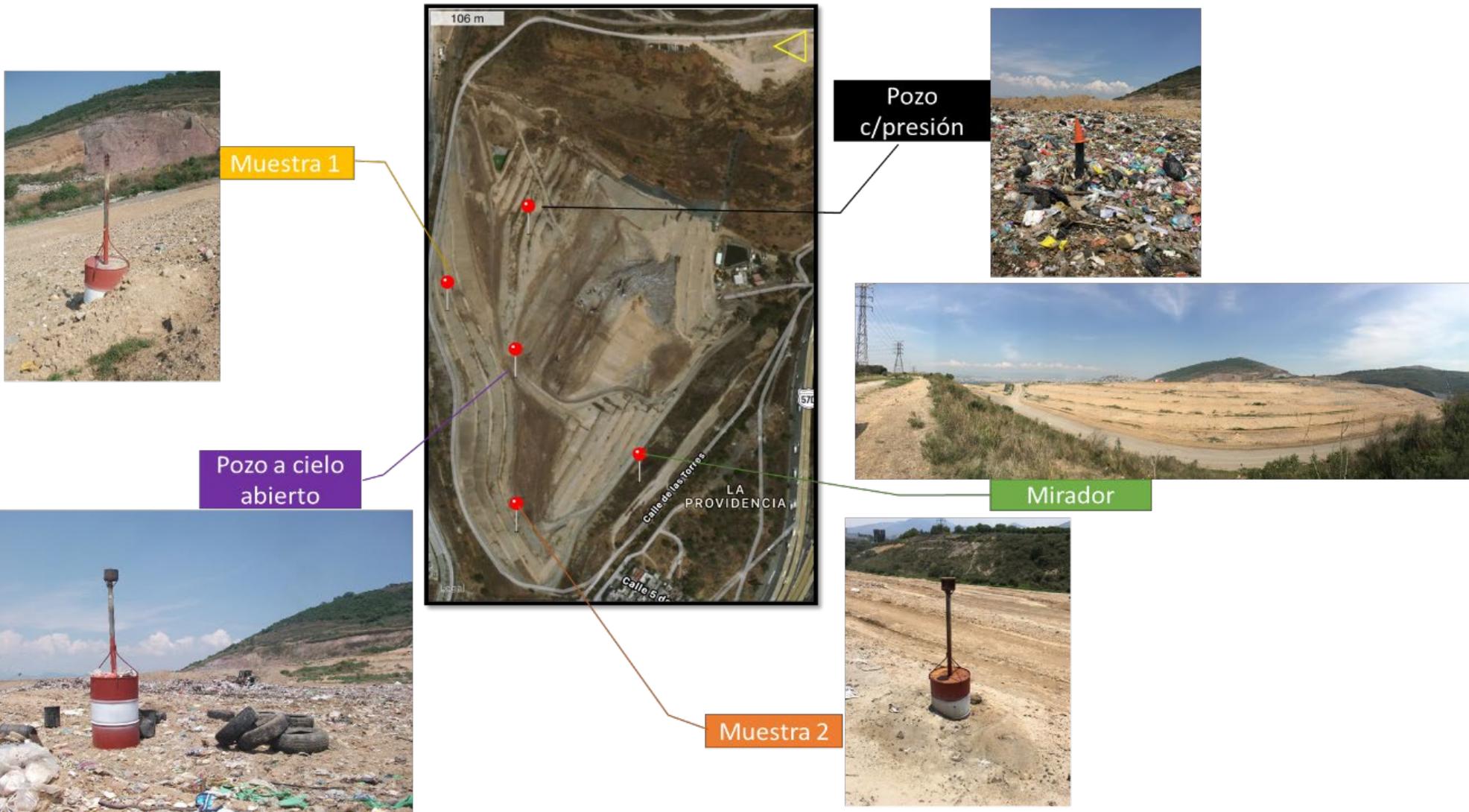


Figura 40. Ubicación de las coordenadas representativas del Relleno Sanitario

Una vez obtenidas las coordenadas, se determinó la localización del área de estudio para descargar los archivos (Imágenes Landsat 7) del sitio <https://earthexplorer.usgs.gov/> de la USGS (United States Geological Survey) a través de la cuadrícula Path 26 / Row 46.

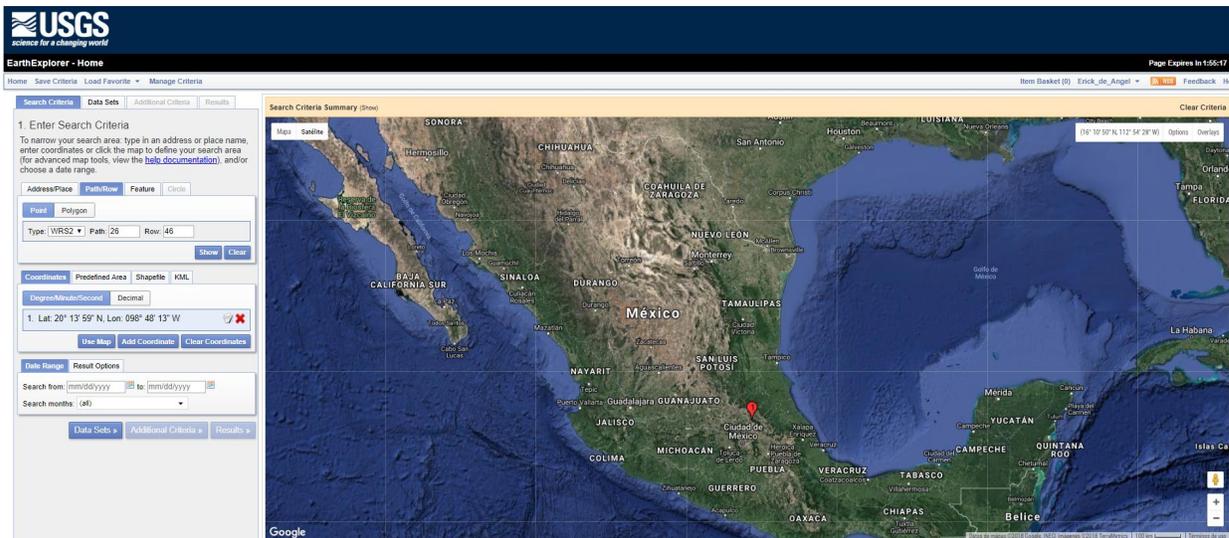


Figura 41. Ubicación del Relleno Sanitario en el Estado de México, México.

Dentro de su base de datos, se seleccionó la colección de archivos Landsat 7 ETM+ C1 Level 1, obteniendo como resultado desde el ingreso del sitio (enero del 2017) 127 imágenes de la zona, las cuales fueron descargadas por carpetas en formato Geo TIFF para su revisión y selección.

### 3.3.2 PREPROCESAMIENTO

Para el primer procesamiento de datos obtenidos por las bandas térmicas, se utilizó el software Erdas Imagine 9.4, que aplica algoritmos al corregir alteraciones radiométricas y geométricas de las imágenes.

Se descargaron 127 archivos del sitio (carpetas comprimidas en formato rar), de los cuales se consideraron los valores máximos y mínimos de la Banda 6 (VCID\_2 y VCID\_1) para unirlos. Estas imágenes poseen información del espectro infrarrojo térmico (propiedades termales del suelo) con longitud de onda de 10.4 – 125  $\mu\text{m}$ .

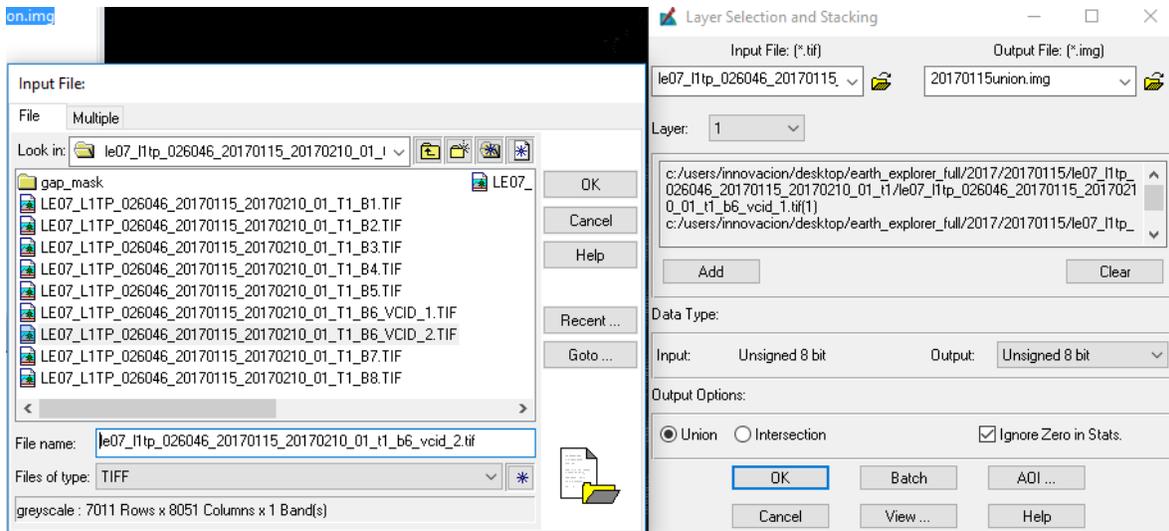


Figura 42. Izquierda: archivos Landsat en formato TIFF de diferentes bandas. Derecha: Unión de las imágenes con valores máximos y mínimos de la Banda 6.

Al obtener las imágenes resultantes, se realizó la primera selección de ellas de manera visual, con base en la observación y percepción directa de nubosidades en la zona de estudio. La segunda selección fue realizada a través de una comparación de las temperaturas promedio de los días en el sitio y las temperaturas superficiales de la zona. Para ello, se obtuvo el historial de temperaturas promedio de los sitios en diferentes fuentes (Ver tabla 1) y se contrastaron con los cálculos resultantes de la temperatura superficial, lo cual se especificará más adelante.

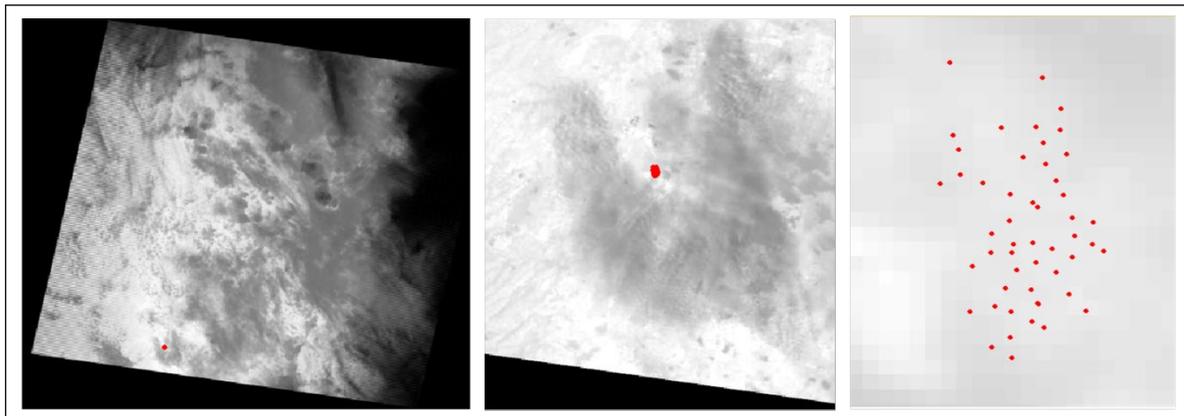


Figura 43. Imagen con nubosidades: Ubicación de las coordenadas representativas del Relleno Sanitario sobre la misma imagen a diversas escalas

Una vez descartadas las imágenes con nubosidades, se consideraron 68 imágenes (con sus respectivas fechas) desde enero del 2013 a septiembre del 2018. A cada uno de estos archivos, se les aplicaron las correcciones radiométricas y geométricas para realizar sus cálculos posteriormente.

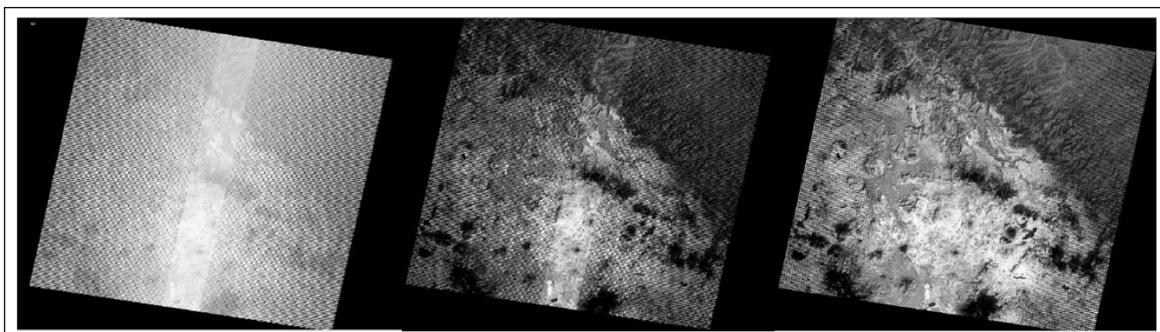


Figura 44. Correcciones radiométricas y geométricas de la imagen del 31 de enero de 2017

### 3.3.3 PROCESAMIENTO

Inicialmente, es necesario indicar que cada una de las imágenes corregidas posee información en cada uno de sus píxeles, los cuales se convierten en una intensidad luminosa o nivel de gris. A esta información se le denomina Nivel Digital (ND) y, debido a que posee cantidades enteras, es posible considerar cada imagen como una matriz numérica, donde cada píxel es una entrada considerada como coordenada. Así, el ND de las imágenes está asociado a la escala de grises con valores de 8 bits, es decir,  $2^8$  valores distintos de tonalidades (0-255 o 1-256 datos.)

El proceso de cálculo de temperaturas por coordenadas en cada una de las imágenes, comienza con el Nivel Digital de la banda térmica, detectado por el sensor satelital, el cual es corregido, y a partir de éste se aplican diferentes modelos matemáticos para obtener el Factor de Temperatura anual. El siguiente diagrama describe de manera general este proceso aplicado a cada una de las 68 imágenes empleando el software Arc Map 10.5.

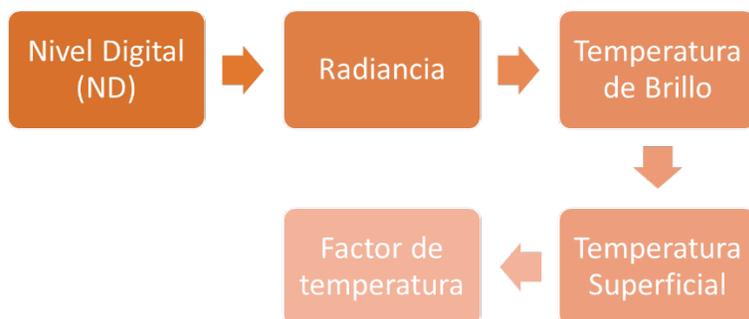


Figura 45. Cálculos para obtención del Factor de temperatura anual del Relleno Sanitario

### 3.3.3.1 CONVERSIÓN DE ND A RADIANCIA (TOA – TOP OF ATMOSPHERE)

Los datos obtenidos por el sensor poseen información para obtener la energía reflejada, ya que la radiancia espectral es consecuencia de la reflexión de la radiación electromagnética en las cubiertas. Debido a que los coeficientes para esta conversión son valores conocidos en cada sensor, es posible aplicar el proceso inverso, es decir, determinar la radiancia espectral a través del ND. Para ello se aplica la siguiente fórmula del SW algorithm empleando la herramienta Raster Calculator,

$$L_{\lambda} = ML \cdot Q_{cal} + AL$$

donde:

$L_{\lambda}$  = Radiancia espectral [ $W/(m^2 \text{ srad } \mu m)$ ]

$Q_{cal}$  = Producto estándar cuantificado y calibrado por valores de píxel (ND).

