

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA
PROGRAMAS MULTIDISCIPLINARIOS DE POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE BIOGÁS EN SITIOS DE
DISPOSICIÓN FINAL DEL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, Y SUS POSIBLES
OPCIONES DE VALORIZACIÓN**

PRESENTA:

NORMA LILIA LÓPEZ DÍAZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ALFREDO ÁVILA GALARZA

ASESORES:

DR. MARCOS ALGARA SILLER

DR. GREGORIO ÁLVAREZ FUENTES

Contenido

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
MODELADO DE LA CANTIDAD DE BIOGÁS GENERADO EN SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL	5
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	6
JUSTIFICACIÓN	6
OBJETIVO GENERAL	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	6
1. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y RELLENO SANITARIO.....	8
1.1. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)	8
1.1.1.Ley Ambiental del Estado de San Luis Potosí (1999).....	10
1.1.2.Reglamento interno de la Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental (1998).....	10
1.1.3.Bando de la policía y buen gobierno del municipio de San Luis Potosí.....	11
1.2. MARCO NORMATIVO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN MÉXICO	11
1.2.1.Ley de promoción y desarrollo de Bioenergéticos (2008).....	11
1.2.2.Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética (2009)	12
1.2.3.Estrategia nacional de energía 2013-2025	13
1.3. CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS	14
1.4. CARACTERÍSTICAS DE LOS RSU	15
1.5. MANEJO INTEGRAL DE LOS RSU	16
1.5.1.Generación.....	16
1.5.2.Recolección y transporte	17
1.5.3.Transferencia.....	18
1.5.4.Tratamiento y/o disposición final.....	18
1.6. MÉTODOS DE APROVECHAMIENTO, TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL (RELLENO SANITARIO).....	19
1.6.1.Aprovechamiento	19
1.6.2.Tratamiento	20
1.6.3.Disposición final (Relleno Sanitario).....	20
1.7. ESPECIFICACIONES DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE UN RELLENO SANITARIO CON BASE EN LA NOM-083-SEMARNAT-2003	21
1.7.1.Especificaciones para la selección del sitio	21
1.8. MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN DE UN RELLENO SANITARIO.....	24
1.8.1.Método de construcción de relleno sanitario tipo área	24
1.8.2.Método de construcción de relleno sanitario tipo celda o trinchera.....	25
1.9.1.Relleno sanitario mecanizado.....	26
1.9.2.Relleno sanitario semimecanizado.....	26
1.9.3.Relleno sanitario manual.....	26
1.10. IMPACTOS AMBIENTALES GENERADOS POR LA DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RSU	26
1.10.1.Riesgos asociados a los gases generados en los rellenos sanitarios.....	27

2. MODELOS PARA ESTIMAR LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN RELLENOS SANITARIOS	29
2.1. GENERALIDADES DEL BIOGÁS	29
2.2. DESCOMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	29
2.2.1.Transformaciones biológicas de los RSU	31
2.3.1.Modelos cinéticos empleados en los modelos de biogás.....	36
2.3.2.Modelos empleados para estimar la generación de biogás en rellenos sanitarios	36
2.4. APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS	40
2.5. Casos internacionales del aprovechamiento de biogás	41
2.5.1.Proyecto de aprovechamiento de biogás en EUA	42
2.5.2.Proyecto de aprovechamiento de biogás en Brasil	42
2.5.3.Proyecto de aprovechamiento de biogás en Perú	43
2.6. PROYECTOS DE APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS EN MÉXICO	44
2.6.1.Relleno Sanitario Salinas Victoria	45
2.6.2.Relleno Sanitario La Perseverancia	46
2.6.3.Relleno Sanitario Mompaní.....	47
3. CARACTERIZACIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO EN EL ESTADO DE S.L.P., MÉXICO	48
3.1. TIRADERO CONTROLADO A CIELO ABIERTO DE MATEHUALA, S.L.P.	49
3.1.1.Evaluación del cumplimiento de estudios y análisis previos requeridos para la construcción con base en la NOM-083-SEMARNAT-2003 en el tiradero controlado a cielo abierto de Matehuala, S.L.P.	50
3.1.2.Aspectos abióticos del sitio de estudio	50
3.2. TIRADERO CONTROLADO A CIELO ABIERTO DE TANCANHUITZ, S.L.P.	51
3.2.1.Evaluación del cumplimiento de estudios y análisis previos requeridos para la construcción con base en la NOM-083-SEMARNAT-2003 en el tiradero controlado a cielo abierto de Tancanhuitz, S.L.P.	52
3.2.2. Aspectos bióticos del sitio de estudio	53
3.3. RELLENO SANITARIO DE SAN JUANICO EL GRANDE, SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P.	53
4. MODELADO DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	56
4.1. APLICACIÓN DEL MODELO MEXICANO DE BIOGÁS 2.20	58
4.1.1.Modelo Mexicano de Biogás 2.0.....	58
4.1. MODELADO DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN EL RELLENO SANITARIO DE SAN JUANICO EL GRANDE.....	59
4.1.1.Escenarios con base en la eficiencia de captura de biogás en el relleno sanitario de San Juanico el Grande.....	62
4.2. MODELADO DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN EL TIRADERO A CIELO ABIERTO DE MATEHUALA.	63
4.2.1.Escenarios con base en la eficiencia de captura de biogás en el tiradero controlado a cielo abierto en Matehuala.....	65
4.3. MODELADO DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN EL TIRADERO A CIELO ABIERTO CONTROLADO EN TANCANHUITZ	66
4.3.1.Escenarios con base en la eficiencia de captura de biogás en el tiradero a cielo abierto controlado en Tancanhuitz	68

4.4. COMPARACIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO CON OTRAS INVESTIGACIONES	69
5. VALORIZACIÓN DEL BIOGÁS GENERADO EN EL RELLENO SANITARIO DE SAN JUANICO EL GRANDE, S.L.P.	71
5.1. BONOS DE CARBONO EN PROYECTOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS EN RELLENOS SANITARIOS	71
5.1.1.Máxima capacidad de planta	72
5.1.2.Dimensionamiento eléctrico	74
5.2. EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EVITADAS AL GENERAR ENERGÍA ELÉCTRICA POR FUENTES ALTERNATIVAS	76
5.3. INVERSIÓN INICIAL DE UNA PLANTA GENERADORA DE ENERGÍA A PARTIR DE BIOGÁS	77
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
BIBLIOGRAFÍA	81
ANEXOS	87

RESUMEN

La disposición final es la última etapa del manejo integral de los RSU, en la que la descomposición de la fracción orgánica genera productos como: polvos, lixiviados y biogás (éste constituido principalmente por: CH_4 y CO_2). Dado su carácter contaminante es necesario evaluar la liberación de gases para determinar los procesos de control adecuados, que minimicen su impacto ambiental. El objetivo de esta investigación fue cuantificar la generación de biogás y su potencial energético, en el relleno sanitario de San Juanico el Grande (municipio de San Luis Potosí, México), en el tiradero controlado a cielo abierto de Matehuala y de Tancanhuitz. Los datos obtenidos corresponden al periodo de noviembre 2018 a marzo 2019. La metodología constó de las siguientes etapas: 1) Recuperación y análisis de datos del sitio de disposición final; 2) Modelado de la generación de biogás (Modelo Mexicano de Biogás); 3) Cálculo del potencial energético del biogás generado. Los resultados obtenidos indican que la generación máxima de biogás en el relleno Sanitario de San Juanico el Grande se presentará en el año de 2042 y será de aproximadamente 38, 271,892 $\text{m}^3/\text{año}$, en el tiradero controlado a cielo abierto de Matehuala de 2, 101,252 $\text{m}^3/\text{año}$ en el año 2029 y finalmente en el tiradero controlado a cielo abierto en Tancanhuitz de 3, 651,699 $\text{m}^3/\text{año}$ en el año 2025. En lo que respecta al potencial energético, por cuestiones de viabilidad, únicamente se calculó para el Relleno sanitario de San Juanico el Grande y, se plantearon tres escenarios, con base al porcentaje de eficiencia de captura del biogás del 50%, 60% y 70%, cuyos resultados indican valores de 3.6 MW, 4.3 MW y 5.1 MW, respectivamente. Esta energía podría abastecer del 2.5, 3 y 3.5 % de la demanda eléctrica requerida en el municipio estudiado.

Palabras clave: Biogás, modelo, potencial energético.

ABSTRACT

The final disposal is the last stage of the integrated solid waste management, in which the decomposition of the organic fraction to generate some products such as: powder, leached and landfill gas (mainly made up by CH_4 and CO_2). Due to its polluting characteristic it is necessary to evaluate the gas emission to determine the correct control processes, that minimize their environmental impact. The aim of this research was to estimate the generation of landfill gas and energy potential, in the San Juanico El Grande's landfill (municipality of San Luis Potosí, Mexico), in the Matehuala's dump and in the Tancanhuitz's dump. The data obtained corresponded from November 2018 to March 2019. The methodology was divided into three stages: a) Recovery and analysis of data from the landfill; 2) Modeling the generation of landfill gas (Mexican biogas model); 3) Calculation of energy potential. The results showed that the maximum generation of landfill gas will be in 2042 and will be approximately of 38,271,892 m^3/year , in the Matehuala's dump the maximum generation of landfill gas will be in 2029 and will be approximately of 2,101,252 m^3/year and in the last study case (Tancanhuitz's dump) the maximum generation of landfill gas will be in 2025 and will be approximately of 3,651,699 m^3/year . In regards the energy potential, only it was estimated in the San Juanico El Grande's Landfill for valorization issues, and I were proposed three scenarios, based on the percentage of landfill gas capture efficiency of 50%, 60% and 70%, whose results showed values of 3.6 MW, 4.3 MW and 5.1 MW, respectively. This energy could supply 2.5%, 3% and 3.5% of the electricity demand required in the municipality.

Keywords: landfill, biogas, model, energy potential.

INTRODUCCIÓN

El incremento de la generación de los residuos sólidos urbanos (RSU) es causado principalmente por: el crecimiento poblacional, el consumismo, la expansión del sector industrial y la demanda social de bienes, servicios e infraestructura, entre otros. Si bien, estos elementos juegan un papel importante en el desarrollo económico y social de un lugar, generan también subproductos y residuos abundantes que si no son dispuestos adecuadamente, generan impactos ambientales para la salud de las personas y los ecosistemas, entre los que destacan: la generación de contaminantes y gases de efecto invernadero (GEI), el adelgazamiento de la capa de ozono, la contaminación de los suelos y cuerpos de agua, la proliferación de fauna nociva y la transmisión de enfermedades (Karanjekar, y otros, 2015).

El manejo de los RSU adquirió importancia a partir de 1992 en la “Conferencia de las Naciones Unidas sobre el medio ambiente y el desarrollo (CNUMAD)”, efectuada en Río de Janeiro, Brasil. Como resultado de ésta se generó el documento Agenda XXI (Guido, Rossin, Teixeira, & Zepeda, 1995). En el cual, como parte de los compromisos, se dedicó una sección a la “Gestión ecológicamente racional de los desechos sólidos y cuestiones relacionadas con las aguas cloacales”, con el objetivo de lograr beneficios al medio ambiente y a la sociedad.

El manejo integral de los residuos sólidos urbanos es un conjunto ordenado de procesos para favorecer la minimización de su generación, su segregación y almacenamiento diferenciado para favorecer su valorización y o su disposición final adecuada. Esta última etapa se refiere a su confinamiento permanente en sitios e instalaciones que mitiguen los impactos y afectaciones a la salud de la población y de los ecosistemas (LGPGIR, 2003).

Dado el incremento de la generación de residuos sólidos urbanos por persona, en los últimos años ha cobrado mucha importancia a nivel mundial. En 1996, la Unión Europea (UE), empezó a tomar medidas al respecto y concretó la estrategia comunitaria sobre residuos, que estableció una jerarquía de operaciones de gestión de residuos: prevención, reciclado y reutilización, eliminación definitiva, así como la inclusión de nuevos instrumentos

en la gestión de residuos tales como: económicos, planes de gestión de residuos, vigilancia del cumplimiento de la legislación, etc. (Europea, 2000).

Como ejemplo de caso de éxito en algunas ciudades europeas que han apostado en operar sistemas de manejo integral de los residuos, es el de Malmö (Suecia). Esta ciudad aplica el “modelo central eco-ciclo”, basado fundamentalmente en la separación en origen, instalaciones que generan energía, reutilización, reciclaje y compostaje, y logra que únicamente el 0.7% de sus residuos se dispongan en rellenos sanitarios. Además, el 60% de las necesidades de calefacción se abastece a partir de la energía del biogás, generado por la descomposición controlada de los residuos sólidos urbanos (International Solid Waste Association, 2015).

Los países asiáticos, por su parte, emplean tecnologías como la pirolisis y/o incineración para generar energía a partir de los residuos en los centros de tratamiento y disposición final. Tan sólo en China, aproximadamente el 57.31% de los residuos generados se disponen en rellenos sanitarios, mientras que el resto se incinera. Aunque hay algunos casos como en Shanghái, Jiangsu o Shandong, en donde se logra obtener un porcentaje de 100% de tratamiento a los residuos (Palomino, 2019).

En lo que respecta a la disposición final de los RSU en América Latina y el Caribe, únicamente el 54,4% de éstos son depositados en un relleno sanitario, 18,5% en sitios controlados, 23.3% en tiraderos a cielo abierto, 2% son quemados a cielo abierto y 1.8% son desechados directamente a cuerpos de agua, lo cual resulta en impactos sanitarios y ambientales (Rondón Toro, Szantó Narea, Pacheco, Contreras, & Gálvez, 2016). Las opciones de minimización, aprovechamiento, reciclaje y tratamiento, además del confinamiento adecuado son poco aplicadas (Sáez & Urnadeta , 2014).

Uno de los productos de la descomposición anaerobia de los residuos es el biogás. El biogás es una mezcla inflamable de gases que contiene mayormente CH₄, en una proporción de 50-70 %, el resto es principalmente CO₂ con presencia de otros gases. El CH₄ y CO₂ son dos de los gases principales, responsables del calentamiento global.

En términos de la composición de las emisiones totales de los GEI en México, el CO₂ es el de mayor generación (75.1%) y el metano (19%). Por otro lado, es importante mencionar que los RSU son responsables del 4% de las emisiones totales del país, y que los sitios de disposición final de éstos aportan el 2.9% del total de estas emisiones (que equivalen al 21,920.61 t de CO₂e, repartidas de la manera siguiente: rellenos sanitarios: 17,007.473 t de CO₂eq, sitios no controlados: 2,456.286 t de CO₂eq y tiraderos a cielo abierto: 2,456.851 t de CO₂eq) (INECC, 2015).

Modelado de la cantidad de biogás generado en sitios de disposición final

El desarrollo de modelos matemáticos que describen el procesamiento anaerobio de los residuos sólidos urbanos, comenzó en la década de los años 70, debido a la necesidad ambiental de tratar los residuos de rastros en países de Europa Central (Burh & Andrews , 1977). Entre los primeros trabajos realizados se encuentran los de Hill y Barth, que incluyen modelos para la digestión de excreta de cerdos. En estos modelos se incorporan las etapas de hidrólisis y ácido génesis para estimar el efecto de la sobrecarga orgánica en la velocidad de metanización (Hill & Barth , 1977).

A partir de los datos de 18 sitios de disposición final, en Estados Unidos se compararon los resultados de diferentes modelos (orden cero, primer orden, multifase y multifase modificado). Los resultados obtenidos reflejaron coeficientes de R² entre 0.914 y 0.955; es decir, los modelos se ajustaron más 90% a los datos obtenidos. El que presentó el valor más alto, fue el modelo de primer orden (Vogt & Augenstein, 1997).

Actualmente, el modelo más reconocido en la literatura para la estimación de biogás generado en sitios de disposición final es el de LandGem. Éste es un modelo de primer orden, en el que la tasa de generación depende directamente de la cantidad de residuos sólidos confinados en el sitio y, decrece de forma exponencial después de alcanzar el punto máximo de generación. En el caso de los estudios realizados en México, es una buena opción, emplear el Modelo Mexicano de biogás, ya que considera variables ambientales específicas del país, zona y/o región (Aguilar Virgen, Taboada González, Ojeda Benítez, & Cruz Sotelo, 2014).

Descripción del problema

La Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental del Gobierno del Estado de San Luis Potosí (SEGAM) señala que el manejo de los residuos sólidos urbanos en la entidad es crítico, ya que de los 54 sitios de disposición final que existen sólo cuatro de ellos cumplen con lo estipulado en la NOM-083-SEMARNAT-2003; mientras que los otros no cuentan con sistemas de ventilación o quema de biogás, ni con regulación de lixiviados (SEGAM, 2017). Los datos más recientes indican que la generación estatal diaria de aproximadamente 2, 255,776 kg de RSU es responsable de la emisión de 943.193 Gg de CO₂eq.

Justificación

En el contexto anterior, es necesario evaluar la problemática ambiental de la liberación de biogás en los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos, en el estado de San Luis Potosí, a fin de determinar los procesos para su manejo y control, minimizando su impacto ambiental y social. Para ello se estudiará la posibilidad de valorizar el biogás generado, mediante su conversión a energía eléctrica y/o la adquisición de certificados de reducción de emisiones (CER´s).

Objetivo General

El objetivo general de esta tesis de maestría fue determinar el potencial de generación de biogás por la descomposición de residuos sólidos urbanos (RSU), en los sitios de disposición final de los municipios de San Luis Potosí, Matehuala y Tancanhuitz, y su posible valorización para su aprovechamiento.

Objetivos específicos:

1. Estimar la cantidad de biogás generada en los sitios de disposición final de RSU de los municipios de San Luis Potosí, Matehuala y Tancanhuitz.
2. Estimar el potencial energético de la conversión del biogás generado en los sitios de disposición final estudiados.
3. Identificar alternativas para el aprovechamiento energético del biogás generado en los sitios de disposición final estudiados.

El contenido de este proyecto de investigación está conformado por las siguientes secciones:

En el **capítulo 1** se presenta un análisis revisión bibliográfica del tema de los residuos sólidos urbanos y su manejo ambiental. Se describen: los impactos ambientales principales que se generan por el manejo deficiente los RSU, el marco normativo que rige estos RSU, y el método de relleno sanitario como opción de disposición final.

En el **capítulo 2** se describen las generalidades de la formación del biogás y los parámetros que influyen en su formación. Se describen y analizan los modelos existentes para calcular la generación de biogás y se selecciona el más adecuado para estimar la producción de metano en este trabajo de investigación.

En el **capítulo 3** se detallan las características ambientales, de construcción y operación de los sitios de disposición final de RSU, de los municipios de San Luis Potosí, Matehuala y Tancanhuitz, que fueron seleccionados para estudiar su potencial de generación de biogás.

En el **capítulo 4** se describe el Modelo Mexicano de Biogás v. 2, que fue seleccionado para el cálculo de la generación de biogás; se indican los datos de entrada y cómo fue su obtención; así como el análisis de resultados, a través de su comparación con los resultados obtenidos en trabajos anteriores, bajo condiciones similares.

Finalmente, en el capítulo 5, se presentan las **posibles opciones de valorización del biogás que se genera en el sitio de disposición final del municipio de San Luis Potosí, al ser el único que, según los estudios, tendría viabilidad**. Se descartó la posibilidad de la valorización a través de los CER´s por ser incosteables en el contexto internacional actual.

1. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y RELLENO SANITARIO

1.1. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

El marco normativo mexicano en el rubro de los RSU, tiene como base La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, precedido por su Reglamento, así como por las Normas Oficiales Mexicanas y las Normas Mexicanas, de manera gráfica se representa de la siguiente forma:

La normativa describe a dos tipos de sitios de disposición final: los rellenos sanitarios y los sitios controlados. Los primeros constituyen la mejor solución para la disposición final de los RSU, ya que involucran métodos y obras de ingeniería particulares, que controlan la fuga de lixiviados y la generación de biogás. Por su parte, los sitios controlados no cumplen con las especificaciones de impermeabilización para el control de los lixiviados y del biogás. Aunque de acuerdo a datos de SEMARNAT (2012), del total de RSU generados, únicamente el 72% es enviado a rellenos sanitarios y sitios controlados; 23%, a tiraderos de cielo abierto y el 5% restante se desconoce el lugar donde se coloca.

En el país se logra un gran avance en el tema, con la implementación de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) en el año 2003. Complementándose con la promulgación de la Norma Oficial Mexicana 083-SEMARNAT-2003 que determina las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de RSU y de manejo especial.

Por otro lado, en La Ley General de Cambio Climático estipula en el sector de residuos, una estrategia para la reducción de emisiones de GEI: “desarrollar acciones y promover el desarrollo y la instalación de infraestructura para minimizar y valorizar los residuos, así como para reducir emisiones de metano (CH_4) proveniente de la descomposición de la fracción orgánica de los RSU”.

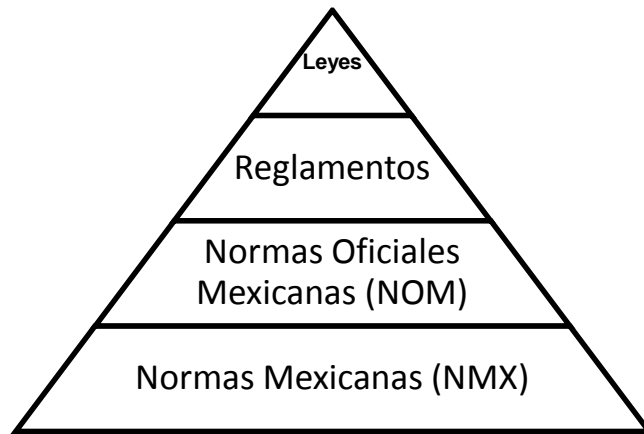


Figura 1.1. Marco Normativo Mexicano

A continuación se desglosa cada una de las secciones que conforman el marco normativo de los RSU:

Tabla 1.1. Marco Normativo Mexicano

Leyes	<ul style="list-style-type: none"> • Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR).
Reglamento	Reglamento de la LGPGIR
Normas Oficiales Mexicanas (NOM)	<p>NOM-083-SEMARNAT-2003. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.</p> <p>NOM-098-SEMARNAT-2002. Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes.</p>
Normas Mexicanas (NMX)	<p>NMX-AA-019-1985. Peso volumétrico "in situ".</p> <p>NMX-AA-018-1984. Determinación de cenizas.</p> <p>NMX-AA-021-1985. Determinación de materia orgánica.</p> <p>NMX-AA-022-1985. Selección y cuantificación de subproductos.</p> <p>NMX-AA-024-1984 Determinación de nitrógeno total.</p> <p>NMX-AA-025-1984. Método potenciométrico.</p> <p>NMX-AA-031-1976. Determinación de azufre en desechos sólidos.</p> <p>NMX-AA-032-1976. Determinación de fósforo total en desechos sólidos (método del fosfavanadomolibdato).</p> <p>NMX-AA-033-1985. Determinación de poder calorífico superior.</p> <p>NMX-AA-052-1985. Preparación de muestras en el laboratorio para su análisis.</p> <p>NMX-AA-061-1985. Determinación de la generación.</p>

NMX-AA-067-1985. Determinación de la relación carbono / nitrógeno.

NMX-AA-068-1986. Determinación de hidrogeno a partir de materia orgánica.

NMX-AA-080-1986. Determinación del porcentaje de oxígeno en materia orgánica.

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

NMX-AA-092-1984. Determinación de azufre.

NMX-AA-094-1985. Determinación de fosforo total.

En lo que respecta al Estado y municipio de San Luis Potosí, la normativa ambiental y/o complementaria en este rubro es la siguiente:

1.1.1. Ley Ambiental del Estado de San Luis Potosí (1999)

La Ley Ambiental del Estado de San Luis Potosí surge debido a la necesidad de contar con ordenamientos jurídicos para que el Estado pueda cumplir con los principios de la política ambiental nacional. En lo concerniente al tema de los RSU, se menciona en el Título uno, artículo No. 7 que corresponde al Ejecutivo del Estado la regulación de los sistemas de recolección, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los RSU, así como la selección, determinación y autorización de los sitios destinados para el confinamiento de los residuos en conjunto con los municipios.

1.1.2. Reglamento interno de la Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental (1998)

El reglamento tiene por objeto regular la organización y funcionamiento interno de la Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental, así como establecer las facultades y atribuciones de sus servidores públicos de conformidad con la competencia que le confieren a esta dependencia, la Ley Orgánica de la Administración Pública del Estado y la Ley Ambiental del Estado de San Luis Potosí. En lo que respecta al tema de RSU, se dictamina en el Capítulo XXI que corresponde a la Dirección de Capacitación y Promoción Ambiental elaborar para los municipios las propuestas de planes y proyectos para la implementación de programas de manejo de sistemas de recolección, promover en el estado los principios de valoración, responsabilidad compartido y manejo integral de RSU bajo los criterios de

eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social, así como elaborar y actualizar el inventario de los sitios de disposición final.

1.1.3. Bando de la policía y buen gobierno del municipio de San Luis Potosí

Los principales objetivos del Bando de la policía y buen gobierno son: preservar el espacio público como lugar de convivencia, determinar las sanciones aplicables por la comisión de acciones u omisiones que alteren el orden público y la convivencia armónica de los ciudadanos, mantener el buen funcionamiento de los servicios públicos y privados que tiene acceso la ciudadanía, procurar la conservación del medio ambiente y la salubridad en general. En lo relacionado al tema de los RSU, se especifica en el Capítulo quinto, que será motivo de infracción abandonarlos fuera de los horarios y días de recolección, así como incinerarlos a cielo abierto en la vía pública o lugares privados.

1.2. MARCO NORMATIVO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN MÉXICO

La introducción de la regulación de las Energías Renovables al Marco Normativo en México es reciente, se podría considerar que fue a partir de la promulgación de la Ley de promoción y desarrollo de Bioenergéticos en 2008.

Actualmente no se puede negar la gran dependencia a los combustibles fósiles en el rubro energético, así como con la deficiencia de contar con fuentes de energía alternativas, para satisfacer las necesidades nacionales, por tanto se podría afirmar que la respuesta a ello serían las Energías Renovables. A continuación se presentan los instrumentos jurídicos más relevantes en la materia:

1.2.1. Ley de promoción y desarrollo de Bioenergéticos (2008)

La Ley tiene por objeto promocionar y desarrollar Bioenergéticos con el fin de contribuir a la diversificación energética y el desarrollo sustentable, así como procurar la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera y gases de efecto de invernadero (GEI). Para ello,

se consideran los instrumentos internacionales contenidos en los Tratados en que los que México forma parte.

Se consideran sujetos a esta Ley a los ejidos, comunidades, persona física o moral, que de manera individual o colectiva realicen cualquier actividad relacionada con la producción, comercialización y/o distribución, transporte y almacenamiento de Bioenergéticos.

1.2.2. Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética (2009)

Tiene por objeto regular el aprovechamiento de fuentes de energía renovables y las tecnologías limpias para generar electricidad, así como establecer la estrategia nacional y los instrumentos para el financiamiento de la transición energética, considerando que se lleve a cabo de conformidad con los siguientes criterios:

1. Reducción en los impactos ambientales y en la salud pública, causados por el uso de combustibles de origen fósil.
2. Reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero, en la generación de electricidad, mediante el uso de Energías renovables y Cogeneración Eficiente.
3. Aprovechamiento de la biomasa proveniente de las actividades agrícolas, pecuarias, silvícolas, acuícolas.

Por otro lado hay que enfatizar que se excluye del objeto de esta Ley, el aprovechamiento de **rellenos sanitarios** que no cumplan con la normativa ambiental.

Como resultado de la promulgación de la Ley, se creó el Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía. El comité es el responsable de emitir los lineamientos para la administración, asignación y distribución de los recursos con el fin de promover los objetivos de la Estrategia Nacional de Energía. Asimismo, con el

propósito de potenciar el financiamiento disponible para la transición energética, el ahorro de energía y el aprovechamiento de las energías renovables.

1.2.3. Estrategia nacional de energía 2013-2025

La estrategia surge como resultado de los problemas que enfrenta México, derivados de la generación y del uso de la energía eléctrica, los cuales ocasionan impactos en materia ambiental (destacando el cambio climático), a la salud y al sector económico. Por ello, es necesario tomar acciones para reducir considerablemente las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), así como identificar y reducir la vulnerabilidad ante el cambio climático. Estos retos requieren una transformación en los patrones de producción y uso de energía.

En este sentido, hace falta la caracterización de las energías renovables que permita contar con un inventario del potencial en el país, ubicación, calidad y así difundir dicha información, junto con las características y posibles aplicaciones, para la planeación en el corto y mediano plazo de nuevos proyectos.

En particular, se busca potenciar las distintas ubicaciones con viabilidad eólica, el uso de energía solar, los yacimientos con potencial geotérmico de alta entalpía, **el biogás de rellenos sanitarios**, los residuos agrícolas y forestales como fuente de biomasa, la hidráulica de pequeña escala, así como la cogeneración eficiente en la industria. Para poder realizar lo anterior, es necesario implementar **políticas públicas** congruentes con los objetivos y metas establecidas. Por tal motivo, es importante crear un marco regulatorio adecuado para el aprovechamiento de estas fuentes de energía, con instrumentos fiscales y económicos que permitan al sector privado alcanzar un mayor grado de madurez a mediano plazo.

1.3. CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS

Los residuos se clasifican de acuerdo a sus características y origen, y se dividen en tres grupos: residuos sólidos urbanos (RSU), residuos de manejo especial (RME) y residuos peligrosos (RP).

1. Residuos sólidos urbanos (RSU). Son los que se generan en las casas habitación como resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas (productos de consumo y sus envases, embalajes o empaques) o los que provienen también de cualquier otra actividad que se desarrolla dentro de los establecimientos o en la vía pública, con características domiciliarias, y los resultantes de las vías y lugares públicos siempre que no sean considerados como residuos de otra índole (LGPGIR, 2003). Con el fin de ser homogéneos al momento de estudiar el tema de RSU en el país, se efectuó una clasificación por regiones, y se encuentran constituidas de la siguiente forma:

Noroeste: Baja California, Baja California Sur, Sinaloa y Sonora.

Noreste: Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León y Tamaulipas.

Occidente: Aguascalientes, Colima, Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Querétaro, San Luis Potosí y Zacatecas.

Centro: Estado de México, Hidalgo, Morelos, Puebla, Tlaxcala y Distrito Federal.

Sur: Chiapas, Guerrero, Oaxaca y Veracruz.

Sureste: Campeche, Quintana Roo, Tabasco y Yucatán.

2. Residuos de manejo especial (RME). De acuerdo a la LGPGIR los RME son aquéllos generados en los procesos productivos que no reúnen las características para ser considerados residuos sólidos urbanos o peligrosos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos.

3. Residuos peligrosos (RP). Son los que poseen alguna de las características CRETIB (corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, biológico-infecciosos),

así como los envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados (LGPGIR, 2003).

Otra forma de clasificarlos es por su **composición**:

1. **Residuos orgánicos.** Son aquellos que están compuestos por desechos de origen biológico.
2. **Residuos inorgánicos.** Son aquellos que no tienen origen biológico sino industrial o artificial.
3. **Residuos peligrosos (inorgánicos no reciclables).** Los residuos peligrosos son sustancias químicas de tipo corrosivo, ácidos o desechos radioactivos, los cuales que deben ser tratadas con especial cuidado, ya que pueden ocasionar peligros a la salud de las personas.

1.4. CARACTERÍSTICAS DE LOS RSU

Las características de los residuos sólidos urbanos comúnmente son empleadas para dimensionar las instalaciones, equipos de recolección, estaciones de transferencia, plantas de tratamiento y rellenos sanitarios, y las principales se mencionan a continuación:

1. **Generación per cápita (gpc)**, es importante porque en conjunto con el tamaño de la población se utilizan para dimensionar la cantidad generada de residuos, siendo crucial también al momento de establecer políticas públicas orientadas a disminuir el consumo de productos y generación de residuos.
2. **Peso volumétrico (pv)**, es útil para dimensionar las unidades de recolección de residuos sólidos urbanos y, por ende es un parámetro importante en la planificación del sistema de almacenamiento, recolección de residuos y disposición final.
3. **Composición de los residuos sólidos urbanos**, es un parámetro de gran importancia para proponer su manejo enfocado a la valorización y con ello dimensionar las plantas de tratamiento de los RSU.