$ML$  = Factor multiplicativo de escalado específico obtenido del metadato RADIANCE\_MULT\_BAND\_6\_VCID\_1. En este caso, con valor 6.7087E-02.

$AL$  = Factor aditivo de escalado específico obtenido del metadato RADIANCE\_ADD\_BAND\_6\_VCID\_1. En este caso, con valor -0.06709.

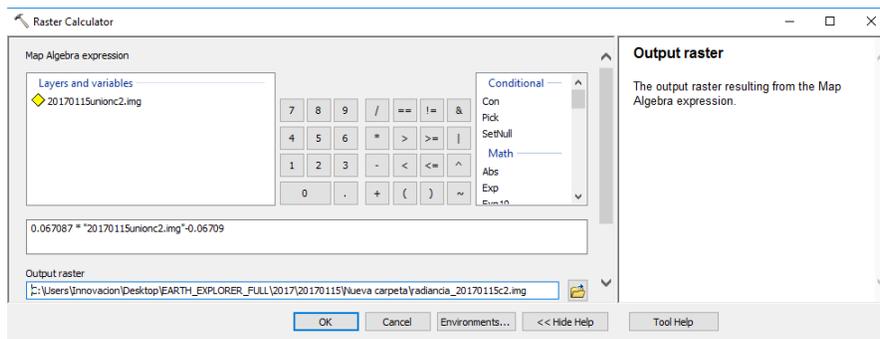


Figura 46. Cálculo de Radiancia espectral con la herramienta Raster Calculator

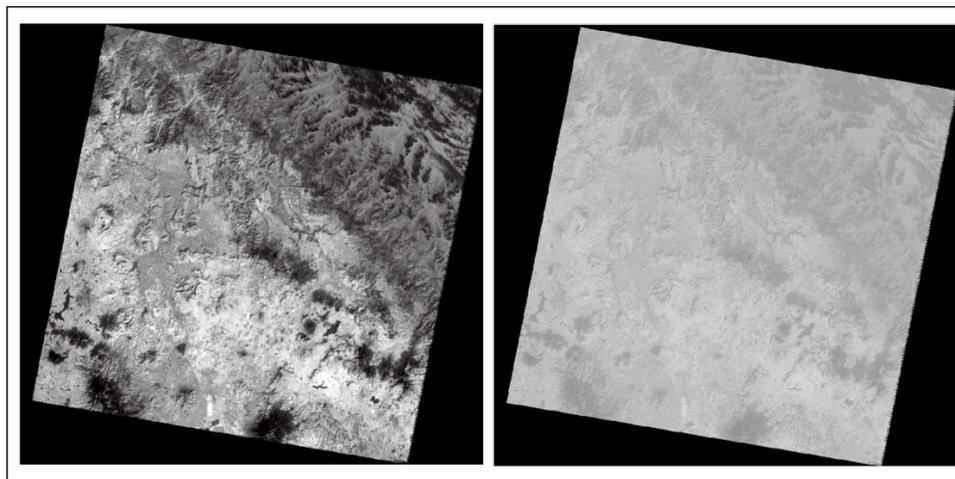


Figura 47. Imágenes de ND a TOA. Conversión de la imagen del 15 de enero de 2017

### 3.3.3.2 CONVERSIÓN DE TOA A TEMPERATURA DE BRILLO (TB)

Para el siguiente cálculo de imagen, se empleó la siguiente ecuación

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)}$$

donde:

$T_B$  = Temperatura de Brillo aparente [K]

$L_\lambda$  = TOA [ $W/(m^2 \text{ srad } \mu m)$ ]

$K_1$  = Constante de conversión térmica específica de la Banda 6. Esta constante se encuentra en el metadato K1\_CONSTANT\_BAND\_6\_VCID\_1 = 666.09.

$K_2$  = Constante de conversión térmica específica de la Banda 6. Esta constante se encuentra en el metadato K2\_CONSTANT\_BAND\_6\_VCID\_1 = 1282.71.

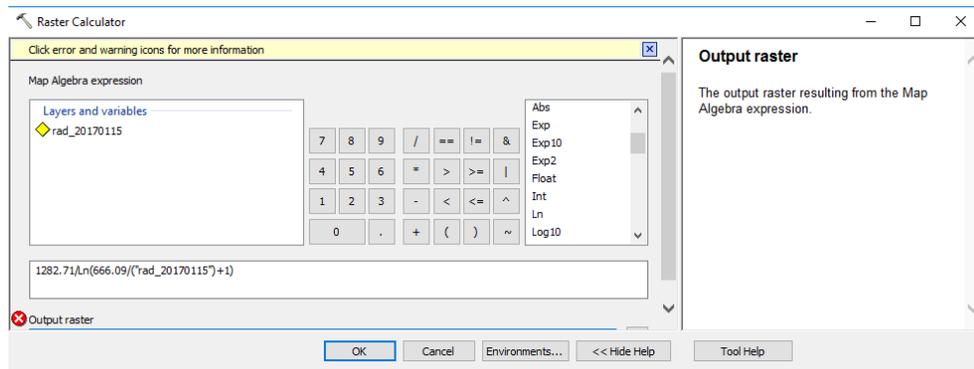


Figura 48. Cálculo de la Temperatura de Brillo con la herramienta Raster Calculator

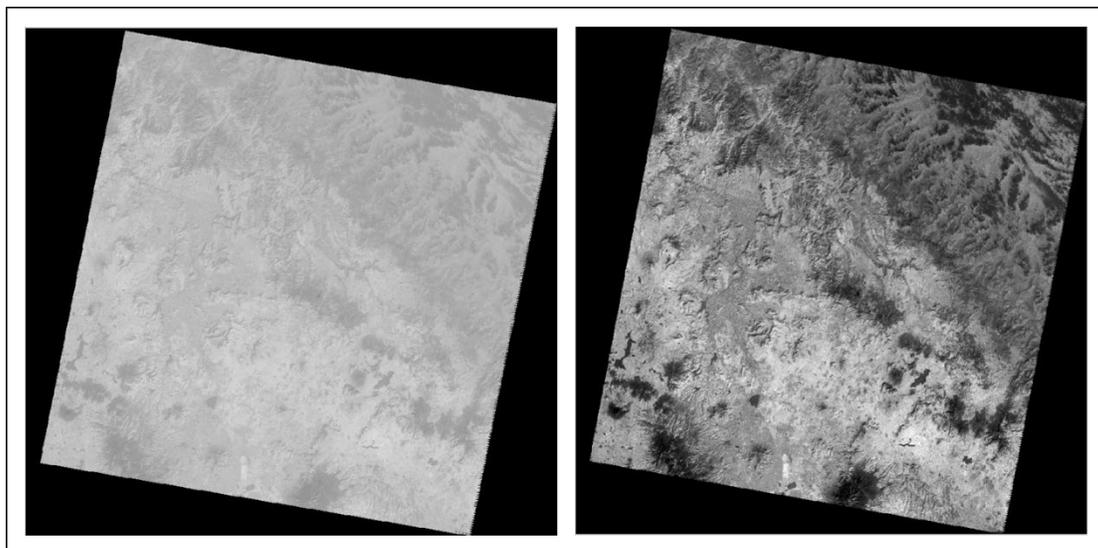


Figura 49. Imágenes de TOA a TB. Conversión de la imagen del 15 de enero de 2017

### 3.3.3.3 CONVERSIÓN DE TEMPERATURA DE BRILLO A TEMPERATURA SUPERFICIAL (LST)

Para la obtención del mapa de temperatura de superficie, se aplicó la siguiente ecuación a cada una de las coordenadas de los pozos (píxeles) por imagen (Srivastava, Majumdar y Bhattacharya, 2009; Akumu et al., 2010).

$$T_S = \frac{T_B}{1 + \lambda \left( \frac{T_B}{\rho} \right) \ln \epsilon}$$

donde:

$T_B$  = Temperatura de Brillo aparente [K]

$\lambda$  = Longitud de onda media de la Banda 6 (11.335  $\mu\text{m}$ )

$\rho$  = Constante numérica ( $1.4387728 \times 10^{-2} \text{ m K}$ )

$\epsilon$  = Emisividad constante a suelo desnudo (0.97)

La Constante física  $\rho$  relaciona temperatura absoluta y energía. Se determina mediante la ecuación  $\rho = \frac{hc}{\sigma}$  donde las constantes son: h (constante de Planck) =  $6.626068 \times 10^{-34} \text{ J s}$ , c (velocidad de la luz) =  $2.99792 \times 10^8 \text{ m/s}$  y  $\sigma$  (constante de Boltzmann) =  $13806503 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

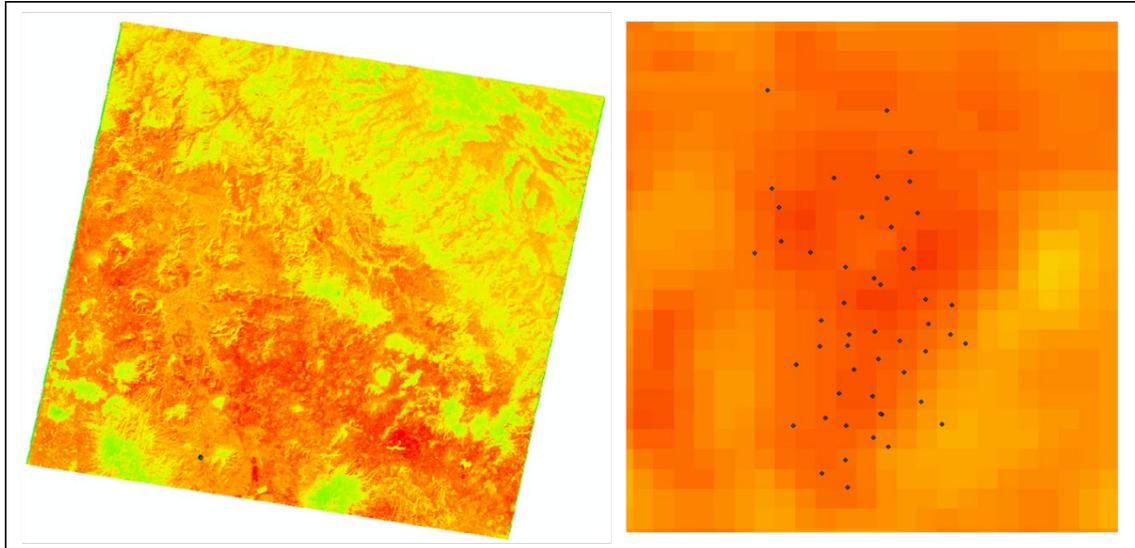


Figura 50. Izquierda Imagen resultante con datos de LST. Derecha: Coordenadas en la misma imagen con las coordenadas de los pozos de venteo en la R.S Imágenes del 15 de enero de 2017

Para el caso de discriminación de imágenes con nubosidad, se convirtieron las unidades de temperaturas de Kelvin a  $^{\circ}\text{C}$ , es decir, restando 273.15 a la temperatura resultante de la coordenada del Mirador (Ver Figura 44). Después, se descartaron las imágenes que poseían menor temperatura con respecto a la temperatura promedio del día (Ver tabla de sección Anexo).

Para obtener los datos de la temperatura superficial de cada uno de los pozos de venteo, se realizó la conversión de coordenadas geográficas a UTM WGS84. Después, en cada una de las 68 imágenes, se trabajó con la información correspondiente a cada uno de los 52 pozos. Obteniendo así, 3536 datos distintos para continuar con los cálculos.

Referencia	Coord. Geográficas		Coordenadas UTM WGS84	
	Longitud	Latitud	Longitud	Latitud
Mirador	-99.207358	19.582564	478252.6280809064	2165302.1074352544
Muestra 1	-99.210011	19.584892	477974.7012522692	2165560.052962728
Pozo con presión	-99.209072	19.583983	478073.0579561064 4	2165459.3464389145
Pozo a cielo abierto	-99.208894	19.585919	478091.988024008	2165673.5525614917
Muestra 2	-99.209058	19.581894	478074.2435470983 6	2165228.1854631337

Tabla 14. Conversión de coordenadas representativas del estudio

### 3.3.3.4 FACTOR DE TEMPERATURA

Otro elemento del modelo empírico es el Factor de Temperatura, el cual se determina mediante las siguientes ecuaciones:

$$F(T_s) = \frac{e^{0.334(T_s-23)}}{1 + e^{0.334(T_s-23)}}$$

$$F_t = \frac{F(T_s)}{\overline{F(T_s)}}$$

donde:

$F_t$  = Factor de Temperatura anual (adimensional)

$T_s$  = Temperatura Superficial de la Tierra [°C]