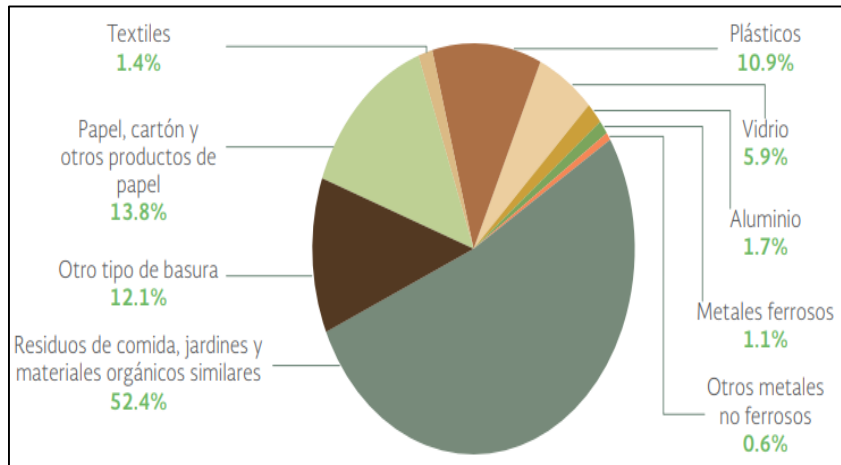


Figura 1.2. Composición de los RSU en México. Fuente: SEDESOL, 2013.

1.5. MANEJO INTEGRAL DE LOS RSU

De acuerdo a lo estipulado en el artículo 5, fracción XVIII de la LGPGIR, se define al manejo integral de los RSU como: “Las actividades de reducción en la fuente, separación, reutilización, reciclaje, coprocesamiento, tratamiento biológico, químico, físico o térmico, acopio, almacenamiento, transporte y disposición final de residuos, individualmente realizadas o combinadas de manera apropiada, para adaptarse a las condiciones y necesidades de cada lugar, cumpliendo objetivos de valorización, eficiencia sanitaria, ambiental, tecnológica, económica y social.”. Se encuentra conformado por las siguientes etapas:

1.5.1. Generación

La generación es la etapa en la que se producen residuos originados por el desarrollo de procesos productivos o de consumo. Básicamente se conoce el tipo y la cantidad de residuos generada. Con base en el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos (DBPGI) 2012, esto ha incrementado notablemente en los últimos años, comparando entre 2003 y 2011 fue de 25%, asociándolo principalmente al crecimiento poblacional, el desarrollo industrial, las modificaciones tecnológicas y el cambio en los

patrones de consumo. La generación de RSU en el país es muy distinta a nivel geográfico. Tal como se muestra a continuación:

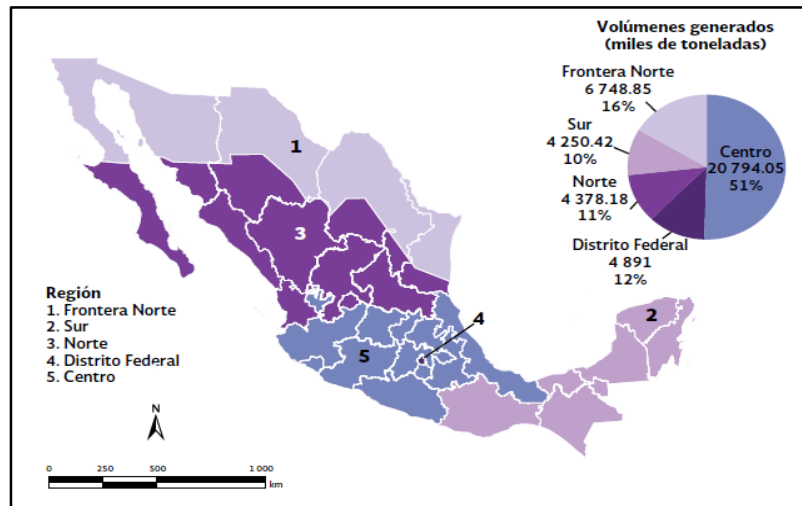


Figura 1.3. Generación de RSU por región. Fuente: SEDESOL, 2011.

1.5.2. Recolección y transporte

Las etapas de recolección y el transporte, se consideran la parte medular del manejo integral de los RSU, ya que tienen como objetivo prevenir la dispersión de los RSU para preservar la salud pública, mediante la recolección y transporte de los desechos al sitio de tratamiento y/o disposición final, aunado a que gran parte del presupuesto económico se destinada a ello.

La cobertura nacional promedio de recolección es de 83.93%. Aunque es importante mencionar que los Estados de Colima, Aguascalientes, Chihuahua, Ciudad de México, Nayarit y Quintana Roo presentan 100% de cobertura de recolección. Contrastando con los estados de Baja California Sur, Guerrero y Puebla, que reportean una cobertura menor al 50% (INECC, 2012;SEDESOL, 2009).

1.5.3. Transferencia

Las estaciones de transferencia regularmente se sitúan en un punto intermedio entre la zona de generación y el sitio de disposición final, para reducir costos y tiempos en la logística. La principal actividad que se ejecuta es separar material valorizable, y así enviar el restante a tratamiento y/o disposición final.

En lo que respecta a la situación en el país, se reportan 86 estaciones de transferencia. En la mayoría de estas instalaciones (71.43%) solo se realizan actividades de transferencia; en un 22.62% de ellas, se realizan actividades de transferencia separada y en el 5.95% se realizan actividades de acondicionamiento de los materiales separados, como trituración y compactación (INECC, 2012;SEDESOL, 2009).

1.5.4. Tratamiento y/o disposición final

El tratamiento es el procedimiento físico, químico, biológico o térmico, mediante el o los cuales las características de los residuos cambian, se reduce el volumen así como la peligrosidad. Seguido, se encuentra la disposición final que consiste en depositar o confinar permanentemente los residuos, en un sitio que cumpla con las características para prevenir afectaciones a la salud y a los ecosistemas. De acuerdo al DBPGI 2012, en la etapa de tratamiento únicamente se realizan actividades de separación física de residuos y de tipo biológicos, como elaborar composta. Por otro lado, en lo que respecta a la cantidad de RSU enviada a disposición final; el 60.54% es dispuesta en rellenos sanitarios y sitios controlados, el 15.93% en tiraderos a cielo abierto y el restante se desconoce en donde se deposita.

En lo que respecta a la situación particular de los estados; Baja California, Aguascalientes y Ciudad de México, disponen el 100% de sus RSU en rellenos sanitarios y sitios controlados, por el contrario los Estados de Oaxaca, Michoacán y Tabasco reportan valores mayores al 55% de RSU dispuestos en tiraderos a cielo abierto. Es importante agregar que

el 50% de las entidades federativas, reportan enviar entre el 80 y el 100% de sus residuos sólidos a rellenos sanitarios.

1.6. MÉTODOS DE APROVECHAMIENTO, TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL (RELLENO SANITARIO)

Los métodos de aprovechamiento, tratamiento y disposición final, desempeñan un papel muy importante en el manejo integral de los residuos, ya que la eficiencia con la que se ejecuten repercutirá directamente en la magnitud de explotación de los recursos naturales (materia prima), la promoción de la economía circular, el incremento de la vida útil de los rellenos sanitarios y, en general se reflejará en la disminución de las cargas ambientales asociadas a un producto.

1.6.1. Aprovechamiento

El aprovechamiento consiste esencialmente en recuperar lo que se considera un residuo, contribuyendo de esta forma a la conservación de los recursos naturales (requerimiento de materias primas), por tanto reusar, reciclar y/o el empleo constructivo es una actividad importante en el manejo integral de los RSU (Jaramillo, 2002).

- 1. Reutilización.** Consiste en utilizar un producto o material sin modificar su forma o función esencial.
- 2. Reciclaje.** Es la transformación de los residuos o reprocesamiento que permiten devolver su valor económico, evitando así su disposición final. Es importante considerar que únicamente debe llevarse a cabo cuando genere un ahorro de energía y materias primas, sin ocasionar daños a la salud y/o los ecosistemas.
- 3. Uso energético.** Transformar los residuos en un material o una forma de energía diferente. Es el caso del uso del biogás, generado por la digestión anaerobia de los

RSU, así como recuperar el calor producido durante la incineración (Romo Millares, 2014).

1.6.2. Tratamiento

Los métodos de tratamiento de los residuos tienen como objetivo modificar las características físicas, químicas o biológicas; con el fin de reducir o neutralizar sustancias peligrosas que contienen los residuos, recuperar materiales o sustancias valorizables y/o facilitar el uso como fuente de energía. En el rubro de los RSU destacan los siguientes:

- 1. Incineración.** Es un proceso térmico que propicia la reducción en peso y volumen de los RSU, mediante la combustión controlada en presencia de oxígeno. Durante el tratamiento ocurre una transformación en material gaseoso que se libera a la atmosfera, y una parte sólida que se puede disponer con mayor facilidad. Aunado a ello, se genera calor, el cual puede ser aprovechado como fuente de energía para el mismo proceso u otros (SEDESOL, 2011).
- 2. Compostaje.** Proceso mediante el cual se descompone la materia orgánica de forma aeróbica (presencia de oxígeno). Es una opción factible para el tratamiento de los RSU, cuando se presenta una proporción mayor a 50% de composición orgánica (restos de alimentos, residuos de jardinería y otros materiales similares). Aunque se resulta más viable, cuando los residuos son separados en el punto de generación. El material que se produce, comúnmente es empleado como abono orgánico (Romo Millares, 2014).

1.6.3. Disposición final (Relleno Sanitario)

La disposición final es la última etapa del manejo integral de los residuos, y su importancia radica en que el sitio que cuenta con las condiciones adecuadas para llevar a cabo el confinamiento de los residuos, de esta forma se asegura la prevención de los impactos negativos a la salud pública y a los ecosistemas.

En México, los rellenos sanitarios son las instalaciones diseñadas y operadas, como sitio de disposición final de los RSU y de los RME, en las que diariamente deben de colocar capas de arena o arcilla, así como efectuar compactación en el lugar. Cuentan con los elementos de control necesarios para no generar daños a la salud y al ambiente, aún después de su clausura; entre los que destacan el monitoreo de los lixiviados y el biogás emitido por causa de la descomposición de la fracción orgánica de los RSU. Es importante resaltar, que el éxito de la infraestructura depende en gran medida en la adecuada selección del sitio, diseño, así como correcta operación del sitio (Jaramillo, 2002).

1.7. ESPECIFICACIONES DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE UN RELLENO SANITARIO CON BASE EN LA NOM-083-SEMARNAT-2003

De acuerdo a la NOM-083-SEMARNAT-2003, un relleno sanitario es 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 adicional, los impactos ambientales.

Los sitios de disposición final se categorizan de acuerdo a la cantidad de toneladas de residuos que ingresan

Tabla 1.2. Clasificación del relleno sanitario con base a la recepción diaria de RSU.

Tipo	Tonelaje recibido Ton/día
A	Mayor a 100
B	50 hasta 100
C	10 y menor a 50
D	Menor a 10

1.7.1. Especificaciones para la selección del sitio

La NOM-083-SEMARNAT-2003 dicta especificaciones para la selección de los rellenos sanitarios, es muy importante considerarlas, ya que si se hace caso omiso se pone en riesgo

la viabilidad del proyecto, así como probabilidades de ser acreedores de sanciones por parte de la autoridad.

1.7.1.1. Consideraciones para la selección del sitio

El primer filtro a considerar para seleccionar o descartar un sitio para el desarrollo de un relleno sanitario, se determina por las siguientes condicionantes:

1. Cuando el sitio se encuentre a menos de 13 km de la pista de un aeródromo de servicio al público o aeropuerto, la distancia elegida se determinará mediante un estudio de riesgo aviario.
2. No se deben ubicar dentro de áreas naturales protegidas, a excepción de los sitios que estén contemplados en el Plan de manejo de éstas.
3. El límite del sitio de disposición final debe estar a una distancia mínima de 500 m, en localidades mayores de 2500 habitantes.
4. No debe ubicarse en zonas de marismas, manglares, esteros, pantanos, humedales, estuarios, planicies aluviales, fluviales, recarga de acuíferos, arqueológicas; ni sobre cavernas, fracturas o fallas geológicas.
5. Se debe localizar fuera de zonas de inundación con periodos de retorno de 100 años.
6. La distancia mínima con respecto a cuerpos de agua superficial continua, lagos y lagunas, debe ser de 500 metros.
7. La distancia a cualquier pozo de extracción de agua para uso doméstico, industrial, riego y ganadero, tanto en operación como abandonados, será de 100 metros adicionales a la proyección horizontal de la mayor circunferencia del cono de abatimiento. Cuando no se pueda determinar el cono de abatimiento, la distancia al pozo no será menor de 500 metros.

1.7.1.2. Estudios y análisis previos a la selección del sitio

Previo a la selección se deben efectuar una serie de estudios y análisis, con base en la clasificación del relleno sanitario:

Tabla 1.3. Estudios y análisis previos a la selección del sitio

Estudios y Análisis	Clasificación de relleno sanitario: A B C		
Geológico y Geohidrológico Regionales	▪		
Evaluación Geológica y Geohidrológica	▪	▪	
Hidrológico	▪	▪	▪
Topográfico	▪	▪	▪
Generación y composición de los RSU y de Manejo Especial	▪	▪	▪
Generación de biogás	▪	▪	
Generación de lixiviado	▪	▪	

1.7.1.3. Características constructivas y operativas de un relleno sanitario

Las principales características a considerar durante la construcción y la operación de un relleno sanitario son las siguientes:

1. Contar con una barrera geológica natural o equivalente, a un espesor de un metro y un coeficiente de conductividad hidráulica, de al menos 1×10^{-7} cm/seg; o bien, garantizarla con un sistema de impermeabilización equivalente.
2. Se debe garantizar la extracción, captación, conducción y control del biogás generado en el sitio de disposición final, ya sea para su aprovechamiento o únicamente para la quema.
3. Construir un sistema que garantice la captación y extracción del lixiviado generado.
4. Diseñar un drenaje pluvial.
5. Contar con un área de emergencia para la recepción de RSU.

6. Con base en la clasificación antes detallada, deberán alcanzar los siguientes niveles mínimos de compactación:

Tabla 1.4. Niveles mínimos de compactación, con base a la clasificación del relleno sanitario

Sitio	Compactación de los RSU (kg/m³)	Recepción de RSU Ton/día
A1	Mayor de 700	Mayor de 750
A2	Mayor de 600	100-750
B	Mayor de 500	50-100
C	Mayor de 400	10-50

1.8. MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN DE UN RELLENO SANITARIO

El método de construcción del relleno sanitario estará en función de las características del sitio en el que se vaya a desarrollar el proyecto y por ende este va definir la forma de operación. A continuación se describen los métodos de construcción más comunes:

1.8.1. Método de construcción de relleno sanitario tipo área

El método de construcción de relleno sanitario tipo área, es aplicable cuando se pretenda rellenar depresiones naturales o canteras abandonadas, así como en áreas relativamente planas, donde no sea factible excavar fosas o trincheras para depositar los residuos, por tanto se tienen que colocar a nivel de suelo, al que se le debe colocar un material impermeabilizante (Roben, 2002). En estos casos, el material de cobertura debe ser transportado desde otros sitios, o en caso de ser posible, extraerlo de la capa superficial. Las fosas se deben construir con una pequeña pendiente en el talud, para evitar deslizamientos y conseguir una mayor estabilidad.

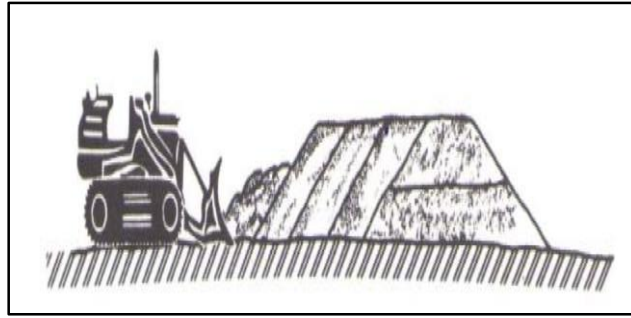


Figura 1.4. Relleno sanitario tipo área. (Vázquez, 1994)

1.8.2. Método de construcción de relleno sanitario tipo celda o trinchera

El método de construcción de relleno sanitario tipo celda o trinchera, se utiliza en regiones planas y consiste en excavar periódicamente zanjas de dos o tres metros de profundidad con una retroexcavadora o un tractor de orugas. Los residuos se depositan y acomodan dentro de la trinchera para luego compactarlos y cubrirlos con la tierra excavada (Röben, 2002).

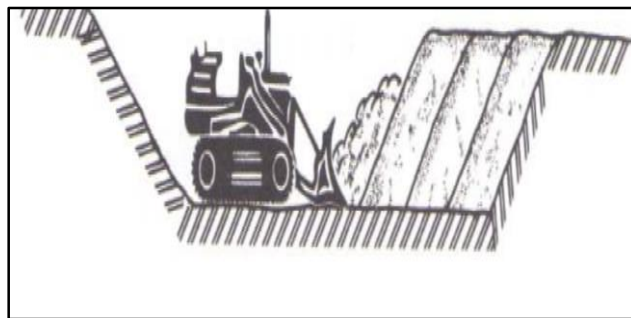


Figura 1.5. Relleno sanitario tipo celda o trinchera. (Vázquez, 1994)

1.9. TIPOS DE RELLENOS SANITARIOS CON BASE EN SU OPERACIÓN

De acuerdo a Jaramillo y Röben (2002), existen tres tipos de rellenos sanitarios considerando la forma de operación; esto va a estar en función de la magnitud del proyecto y por ende de las herramientas y/o equipos necesarios a emplear durante la ejecución de actividades. A continuación se describen brevemente cada uno de ellos:

1.9.1. Relleno sanitario mecanizado

El relleno sanitario mecanizado es una obra de infraestructura diseñada para las grandes ciudades y/o poblaciones que generan más de 40 toneladas diarias. Por ser un proyecto complejo, es importante investigar a detalle algunos aspectos tales como: la cantidad y tipo de residuos, la extensión del terreno, el diseño, la construcción del relleno sanitario y la infraestructura, todo ello para planificar adecuadamente las inversiones, gastos de operación y mantenimiento, ya que demandan de equipo especializado para la operación como tractores de oruga, retroexcavadoras, etc.

1.9.2. Relleno sanitario semimecanizado

El relleno sanitario semimecanizado es una obra de infraestructura diseñada para poblaciones que generan entre 16 y 40 toneladas diarias de residuos. En este caso, es conveniente emplear maquinaria pesada como apoyo al trabajo manual, con el objetivo de efectuar una buena compactación de los RSU, estabilizar la zona y de esta forma alargar la vida útil del proyecto.

1.9.3. Relleno sanitario manual

El relleno sanitario manual, resulta ser una adaptación del concepto “relleno sanitario”, con el fin de cubrir las necesidades de poblaciones pequeñas, que generan menos de 15 toneladas de residuos al día. En este caso no se emplea maquinaria pesada, ya que las actividades de compactación y confinamiento deben ejecutarlas cuadrillas de hombres.

1.10. IMPACTOS AMBIENTALES GENERADOS POR LA DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RSU

La disposición final de los residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios y/o en tiraderos a cielo abierto propicia la generación de diferentes productos, relacionados con los procesos

de descomposición microbiana, así como de la liberación de componentes contaminantes de los residuos (Gábor & Encarnación, 2006). Los cuales se pueden presentar de las siguientes formas:

1. Sólida (polvo y materiales ligeros arrastrados por el viento).
2. Líquida (lixiviados).
3. Gaseosa (biogás).
4. Disturbio al paisaje (arrastre de residuos ligeros como plásticos, papeles y envolturas en los alrededores).

Cuando no se tiene control de estos productos en los sitios de disposición final, se originan impactos ambientales como la contaminación de los suelos y acuíferos por causa de los lixiviados, emisiones de gases de efecto invernadero debido al biogás liberado (que se encuentra compuesto principalmente por CH_4 y CO_2), así como la proliferación de fauna nociva. Por tanto, es de suma importancia conocer los procesos de descomposición, así como la dinámica de los elementos que interactúan para prevenir y/o controlar los impactos ambientales.

1.10.1. Riesgos asociados a los gases generados en los rellenos sanitarios

Los gases generados en los rellenos sanitarios poseen características como inflamabilidad y toxicidad, lo cual se considera un riesgo intrínseco del relleno sanitario, que se intensifica si no se opera de forma correcta y, que puede generar impactos a los ecosistemas y a la salud humana (Townsend *et. al* 2015). A continuación se mencionan algunas generalidades de estos riesgos.

Inflamabilidad: El biogás es altamente inflamable, por tanto los sitios de disposición final representan un riesgo de incendio y explosión para las personas que supervisan, así como para los que viven en los alrededores, cuando no se operan de manera correcta.

Toxicidad: El biogás contiene compuestos orgánicos volátiles (COV), de los cuales algunos son tóxicos. (en bajas o altas concentraciones). La exposición continua puede resultar dañina para la salud de las personas y animales, siendo un factor importante el grado de toxicidad, que depende de la concentración que se absorbe en el organismo y el tiempo de exposición.

2. MODELOS PARA ESTIMAR LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN RELLENOS SANITARIOS

2.1. GENERALIDADES DEL BIOGÁS.

El biogás es el nombre que comúnmente se emplea para hacer referencia a la mezcla inflamable de gases, que se genera cuando la materia orgánica (residuos sólidos urbanos, estiércol, lodos de aguas residuales, etc.) se descompone de forma anaeróbica. La mezcla contiene mayormente CH₄, en una proporción de 50-70 %, el resto es principalmente CO₂ con presencia de otros gases (Abbasi, Tauseef, & Abbasi, 2012).

2.2. DESCOMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Los procesos que ocurren durante la descomposición se pueden sintetizar de la siguiente forma:

Tabla 2.1. Procesos que ocurren durante la descomposición.

Procesos	Descomposición aerobia	Descomposición anaerobia
Requerimientos	Disponibilidad de oxígeno, menor proporción de humedad	Ausencia de oxígeno, mayor humedad
Temperatura	(50-70) °C	(35-50) °C
Reacciones	Oxidación, nitrificación	Reducción, desnitrificación
Productos	CO ₂ , H ₂ O, productos de la oxidación	Ácidos orgánicos, CH ₄ , CO ₂ , NH ₃ , H ₂ S, lixiviado

De acuerdo a Johannessen (1999), el proceso de la descomposición está conformada por las siguientes etapas:

Fase 1: Etapa aeróbica promovida por el aire atrapado en las celdas cubiertas en el sitio de disposición final. Sin embargo, el oxígeno del aire, empieza a consumirse rápidamente, así como el nitrógeno, por los procesos de nitrificación. Como

consecuencia de la degradación aerobia de la materia orgánica, empieza a producirse bióxido de carbono, que se acompaña de una elevación de la temperatura. Esta fase dura hasta el agotamiento del oxígeno, abarcando por lo general un par de semanas.

Fase 2: También denominada fase ácida, la cual es una transición a los procesos anaerobios, cuando la fermentación empieza a generar lixiviados con un alto contenido de ácidos orgánicos, lo que da lugar a un descenso significativo en el pH. Por otro lado, el biogás generado está constituido mayormente de bióxido de carbono y nitrógeno aún no consumido, aunado a la producción de un porcentaje menor de hidrógeno. En los lixiviados, la demanda química de oxígeno alcanza su concentración más alta, así como el amoníaco y los ácidos orgánicos también llegan a su máxima concentración.

Fase 3: Es una etapa metanogénica intermedia en donde predominan las condiciones totalmente anaerobias. La proporción del metano se incrementa, mientras el contenido de bióxido de carbono decrece. Los ácidos grasos volátiles son transformados a biogás, y su concentración disminuye en el lixiviado. Esto conlleva a un aumento en el pH, mientras que la carga orgánica del lixiviado se reduce considerablemente.

Fase 4: Conocida como la fase metanogénica estable. Es un periodo anaerobio durante el cual se alcanza una máxima producción del metano, con una concentración estable en el biogás de alrededor del 55% en volumen. El contenido de bióxido de carbono es un poco menor pero también estable, variando entre 40 y 50%. En el lixiviado se mantiene un pH elevado, con concentraciones significativas de amoníaco, y una carga orgánica decreciente medida por la demanda química de oxígeno.

Fase 5: Es la etapa final de la estabilización de los residuos, con un carácter aerobio. Estas condiciones ocurren por lo regular en rellenos recién clausurados. La producción de metano decrece y el bióxido de carbono se sustituye por nitrógeno y oxígeno

conforme se introduce el aire atmosférico a través de las capas superficiales del relleno.

El mayor impacto ambiental del biogás, lo generan los dos principales componentes (CH_4 y CO_2). Destacando que el metano posee un efecto de albedo 23 veces mayor al del bióxido de carbono, es decir, su contribución al calentamiento global es mayor aunque su volumen sea proporcionalmente menor (IPCC,2001).

2.2.1. Transformaciones biológicas de los RSU

Las transformaciones biológicas de la fracción orgánica de los RSU se pueden utilizar para reducir el volumen y el peso del material; para producir composta y metano. Los principales organismos implicados en las transformaciones biológicas de residuos orgánicos son bacterias, hongos, levaduras y actinomicetos. Estas transformaciones pueden realizarse aerobiamente o anaerobiamente, según la disponibilidad de oxígeno. Las principales diferencias entre las reacciones de conversión aerobia y anaerobia están en la naturaleza de los productos finales, y en el hecho de que sea necesario suministrar oxígeno para realizar la conversión. Los procesos biológicos que se han utilizado para la conversión de la fracción orgánica de los RSU son: el compostaje aerobio y la digestión anaerobia (Vranera, 2011).

Compostaje aerobio. Si se abandona, la fracción orgánica de los RSU sufrirá descomposición biológica. La extensión y el periodo de tiempo necesario para que se produzca la descomposición dependerán de la naturaleza del residuo, del contenido de humedad, de los nutrientes disponibles, y de otros factores ambientales. Bajo condiciones controladas, los residuos de jardín y la fracción orgánica de los RSU se pueden convertir en un residuo orgánico estable conocido como composta en un periodo de tiempo razonablemente corto (de cuatro a seis semanas), este se puede representar por la siguiente ecuación:

Materia orgánica + O₂ + Nutrientes + Materia orgánica + CO₂ + H₂O + NH₃ + SO₄⁻ + Calor

En la ecuación, los principales productos finales son: materia orgánica resistente, dióxido de carbono, agua, amoníaco y sulfato. La composta es la materia orgánica resistente que permanece y que normalmente contiene un alto porcentaje de lignina, que es difícil de convertir biológicamente en un periodo de tiempo relativamente corto. La lignina, que se encuentra principalmente en el papel de periódico, es el polímero orgánico que une las fibras celulósicas en los árboles y algunas plantas.

Digestión anaerobia. La porción biodegradable de la fracción orgánica de los RSU se puede convertir biológicamente bajo condiciones anaerobias en un gas que contiene dióxido de carbono y metano (CH₄). Esta conversión se puede representar con la siguiente ecuación:

Materia orgánica + H₂O + Materia orgánica resistente + CO₂ + CH₄ + NH₃ + H₂S + Calor

De esta forma, los principales productos finales son: dióxido de carbono, metano, amoníaco, sulfuro de hidrógeno y materia orgánica resistente. En la mayoría de los procesos de conversión anaerobios el dióxido de carbono y el metano constituyen más del 99% del gas total producido.

La digestión anaeróbica es un proceso muy complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar, como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas. De hecho, muchas de estas reacciones ocurren de forma simultánea. Los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta ahora, dividen el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica en cuatro fases o etapas: Hidrólisis, Etapa fermentativa o acidogénica, Etapa acetogénica y Etapa metanogénica (Baskar, Baskar, & Dhillon, 2012) .

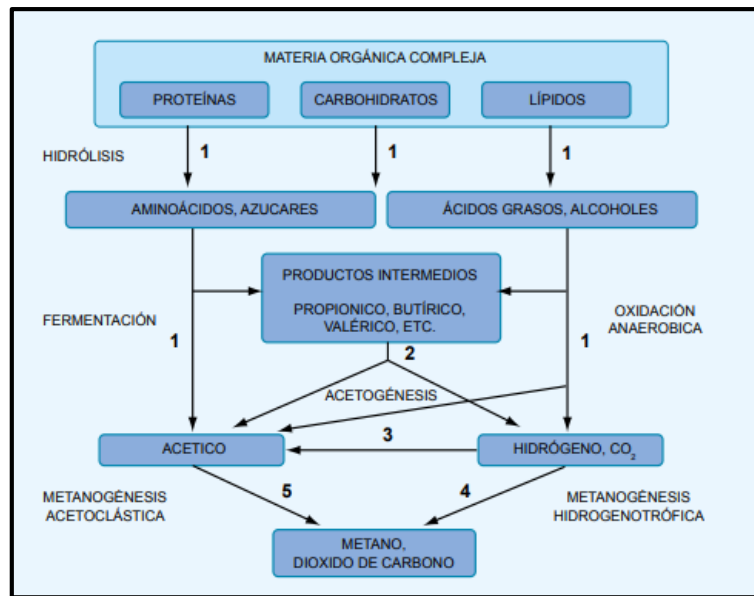


Figura 2.6. Etapas de la descomposición orgánica. Fuente: Pavlostathis & Gómez (1991).

2.2.2. Condiciones que afectan en la generación de biogás en los rellenos sanitarios

De acuerdo a Rajaram, Zia Siddiqui, & Emran Khan (2011), los principales factores que influyen y determinan la generación de biogás en los sitios de disposición final, son los siguientes:

1. **Composición de los residuos.** Es el factor más importante que determina el potencial de generación de biogás, ya que la cantidad máxima que se produzca se encontrará relacionada con la calidad y el tipo de contenido orgánico en los residuos.
2. **Densidad de los residuos.** La compactación que se realiza en el relleno sanitario repercute directamente en este factor. Ya que cuando esta es alta, puede inhibir la recolección del biogás, en las partes bajas del sitio.
3. **Tamaño de partícula.** Esto afecta en el transporte de nutrientes y humedad a través del relleno sanitario. Es decir, a menor tamaño de partícula la generación de biogás será mayor. Por tal motivo, durante el triturado de los residuos se debe considerar este aspecto.

4. **Temperatura.** Este influye en el tipo de bacterias que se van a desarrollar, así como en la tasa de descomposición y generación de biogás. Estos decrecen con respecto a la temperatura. Por otro lado la temperatura se encuentra influenciada por la profundidad del relleno sanitario.
5. **Humedad.** La cantidad de humedad en los rellenos sanitarios, es una de los variables más importantes que determina la tasa de generación de biogás, el rango óptimo es de 50-60 %. Cuando este valor es menor, repercute directamente en la descomposición y por ende en todo el proceso de formación de biogás (menor generación de metano).
6. **pH.** La generación de metano es mayor cuando el pH en el relleno sanitario es neutro, este se ve afectado por los residuos que se colocan en el sitio, ya que de estos dependerán las características del lixiviado que se genere.
7. **Condiciones atmosféricas.** Estas son importantes, porque afecta a la temperatura, la presión y contenido de humedad en el relleno sanitario.
8. **Cobertura del relleno sanitario.** La elección del material adecuado es muy importante, ya que de ello dependerá que la intrusión del oxígeno, la infiltración y el efecto amortiguador del cambio de temperatura se realice de manera óptima.
9. **Edad de los residuos.** Después de establecerse las condiciones anaerobias en el relleno sanitario, la generación de biogás será significativa de 10 a 20 años. Al transcurrir mayor tiempo, se genera un decrecimiento en la producción de este.

2.3. MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS

La determinación de la cantidad de biogás generado en los sitios de disposición final, se encuentra relacionado a la Ley de conservación de la masa y energía, la cual tiene como consecuencia, la transformación de estos. En el proyecto de investigación se deben utilizar

modelos matemáticos en los que se incluyen otros, tal es el caso de los modelos cinéticos que tratan de explicar las reacciones que ocurren durante la descomposición de RSU, proceso en el que se genera el biogás.

Por otro lado, el sitio de disposición final es el sistema en el que se desarrollan mecanismos de cinética de transferencia de materia y energía. En este caso en la entrada (RSU y condiciones atmosféricas), proceso (reacciones durante la descomposición) y uno de los productos es el biogás que puede ser transformado a otra forma de energía. (Álvarez Zapata, 2013).

Un modelo matemático empleado para la estimación de generación de biogás, resulta ser una herramienta de predicción de la cantidad de biogás o de la fracción de metano, a partir de un volumen de residuos que evoluciona a través del tiempo. El propósito de los modelos existentes es describir en términos simplificados las complejas reacciones que ocurren durante la descomposición de la materia orgánica contenida en los RSU, que se depositan en los sitios de disposición final (Rajaram, Zia Siddiqui, & Emran Khan, 2011). En la mayoría de los modelos de biogás, independientemente de su complejidad, tipo o validación, los parámetros que definen la producción de biogás son los siguientes:

1. **Potencial inicial de producción de biogás:** representa el volumen de gas que se espera se produzca a partir de una determinada cantidad de residuos.
2. **Producción acumulada de biogás:** representa el volumen de gas que se ha producido a partir de una determinada cantidad de residuos en un tiempo determinado.
3. **Potencial de producción de biogás:** representa el volumen de biogás que se producirá a partir de una determinada cantidad de residuos después de un tiempo o la fracción de metano.
4. **Tasa de generación del biogás:** representa el volumen de biogás producido a partir de una determinada cantidad de residuos sobre una base de tiempo.