$\overline{F(T_s)}$  = Media aritmética anual de  $F(T_s)$



20130205	20130221	20130309	20130325	20130426	20130512	20130629	20130715	20130816	20130901	20131003	20131120	20131206	20131222
0.897014563107	0.988591175949	0.995151538559	0.996663047193	1.038606603228	1.677466316125	0.977597504367	0.912716980360	0.758754201633	0.543611553859	0.84931553944	1.111315565042	0.866564459909	0.999146061038
0.944404149386	1.001689749144	0.99880926897	0.994160962865	0.911682008981	1.617432394879	0.682160304452	0.912716980360	0.916340316126	1.495761990127	0.96370331841	1.314314915918	0.957065201149	0.968593602029
0.986143433923	0.995643764801	0.985632817832	0.987301593825	0.911682008981	0.058790589343	0.904371174931	0.943255674018	0.866612117806	1.155570650555	0.932117940807	0.958427723503	1.020504103382	0.994763482439
1.089132554605	1.006866078240	0.990786481231	0.999168236656	0.999992162543	0.143722834210	0.977597504367	0.994787167572	1.005101696997	1.155570650555	1.029180513982	0.958427723503	1.036594076942	0.983676061938
1.024223109507	1.001689749144	0.990786481231	1.002815431618	0.999992162543	0.769478814281	0.977597504367	1.016182714625	1.005101696997	1.155570650555	1.013400345650	1.036030975538	1.036594076942	0.976708245663
1.024223109507	1.001689749144	0.979743387533	0.996663047193	0.957666719842	1.318936818135	0.830012838195	0.970559800129	0.962559369293	1.155570650555	0.932117940807	0.958427723503	1.050593494068	0.968593602029
1.089132554605	1.018328088480	0.998880926897	1.001134648111	0.912808768485	0.084740399626	0.977597504367	1.016182714625	1.005101696997	0.86891056513	1.035430148132	1.036030975538	1.073130286467	0.983676061938
1.089132554605	1.018328088480	0.998880926897	1.001134648111	0.999992162543	0.084740399626	0.977597504367	1.016182714625	1.005101696997	0.86891056513	1.035430148132	1.036030975538	1.073130286467	0.983676061938
0.848491062901	0.970831900824	0.979743387533	0.996663047193	0.957666719842	1.456681631375	0.977597504367	0.802249553663	1.005101696997	0.86891056513	1.013400345650	1.036030975538	0.957065201149	1.008822219278
0.944404149386	0.988591175949	0.990786481231	0.999168236656	0.957666719842	1.577726939878	0.977597504367	1.016182714625	0.962559369293	0.388721144360	1.021890369378	1.036030975538	0.957065201149	1.002890419081
0.944404149386	0.988591175949	0.990786481231	0.999168236656	0.957666719842	1.577726939878	0.977597504367	1.016182714625	0.962559369293	0.388721144360	1.021890369378	1.036030975538	0.957065201149	1.002890419081
1.024223109507	1.006866078240	1.007112529942	1.001134648111	0.999992162543	0.137204954117	0.977597504367	1.034893189534	1.005101696997	0.543611553859	1.021890369378	1.036030975538	0.920504103382	0.999146061038
1.089132554605	1.015091889671	1.009094576151	1.004248932676	1.038606603228	0.170301142156	0.977597504367	1.034893189534	1.043913441043	1.005236586576	1.029180513982	1.036030975538	1.036594076942	0.999146061038
1.058492698494	1.006866078240	1.007112529942	0.999168236656	0.999992162543	0.622337532066	0.977597504367	1.034893189534	1.043913441043	1.005236586576	1.021890369378	0.958427723503	0.791095134789	1.002890419081
1.024223109507	0.995643764801	1.004789012134	0.999168236656	0.957666719842	0.921089267419	0.977597504367	1.034893189534	1.078841850908	1.155570650555	1.021890369378	0.958427723503	0.930140709794	1.006087718570
1.024223109507	0.988591175949	1.007112529942	0.999168236656	0.999992162543	0.845356351766	0.977597504367	1.034893189534	1.078841850908	1.19339060239	1.013400345650	0.958427723503	0.930140709794	1.011550636650
1.058492698494	1.006866078240	1.007112529942	1.001134648111	1.038606603228	0.427252006838	1.048635946801	1.034893189534	1.078841850908	1.319339060239	1.013400345650	0.958427723503	0.791095134789	1.011550636650
1.116319766141	1.015091889671	1.012233622101	1.001134648111	1.073357451047	0.170301142156	1.034893189534	1.078841850908	1.155570650555	1.021890369378	1.036030975538	1.036594076942	1.006087718570	1.006087718570
1.161325518644	1.018328088480	1.012233622101	1.004248932676	1.038606603228	0.170301142156	0.977597504367	1.034893189534	1.043913441043	1.155570650555	1.021890369378	1.036030975538	1.062681252382	1.006087718570
1.002259944728	1.015091889671	1.012233622101	1.002815431618	1.073357451047	0.236165777946	0.977597504367	1.016182714625	1.078841850908	1.155570650555	0.932117940807	1.036030975538	1.050593494068	1.002890419081
1.24223109507	0.995643764801	0.998880926897	1.002815431618	1.073357451047	0.553031795786	0.977597504367	1.016182714625	1.078841850908	1.319339060239	0.932117940807	1.036030975538	0.980955712885	1.013145065762
1.058492698494	1.01301976626	1.009094576151	1.004248932676	1.104427592487	0.321264643127	0.904371174931	0.970559800129	1.043913441043	1.155570650555	0.97889724833	0.958427723503	1.002053777674	0.999146061038
1.089132554605	1.01301976626	1.004789012134	1.002815431618	1.073357451047	0.553031795786	0.904371174931	0.943255674018	1.005101696997	1.155570650555	0.97889724833	1.036030975538	1.020504103382	0.994763482439
1.058492698494	1.014943782866	1.009094576151	1.004248932676	1.104427592487	0.321264643127	0.977597504367	0.994787167572	1.078841850908	1.155570650555	1.003532900022	1.036030975538	1.020504103382	0.999146061038
1.210341750625	1.021095857958	1.007112529942	1.005471711731	1.038606603228	0.694770634567	0.977597504367	1.034893189534	1.078841850908	1.319339060239	1.029180513982	1.036030975538	1.073130286467	0.989649373156
1.024223109507	1.01301976626	1.002065443785	1.002815431618	0.911682008981	1.26311795887	1.048635946801	1.043619362206	1.319339060239	0.97889724833	0.97889724833	0.958427723503	1.002053777674	0.999146061038
0.986143433923	0.995643764801	1.004789012134	0.999168236656	0.999992162543	1.617432394879	1.116564286297	1.034893189534	1.078841850908	1.155570650555	1.013400345650	0.958427723503	0.957065201149	1.014846013301
0.850266049980	0.959788908060	0.972803428145	0.994160962865	0.960801619831	1.137204954117	0.904371174931	0.970559800129	1.043913441043	0.388721144360	1.003532900022	0.958427723503	0.957065201149	1.018592266149
0.89056273297	0.988591175949	0.990786481231	0.994160962865	0.957666719842	0.070656024230	1.667402499626	0.970559800129	1.043913441043	0.543611553859	1.074063141491	1.036030975538	1.020503777674	1.022736944354
0.899056273297	0.995643764801	1.002065443785	1.001134648111	0.957666719842	0.845356351766	0.904371174931	0.912716980360	0.916340316126	0.86891056513	0.96370331841	0.958427723503	1.036594076942	0.989649373156
0.814149426602	0.988591175949	0.99880926897	0.999168236656	0.999992162543	1.369867224830	0.904371174931	0.970559800129	0.916340316126	0.86891056513	0.97889724833	0.958427723503	1.036594076942	0.983676061938
0.899056273297	0.995643764801	0.99880926897	0.999168236656	0.999992162543	0.769478814281	0.904371174931	1.016182714625	0.962559369293	1.005236586576	1.003532900022	1.036030975538	1.036594076942	0.989649373156
1.058492698494	1.006866078240	0.990786481231	1.001134648111	0.999992162543	0.553031795786	0.977597504367	1.016182714625	1.078841850908	1.005236586576	1.029180513982	1.036030975538	1.073130286467	0.994763482439
1.254208973871	1.001689749144	0.990786481231	0.999168236656	0.999992162543	0.170301142156	1.048635946801	0.994787167572	1.110070747550	0.86891056513	1.003532900022	1.111315565042	1.073130286467	0.999146061038
1.26483340087	1.001689749144	0.998880926897	1.001134648111	0.999992162543	0.769478814281	0.977597504367	0.994787167572	1.043913441043	0.86891056513	1.035430148132	1.036030975538	1.062681252382	0.994763482439
1.024223109507	0.988591175949	0.995151538559	1.001134648111	0.999992162543	1.202460392307	0.977597504367	0.994787167572	1.005101696997	3.969124677393	1.035430148132	1.036030975538	1.020504103382	0.994763482439
1.271934387214	1.006866078240	1.004789012134	1.001134648111	0.999992162543	1.617432394879	1.048635946801	1.034893189534	1.005101696997	0.638747711638	1.029180513982	1.111315565042	1.062681252382	0.999146061038
0.986143433923	0.995643764801	0.99880926897	0.999168236656	0.957666719842	1.633336134770	0.977597504367	1.034893189534	1.005101696997	0.543611553859	1.021890369378	1.036030975538	1.000247688228	1.002890419081
0.986143433923	1.001689749144	1.004789012134	0.999168236656	0.999992162543	1.668842410833	1.116564286297	1.034893189534	1.043913441043	1.005236586576	1.013400345650	0.958427723503	0.980955712885	1.016296711792
1.024223109507	1.001689749144	1.007112529942	1.001134648111	0.999992162543	1.677466316125	1.048635946801	0.994787167572	1.005101696997	0.746885613777	1.029180513982	1.036594076942	1.008822219278	1.008822219278
1.058492698494	1.006866078240	1.004789012134	1.004248932676	0.999992162543	1.369867224830	1.048635946801	1.016182714625	1.005101696997	0.86891056513	1.040780834018	1.111315565042	1.062681252382	0.999146061038
0.850266049980	1.001689749144	1.007112529942	1.002815431618	0.999992162543	1.553237522745	1.048635946801	1.034893189534	0.962559369293	0.86891056513	1.021890369378	0.958427723503	1.020504103382	0.999146061038
0.850266049980	0.995643764801	0.99880926897	1.001134648111	0.999992162543	1.137204954117	0.977597504367	0.916340316126	0.916340316126	0.543611553859	1.021890369378	0.958427723503	1.036594076942	0.999146061038
0.850266049980	1.001689749144	1.007112529942	1.002815431618	0.999992162543	1.553237522745	1.048635946801	1.034893189534	0.962559369293	0.86891056513	1.021890369378	0.958427723503	1.020504103382	0.999146061038
0.795434286421	0.995643764801	1.002065443785	0.999168236656	0.999992162543	1.525155579614	1.048635946801	0.994787167572	0.866612117806	0.86891056513	1.003532900022	0.800671394556	0.980955712	

Finalmente, se obtuvieron los promedios, de los factores de temperatura a través de la media aritmética, considerando información numérica de 12 decimales, esto debido a las constantes físicas de temperatura absoluta y energía.

<b>Año</b>	<b><math>F_t</math> anual</b>
<b>2013</b>	0.999999999986059
<b>2014</b>	0.9999999830339Mo55
<b>2015</b>	0.99999998690790
<b>2016</b>	1.002035967947830
<b>2017</b>	1.000000000467740
<b>2018</b>	0.999999962759493

Tabla 15. Resultados de Factores de temperatura anuales promedio

### 3.3.3.5 APLICACIÓN DEL MODELO MEXICANO DE BIOGÁS 2.0

Partiendo del hecho que existe una relación directa entre el crecimiento poblacional y la generación de RSU, tal como lo muestran las estadísticas de la Ciudad de México y área metropolitana (INEGI y SEMARNAT, 2015), se obtuvieron las proyecciones de la población, y en consecuencia de la captación de residuos en el relleno sanitario con base en la información recopilada del Consejo Nacional de Población (CONAPO), H. Ayuntamiento (informes del 2013 – 2015 y 2016 – 2018), así como la empresa concesionaria PROACTIVA, que opera actualmente en el RS de Tlalnepantla de Baz.

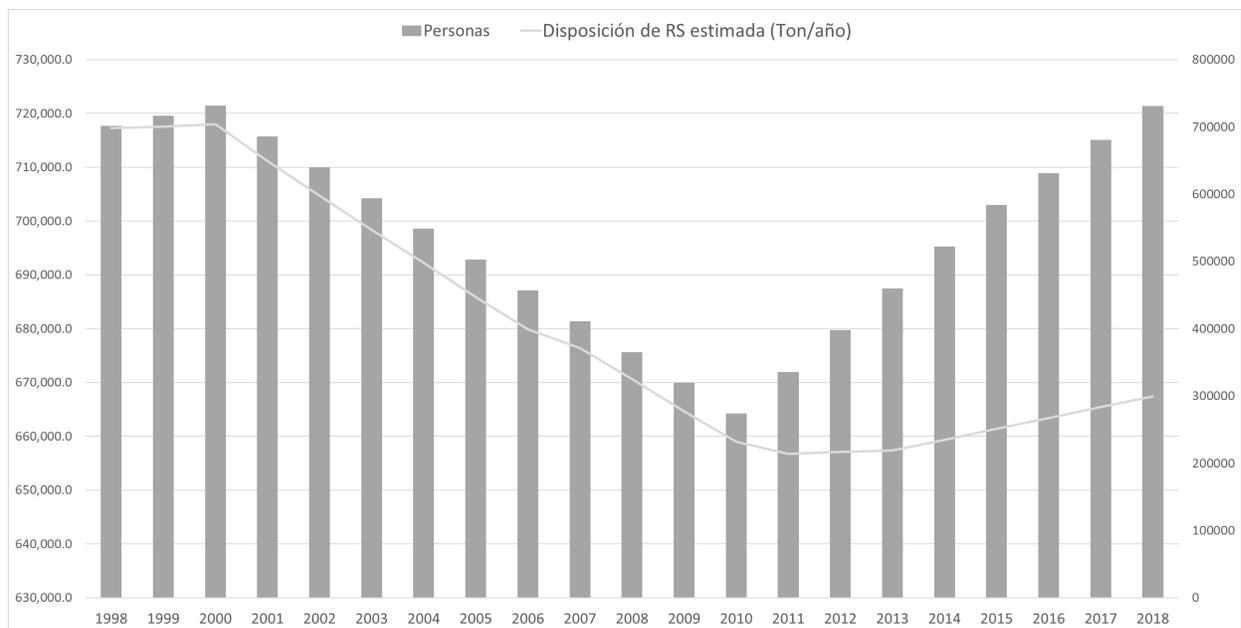


Figura 53. Gráfica comparativa de población y disposición final de RS del municipio de Tlalnepantla de Baz

Cabe mencionar que, debido a que la información poblacional obtenida es por lustros o décadas, se consideraron incrementos constantes por año faltante, a través de funciones escalonadas. Teniendo así que,

$$A_i = \left( \frac{A_f - A_0}{p} \right) + A_0$$

donde:

$A_i$  = Población del año a calcular

$A_f$  = Población del último año inmediato superior con información

$A_0$  = Población del último año inmediato inferior con información

$p$  = Periodo de años entre  $A_f$  y  $A_0$

Del mismo modo, se consideraron las constantes de crecimiento para la disposición anual de residuos en el relleno sanitario.

Finalmente, con los datos obtenidos en sitio, el historial de población y generación de residuos sólidos urbanos, se empleó el Modelo Mexicano de Biogás 2.0, con el cual fue posible estimar el Flujo anual de metano del Relleno Sanitario, con un tiempo de vida hasta el 2030.