2.3.1. Modelos cinéticos empleados en los modelos de biogás

De acuerdo a Karanjekar (2012), los principales modelos cinéticos que se emplean en la determinación de generación de biogás a partir de RSU son los siguientes:

1. **Modelo de orden cero:** la generación de biogás es constante en el tiempo. La edad de los residuos no está incluida en el modelo.
2. **Modelo de primer orden:** la generación de biogás decrece exponencialmente.
3. **Modelo modificado de primer orden:** se considera un tiempo de desfase en la generación de metano. Inicia lentamente para luego crecer hacia un pico que decrece exponencialmente, como en el modelo de primer orden.
4. **Modelos de segundo orden:** describen las complejas reacciones que ocurren durante la degradación de los residuos, a partir de reacciones de primer orden con diferentes tasas.
5. **Modelo multifase de primer orden:** se consideran diferentes fracciones de residuos y diferentes tasas de producción.

2.3.2. Modelos empleados para estimar la generación de biogás en rellenos sanitarios

Para estimar la generación de biogás en los rellenos sanitarios, se deben emplear modelos matemáticos. Cada uno con requerimientos, desde algo muy general hasta cuestiones particulares del sitio a estudiar, de acuerdo al IPCC (2006); Colomer Mendoza, García Darás, Robles Martínez, & Aranda, (2012) ;Urrego Martínez & Rodríguez Miranda, (2015) ;Stege & Davila, (2009), los más empleados son los siguientes:

2.3.2.1. **Modelo de la SWANA (Solid Waste Association of North America)**

En este modelo se desprecia la edad y tipo de residuos, ya que se considera que no tiene ningún efecto en la producción de CH₄.

$$Q = \frac{M.L_0}{t_0 - t_1} \text{ para } t_0 < t < t_1$$

Ecuación 2.1

Donde:

Q: Generación de metano (m³/año).

W: Residuos depositados en el sitio de disposición final (t).

L₀: Potencial de generación de metano. (m³/t).

t: tiempo (años).

t₀: tiempo de desfase (año).

t₁: Tiempo de cese de generación (año).

2.3.2.2. **Modelo de la EPA (Environmental Protection Agency)**

Para emplear el modelo es fundamental conocer la tasa promedio anual de residuos dispuestos, el número de años que ha estado o estuvo abierto el relleno sanitario, el número de años que el relleno ha estado cerrado, el potencial de los residuos dispuestos para generar metano y la tasa de generación de metano de los residuos dispuestos. Se expresa de la siguiente forma:

$$LFG = 2 \cdot L_0 \cdot R \cdot (e^{-k \cdot C} - e^{-k \cdot T})$$

Ecuación 2.2

Donde:

LFG: Cantidad total de gas generado en el año actual (pies³).

L₀: Potencial total de generación de metano de los residuos (pies³/libra).

R: Promedio anual de RSU dispuestos durante la vida activa (libras).

k: Tasa anual de generación de metano (1/año).

T: Tiempo desde la apertura del relleno sanitario (años).

C: Tiempo desde la clausura del relleno sanitario (años)

2.3.2.3. Modelo del IPPC

Está basado en el método de descomposición de primero orden, en donde el CH₄ es el resultado de la transformación del carbono presente en la materia orgánica, bajo condiciones anaeróbicas.

$$\text{Emisiones de CH}_4 = \left[\sum_x \text{CH}_4 \text{ generado}_{x,t} - R \right] \cdot (1 - OXR)$$

Ecuación 2.3

Donde:

CH₄: Cantidad de metano durante el año t en Gg.

t: Año de inventario.

x: Categoría o tipo de desecho y/o material.

R: Metano recuperado durante el año.

OX: Factor de oxidación durante el año T.

2.3.2.4. Modelo mexicano de biogás

Inicialmente fue desarrollado en el 2003 por SCS Engineers, posteriormente se desarrolló una modificación en el 2009 (versión 2.0), con el objetivo de mejorar la primera versión. Se representa de la siguiente forma:

$$Q = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0.1}^1 2kL_o \frac{M_i}{10} (e^{-ktij})(MCF)(F)$$

Ecuación 2.4

Donde:

Q: Flujo de biogás máximo esperado (m³/año).

i : Incremento en tiempo de 1 año.

n: Año del cálculo-año inicial de disposición de residuos.

j : Incremento de tiempo en 0.1 años.

k: Índice de generación de metano (1/año).

L₀: Generación potencial de metano (m³/Mg).

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

t_{ij}: Edad de la sección j de la ama de residuos M_i dispuestas en el año i (años decimales).

MCF: Factor de corrección de metano.

F: Factor de ajuste por incendio.

2.3.2.5. Modelo Afvalzorg multi-fase

En este modelo se considera que cada tipo de residuos contiene distintas fracciones de materia orgánica, por lo que el proceso de degradación es diferente (tasas de degradación). De manera particular se distinguen ocho categorías de residuos y tres fracciones. Por tanto, se calcula para cada una de las fracciones la generación de biogás.

$$Q = \zeta \sum_{i=1}^3 c \cdot A \cdot C_{0,i} \cdot k_{1,i} \cdot e^{-k_{1,i} \cdot t}$$

Ecuación 2.5

Donde:

α_t: Generación de biogás en un tiempo dado (m³/año).

Ç: Factor de diferenciación (tasa de descomposición de la materia orgánica).

i: Fracción de residuo con tasa de degradación k_{1,i} (kg_i/kg residuos).

c : Factor de conversión m³/kg materia orgánica degradada).

A: Cantidad de residuos confinados (Mg).

C₀: Cantidad de materia orgánica (MO) en los RSU (kgMO. Mg de residuos⁻¹).

k_{1,i}: Constante de degradación (año⁻¹).

t: Tiempo transcurrido desde el confinamiento de los residuos (años).

2.4. APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS

Los rellenos sanitarios son los sitios destinados al confinamiento de los RSU, cuyo objetivo principal es retener y/o controlar productos generados durante la descomposición de la fracción orgánica de los residuos (lixiviados y biogás). Aunque la experiencia de países desarrollados ha demostrado que a largo plazo los costos de operación son altos e insostenibles, estos continúan siendo la opción más viable en el sistema de gestión de residuos en países subdesarrollados, y en particular en América del Norte y Latina (Townsend, *et. al* 2015).

Por otro lado la captura de biogás, representa un tipo de tecnología de aprovechamiento energético de residuos, aunado a que contribuye a la mitigación de emisiones a la atmosfera de GEI. Un factor importante que determina la viabilidad de los proyectos es la eficiencia de recuperación de biogás, que depende directamente del diseño y la operación. La eficiencia de recolección del biogás en rellenos sanitarios con un buen diseño fluctúa entre el 60 y el 85% (GIZ, 2018).

De acuerdo a Castells (2012), un sistema de recolección de biogás se constituye por los siguientes elementos:

1. Pozos de recolección del biogás, que consisten en una red de pozos verticales u horizontales instaladas en las celdas de los residuos.
2. Red de tuberías, que tienen el objetivo de conectar los pozos de recolección al quemador o a la planta de aprovechamiento energético.
3. Trampas de condensado o cárcamos, que es un sistema de eliminación de humedad que contiene el biogás y los lixiviados, mismas que pueden taponar la tubería y con ello reducir la efectividad de la red de captación.

4. Estación de quemado con o sin planta de energía, con el fin de quemar el biogás para evitar las emisiones de CH₄ o este se pueda utilizar como combustible para generar electricidad.

Seguido de la recolección del biogás para el aprovechamiento, se encuentra el tratamiento para poder darle alguno de los siguientes usos: sustituir combustibles fósiles en procesos de combustión o para la generación de energía eléctrica y/o térmica, o como biocombustible (IEE, 2012).

A continuación, se muestra un esquema típico del aprovechamiento del biogás en un relleno sanitario para generación de energía eléctrica. Que prácticamente representa de forma gráfica, lo que se describió con anterioridad.

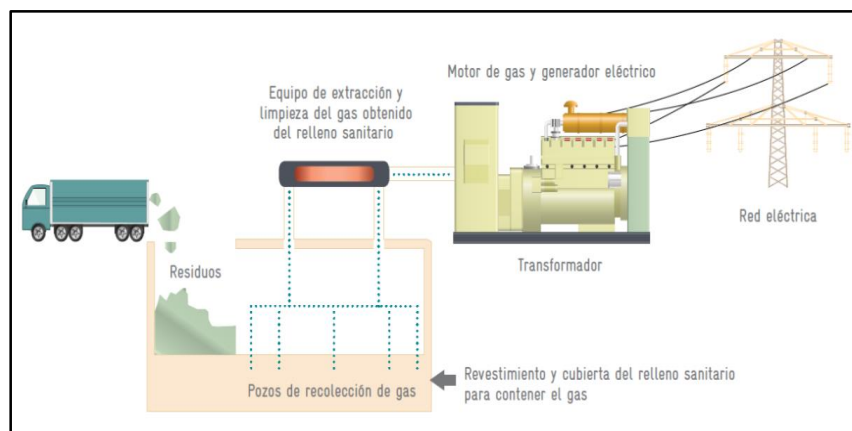


Figura 2.1. Esquema típico del aprovechamiento de biogás en un relleno sanitario. Fuente: IEE, 2012.

2.5. Casos internacionales del aprovechamiento de biogás

La implementación de proyectos en el tema del aprovechamiento del biogás con fines energéticos ha tenido gran presencia en el siglo XXI, debido a la necesidad de buscar opciones alternas al uso de combustibles fósiles y, de esta forma minimizar los impactos ambientales, a continuación se describen algunos casos internacionales:

2.5.1. Proyecto de aprovechamiento de biogás en EUA

El estado de California, EUA, ha establecido metas relacionadas con las energías renovables en su matriz energética, lo cual ha propiciado el desarrollo de proyectos como el de Olinda Alpha Landfill, localizado en el Condado de Orange al sur de California, el cual es operado por OC Waste & Recycling. El sitio de disposición final de RSU, inicia operaciones en el año de 1960 con permiso hasta el año 2021. Cuenta con una capacidad máxima de recepción de 8000 t/día. En 2010, derivado de una iniciativa público-privada que involucra al Condado de Orange y a Broadrock Renewables LLC, se empieza a construir una planta para el aprovechamiento del biogás producido durante la descomposición de la fracción orgánica de los RSU por medio de la generación de energía eléctrica (energía renovable). Finalmente, en el año 2012 inicia operaciones la planta, que tiene una capacidad instalada de generación de 32.5 MW.

La energía obtenida se entrega a la red regional y es comprada por autoridades del condado de Orange para ser utilizada a nivel local, asimismo al ser considerada limpia o renovable puede vender certificados de energía renovable (CER´s) en donde un certificado se emite por cada MWh de electricidad generado. Los precios de los CER´s varían en función de distintos factores, tales como la tecnología, la oferta y la demanda locales y las regulaciones en los mercados, para el caso de Olinda Landfill es de 50 dólares.

2.5.2. Proyecto de aprovechamiento de biogás en Brasil

En el estado de San Pablo, Brasil, se encuentra la planta Termoverde Caieiras, S.A., en la que se genera energía eléctrica a partir de los RSU del relleno Sanitario, desde el año 2016. El sitio de disposición final recibe aproximadamente 8,000 t/día, y tiene una capacidad instalada de 29.5 MW. La planta opera bajo la figura de productor independiente de energía de acuerdo a la Ley 9.074, en donde corresponde a la persona jurídica o empresa que recibe el permiso del Estado para producir electricidad, comercializar parcialmente o totalmente, bajo su responsabilidad y riesgo. Esto favorece a que nuevos inversionistas se involucren

en el tema de la generación de energía eléctrica, ya que bajo estos términos se puede comprar y vender energía de forma competitiva y flexible.

Por otro lado, dentro de los incentivos económicos obtenidos para el desarrollo de la planta se contemplan créditos del Banco Nacional de Desarrollo Económico y Social (BNDES) a través de la línea de fondo climático, con lo que se viabilizó la etapa de inversión del proyecto, la cual se recupera con la venta de energía y de bonos verdes.

2.5.3. Proyecto de aprovechamiento de biogás en Perú

La planta de Huaycoloro, en Perú, inicia operaciones en 2011 por Petramás, en ella se genera energía eléctrica a partir del biogás generado por la descomposición de los RSU dispuestos en el relleno sanitario, en donde se recibe aproximadamente el 42% de los RSU generados en la ciudad de Lima. La planta cuenta con una capacidad instalada de 4.8 MW, y la energía generada es suministrada a la red de transmisión del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN).

En lo que respecta a la venta de la energía generada, fue fortalecida por la normativa desarrollada en Perú, con el fin de introducir este tipo de energía en la matriz energética nacional. Con base en lo estipulado en el Decreto Legislativo 1002, se declaró el interés nacional y la necesidad pública para desarrollar una nueva generación eléctrica por medio de fuentes renovables, así como la disponibilidad de incentivos para proyectos de esta índole.

La política elaborada y desarrollada en Perú corresponde a instrumentos de mercado, fiscales y económicos. En los instrumentos de mercado, la política pública adoptada a través de las distintas leyes el incentivo de tarifas fijas, con el fin de garantizar la recuperación de la inversión a los empresarios. En lo palpable, se materializa otorgando contratos de 20 años para el suministro de energía eléctrica generada con fuentes renovables al SEIN, con una tarifa garantizada y otorgándoles acceso prioritario a las redes.

2.6. PROYECTOS DE APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS EN MÉXICO

La primera iniciativa de aprovechamiento de biogás surge en 1991, y fue implementado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas, en colaboración por la Comisión Federal de Electricidad y la Compañía Luz y Fuerza del Centro en el Relleno Sanitario de Santa Cruz Meyehualco en la Ciudad de México, en donde se instaló una planta piloto de 20 kW (Fernández, Huacuz Villamar, & Saldaña Méndez, 2006). Pero fue hasta el año 2003 que se implementa la primera planta de generación de energía eléctrica en México y América Latina en la ciudad de Monterrey. Es importante agregar, que considerando que actualmente la mayor disposición de RSU se efectúa en rellenos sanitarios o tiraderos a cielo abierto, debería ser prioridad impulsar políticas más robustas y una mejor regulación de la gestión, manejo, aprovechamiento y disposición final de los RSU en el país.

De acuerdo al Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE) de la SENER, se reportó que en el año 2015 existían ocho proyectos de generación de energía por medio de la extracción de biogás en rellenos sanitarios en el país.

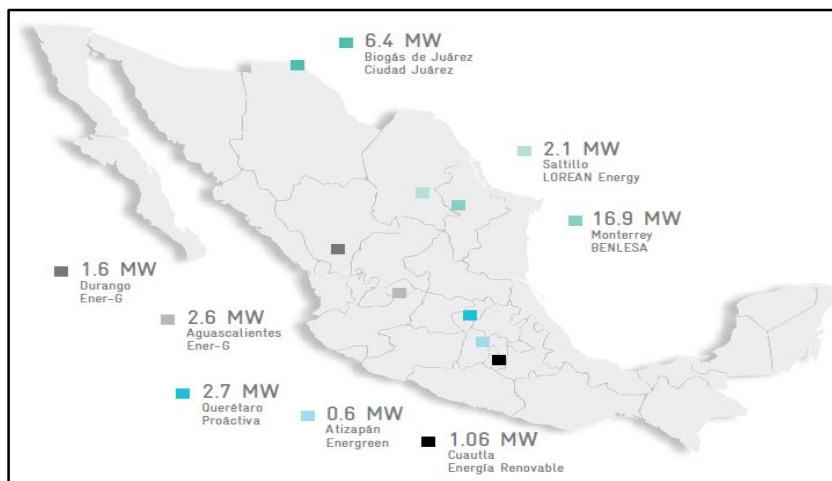


Figura 2.3. Proyectos de aprovechamiento de biogás vigentes en México. Fuente: IEE,2012.

En la **figura 2.3** se representa la ubicación geográfica de cada uno de los ocho proyectos en operación, en el tema del aprovechamiento del biogás con fines energéticos en el país. A continuación en la **tabla 2.2** se detallan generalidades de cada uno de estos proyectos,

destacando el Salinas Victoria, Nuevo León, contar con una capacidad autorizada e instalada de 15.95 MW, desafortunadamente se presenta un declive en la apertura e inversión de nuevos sitios de este tipo, debido principalmente al poco respaldo financiero y rentabilidad en lo concerniente a la venta de bonos de carbono (muy bajo costo).

Tabla 2.2. Proyectos vigentes en México.