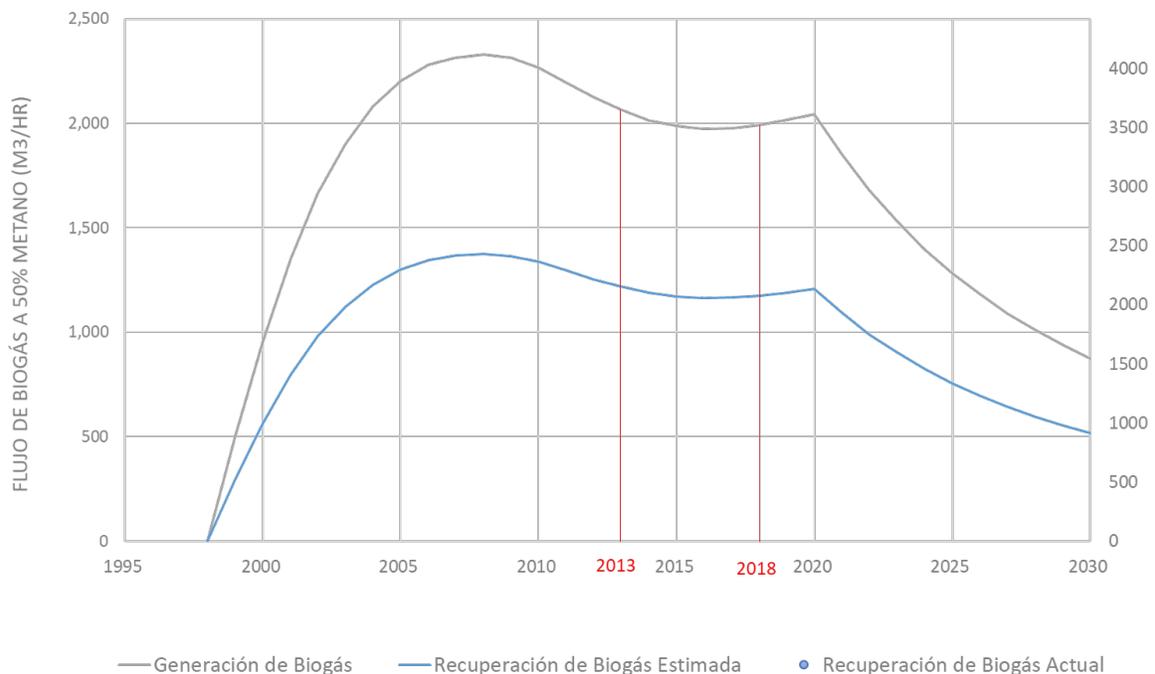


Figura 54. Proyecciones de generación y recuperación de Biogás en el Relleno Sanitario



## PROYECCIONES DE LA GENERACIÓN Y RECUPERACIÓN DE BIOGÁS DE RELLENOS SANITARIOS

Relleno Sanitario Tlanepantla de Baz  
Tlanepantla de Baz, Estado de 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*	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)	(mmBtu/hr)		(m <sup>3</sup> /hr)	(pies <sup>3</sup> /min)	(mmBtu/hr)			(tonnes CH <sub>4</sub> /yr)	(tonnes CO <sub>2</sub> eq/yr)
1998	698,225	698,225	0	0	0.0	59%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1999	700,035	1,398,260	507	298	9.1	59%	4,584	2,698	81.9	7.6	0	14,377	301,908
2000	703,768	2,102,028	954	561	17.0	59%	1,240,197	563	331.1	30.7	0	3,889,356	81,676,466
2001	649,452	2,751,480	1,351	795	24.1	59%	1,623,373	797	469.1	43.4	0	5,091,028	106,911,593
2002	597,808	3,349,288	1,663	979	29.7	59%	1,976,080	981	577.5	53.5	0	6,197,145	130,140,039
2003	546,912	3,896,200	1,903	1,120	34.0	59%	2,298,758	1,123	660.8	61.2	0	7,209,089	151,390,869
2004	498,125	4,394,325	2,080	1,224	37.2	59%	2,592,652	1,227	722.4	66.9	0	8,130,763	170,746,029
2005	447,364	4,841,689	2,204	1,297	39.4	59%	2,856,597	1,301	765.5	70.9	0	8,958,515	188,128,819
2006	398,714	5,240,403	2,280	1,342	40.8	59%	3,091,838	1,345	791.9	73.3	0	9,696,251	203,621,262
2007	371,271	5,611,674	2,316	1,363	41.4	59%	3,310,888	1,366	804.2	74.5	0	10,383,209	218,047,380
2008	324,833	5,936,507	2,331	1,372	41.6	59%	3,502,539	1,375	809.3	74.9	0	10,984,243	230,669,101
2009	277,368	6,213,875	2,313	1,362	41.3	59%	3,666,186	1,365	803.3	74.4	0	11,497,453	241,446,521
2010	231,539	6,445,414	2,267	1,334	40.5	59%	3,802,794	1,338	787.2	72.9	0	11,925,867	250,443,207
2011	214,063	6,659,477	2,196	1,292	39.2	59%	3,929,091	1,296	762.6	70.6	0	12,321,945	258,760,846
2012	217,125	6,876,602	2,123	1,250	37.9	59%	4,057,195	1,253	737.4	68.3	0	12,723,689	267,197,462
2013	219,000	7,095,602	2,064	1,215	36.9	59%	4,186,405	1,218	716.8	66.4	0	13,128,902	275,706,933
2014	235,060	7,330,662	2,016	1,186	36.0	59%	4,325,091	1,189	699.9	64.8	0	13,563,830	284,840,431
2015	251,120	7,581,782	1,986	1,169	35.5	59%	4,473,251	1,172	689.7	63.9	0	14,028,474	294,597,958
2016	267,180	7,848,962	1,974	1,162	35.3	59%	4,630,888	1,164	685.4	63.5	0	14,522,834	304,979,512
2017	283,240	8,132,202	1,976	1,163	35.3	59%	4,797,999	1,166	686.1	63.5	0	15,046,909	315,985,095
2018	299,300	8,431,502	1,990	1,172	35.6	59%	4,974,586	1,174	691.2	64.0	0	15,600,700	327,614,705
2019	305,300	8,736,802	2,016	1,187	36.0	59%	5,154,713	1,190	700.2	64.8	0	16,165,593	339,477,451

Figura 55. Tabla de proyecciones de generación y recuperación de Biogás en el Relleno Sanitario

### 3.3.3.6 IMÁGENES TERMOGRÁFICAS DEL RS

Al acceder al RS del municipio de Tlalnepantla de Baz, se tomaron fotografías con una cámara termográfica con la finalidad de obtener las diferentes temperaturas del suelo y algunos objetos dentro del sitio. Además, se realizó la captura de biogás de dos pozos (muestra 1 y muestra 2) los cuales corresponden a diferentes etapas del relleno sanitario, con diferentes coordenadas, por ende, las presiones de ambos pozos inactivos fueron distintas.

A continuación, se muestran las imágenes más representativas las cuales brindarán información de temperaturas la cual se empleará más adelante para el análisis de resultados aplicados en la metodología.

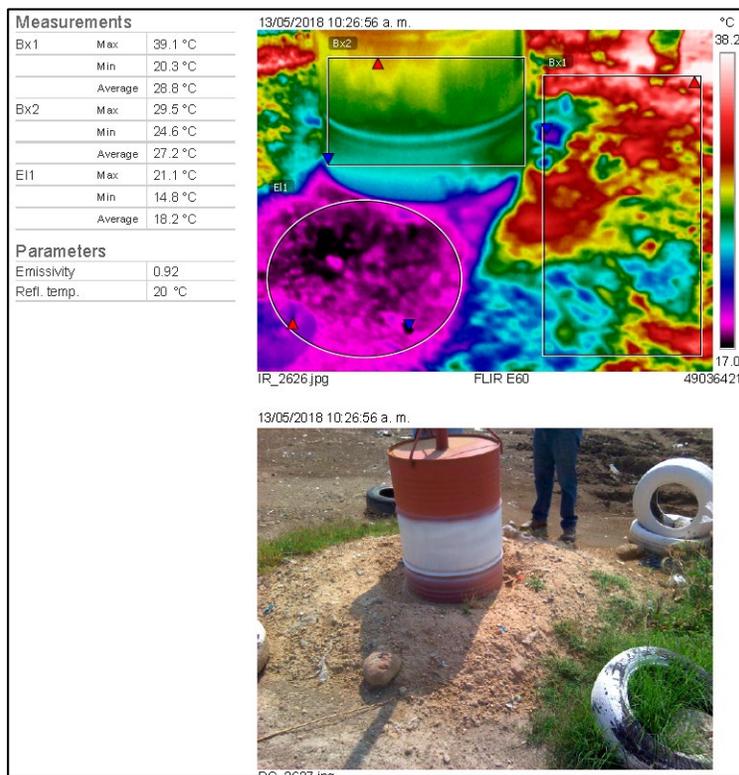


Figura 56. Termografía de la base de la chimenea en superficie. Temperatura promedio: 27.2° C (chimenea), 28.8° C (superficie).

En la superficie alrededor de una chimenea, se tienen temperaturas de 27.2° C a 28.8° C. y en un pozo de venteo inactivo, una temperatura promedio de 32.2° C

Debido a la existencia de zonas con una humedad en la superficie, se presentan variaciones de temperatura en la imagen.

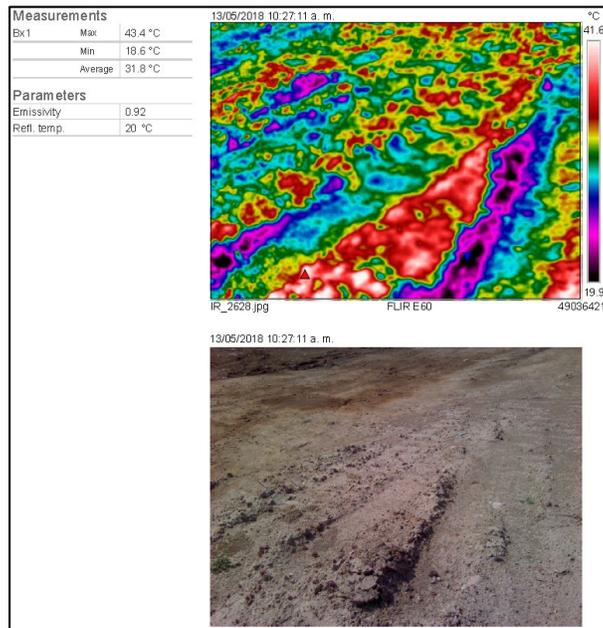


Figura 57. Temperaturas: mínima 18.6 °C, máxima de 43.4 °C

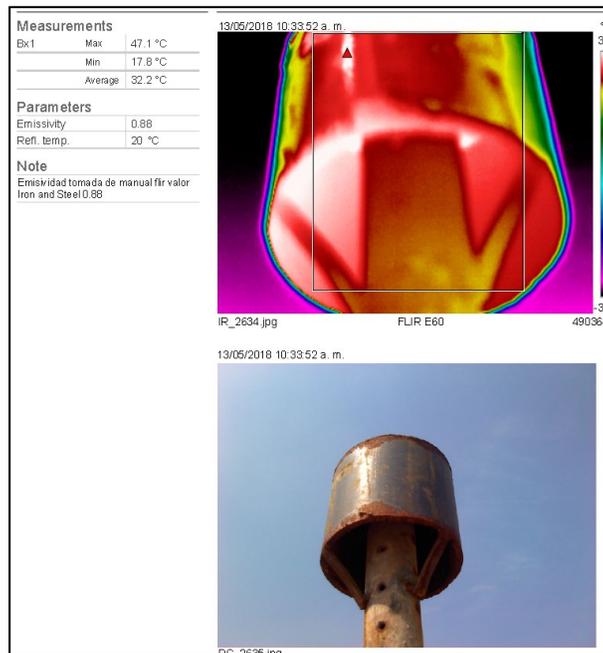


Figura 58. Temperatura de la chimenea de un pozo inactivo. Temperatura promedio 32.2° C

Las temperaturas de la capa exterior del suelo a medio día se encontraron entre 29° C y 37.5°C, lo cual coincide con los datos obtenidos con las temperaturas superficiales. Para el caso de los pozos encendidos en el relleno sanitario, se determinaron temperaturas superiores a los 150°C, lo cual no fueron obtenidas al realizar los cálculos con las imágenes satelitales.

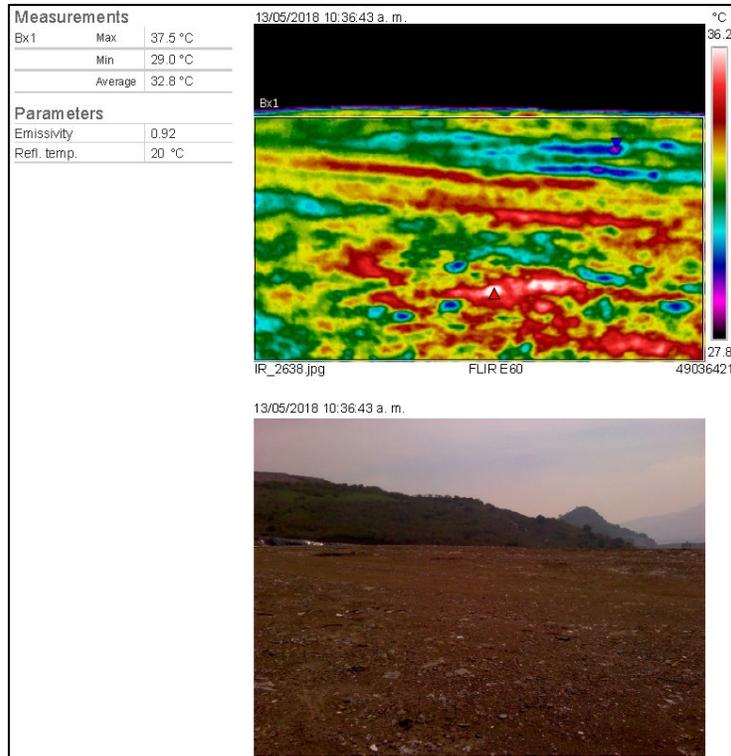


Figura 59. Temperatura mínima: 29 °C, Temperatura máxima: 37.5 °C



Figura 60. Temperatura promedio del suelo: 36.2 °C. Temperatura de los 4 pozos: mayor a 150 °C

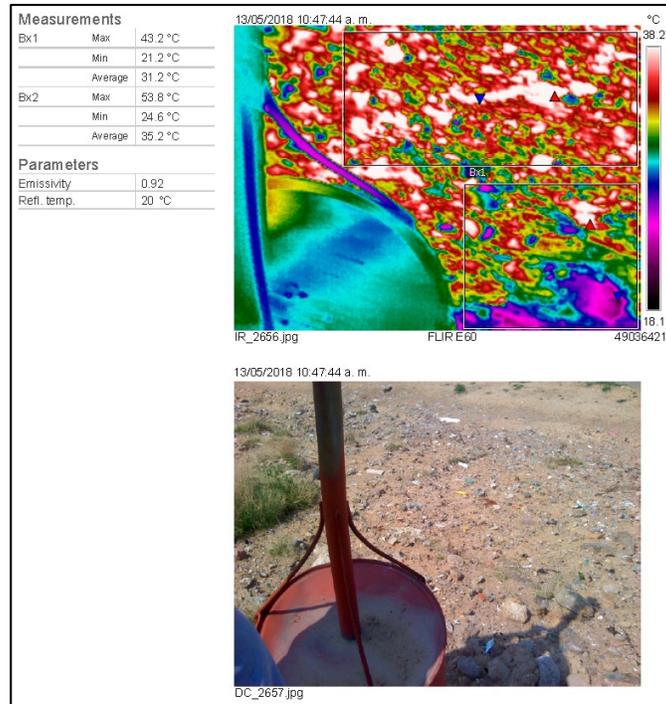


Figura 61. Temperatura promedio de la superficie cercana a un pozo: 35.2°C

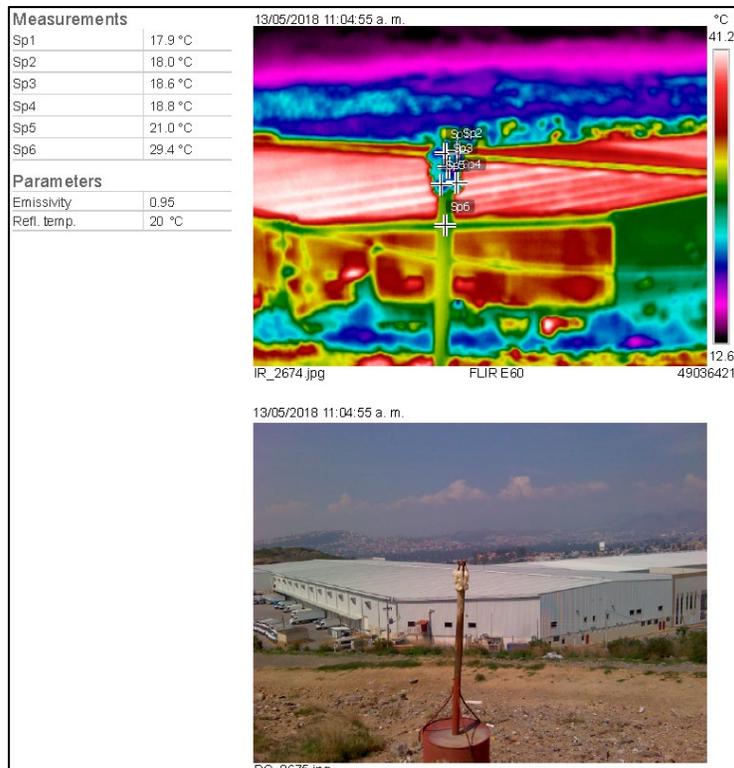


Figura 62. Toma de muestras con biogás en el interior de los globos

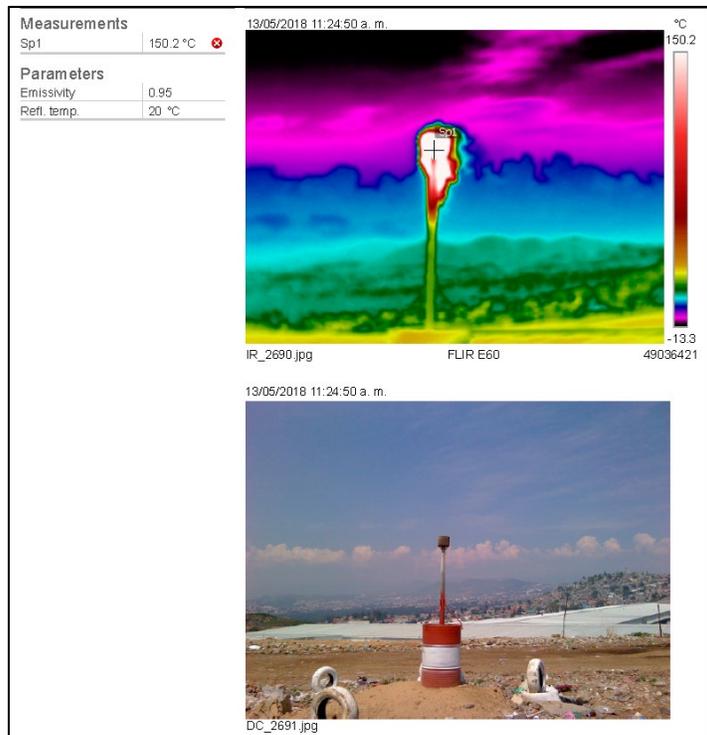


Figura 63. Pozo encendido con quema de biogás. Temperatura mayor a 150 °C

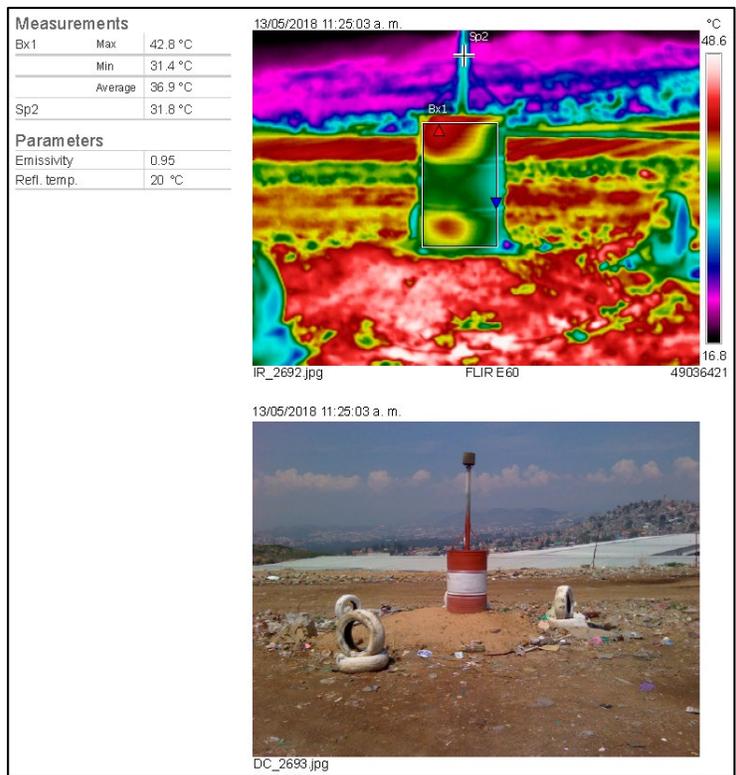


Figura 64. Temperatura promedio del tubo metálico: 31.8 °C. Temperatura promedio de chimenea: 36.9 °C

La siguiente imagen muestra un pozo activo, en el cual se está quemando el biogás lo cual presenta una temperatura mayor a 150° C. La temperatura del tubo es de 92.5° C



Figura 65. La salida de biogás (punto SP2) muestra una temperatura de 128.3° C

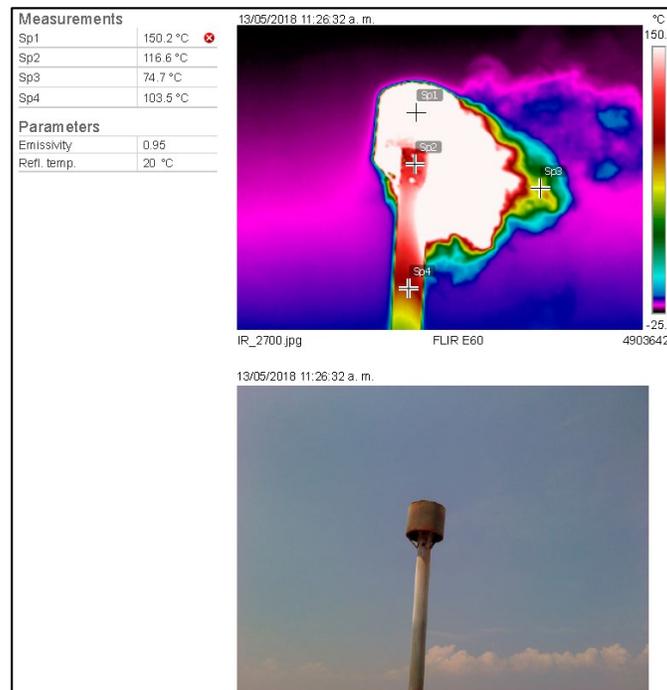


Figura 66. La existencia del flujo de aire incrementa la transferencia de calor por convección

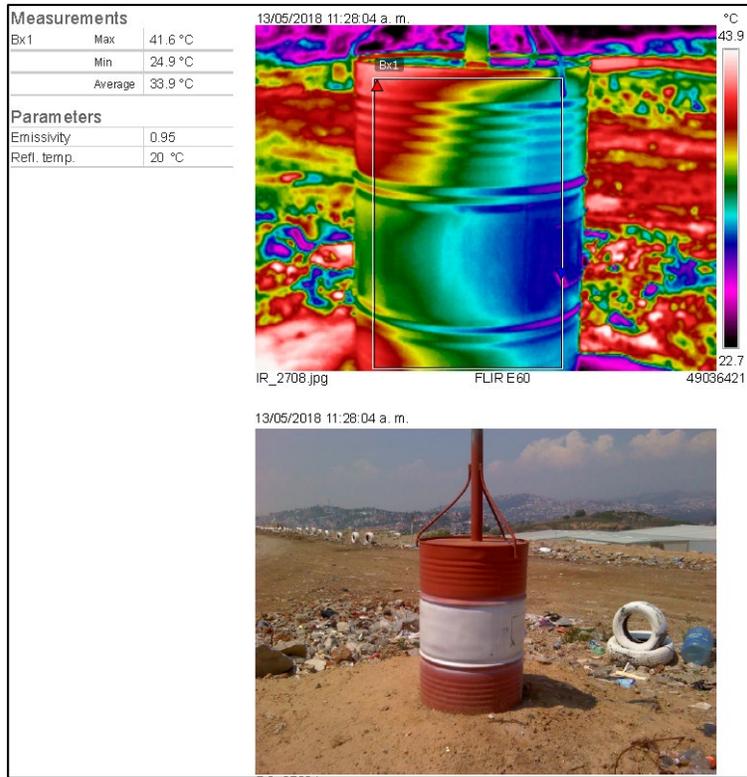


Figura 67. Temperatura promedio de la base de una chimenea (33.9 °C): Mínima de 24.9 °C, Máxima de 41.6 °C

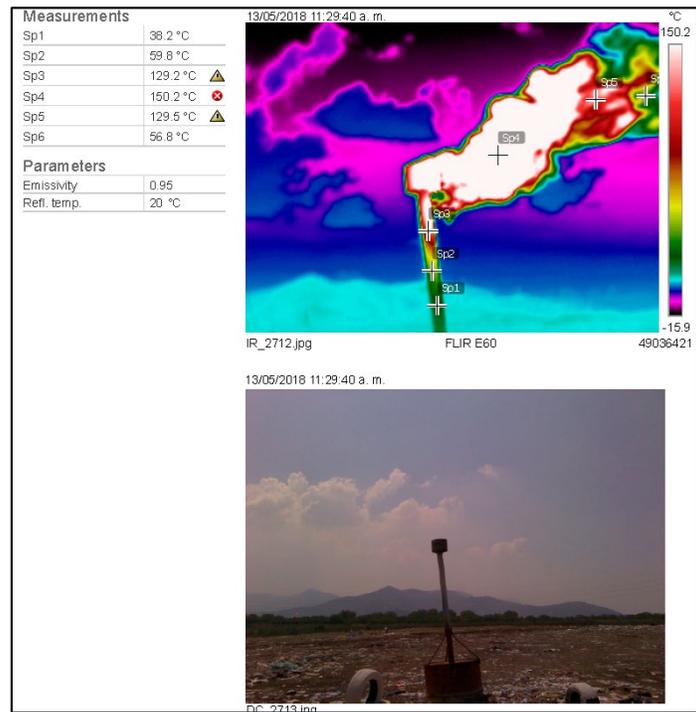


Figura 68. Efecto del viento con el biogás quemado liberando otros gases al medio ambiente

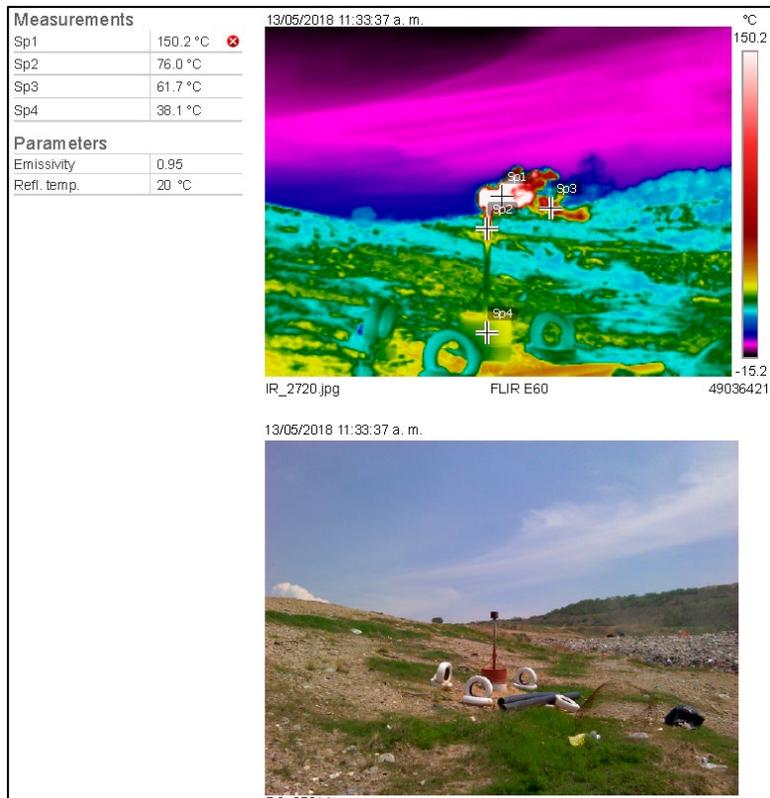


Figura 69. En la quema de biogás de la chimenea se muestran diferentes puntos con variaciones de temperatura

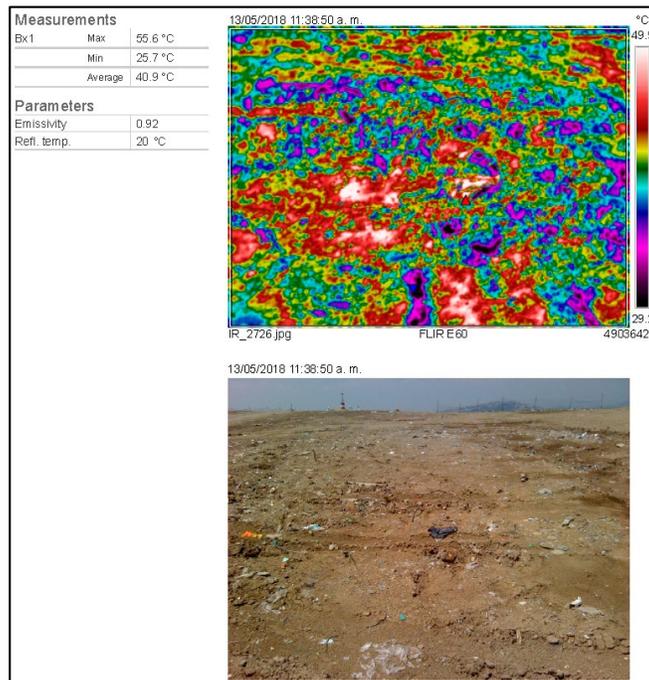


Figura 70. Temperatura del suelo en la parte superior del relleno sanitario

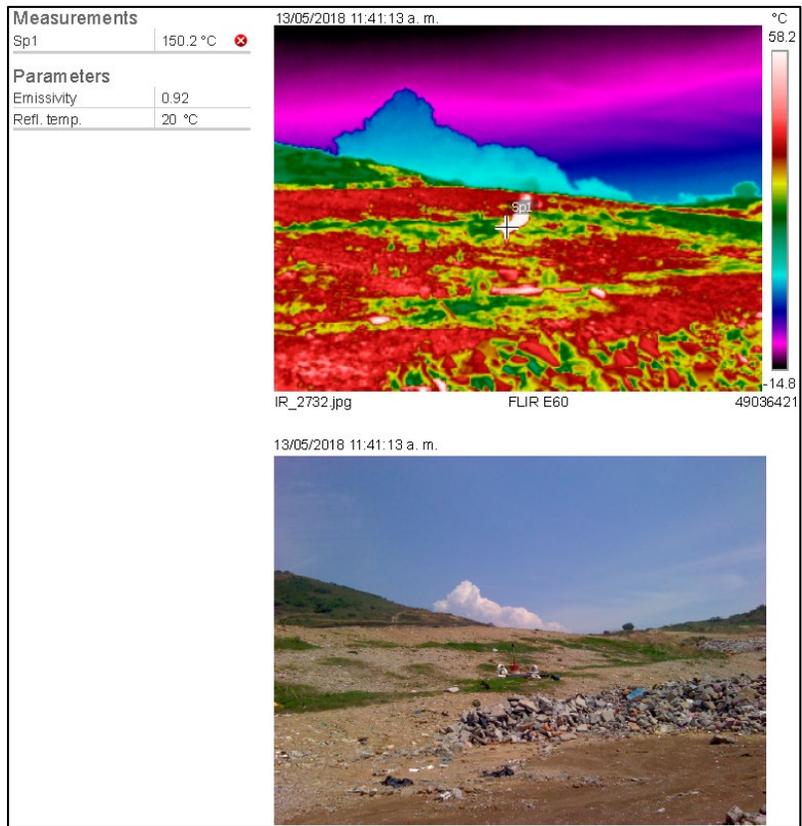


Figura 71. Pozo activo de otra fase del Relleno Sanitario con temperatura mayor a 150° C

La siguiente imagen muestra diferentes temperaturas entre el medio ambiente, el tubo de chimenea y el globo con muestra de biogás



Figura 72. Temperatura de la muestra de biogás (interior del globo): 21° C a 25° C

### 3.3.4 MODELO PARA ESTIMACIONES DE CH<sub>4</sub>

Una vez obtenidos los datos de generación de Biogás con el Modelo Mexicano de Biogás 2.0 y los cálculos del Factor de Temperatura con las imágenes satelitales, se determinó la emisión anual de metano. Esta metodología se encuentra basada en los casos de estudio de Liu (1996), Agarwal y Garg (2007) y Akumu et al. (2010), quienes emplearon un modelo empírico que considera una proporción directa entre los procesos de emisión de metano y la temperatura superficial. Teniendo así, la siguiente ecuación:

$$E_{CH_4} = E_t \times F_t$$

donde:

$$E_{CH_4} = \text{Emisión de } CH_4 \text{ estimada } \left[ \frac{m^3}{h} \right]$$

$F_t$  = Factor de Temperatura (adimensional)

$$E_t = \text{Flujo de } CH_4 \left[ \frac{m^3}{h} \right]$$

La siguiente tabla muestra los resultados estimados hasta el 2018.