Año	Nombre del relleno	Municipio y estado	Recepción diaria de RSU (t)	Compañía generadora de energía	Capacidad autorizada (MW)	Biogás (m³/año)	Operador del relleno
2003	Salinas Victoria	Monterrey, Nuevo León	5000	Bionergía de Nuevo León (Benlesa)	16.95	83,157	Simeprode
2010	Ciudad Juárez	Ciudad Juárez, Chihuahua	1200	Transformadora de Energía Eléctrica de Juárez	6.4	13,811	Biogás de Juárez
2008	Durango	Durango, Durango	400	Ener-G	1.6	6000	Ayuntamiento
2009	Puerto de Chivos	Atizapán, Edo. De México	500	Energreen	0.6	3040	Ayuntamiento
2010	San Nicolás	Aguascalientes, Aguascalientes	914	Ener-G	3.20	10,556	Ayuntamiento
2012	Querétaro	Mompaní, Querétaro	750	TQM Generación Energía Renovable	2.746	12,614	Proactiva
2013	La Perseverancia	Cuatla, Morelos	800	Energía Renovable de Cuatla	1.065	2000	Operadora y Manejo de Rellenos Sanitarios
2013	Saltillo	Saltillo, Coahuila	600	Lorean Energy Group	2.122	7992	Ayuntamiento

2.6.1. Relleno Sanitario Salinas Victoria

En el municipio de Salinas Victoria, Nuevo León, se encuentra activo el proyecto de aprovechamiento energético de los RSU. Este sitio de disposición final comenzó a operar en 1990, y se estima que recibirá residuos hasta el año 2025, en lo que respecta a la planta de generación eléctrica seguirá produciendo hasta el año 2045 (SIMEPRODE, 2006) . En el año 2000, el sistema Integral para el Manejo Ecológico y Procesamiento de Desechos del Estado de Nuevo León (Simeprode) era el responsable del manejo de los RSU, posteriormente en 2003 se formó Benlesa (fusión entre Sistemas de Energía Internacional

y Simeprode), empresa responsable de la recuperación y aprovechamiento del biogás para la generación de energía eléctrica.

El proyecto de aprovechamiento energético se desarrolló en tres etapas:

Etapas 1. 2003: La planta contaba con una capacidad instalada de 7.42 MW y una producción de 58,252 MWh/año.

Etapas 2. 2008: En esta segunda fase se logró instalar la capacidad de 12.72 MW.

Etapas 3. 2010: En la última etapa se logró instalar la capacidad de 16.96, con una generación de energía eléctrica de 120,000 MWh/año.

En lo concerniente a las inversiones, estas provinieron de Bioenergía de Nuevo León de C.V. (BENLESA), y una asociación público-privada entre SIMEPRODE (Sistema Integral para el Manejo Ecológico y Procesamiento de Desechos (pública) y Bielétrica de Monterrey (privada). Dado que la energía de este proyecto es menos costosa, el proyecto se financia por sí mismo (el ahorro para los clientes es cerca del 12%). Adicionalmente, se cuenta con la venta de bonos de carbono por la reducción de emisiones de metano.

2.6.2. Relleno Sanitario La Perseverancia

El relleno sanitario en sus inicios fue operado por el municipio de Cuautla, pero en 2011 adquirió la concesión la compañía Operadora de Ferrocarril y Manejo de Rellenos Sanitarios. El servicio de manejo integral de los RSU se proporciona a los municipios de Cuautla, Cuernavaca, Yautepec, Yecapixtla, Jiutepec, Jonatepec, Ayala, Temixco, Temoac, Tlayacapan, Emiliano Zapata, Totolapan, Tlalnepantla, Jantetelco y Tepoztlán, se estima que diariamente se confinan alrededor de 950 t de RSU. En el año 2013 la empresa Energía Renovable de Cuautla inicia el aprovechamiento energético del biogás para generar energía eléctrica, lográndose instalar una capacidad de planta de 1.065 MW, la energía generada es suministrada a dos empresas que se encuentran en el Edo. De México. En lo

correspondiente al financiamiento, la empresa estableció una cuota de 180 MXN por tonelada de RSU procesada.

2.6.3. Relleno Sanitario Mompaní

El servicio del relleno sanitario está concesionado a la empresa Proactiva Medio Ambiente México para el período 1996-2025. Este sitio de confinamiento es capaz de cubrir las necesidades de los habitantes del municipio de Querétaro, en donde diariamente se confinan aproximadamente 750 t. Por otro lado, en el año de 2011 el Ayuntamiento de Querétaro otorga la concesión a la empresa Tecnología del Medio Ambiente de Querétaro (conformado por Proactiva Medio Ambiente México y Eolicia Biogás Borealia) para aprovechar el biogás y generar energía eléctrica por medio de un proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio (CDM, 2012).

En lo concerniente a la inversión, la empresa Tecnología del Medio Ambiente de Querétaro fue responsable, y en lo que respecta al beneficio se estimó que se reflejaría en un ahorro de más de 94.5 millones de pesos, debido al ahorro del 9% de la tarifa de alumbrado público, así como una ganancia del 35% por la venta de bonos de carbono (Querétaro, 2010).

3. CARACTERIZACIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO EN EL ESTADO DE S.L.P., MÉXICO

Los sitios de estudio seleccionados para la presente investigación fueron los siguientes: dos tiraderos controlados a cielo que se encuentran en los municipios de Matehuala y Tancanhuitz, así como el único relleno sanitario del estado que se encuentra en la ciudad de San Luis Potosí. Es importante mencionar que esta fase de la investigación se vio detonado por la disponibilidad que mostraron los responsables de cada uno los sitios de disposición final para proporcionar información. Por ello se decidió estudiar los tres sitios antes mencionados, así como por la representatividad de las tres zonas geográficas del estado de San Luis Potosí, zona centro, altiplano y huasteca.

En el caso de la disponibilidad de información del sitio de disposición final de RSU del municipio de San Luis Potosí, ésta se gestionó directamente con la empresa que tiene la concesión del relleno sanitario. Para el caso de los otros dos sitios de estudio (Matehuala y Tancanhuitz), la información se obtuvo directamente a través de los Departamentos de Ecología de cada municipio. A estas informaciones se adicionaron las disponibles en el INEGI, así como la obtenida a través de la Secretaría de Ecología y Medio Ambiente del Estado de San Luis Potosí.



Figura 3.1. Ubicación de los sitios de disposición final a estudiar.

3.1. TIRADERO CONTROLADO A CIELO ABIERTO DE MATEHUALA, S.L.P.

El tiradero controlado a cielo abierto se encuentra al Norte del municipio de Matehuala, las coordenadas UTM correspondientes son las siguientes: a) $x= 337,376$ y b) $y= 2, 624,239$. Este sitio de disposición final es operado por el mismo municipio, inició actividades en el año de 2012 y se prevé que tendrá un tiempo de vida útil de aproximadamente 14 años. Actualmente recibe aproximadamente 67 t de RSU, la profundidad de las celdas es de 5 m y cuenta con cuatro pozos para quema de biogás (H. Ayuntamiento de Matehuala, 2018). Considerando la clasificación con base a la recepción diaria estipulada por la NOM-083-SEMARNAT-2003, sería tipo B con ingresos entre 50 y 100 toneladas diarias.



Figura 3.2. Ubicación de tiradero controlado a cielo abierto en el municipio de Matehuala, San Luis Potosí.

El municipio de Matehuala colinda al norte con los municipios de Villa de La Paz, Cedral y el estado de Nuevo León, al sur con Villa de Guadalupe y Villa de la Paz.

3.1.1. Evaluación del cumplimiento de estudios y análisis previos requeridos para la construcción con base en la NOM-083-SEMARNAT-2003 en el tiradero controlado a cielo abierto de Matehuala, S.L.P.

Considerando lo estipulado en la NOM-083-SEMARNAT-2003, se efectuó un check list de los estudios y análisis con los que en teoría debería cumplir el tiradero controlado a cielo abierto, respecto a lo real en el tiradero controlado a cielo abierto de Matehuala, S.L.P.

Tabla 3.1. Evaluación del cumplimiento de estudios y análisis previos requeridos para la construcción de un sitio de disposición final.

Estudios y Análisis	Tipo de relleno sanitario: B	Cumplimiento Real
Geológico y Geohidrológico Regionales		
Evaluación Geológica y Geohidrológica	▪	No cumple
Hidrológico	▪	No cumple
Topográfico	▪	No cumple
Generación y composición de los RSU y de Manejo Especial	▪	No Cumple
Generación de biogás	▪	No cumple
Generación de lixiviado	▪	No cumple

Considerando lo anterior se deduce que el tiradero controlado a cielo abierto localizado en Matehuala, S.L.P., no cumple con los requerimientos mínimos a considerar previo a la construcción, por lo tanto, se podría sobreentender que la operación actual es ineficiente lo cual debe estar generando impactos ambientales que no están siendo controlados y/o mitigados.

3.1.2. Aspectos abióticos del sitio de estudio

Los aspectos abióticos del sitio de estudio son importantes a manera de complemento para entender bajo las condiciones que se encuentra influenciado el sitio de estudio. A continuación se describen brevemente:

Tabla 3.2. Aspectos abióticos en Matehuala, S.L.P.

Clima	Geología	Edafología
<p>El clima se caracteriza por ser seco semicálido (75%), seco templado (24.1%) y semiseco templado (0.9%), por otro lado el rango de temperatura oscila entre 14-20 °C y el de precipitación de 300-500 mm.</p>	<p>Los periodos se encuentran distribuidos de la siguiente manera: Cuaternario (65.7%), Cretácico (28.7%) y Neógeno (4.2%).</p> <p>Las rocas presentes son de tipo sedimentaria: caliza (24.9%), conglomerado (4.2%), caliza-lutita (3.8%).</p>	<p>Los tipos de suelo dominantes son: Calcisol (39%), Leptosol (31.4%), Kastañozem (15.1%), Gypsisol (8.3%), Phaeozem (2.8%), Regosol (1.2%), Chernozem (0.8%) y Solonchak (0.3%).</p>

Fuente: INEGI, 2009.

3.2. TIRADERO CONTROLADO A CIELO ABIERTO DE TANCANHUITZ, S.L.P.

El tiradero controlado a cielo abierto se encuentra al Norte del municipio de Tancanhuitz sobre la carretera Valles Tamanzunchale, las coordenadas UTM correspondientes son las siguientes: a) x= 502,433y b) y= 2, 394,453. Este sitio de disposición final es de índole intermunicipal constituido por las siguientes poblaciones: Tancanhuitz, Xilitla, Axtla de Terrazas y Aquismón, y es operado por autoridades pertenecientes al municipio de Xilitla. El sitio inició actividades en el año de 2004 y se prevé que tendrá un tiempo de vida útil de aproximadamente 20 años. Actualmente recibe aproximadamente 112 t de RSU diariamente, la profundidad de las celdas es de 8 m y cuenta con cuatro pozos para quema de biogás (SEGAM, 2018). Considerando la clasificación con base en la recepción diaria estipulada por la NOM-083-SEMARNAT-2003, sería tipo A con ingresos mayores a 100 toneladas diarias.



Figura 3. 3. Ubicación del tiradero controlado a cielo abierto en el municipio de Tancahuitz, San Luis Potosí.

El municipio de Tancahuitz colinda al norte con los municipios de Aquismón y Tanlajás: al este con Tampamolón Corona, Coxcatlán, Huehuetlán y Aquismón: al oeste con Aquismón.

3.2.1. Evaluación del cumplimiento de estudios y análisis previos requeridos para la construcción con base en la NOM-083-SEMARNAT-2003 en el tiradero controlado a cielo abierto de Tancahuitz, S.L.P.

Considerando lo estipulado en la NOM-083-SEMARNAT-2003, se efectuó un check list de los estudios y análisis con los que en teoría debería cumplir el tiradero controlado a cielo abierto, respecto a lo real.

Tabla 3.3. Evaluación del cumplimiento de estudios y análisis previos requeridos para la construcción de un sitio de disposición final.

Estudios y Análisis	Tipo de relleno sanitario: A	Cumplimiento Real
Geológico y Geohidrológico Regionales	▪	No Cumple
Evaluación Geológica y Geohidrológica	▪	No Cumple
Hidrológico	▪	No Cumple
Topográfico	▪	No Cumple
Generación y composición de los RSU y de Manejo Especial	▪	No Cumple
Generación de biogás	▪	No Cumple
Generación de lixiviado	▪	No Cumple

Considerando lo anterior se deduce que el tiradero controlado a cielo abierto localizado Tancahuitz, S.L.P., no cumple con los requerimientos mínimos previos a la construcción. Es importante mencionar que con base a la magnitud del proyecto, se tuvieron que haber realizado todos los estudios y análisis estipulados por la NOM-083-SEMARNAT-2003. Por lo

tanto, hay grandes probabilidad de que se estén generando impactos ambientales significativos e incluso tratarse de cuestiones irremediables en la zona de operación.

3.2.2. Aspectos bióticos del sitio de estudio

Los aspectos abióticos del sitio de estudio son importantes a manera de complemento para entender bajo las condiciones que se encuentra influenciado el sitio de estudio.

Tabla 3.4. Aspectos abióticos en Tancanhuitz, S.L.P.

Clima	Geología	Edafología
El clima se caracteriza por ser semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano (57.9%) y cálido subhúmedo con lluvias de mayor humedad (42.1%), por otro lado el rango de temperatura oscila entre 22-26 °C y el de precipitación de 1,500-2,500 mm.	Los periodos se encuentran distribuidos de la siguiente manera: Paleógeno (50.9%), Cretácico (48.2%), Cuaternario (0.6%) y Terciario (0.3%). Las rocas presentes son de tipo sedimentaria: lutita (55.6%), lutita-arenisca (41.7%), caliza-lutita (1.3%) y caliza (0.3%).	Los tipos de suelo dominantes son: Calcisol (39%), Leptosol (31.4%), Kastañozem (15.1%), Gypsisol (8.3%), Phaeozem (2.8%), Regosol (1.2%), Chernozem (0.8%) y Solonchak (0.3%).

Fuente: INEGI,2009

3.3. RELLENO SANITARIO DE SAN JUANICO EL GRANDE, SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P.

El relleno sanitario se ubica en el Ejido de San Juanico el Grande, municipio de San Luis Potosí, S.L.P. (Figura 1). La población más cercana al sitio es la comunidad de Peñasco (perteneciente al municipio de San Luis Potosí), que en línea recta se encuentra hacia el Noroeste del sitio a 2,000 m de distancia, con las coordenadas geográficas siguientes: Latitud Norte: 22° 18'27.16'' y Longitud Oeste: 100° 55'57.30'' (H. Ayuntamiento de S.L.P., 2018)

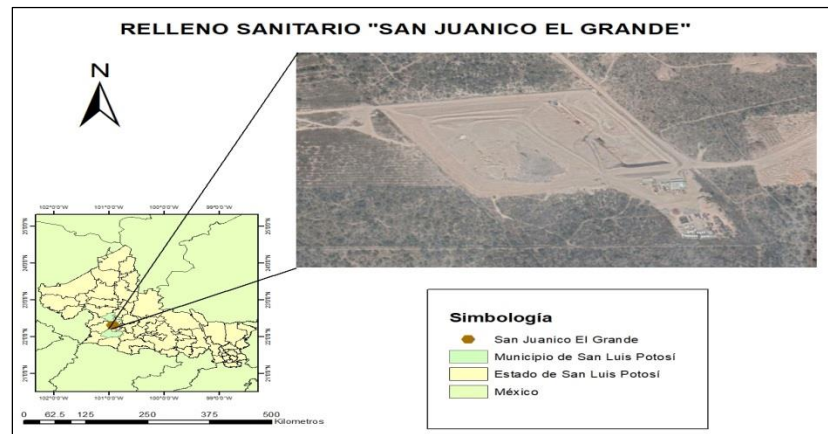


Figura 3.4. Ubicación del relleno sanitario de San Juanico el Grande, municipio de San Luis Potosí, S.L.P.

El relleno sanitario es tipo A, subclasificación A1, empezó a operar en el año 2015, se estima que tendrá un tiempo de vida útil de 25 años y se construirán aproximadamente 15 celdas, actualmente se encuentra en operación la celda tres y en construcción, la cuatro; hay un cárcamo de lixiviados y 17 pozos de biogás. La recepción de RSU es de aproximadamente 800 t diaria. El proceso que se efectúa ordinariamente es el pesaje de la cantidad de los RSU que ingresan, la disposición de éstos en el área de tiro, la compactación de los RSU, la colocación de una cubierta con tepetate (de aproximadamente 40 cm), así como la inspección de las chimeneas de biogás. Otras actividades programadas son: Recirculación de lixiviados (semanalmente); Levantamiento topográfico (cada mes); y los monitoreos semestrales de biogás, acuíferos y lixiviados (Red Ambiental, 2018).

3.1.1. Evaluación del cumplimiento de estudios y análisis previos requeridos para la construcción con base en la NOM-083-SEMARNAT-2003 en el relleno sanitario de San Luis Potosí, S.L.P.

Con base en lo indicado en la tabla 3.5 se concluye que el relleno sanitario de San Juanico el Grande cumplió con cada uno de los estudios y análisis previo a la construcción del sitio de disposición final, por tanto, esto podría ser indicio de una operación eficiente, agregando que el servicio se encuentra concesionado a una empresa privada, a diferencia de los dos sitios descritos con anterioridad que son operados por personal del municipio y, que evidentemente no cuentan con la experiencia requerida en el tema.

Tabla 3.5. Evaluación del cumplimiento de estudios y análisis previos requeridos para la construcción de un relleno sanitario.

Estudios y Análisis	Tipo de relleno sanitario: A	Cumplimiento Real
Geológico y Geohidrológico Regionales	▪	Cumple
Evaluación Geológica y Geohidrológica	▪	Cumple
Hidrológico	▪	Cumple
Topográfico	▪	Cumple
Generación y composición de los RSU y de Manejo Especial	▪	Cumple
Generación de biogás	▪	Cumple
Generación de lixiviado	▪	Cumple

3.1.2. Aspectos bióticos del sitio de estudio

Los aspectos abióticos del sitio de estudio son importantes a manera de complemento para entender bajo las condiciones que se encuentra influenciado el sitio de estudio.

Tabla 3.6. Aspectos abióticos en San Luis Potosí, S.L.P.

Clima	Geología	Edafología
BS0 (kw), se ubica en la región norte y, corresponde a un clima árido con verano cálido, temperatura media anual entre 12 y 18 °C, la del mes más frío entre -3°C y 18°C y la del mes más cálido superior a 18°C. La temporada más lluviosa es en verano y el porcentaje de lluvias invernal del 5%-10.2% del total anual.	Dentro del área se presentan los siguientes tipos geológicos: a. Rocas volcánicas: tobas acidas, tobas básicas, riolitas, roilitas tobas básicas, brechas volcánicas, basaltos pertenecientes al mioceno principalmente del tipo Basálticas y Andesíticas. Poseen una permeabilidad de media a alta. b. Rocas sedimentarias: Predominantemente calcáreas (calizas, calizas lutitas conglomerados) y arcillosas (lutitas, lutitas areniscas). Poseen una permeabilidad baja.	Se presentan siete tipos de suelo predominante entre los que se encuentran: Los Chernozem, Luviosol, Regosol, Vertisol y Planosol.

Fuente: INEGI, 2009.

4. MODELADO DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El desarrollo de modelos matemáticos que describen el procesamiento anaerobio comenzó en la década de los años 70, debido a la necesidad ambiental de tratar los residuos de rastros en países de Europa Central (Burh & Andrews , 1977). Entre los primeros trabajos realizados se encuentran los de Hill y Barth, que incluyen modelos para la digestión de residuos de cerdos. En estos modelos se incorporan las etapas de hidrólisis y acido génesis para estimar el efecto de la sobrecarga orgánica en la velocidad de metanización (Hill & Barth , 1977).

Posteriormente se reporta el desarrollo del modelo GASFILL, partiendo de estudios en un sitio de disposición final. En donde se emplearon como base ecuaciones de conservación de masa para el CH₄ y CO₂. Lo interesante radicó en incluir aspectos de física, biología y química que intervienen en la producción de biogás, en los sitios de disposición final. Por otro lado se compararon los datos obtenidos en el experimento (campo) con los de las simulaciones (Findikakis, Papelis, Halvadakis, & Leckie, 1988).

En 1995 se estudió la eficiencia en la predicción de diferentes modelos (orden cero, primero y segundo orden, y multifase), para ello se emplearon datos de la generación de biogás de nueve sitios de disposición final en Holanda. Como conclusión, se obtuvo que los modelos multifase son los que mejor describen y/o se ajustan a la producción de biogás, seguido de los de primer y según orden, y finalmente los de orden cero que fueron menos precisos (Reinhold, Merrath, Lennemann, & Markl, 1995). El punto clave probablemente radicó, en que los modelos multifase clasificaban en tres categorías a los residuos (rápida, moderada y lentamente biodegradable). Por lo que los autores consideraron que podría ser una buena alternativa, realizar una clasificación más amplia de los residuos para incrementar la eficiencia de predicción de los modelos (Boom & Oonk, 1995).

El trabajo en la aplicación de modelos matemáticos continuó y, en 1996 se aplicó para el funcionamiento óptimo de un digestor anaerobio para tratamiento de aguas residuales de origen alimenticio. En ese momento, el impacto ambiental que genera el biogás empezó a

adquirir importancia, ya que uno de los objetivos del proyecto fue el control de las emisiones para no contribuir al efecto invernadero (Bozinis, Alexiou, & Pistikopoulos, 1996).

En 1997, se desarrolló un proyecto empleando RSU a escala de laboratorio, con condiciones controladas. El modelo que se validó fue el de Hill y Bart, el cual consta de dos etapas: acidogénesis y metanogénesis. El objetivo principal fue evaluar la generación de biogás, como una buena alternativa, en forma de energía renovable. Finalmente, los resultados fueron favorables, ya que el modelo predijo con éxito el rendimiento de generación/producción de biogás (Kiely, Tayfur, Dolan, & Tanji, 1997).

En otro estudio se realizó la comparación de diferentes modelos (orden cero, primer orden, multifase y multifase modificado) a partir de los datos de 18 sitios de disposición final en Estados Unidos. Los resultados obtenidos, reflejaron coeficientes de R^2 entre 0.914 y 0.955, es decir los modelos se ajustaron más 90% a los datos obtenidos. El que presentó el valor más alto, fue el modelo de primer orden. (Vogt & Augenstein, 1997).

El modelo más empleado y/o reconocido en la literatura para la estimación de biogás generado en sitios de disposición final es el de LandGem. Es un modelo de primer orden; es decir, en el que la tasa de generación depende directamente de la cantidad de residuos sólidos confinados en el sitio y, decrece de forma exponencial después de alcanzar el punto máximo de generación. Por otro lado, en el caso de los estudios realizados en México, es una buena opción, emplear el Modelo Mexicano de biogás, ya que considera variables ambientales específicas del país, zona y/o región.

De acuerdo con lo anterior, en este trabajo de investigación se optó por utilizar el Modelo Mexicano de Biogás (MMB) considerando los siguientes criterios: fue diseñado para emplearlo en el país, y por ende considera características intrínsecas a este, así como la gran representatividad de los resultados obtenidos en otros proyectos. En particular se identificó una investigación efectuada en el relleno sanitario ubicado en la ciudad de Zapopán, Jalisco en donde se emplearon diez modelos para estimar la generación de biogás, al comparar los resultados del modelado con los de la medición en sitio, los que más se aproximaron al de la generación real fueron los obtenidos por el MMB.

4.1. APLICACIÓN DEL MODELO MEXICANO DE BIOGÁS 2.0

La estimación de la generación de biogás en el Relleno Sanitario de San Juanico el Grande, así como de los tiraderos a cielo abierto de Matehuala y Tancanhuitz se determinó empleando el Modelo Mexicano de Biogás 2.0 (descrito en el Capítulo No. 2), debido a la representatividad probada de sus resultados. Es relevante mencionar que el cálculo de la generación de biogás en los rellenos sanitarios es un aspecto primordial para estimar y minimizar los impactos ambientales que ocasiona el manejo inadecuado del biogás.

4.1.1. Modelo Mexicano de Biogás 2.0

El Modelo Mexicano de Biogás (MMB 2.0), se encuentra representado por la **ecuación 4.1**:

$$Q = \sum_{t=1}^n 0 \sum_{j=0.1}^1 2kL_o \frac{M_i}{10} (e^{-ktij})(MCF)(F)$$

Ecuación 4.1.

Donde:

Q: Flujo de biogás máximo esperado (m³/año).

i : Incremento en tiempo de 1 año.

n: Año del cálculo-año inicial de disposición de residuos.

j : Incremento de tiempo en 0.1 años.

k: Índice de generación de metano (1/año).

L_o: Generación potencial de metano (m³/Mg).

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

t_{ij}: Edad de la sección j de la ama de residuos M_i dispuestas en el año i (años decimales).

MCF: Factor de corrección de metano.

F: Factor de ajuste por incendio.

Con base en el manual del usuario MMB 2.0, los valores del índice de generación de metano K y de la generación potencial de metano L_o son los siguientes para los tres sitios estudiados:

Tabla 4.1. Valores K y Lo

Categoría de residuo	K	L_o
1	0.100	69
2	0.050	149
3	0.020	214
4	0.010	202

Fuente: Elaboración propia con base al MMB 2.0

En lo concerniente al MCF, se consideraron como aspectos clave la profundidad de las celdas y la operación en el sitio de disposición final, señalados en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Valores de MCF

Sitio de disposición final	MCF
San Juanico el Grande	1.0
Matehuala	0.5
Tancanhuitz	0.5

Fuente: Elaboración propia con base al MMB 2.0

Finalmente se asignó el valor de “0” en los tres casos al factor de ajuste por incendio. En el caso del relleno sanitario porque no se reportan incendios y, en el de los tiraderos a cielo abierto porque no se contó con información certera debido a que las autoridades correspondientes no la proporcionaron.

El modelado correspondiente a los sitios de disposición final de San Luis Potosí, Matehuala y Tancanhuitz, se efectuó empleando el software del Modelo Mexicano de Biogás V.2.0.

4.1. MODELADO DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN EL RELLENO SANITARIO DE SAN JUANICO EL GRANDE

Para poder efectuar el modelado de la generación de biogás en el relleno sanitario de San Juanico de Grande, se requirieron algunos “datos de entrada”, esto con el objetivo de detallar más el caso de estudio, y conseguir resultados más precisos. A continuación se muestra un resumen de ello:

Tabla 4.3. Datos de la sección de alimentación

Nombre del sitio	San Juanico el Grande
Ciudad	San Luis Potosí
Estado	San Luis Potosí
Región	5 (Noroeste-Interior Norte)
Año de apertura del sitio	2015
Disposición anual del año más reciente	305,112 Mg
Año de clausura proyectado	2041
Incremento anual estimado de disposición	1.5%
Profundidad promedio del relleno sanitario	12 m
Porcentaje de área con residuos con cubierta diaria	90%
Porcentaje del área con residuos sin cubierta diaria	10%

Los resultados más representativos, correspondientes a la generación de biogás en el periodo 2015-2042 fueron los siguientes:

Tabla 4.4. Modelado de la generación de biogás

Año	RSU acumulados	Biogás (m ³ /año)	Año	RSU acumulados	Biogás (m ³ /año)
2015	35,265	0	2029	4,521,594	22,398,951
2016	263,207	268,304	2030	4,886,394	23,754,000
2017	542,682	1,984,451	2031	5,256,694	25,076,439
2018	847,794	3,977,298	2032	5,632,594	26,369,811
2019	1,157,494	6,033,014	2033	6,014,094	27,637,362
2020	1,471,794	7,989,260	2034	6,401,294	28,881,302
2021	1,790,794	9,854,839	2035	6,794,294	30,104,401
2022	2,114,594	11,638,421	2036	7,193,194	31,309,204
2023	2,443,294	13,347,902	2037	7,598,094	32,498,040
2024	2,776,894	14,990,478	2038	8,009,094	33,673,052
2025	3,115,494	16,571,945	2039	8,426,294	34,836,206
2026	3,459,194	18,098,336	2040	8,849,794	35,989,310
2027	3,808,094	19,575,152	2041	9,279,694	37,134,028
2028	4,162,194	21,007,415	2042	9,279,694	38,271,892

En la tabla 4.4. se reporta información fraccionada en tres columnas, de izquierda a derecha: año, RSU acumulados y cantidad de biogás. Para poder observar mejor el comportamiento de la variable biogás a través del tiempo se representa por medio de la figura 4.1.

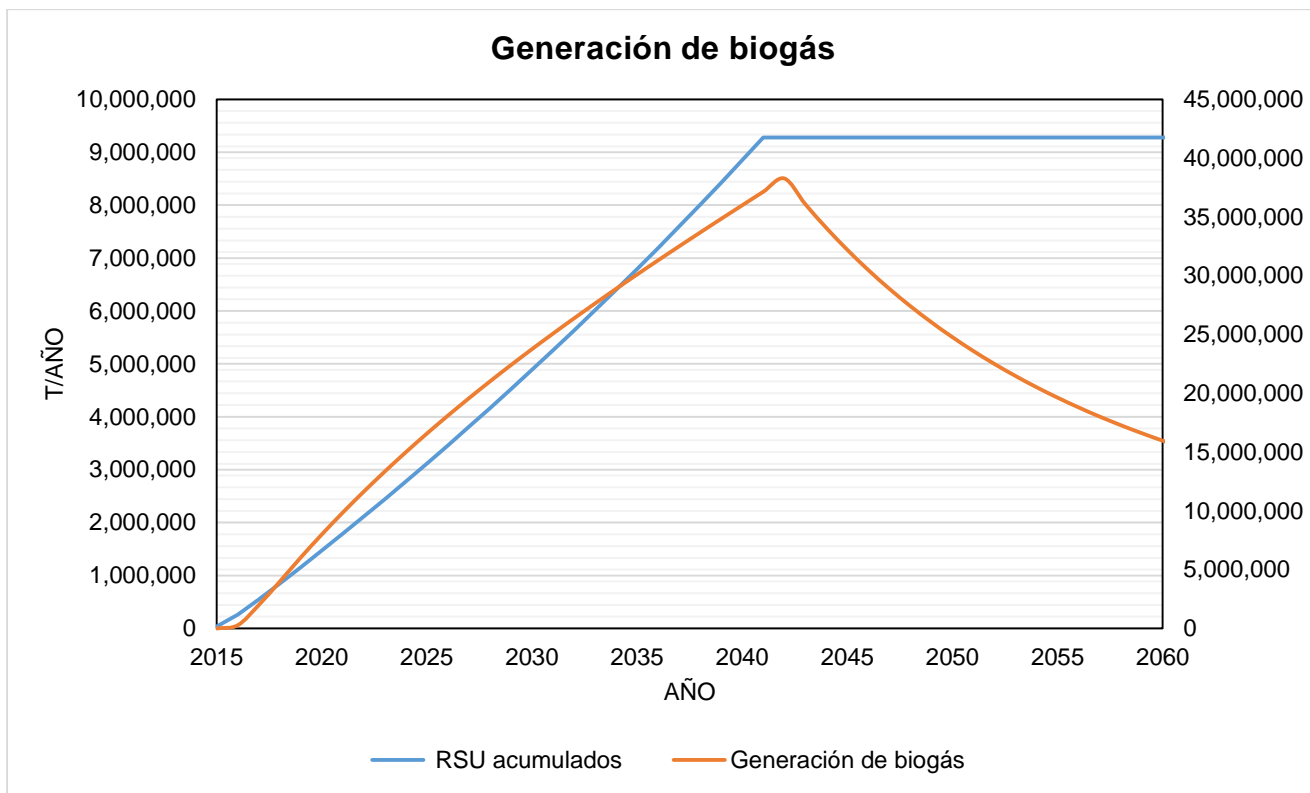


Figura 4.1. Relación entre Residuos Sólidos Urbanos acumulados y generación de biogás.

De acuerdo con los resultados representados en la figura 4.1, la mayor generación de biogás ocurrirá en el año 2042; es decir, un año después de la fecha en la que se pronostica la clausura del relleno sanitario. Esto se encuentra relacionado a que en el año 2041 se contará con la mayor cantidad de residuos acumulados y, esto da pauta a cumplir con la teoría del MMB, la cual estipula que la generación de biogás empieza a ocurrir aproximadamente un año después al confinamiento de los residuos, es decir en el año 2042 se estará emitiendo el biogás derivado de la descomposición de los residuos depositados durante todo el tiempo de vida útil del proyecto. Posterior al año 2041, únicamente se tendrá una acumulación de residuos y, estos entraran gradualmente a la etapa final de la descomposición, denominada estabilización con carácter aerobio, es decir la generación de biogás decrece porque se empieza a sustituir por nitrógeno y oxígeno que contiene el aire atmosférico, que se introduce a través de las capas superficiales de los taludes en el relleno sanitario.

4.1.1. Escenarios con base en la eficiencia de captura de biogás en el relleno sanitario de San Juanico el Grande

La eficiencia de captura de biogás está en función del diseño del sistema (cuanta área del relleno sanitario está cubierta por el sistema de captura) y la operación y mantenimiento de sistema (que tan eficientemente es operado y mantenido).