<b>Año</b>	<b>Biogás (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>CH<sub>4</sub> (m<sup>3</sup>/h)</b>
<b>2013</b>	2123.421358	1061.710679
<b>2014</b>	2064.213732	1032.106866
<b>2015</b>	2015.547758	1007.773879
<b>2016</b>	1990.237362	995.1186809
<b>2017</b>	1973.61922	986.8096102
<b>2018</b>	1975.652274	987.826137

Tabla 16. Estimación de Biogás y Metano en el Relleno Sanitario

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 IMPACTO POBLACIONAL CON LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN SITIO

Así como se menciona en la metodología, en la base de datos de la CONAPO y del INEGI, se tiene información de la densidad poblacional en periodos de 5 años. Con base en ello, y el ajuste de cantidades anuales por medio de funciones escalonadas, se percibe en la figura 72 (gráfica izquierda) que existió un decremento en la población y, por ende, una disminución de captación de residuos en el sitio. Lo anterior, fue debido a que, en esa época, la población migró a la Ciudad de México en busca de oportunidades laborales. Además, la disposición final de los residuos correspondía de forma adicional a algunos municipios cercanos y la Ciudad de México.

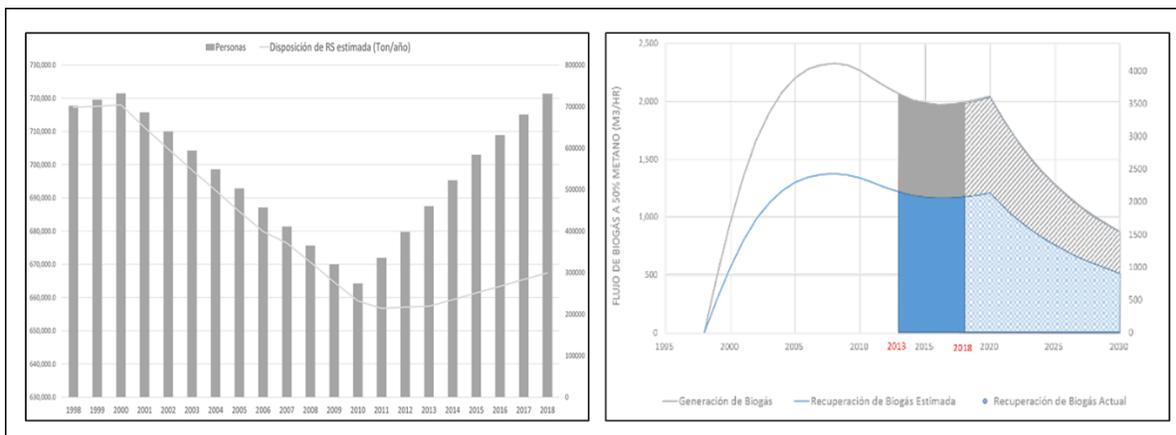


Figura 73. Impacto de la densidad poblacional vs proyección de biogás

En la segunda gráfica donde se aplica el Modelo Mexicano de Biogás 2.0 (figura 72, gráfica derecha), se obtiene de manera convencional una función polinomial de segundo orden, aunque, debido a la disposición de residuos en el sitio, se observa un decremento en el periodo del 2000 al 2016, esto debido como consecuencia de la densidad poblacional. Por otro lado, la proyección de generación y recuperación de biogás se obtiene de manera general hasta el año 2030 que sería la última etapa del ciclo de vida del relleno sanitario.

Cabe señalar que la ampliación de vida del RS de Tlalnepantla de Baz en los años 2018 a 2030 corresponde a que la estimación de recolección de residuos (en el año de apertura) no determinó la disminución de la población y recolección exclusiva de los RSU del municipio. Lo anterior generó capacidad volumétrica y tiempo para llenar y compactar en su totalidad este SDF.

## 4.2 COORDENADAS GEOGRÁFICAS DE LOS SITIOS

La obtención de coordenadas geográficas los pozos permiten obtener la vista superior del sitio en la Plataforma de Google Earth. La siguiente imagen muestra la distribución de los 52 pozos de venteo y las oficinas del sitio (punto amarillo).



Figura 74. Ubicación de los pozos de venteo en el Relleno Sanitario Tlalnepantla de Baz, Estado de México

Con la información anterior es posible realizar un modelado de la superficie del terreno del Relleno Sanitario de Tlalnepantla de Baz.

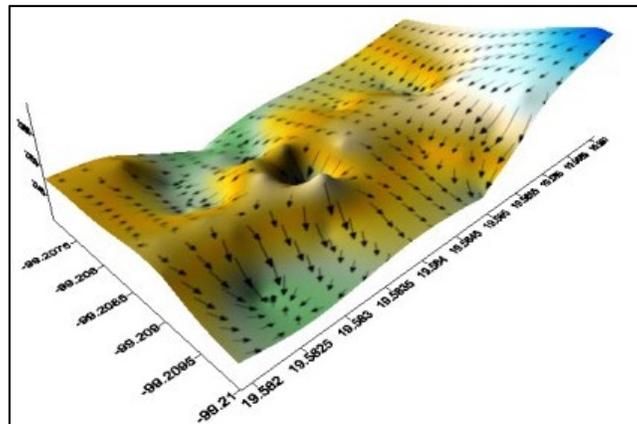


Figura 75. Modelado del R.S. con base en las coordenadas geográficas de los pozos de venteo

Una vez obtenido el modelado del sitio y las diferentes alturas de la superficie, se pueden obtener los gradientes de desplazamiento pluvial, deformaciones que presenta el suelo en esa zona lo cual indica cual es el escurrimiento de los lixiviados en el interior del Relleno Sanitario.

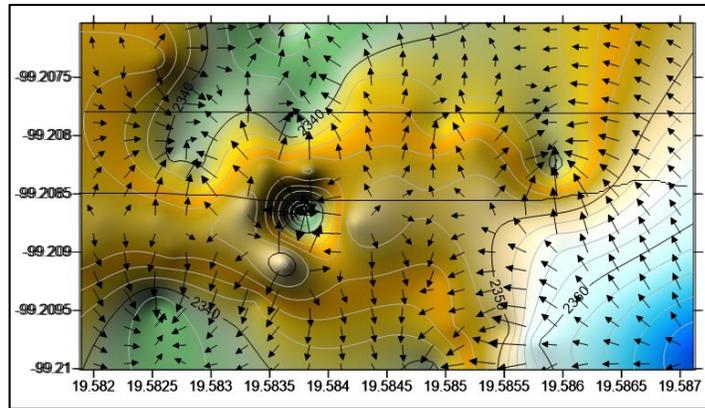


Figura 76. Gradientes de flujo de lixiviados del RS

Cabe mencionar que esta información y el software correspondiente, se pueden realizar estimaciones de generación de lixiviados, entre otras fuentes de información para estos sitios de disposición final.

Por otro lado, así como se mencionó en la metodología, las 5 coordenadas representativas generan un historial de temperaturas del periodo de estudio del RS (2013 – 2018). Como se esperaba, la temperatura de la coordenada del mirador (Figura 76, gráfica verde), se encuentra por debajo de las temperaturas de los pozos del sitio, más aún, la coordenada con mayor temperatura (Figura 76, gráfica morada) corresponde al pozo encendido. Finalmente es posible determinar los máximos y mínimos y el intervalo de temperatura entre los pozos de venteo apagados con presión y encendidos.

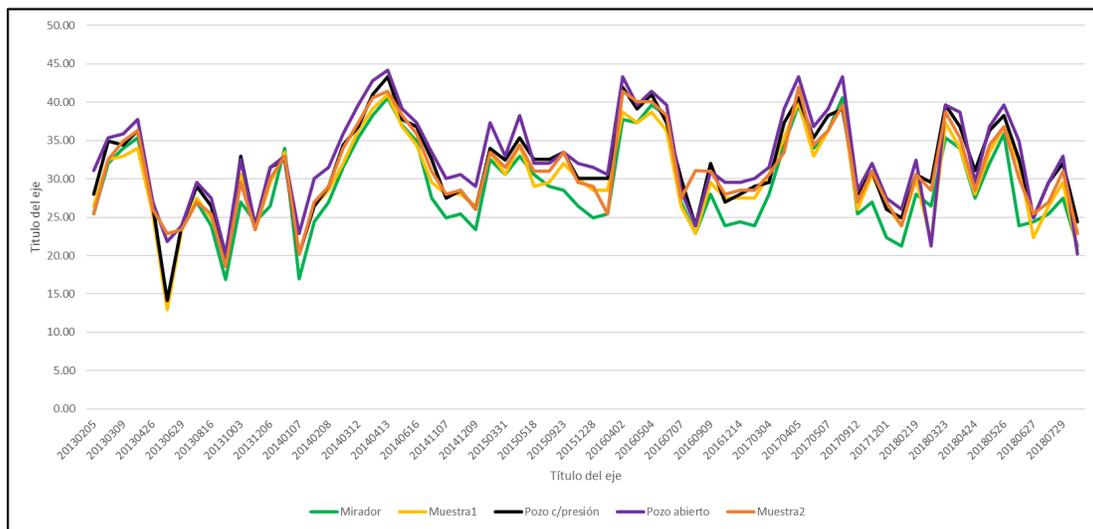


Figura 77. Gráfica del histórico de temperaturas en los pozos de venteo del RS

Es notable que en los periodos de lluvias las temperaturas disminuyen, ya que las estimaciones indican la relación lineal entre la temperatura de suelo, humedad y clima del sitio.

### 4.3 GENERACIÓN DE GEI EN RS

Al colocar una muestra de gas capturado en sitio en el Cromatógrafo del laboratorio del CIEMAD, IPN en el mes de junio de 2018, se obtuvieron bajos niveles de metano, nitrógeno y dióxido de carbono. Esto fue debido a que el pozo inactivo corresponde a la primera celda del relleno sanitario, lo cual, con base en las estimaciones realizadas y el historial generado a través de las coordenadas geográficas, la producción de biogás en él se encuentra en la última etapa de declive.

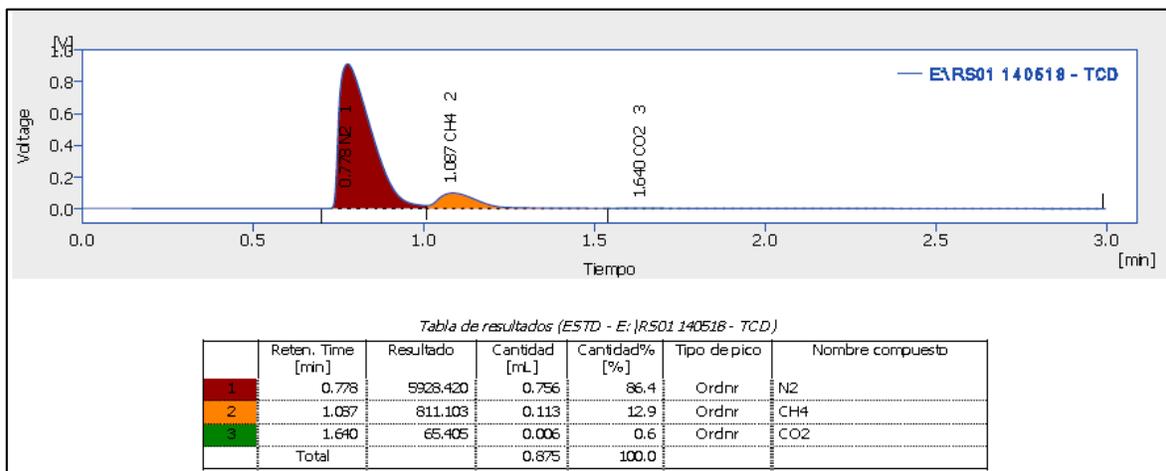


Figura 78. Gráfica y tabla de resultados del contenido de gases en muestra de laboratorio

En los resultados de un muestreo en sitio en el artículo “Caracterización del biogás generado en trece sitios de disposición final de residuos urbanos en México” se obtuvo para el año 2005 en el mismo RS de Tlalnepantla de Baz, las siguientes concentraciones:

<b>CH<sub>4</sub> (%)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>N<sub>2</sub> (%)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>
55.4 – 58.6	40.4 – 41.2	0.5 – 2.7	0.0 – 0.7

Tabla 17. Concentraciones de GEI en RS en el año 2005

Como indica la literatura, basándose en la muestra de análisis, la tabla comparativa (17), y las estimaciones de Biogás de la Figura 72, se cumple que, el año 2005 corresponde a la Fase II del RS, y la muestra del año 2018 corresponde a la Fase V del ciclo de vida del RS. En el primer caso, se tienen altas concentraciones de metano y dióxido de carbono, predominando el primero; en el segundo caso, la generación de metano es menor que el Nitrógeno, y a su vez, mayor que el dióxido de carbono.

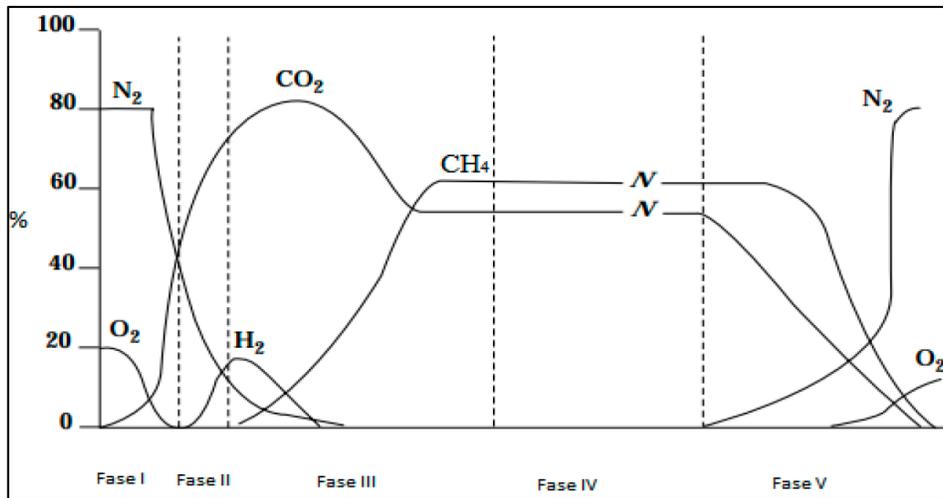


Figura 79. Composición de gases en las últimas fases del RS

## 5. CONCLUSIONES

Evidentemente, durante el periodo de investigación, solamente se pudo acceder a dos rellenos sanitarios de los tres que se tenía contemplados de forma inicial. Siendo así, que al acceder a los otros dos sitios, sólo se pudieron obtener imágenes de los rellenos sanitarios y de forma particular, sólo en uno de ellos (Tlalnepantla de Baz) se obtuvieron las coordenadas geográficas de los pozos de venteo para poder aplicar la metodología mediante percepción remota. Cabe mencionarse que se tienen las coordenadas de una de las celdas del RS “Puerto de Chivos” aunque éstas corresponden a los pozos de extracción, las cuales no presentan una diferencia significativa en los gradientes de temperatura superficial.

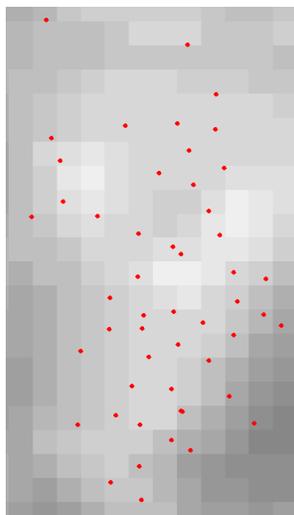
Los resultados obtenidos en este trabajo y el análisis numérico de los mismos, cumplen con la hipótesis mencionada en un inicio: la existencia de correlación entre la aplicación de un modelo empírico con el empleo de las bandas térmicas de un satélite y los datos de monitoreo en campo para estimar emisiones de metano en al menos un relleno sanitario. Esta información pudo ser recabada y procesada debido a las coordenadas geográficas de los pozos de venteo, en este caso, del RS de Tlalnepantla de Baz.

Al tener el acceso en uno de los sitios, se pudo recabar la información necesaria en campo junto con las entrevistas al personal administrativo para poder realizar las estimaciones de generación y recuperación de Biogás junto con los cálculos mencionados en la metodología para aplicar el Modelo Mexicano de Biogás 2.0.

La estimación del CH<sub>4</sub> generado en el relleno sanitario fue realizada por medio de percepción remota fundamentada por un modelo el cual se basa en una relación lineal en la temperatura superficial. Los datos de temperatura superficial coinciden entre la cámara termográfica

empleada en campo con las estimaciones de las imágenes satelitales, esto debido a que los niveles de infrarrojo del sensor Landsat 7 cumplen con esa función.

Por otro lado, para determinar la temperatura en cada uno de los pozos de venteo, activos e inactivos, ya no es posible hallarla de forma específica ya que cada una de las chimeneas poseen un diámetro menor a 30cm y los gradientes de temperatura que se emplean en los cálculos de las imágenes están basados con base en su resolución espacial, es decir, se determinan con base en los promedios de temperatura del suelo que abarca el píxel que contiene al pozo de venteo.



*Figura 80. Resolución espacial del sensor vs coordenadas de pozos*

Es claro que los resultados basados en los últimos 5 años del relleno sanitario determinan un alto desaprovechamiento del biogás el cual ha sido considerado para proveer de energía eléctrica al municipio. Considerando propuestas sustentables y energéticas que sean rentables para el municipio aún es posible implementar una planta de biogás para el empleo de dicho recurso considerado como una óptima fuente alterna de energía que beneficie tanto al medio ambiente como a la sociedad.

Como se observa en esta investigación, muchos sitios que cuentan con empresas privadas que gestionan los residuos y su operación de ellos, niegan el acceso debido al incumplimiento de normas técnicas y ambientales, lo cual conlleva a sanciones y penalizaciones. La herramienta propuesta en este trabajo ofrece una alternativa para realizar estimaciones de generación de biogás y en consecuencia el metano, de forma histórica que no necesariamente implica el acceso al sitio.

Por último, es importante mencionar que la metodología y el uso de esta herramienta brindan una opción previa para poder tomar decisiones en el empleo de tecnologías más precisas que requieran de una inversión para poder realizar proyectos asociados a cuestiones, políticas, ambientales y energéticas.

## 5.1 RECOMENDACIONES

La información y datos que brinda el satélite y su sensor puede obtenerse con mayor precisión en la cuestión de su resolución temporal y espacial, esto conlleva un alto costo para su obtención. Es por ello que esta propuesta de metodología y herramientas pueden emplearse en primera instancia para poder valorar y evaluar el uso de las fuentes de información.

Las estimaciones se basan en modelos lineales, lo cual no siempre corresponde, ya que dependerá de la caracterización de RSU en los SDF, además, las variables que influyen en los cálculos están relacionadas directamente con la densidad de población, ubicación geográfica y sobre todo la gestión adecuada y su manejo en los rellenos sanitarios.

Para poder determinar una mayor precisión para el historial de los rellenos sanitarios, es posible emplear otros satélites meteorológicos con una mejor resolución espacial y con menor temporalidad, los cuales se pueden programar para tomar imágenes entre 5 y 15 minutos.

## ANEXO

Fecha	Temp. (°C)	Humedad (%)	Presión (h Pa)	Vel. Viento (Km/h)	Precipitación (mm)	Evaporación (mm)	Temp. (°C)	Fecha	Temp. (°C)	Humedad (%)	Presión (h Pa)	Vel. Viento (Km/h)	Precipitación (mm)	Evaporación (mm)	Temp. (°C)
20130205	8 - 25	N/A	N/A	31.3	0	4.8	9 - 25	20140107	4 - 17	75	1031	18.4	0	2.1	4.5 - 20.5
20130221	13 - 25	N/A	N/A	38.9 - 57.2	0	5.6	10 - 23	20140123	7 - 23	58	1029	18.4	0	4	4.5 - 24
20130309	11 - 27	72.6	1027	13	0	5.2	9 - 26.5	20140208	10 - 24	71	1029	38.9	0	4.8	9 - 26.5
20130325	9 - 27	N/A	N/A	37 - 51.9	0	7.5	11 - 28	20140224	11 - 25	62	1027	16.6	0	5	11 - 27
20130426	12 - 24	N/A	N/A	38.9	0	5.7	11 - 24	20140312	10 - 26	41	1026	20.5	0	5.4	10 - 2.8
20130512	14 - 25	N/A	N/A	33.5	2.5	1.1	13 - 25	20140328	13 - 28	62	1027	25.9	0	1.9	12.5 - 31
20130629	14 - 23	N/A	N/A	29.4 - 42.4	0	5.1	11.5 - 24	20140413	26 - 30	28	1023	29.5	0	5.7	12 - 31
20130715	13 - 26	N/A	N/A	42.4	0	8.3	7 - 25	20140429	15 - 27	59	N/A	33.5 - 42.5	0	3.6	14 - 29
20130816	14 - 26	N/A	N/A	27.8 - 38.9	0	3.5	11 - 26	20140616	14 - 27	77	1028	35.3 - 46.4	0	7.8	14 - 28
20130901	14 - 26	N/A	N/A	27.8	0	5.1	11 - 25	20140803	23 - 26	36	1027	29.5 - 35.3	0	9.6	12 - 26.5
20131003	10 - 26	N/A	N/A	13	0	4.8	9 - 25	20141107	10 - 23	82	1029	24.1	0	4.1	9 - 26
20131120	11 - 23	N/A	N/A	13 - 20	N/A	N/A	N/A	20141123	13 - 24	77	1028	16.7 - 27.8	0	2.7	2.5 - 20.5
20131206	12 - 25	67	1026	9.4	N/A	N/A	N/A	20141209	7 - 20	81	1031	29.6	0	2.3	8 - 20
20131222	11 - 24	71	1027	18.4	N/A	N/A	N/A								
Fecha	Temp. (°C)	Humedad (%)	Presión (h Pa)	Vel. Viento (Km/h)	Precipitación (mm)	Evaporación (mm)	Temp. (°C)	Fecha	Temp. (°C)	Humedad (%)	Presión (h Pa)	Vel. Viento (Km/h)	Precipitación (mm)	Evaporación (mm)	Temp. (°C)
20150227	10 - 24	58	1025	25.9	0	4.8	9 - 26	20160214	3 - 24	65	1028	20.4			
20150331	9 - 24	66	1029	27.8	0	4.7	8.5 - 25	20160402	13 - 29	41	1027	37			
20150416	14 - 27	67	1027	24.1 - 42.6	0	5.4	11 - 28	20160418	16 - 28	52	1028	61.1 - 72.2			
20150518	15 - 27	77	N/A	27.8	0	4.8	13 - 27.5	20160504	16 - 29	63	1028	22.2			
20150806	14 - 26	82	1030	31.5	7.1	2.4	12 - 27	20160520	16 - 29	68	1027	44.4			
20150923	13 - 25	82	1027	29.6	0	4.3	11.5 - 25.5	20160707	N/A	N/A	N/A	N/A			
20151110	12 - 25	94	1031	22.2	0	4.2	6.5 - 24	20160723	N/A	N/A	N/A	N/A			
20151228	8 - 23	71	1024	22.2				20160909	N/A	N/A	N/A	N/A			
								20161128	9 - 24	25.4 - 76	1020 - 1026	20.4 - 37			
								20161214	8 - 24	16.4 - 61.2	1025 - 1031	20.4			
Fecha	Temp. (°C)	Humedad (%)	Presión (h Pa)	Vel. Viento (Km/h)	Precipitación (mm)	Evaporación (mm)	Temp. (°C)	Fecha	Temp. (°C)	Humedad (%)	Presión (h Pa)	Vel. Viento (Km/h)	Precipitación (mm)	Evaporación (mm)	Temp. (°C)
20170115	6 - 22	19.2 - 81.3	1022 - 1029	27.8 - 33.3				20180102	6 - 20	24.3 - 81.2	1025 - 1032	20.4			
20170304	10 - 22	26.7 - 81.6	1025 - 1031	24.1				20180219	13 - 23	25.1 - 62.4	1021 - 1027	25.9			
20170320	8 - 24	11.2 - 71	1026 - 1031	27.8				20180307	13 - 22	30.5 - 76.7	1022 - 1028	31.5			
20170405	12 - 29	7.1 - 38.2	1021 - 1026	40.7				20180323	10 - 27	9.2 - 76.2	1024 - 1032	29.6			
20170421	11 - 25	17.2 - 76.3	1019 - 1026	29.6 - 33.3				20180408	13 - 26	17.9 - 58.2	1021 - 1026	20.4			
20170507	14 - 26	22.5 - 62.9	1022 - 1027	20.4				20180424	15 - 24	31.1 - 82.2	1025 - 1029	29.6 - 35.2			
20170523	17 - 31	11.7	1026 - 1027	35.2				20180510	12 - 24	16.4 - 66.9	1022 - 1027	40.7			
20170912	9 - 23	15.9 - 93.4		18.5				20180526	12 - 27	12.7 - 71.4	1021 - 1027	31.5 - 37			
20171115	7 - 23	17.4 - 93.3	1024 - 1029	24.1				20180611	16 - 26	29.8 - 77.1	1021 - 1026	37 - 38.9			
20171201	3 - 21	10.6 - 100	1025 - 1031	24.1				20180627	15 - 23	35.7 - 82.2	1025 - 1029	29.6			
								20180713	13 - 24	36 - 82.1	1026 - 1031	33.3 - 50			
								20180729	13 - 26	25.7 - 82.1	1025 - 1031	25.9 - 38.9			
								20180814	13 - 23	38.2 - 82	1024 - 1028	25.9			

Figura 81. Condiciones meteorológicas de los días que se emplearon las imágenes Landsat 7. Fuente 1: Base de datos de climatología del Servicio Meteorológico Nacional. CONAGUA, junio de 2018. <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=mex>. Estación 15137 (Amelaco, Estado de México, Municipio de Tlalnepantla de Baz). Fuente 2: Histórico del clima de Tlalnepantla de Baz. <https://www.meteored.mx/tlalnepantla-de-baz/historico>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Categoría de los sitios de disposición final.....	18
Tabla 2. Comparativa del diseño de R.S.....	19
Tabla 3. Factores tentativos de emisión de contaminantes atmosféricos para quemadores de gas producto de R.S.....	25
Tabla 4. Comparación de producción de biogás en SDF .....	27
Tabla 5. Flujos de biogás en SDF de RSU .....	27
Tabla 6. Composición y generación potencial de biogás en RS a partir de la degradación de la FORSU.....	28
Tabla 7. Valores del Índice de generación de metano (k).....	31
Tabla 8. Factor de corrección de metano (MCF).....	32
Tabla 9. Potenciales específicos de calentamiento global y emisiones atmosféricas .....	38
Tabla 10. Características generales del satélite Landsat 7 .....	44
Tabla 11. A la profundidad de la celda, se le restaron los metros ocupados por el material de cobertura. (2) Se consideró una compactación de $600 \text{ Kg m}^{-3}$ . .....	50
Tabla 12. Proyecciones de generación y recuperación de biogás del R.S. “Puerto de Chivos” .....	52
Tabla 13. Características de las celdas del R.S. con sus respectivos pozos. Fuente: Elaboración propia .....	61
Tabla 14. Conversión de coordenadas representativas del estudio .....	74
Tabla 15. Resultados de Factores de temperatura anuales promedio .....	77
Tabla 16. Estimación de Biogás y Metano en el Relleno Sanitario .....	89
Tabla 17. Tabla 17. Concentraciones de GEI en RS en el año 2005.....	93

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comparación de los incrementos de la población mexicana y la generación de R.S.U. ....	20
Figura 2. Características de gas generado en un Relleno Sanitario.....	23
Figura 3. Relleno Sanitario Atizapán de Zaragoza Edo. de México .....	25
Figura 4. GEI emitidos por diversas fuentes en México durante el periodo 1990-2015 .....	26
Figura 5. Curva característica de Producción de biogás en un RS.....	35
Figura 6. Pozos de captación de biogás y su área de influencia.....	37
Figura 7. Esquema de instalación de un pozo de captación de biogás en un SDF .....	37
Figura 8. Secuencia de barrido del sensor MSS .....	45
Figura 9. Mapa de Ubicación de los Rellenos Sanitarios en el Estado de México.....	47
Figura 10. Imágenes del SDF que muestran el descargue de basura y tipo de suelo. Año: 2012.....	47
Figura 11. Separación de Residuos Sólidos. Imagen de respirador. Año: 2012.....	48
Figura 12. Laguna de lixiviados sin malla perimetral. Año: 2012 .....	48
Figura 13. Camión de transferencia proveniente del Bordo Poniente. Año: 2012 .....	48
Figura 14. Vista superior del RS “Puerto de Chivos” mediante app My GPS Coordinates Pro. Año: 2018. ....	49
Figura 15. Pozo de extracción en la cima del Relleno Sanitario. Año: 2018 .....	50
Figura 16. Imagen de la cima de la superficie del Relleno Sanitario. Año: 2018 .....	50
Figura 17. Residuos sólidos urbanos a cielo abierto. Año: 2018 .....	51
Figura 18. Colector de biogás ERM. Año: 2018 .....	51
Figura 19. Báscula de camiones y oficinas del Relleno Sanitario. Años:2012 (izquierda), 2018 (derecha) .....	53
Figura 20. Compactación y saneamiento de los Residuos Sólidos. Año: 2012.....	54
Figura 21. Pozo de venteo y basura a cielo abierto. Año: 2012.....	54
Figura 22. Compactación de los residuos a través de Tractor D-7, compactador 8-16 y Trascabo 953. Año: 2012.....	55
Figura 23. Celda acondicionada para reposición de residuos. En época de lluvia se genera 1.4 l s – 1. Año: 2012 .....	55
Figura 24. Maqueta del RS de la empresa PROACTIVA. Año: 2018 .....	56
Figura 25. Imágenes de 3 pozos de venteo en el Relleno Sanitario Huilango.....	58
Figura 26. Se observa en la foto de la izquierda que no hay división entre el Relleno Sanitarios y las casas aledañas .....	59
Figura 27. Representación de 2 pozos en sitios distintos del Relleno Sanitario.....	59
Figura 28. Imagen de pozo de venteo entre el pasto seco .....	59
Figura 29. Anexo 1, Mapa de Ubicación del Relleno Sanitario Huilango .....	60
Figura 30. Anexo 2, Mapa de Ubicación de los pozos de venteo en el Relleno Sanitario Huilango	60
Figura 31. Imagen satelital del Relleno Sanitario “Puerto de Chivos” Fuente: INEGI, Google 2018 .....	61
Figura 32. Celdas activas 4 y 6 consideradas de emergencia. Año: 2018.....	62
Figura 33. Vista desde la celda 7: Al fondo se observan las instalaciones de Planta de Biogás Energreen. Año: 2018 .....	62
Figura 34. Izquierda: Pozo de extracción de Biogás. Derecha: Colector de Biogás tipo ERM. Año: 2018 .....	62
Figura 35. Izquierda: Pozos de extracción de Biogás. Derecha: Pozos geo referenciados de Celda 7. Año: 2018 .....	63

Figura 36. Instalaciones Planta de Biogás Energreen Atizapán. Año: 2018 .....	63
Figura 37. Superficie superior del Relleno Sanitario.....	64
Figura 38. Metodología para estimación de emisiones de metano.....	65
Figura 39. Ubicación de los pozos de venteo en el Relleno Sanitario. Izquierda coordenada Geográficas, derecha Imagen GeoTiff corregida de enero del 2017.....	66
Figura 40. Ubicación de las coordenadas representativas del Relleno Sanitario.....	67
Figura 41. Ubicación del Relleno Sanitario en el Estado de México, México.....	68
Figura 42. Izquierda: archivos Landsat en formato TIFF de diferentes bandas. Derecha: Unión de las imágenes con valores máximos y mínimos de la Banda 6.....	69
Figura 43. Imagen con nubosidades: Ubicación de las coordenadas representativas del Relleno Sanitario sobre la misma imagen a diversas escalas .....	69
Figura 44. Correcciones radiométricas y geométricas de la imagen del 31 de enero de 2017 .....	70
Figura 45. Cálculos para obtención del Factor de temperatura anual del Relleno Sanitario .....	70
Figura 46. Cálculo de Radiancia espectral con la herramienta Raster Calculator .....	71
Figura 47. Imágenes de ND a TOA. Conversión de la imagen del 15 de enero de 2017 .....	71
Figura 48. Cálculo de la Temperatura de Brillo con la herramienta Raster Calculator.....	72
Figura 49. Imágenes de TOA a TB. Conversión de la imagen del 15 de enero de 2017 .....	72
Figura 50. Izquierda Imagen resultante con datos de LST. Derecha: Coordenadas en la misma imagen con las coordenadas de los pozos de venteo en el R.S Imágenes del 15 de enero de 2017 ..	73
Figura 51. Factores de temperatura superficial de 14 imágenes con 51 pozos c/u. (Año 2013).....	75
Figura 52. Factores de temperatura promedio anual de 14 imágenes con 51 pozos c/u. (Año 2013) .....	76
Figura 53. Gráfica comparativa de población y disposición final de RS del municipio de Tlalnepantla de Baz.....	77
Figura 54. Proyecciones de generación y recuperación de Biogás en el Relleno Sanitario.....	78
Figura 55. Tabla de proyecciones de generación y recuperación de Biogás en el Relleno Sanitario	79
Figura 56. Termografía de la base de la chimenea en superficie. Temperatura promedio: 27.2° C (chimenea), 28.8° C (superficie).....	80
Figura 57. Temperaturas: mínima 18.6 ° C, máxima de 43.4 ° C.....	81
Figura 58. Temperatura de la chimenea de un pozo inactivo. Temperatura promedio 32.2° C.....	81
Figura 59. Temperatura mínima: 29 °C, Temperatura máxima: 37.5 °C.....	82
Figura 60. Temperatura promedio del suelo: 36.2 °C. Temperatura de los 4 pozos: mayor a 150 °C .....	82
Figura 61. Temperatura promedio de la superficie cercana a un pozo: 35.2°C.....	83
Figura 62. Toma de muestras con biogás en el interior de los globos.....	83
Figura 63. Pozo encendido con quema de biogás. Temperatura mayor a 150 °C.....	84
Figura 64. Temperatura. promedio del tubo metálico: 31.8 °C. Temperatura promedio de chimenea: 36.9 °C .....	84
Figura 65. La salida de biogás (punto SP2) muestra una temperatura de 128.3° C.....	85
Figura 66. La existencia del flujo de aire incrementa la transferencia de calor por convección .....	85
Figura 67. Temperatura promedio de la base de una chimenea (33.9 °C): Mínima de 24.9 ° C, Máxima de 41.6 ° C.....	86
Figura 68. Efecto del viento con el biogás quemado liberando otros gases al medio ambiente .....	86
Figura 69. En la quema de biogás de la chimenea se muestran diferentes puntos con variaciones de temperatura .....	87

Figura 70. Temperatura del suelo en la parte superior del relleno sanitario.....	87
Figura 71. Pozo activo de otra fase del Relleno Sanitario con temperatura mayor a 150° C.....	88
Figura 72. Temperatura de la muestra de biogás (interior del globo): 21° C a 25° C.....	88
Figura 73. Impacto de la densidad poblacional vs proyección de biogás.....	90
Figura 74. Ubicación de los pozos de venteo en el Relleno Sanitario Tlalnepantla de Baz, Estado de México .....	91
Figura 75. Modelado del R.S. con base en las coordenadas geográficas de los pozos de venteo.....	91
Figura 76. Gradientes de flujo de lixiviados del RS .....	92
Figura 77. Gráfica del histórico de temperaturas en los pozos de venteo del RS.....	92
Figura 78. Gráfica y tabla de resultados del contenido de gases en muestra de laboratorio.....	93
Figura 79. Composición de gases en las últimas fases del RS .....	94
Figura 80. Resolución espacial del sensor vs coordenadas de pozos.....	95
Figura 81. Condiciones meteorológicas de los días que se emplearon las imágenes Landsat 7.	
Fuente 1: Base de datos de climatología del Servicio Meteorológico Nacional. CONAGUA, junio de 2018. <a href="http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=mex">http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=mex</a> . Estación 15137 (Amelaco, Estado de México, Municipio de Tlalnepantla de Baz). Fuente 2: Histórico del clima de Tlalnepantla de Baz. <a href="https://www.meteored.mx/tlalnepantla-de-baz/historico">https://www.meteored.mx/tlalnepantla-de-baz/historico</a> .....	97

## 6. REFERENCIAS

- 3er Encuentro Nacional de Expertos en Residuos Sólidos. UAM, Azcapotzalco. México, 2010.
- 4º Encuentro Nacional de Expertos en Residuos Sólidos. UABC. México, 2010.
- Acuerdo de París, Naciones Unidas. Francia, París, 2015.
- Aguilar Q., Taboada P.A., Ojeda S. (2012). Estimación de las constantes k y Lo de la tasa de generación de biogás en sitios de disposición final en Baja California, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* Vol. 28. México.
- Aguilar Virge Q. Armijo de Vega C y Taboada Gonzales P. (2009), El potencial energético de los residuos sólidos municipales. Universidad Autónoma de Baja California. México.
- Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P. A., Ojeda-Benítez, S. (2011). Modelo Mexicano para la estimación de la generación biogás. *Ingeniería, Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán.*
- Alejandra Cortez J., (2013). Estimación de emisiones de metano del Relleno Sanitario Bordo Poniente por medio de imágenes de satélite. Tesis (Maestría en ciencias en estudios ambientales y de la sustentabilidad). CIIEMAD, IPN, México.
- Alex Setge, (2009). Methane to Markets. Events land. Modelo Mexicano de Biogas Version 2, México.
- Blanca Elena Jiménez Cisneros, (2001). La contaminación ambiental en México: causas efectos y tecnología apropiada. Instituto de Ingeniería UNAM, FEMISCA, Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A.C. Editorial Limusa, México.
- Cárdenas M. Paulina (2014), Estimación de biogás y lixiviados en sitios de disposición final de RSU del Estado de México. Tesis (Ingeniera Biotecnóloga). México, UPIBI, IPN.
- CIDAC (2014), Diagnóstico de la situación energética en el Distrito Federal: Retos, pendientes y potencialidades, México.
- Colomer Mendoza Francisco J., García Darás Ferran, Esteban Altabella Joan, Robles Martínez Fabián y Aranda Gil. Emisiones gaseosas de un relleno sanitario en México. Comparación con los modelos de generación de Biogás. 2016. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 32 (Especial Residuos Sólidos. Págs 113 – 122. DOI: 10.20937/RICA.2016.32.05.08
- Compendio de Estadísticas Ambientales. En *Informa de la Situación del Medio Ambiente en México*. México.
- CONAGUA, (2005). *Fundamentos de Teledetección espacial*. México.
- Descripción y corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Lansat Data Continuity Mission) Versión 1.0. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia, 2013.
- Descripción y Corrección de Productos Landsat 8. (Landsat Data Continuity Mission). Versión 1.0. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Colombia, 2013.
- Diagnóstico actual del flujo de residuos sólidos urbanos que se genera en el D.F. CIIEMAD, IPN. PAOT, México, D.F. 2014

- Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. INEEC, SEMARNAT, México, 2012.
- Diagnóstico de la situación energética en el Distrito Federal: retos, pendientes y potencialidades. COPARMEX-DF y CIDAC, México, 2014.
- Electricity generation potential from biogas produced from organic waste in México. Alemania, 2015.
- Energía a partir de biomasa. Emilio Cerdá. Universidad Complutense de Madrid. España.
- Gábor K., Sergio F., Guillermo E. y Gustavo S. (2007). Caracterización del biogás generado en trece sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en México. Instituto Nacional de Ecología, Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental, Dirección de Investigación en Residuos y Sitios Contaminados. Gaceta Ecológica 82. Instituto Nacional de Ecología, México.
- Galván Loredó V., (2015). Estudio de la valorización de los residuos orgánicos contenidos en los residuos sólidos urbanos generados en el distrito federal. Tesis (maestría en ciencias). Tesis (Maestría en ciencias en estudios ambientales y de la sustentabilidad). CIEMAD, IPN, México.
- García Ramírez A., (2015). Evaluación de dos alternativas de aprovechamiento del biogás generado en un sistema de digestión anaerobia de RSOU. UNAM, México.
- Hipólito Romero Tehuitzil, Ubaldo Miranda Miranda, Ricardo Seldaña Flores, (2011). Evaluación del potencial de generación de electricidad con residuos sólidos. Caso: Estado de Hidalgo. Revista hacia la sustentabilidad: Los residuos sólidos como fuente de materia prima. México.
- Hugo Alejandro Nájera Aguilar, Ma. Neftalí Rojas Valencia y José Manuel Gómez Ramos, (Diciembre, 2010). Manejo de Biogás y Lixiviados en Rellenos Sanitarios del centro del país, un panorama general. Lacandonia, año 4, Vol. 4, No. 2, México.
- ICLEI, Gobiernos locales por la Sustentabilidad, (2011). Guía para el Aprovechamiento de Biogás en Rellenos Sanitarios Municipales, México.
- ICMA Latinoamérica, (2011). Experiencias en proyectos de recuperación de metano de rellenos sanitarios municipales. México.
- II Encuentro en Residuos Sólidos. Universidad Michoacán de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán. México, 2009
- INEGI, (2014). Sistemas de Información Geográfica. México.
- Información para el plan de desarrollo. Tlalnepantla de Baz. México, 2015.
- Instituto de Investigaciones Eléctricas, (2012). Guía de usuario. Generación de electricidad mediante residuos sólidos urbanos, México.
- Inventario de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. INECC, México 2013.
- Inventario de RS, CDMX 2014. SEDEMA, México
- JICA (1999), Estudio sobre el manejo de residuos sólidos para la Ciudad de México de los Estados Unidos Mexicanos, Informe final, Kokusi Koyo Co, LTD.
- José A. Pletto y Celso L. De la Silva, (2009). Influencia de la separación de residuos sólidos urbanos para reciclaje en el proceso de incineración con Generación de Energía. Universidad Estadual Paulista, Brasil.
- José Luis, D. Biogás de rellenos sanitarios: Captura y Utilización. Global Methate Initiative.

- Juárez, C. Güereca, L. Gassó. S. (2008). Análisis de ciclo de vida del sistema de gestión de residuos sólidos municipales de la Ciudad de México. Centro de Investigación en calidad ambiental. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. México.
- L.R. Tovar, R.A. Castro, M.E. Gutiérrez, (2011). Landfill Gas Availability in Mexico City Bordo Poniente Stage IV, México.
- María Teresa Orta, Gerardo Saucedo Castañeda y Luis Raúl Tovar Gálvez, (2014). Composición y generación de residuos sólidos urbanos de la CDMX durante 2008-2009. UAM, México.
- Nancy Merary Jiménez Martínez, (2015). La gestión integral de residuos sólidos urbanos en México: entre la intención y la realidad. Letras verdes, revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales, México.
- Plan Parcial de Desarrollo Urbano del Centro Urbano Regional de Tlalnepantla de Baz. México, 2013.
- Quetzalli Aguilar Virgen, Carolina Armijo de Vega, Paul Taboada Gonzalez, Xochitl M. Aguilar, (2010). Potencial de recuperación de recuperación de residuos sólidos domésticos dispuestos en un relleno sanitario. Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- Red Mexicana de Bioenergía, A.C., (2012). Producción de Biogás en México. Estado actual y perspectivas, México.
- SEMARNAT, GTZ (2004). Guía de cumplimiento de las NOM-083-SEMARNAT-2003. México.
- Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium, Italia del artículo Landfill Gas Availability in Mexico City Bordo Poniente Satage IV, Italia, 2011.
- Vera – Romero Iván, Melitón Estrada - Jaramillo, José Martinez - Reyes, Agustina Ortiz – Soriano, (2015). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte II: residuos sólidos urbanos. Investigación, ingeniería y tecnología de la UNAM, Vol. 16, No. 3, México.
- Wagner Colmenares Mayanga, Ing. Karin Santos Bonilla, (Mayo, 2007). Generación y manejo de gases en sitios de disposición final. Portal de Ingeniería Química.

## DIRECCIONES DE INTERNET

- CONAPO. Consejo Nacional de Población. <<http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones> >
- INEEC. Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. <<https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>>
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <<https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/imgLANDSAT/>>
- Meteored. Histórico del clima en Tlalnepantla de Baz. <<https://www.meteored.mx/tlalnepantla-de-baz/historico>>
- NASA. Landsat Science. <<https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-7/>>
- SEMARNAT. El medio ambiente en México: Residuos sólidos urbanos. [https://apps1.semarnat.gob.mx:445/dgeia/informe\\_resumen14/07\\_residuos/7\\_1\\_2.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:445/dgeia/informe_resumen14/07_residuos/7_1_2.html)>
- Servicio Meteorológico Nacional. Información climatológica por Estado. <<http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=mex>>
- SIGTE – Universitat de Girona. Taller Teledetección. <<https://sigte-tallerjornadas2015.readthedocs.io/es/latest/>>
- USGS. Earth Explorer. <<https://earthexplorer.usgs.gov/> >