De acuerdo con la USEPA, las eficiencias de captura típicas varían entre 60% a 85%, con un promedio de 75%. Mientras los rellenos sanitarios en México pueden alcanzar eficiencias de captura máximas de más de 90% bajo las mejores condiciones, sitios sin manejo nunca podrían alcanzar eficiencias de captura de 50% aun con un muy buen sistema de captura instalado (MMB, 2009).

En este trabajo de investigación se propusieron tres escenarios con base en la eficiencia de captura de biogás (50%, 60% y 70%). Los resultados se encuentran representados de forma gráfica a continuación:

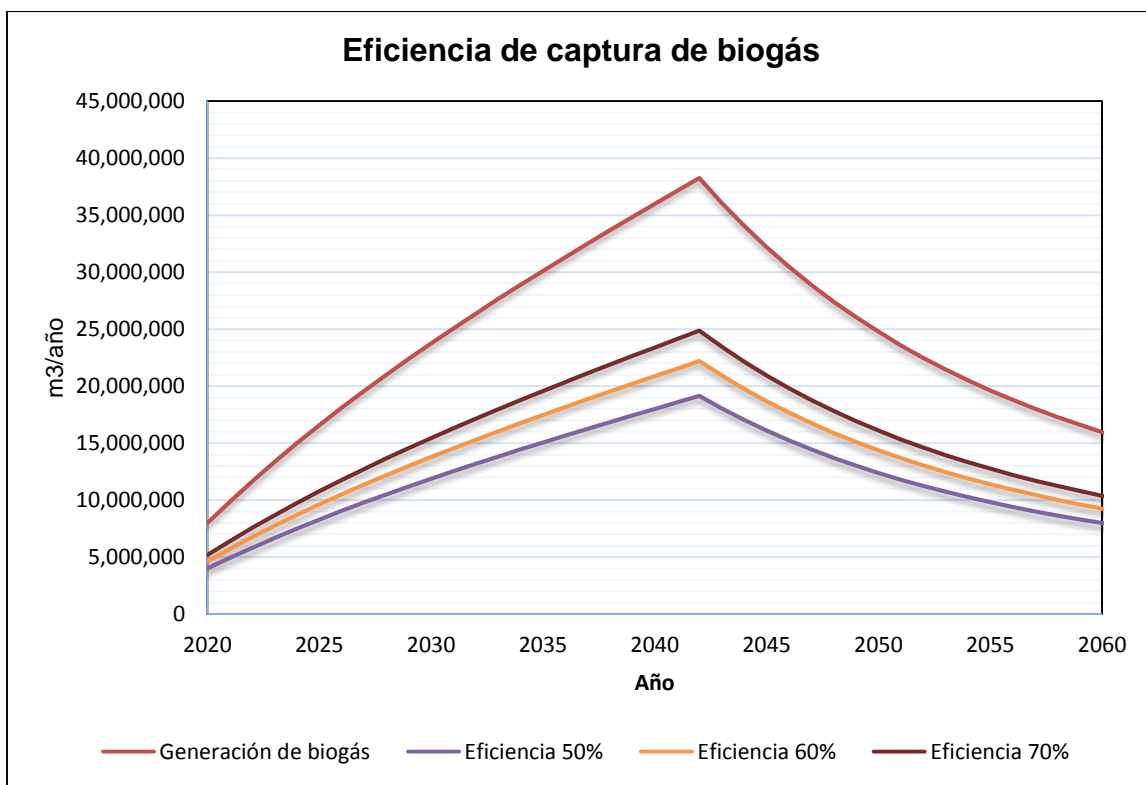


Figura 4.2. Modelado de la generación y captura de biogás en el sitio de estudio, para una eficiencia de captura de biogás del 50, 60 y 70%.

Considerando los tres escenarios, en el año de mayor generación de biogás (2042) se podrían lograr capturar las cantidades siguientes: 19, 135,946 m³/año (50%), 22, 963,135 m³/año (60%) y 26,790, 325 m³/año (70%). Cabe mencionar que la cantidad capturada de biogás nada se encuentra relacionada con un mayor potencial energético en situaciones reales, ya que este se encontrará directamente relacionado con la calidad del biogás que se está generando, concentración de CH₄, así como presencia mínima de elementos traza, ya que estos últimos podrían encarecer la fase del tratamiento del biogás al emplear un sistema de aprovechamiento con fines energéticos.

4.2. MODELADO DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN EL TIRADERO A CIELO ABIERTO DE MATEHUALA.

Los datos de entrada para efectuar el modelado de la generación de biogás en el tiradero a cielo abierto de Matehuala, fueron más limitados, debido a que las autoridades autorizadas para proporcionar esta información fueron un tanto herméticos, y en algunos casos reflejaban desconocer del tema, sobre todo en la parte crucial de estos sitios que es la operación. Esta situación es lamentable, porque sin duda alguna hay muchas réplicas de esta situación en el resto del estado y del país.

Tabla 4.5. Datos correspondientes a la sección de entrada.

Nombre del sitio	Tiradero a cielo abierto
Ciudad	Matehuala
Estado	San Luis Potosí
Región	5 (Noroste-Interior Norte)
Año de apertura del sitio	2012
Disposición anual del año más reciente	24,455Mg
Año de clausura proyectado	2026
Incremento anual estimado de disposición	1.5%
Profundidad promedio del relleno sanitario	5 m
Porcentaje de área con residuos con cubierta diaria	80%
Porcentaje del área con residuos sin cubierta diaria	20%

Los resultados más representativos correspondientes a la generación de biogás en el periodo 2012-2029 son los siguientes:

Tabla 4.6. Modelado de la generación de biogás en Matehuala

Año	RSU acumulados	Biogás (m ³ /año)	Año	RSU acumulados	Biogás (m ³ /año)
2012	22,335	0	2021	239,271	1,270,435
2013	45,010	169,929	2022	265,271	1,384,813
2014	68,030	330,993	2023	291,671	1,495,633
2015	91,401	484,012	2024	318,471	1,603,203
2016	115,128	629,734	2025	345,671	1,707,802
2017	139,216	768,838	2026	373,271	1,809,685
2018	163,671	901,944	2027	401,271	1,909,083
2019	188,471	1,029,616	2028	429,671	2,006,208
2020	213,671	1,152,160	2029	429,671	2,101,252

A continuación, se muestran los resultados más representativos con base en la tabla 4.6:

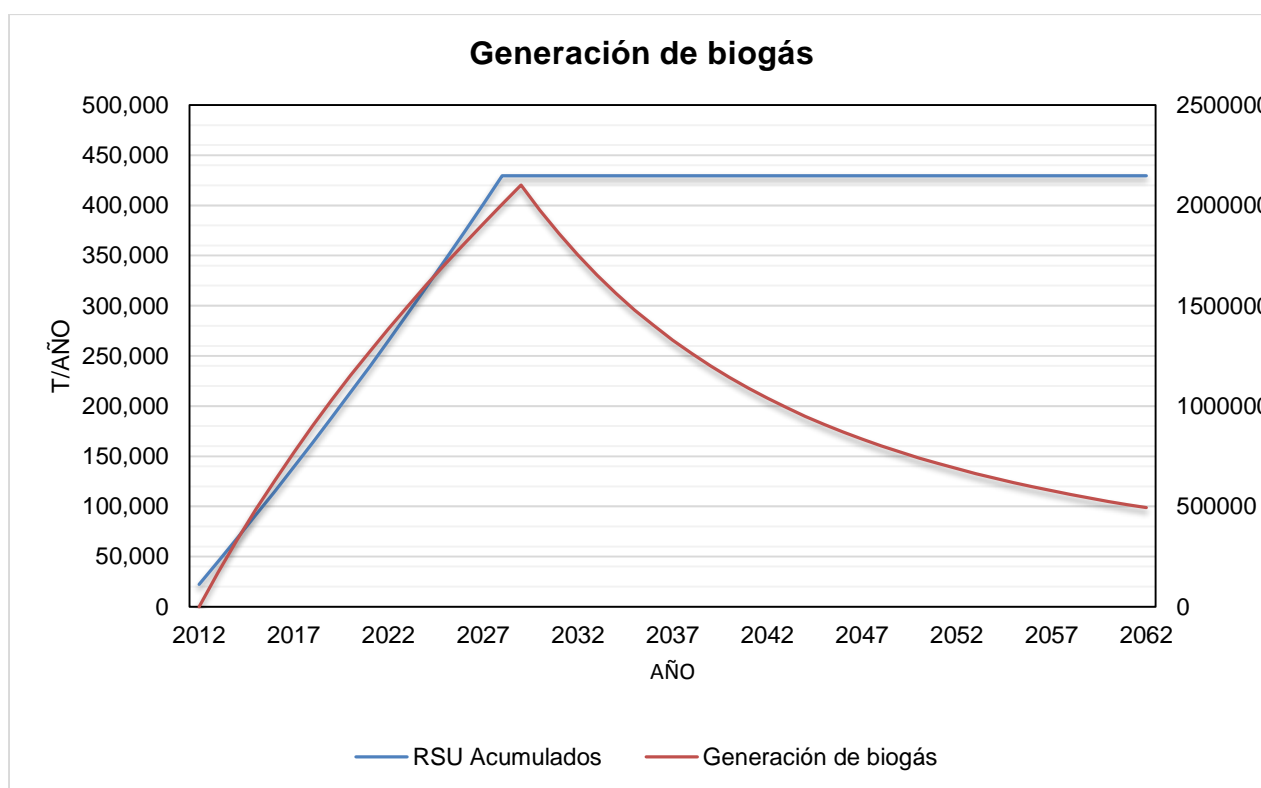


Figura 4.3. Generación de biogás con base a los Residuos Sólidos Urbanos acumulados.

De acuerdo a los resultados representados en la figura 4.4 la mayor generación de biogás será de 2,1001, 252 m³/año y, ocurrirá en el año 2029, es decir tres años después a la fecha en la que se pronostica la clausura del tiradero controlado a cielo abierto. El primer punto a resaltar en este caso, es que en teoría la mayor generación de biogás tendría que presentarse en el año de clausura o en el siguiente, en este sitio de acuerdo a la estimación ocurrirá tres años después, esto podría estar relacionado con las condiciones de diseño y operación, que se

consideran en el MMB, ya que el tiradero a cielo abierto cuenta con una profundidad de 5 m., lo que prolifera una mayor infiltración de aire, entorpecimiento del proceso de descomposición de la fracción orgánica y, por ende influye en la generación de biogás que ocurre bajo condiciones anaeróbicas. Otro punto que también podría influir, es contar con una mayor carga de residuos de degradación moderadamente lenta que requerirán de mayor tiempo para completar el proceso de descomposición.

4.2.1. Escenarios con base en la eficiencia de captura de biogás en el tiradero controlado a cielo abierto en Matehuala

En este caso de investigación se propusieron dos escenarios de 40% y 45% de eficiencia de captura de biogás, considerando que se desconoce la forma de operación en el tiradero a cielo abierto y, resaltando que con base en la literatura en este tipo de sitios nunca se podrán alcanzar porcentajes superiores al 50% de eficiencia de captura. Los resultados se encuentran representados en la figura 4.5.

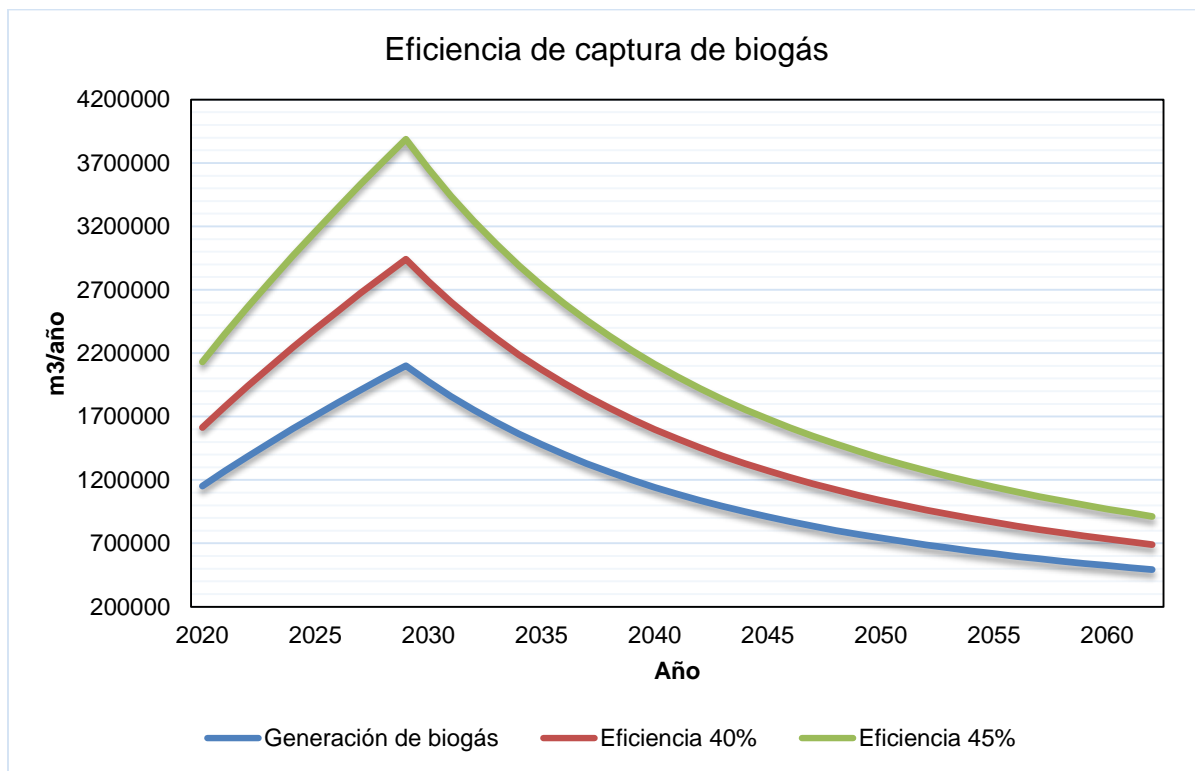


Figura 4.4. . Modelado de la generación y captura de biogás en el sitio de estudio, para una eficiencia de captura de biogás del 40% y 45%.

Considerando los dos escenarios de eficiencia de captura, en el año de mayor generación de biogás (2029) se podrían llegar a capturar las siguientes cantidades: 840,500 m³/año (40%) y 945,563 m³/año (45%). En este caso de estudio, considero que lo primero que se tendría que hacer, es regular la parte operativa del proceso y efectuar un análisis detallado de la infraestructura actual, ya que desde la planeación del proyecto se omitieron aspectos importantes, que hubiesen podido asegurar la solidez del proyecto.

4.3. MODELADO DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN EL TIRADERO A CIELO ABIERTO CONTROLADO EN TANCANHUITZ

Los datos de entrada para efectuar el modelado de la generación de biogás en el tiradero a cielo abierto de Tancanhuitz, al igual que en el caso de Matehuala fueron limitados, sin embargo se procedió a efectuar el modelado de la generación de biogás, y al menos tener idea o contar con las bases de la situación real.

Tabla 4.7. Datos correspondientes a la sección de entrada.

Nombre del sitio	Tiradero a cielo abierto intermunicipal
Ciudad	Tancanhuitz
Estado	San Luis Potosí
Región	5 (Noroeste-Interior Norte)
Año de apertura del sitio	2004
Disposición anual del año más reciente	40,880Mg
Año de clausura proyectado	2024
Incremento anual estimado de disposición	1.5%
Profundidad promedio del relleno sanitario	8 m
Porcentaje de área con residuos con cubierta diaria	60%
Porcentaje del área con residuos sin cubierta diaria	40%

Los resultados más representativos correspondientes a la generación de biogás en el periodo 2004-2025 son los siguientes:

Tabla 4.8 Modelado de la generación de biogás en Tancanhuitz.

Año	RSU acumulados	Biogás (m ³ /h)	Año	RSU acumulados	Biogás (m ³ /h)
2004	33,084	0	2015	432,007	2,215,388
2005	66,672	251,710	2016	471,670	2,374,445
2006	100,771	490,289	2017	511,937	2,529,139
2007	135,390	716,951	2018	552,817	2,679,913
2008	170,536	932,804	2019	594,317	2,827,174
2009	206,217	1,138,854	2020	636,417	2,971,274
2010	242,441	1,336,019	2021	679,117	3,112,332
2011	279,217	1,525,135	2022	722,417	3,250,604
2012	316,553	1,706,964	2023	766,317	3,386,323
2013	354,458	1,882,202	2024	810,917	3,519,703
2014	392,939	2,051,483	2025	810,917	3,651,699

A continuación se muestran los resultados más representativos con base en la tabla 4.8:

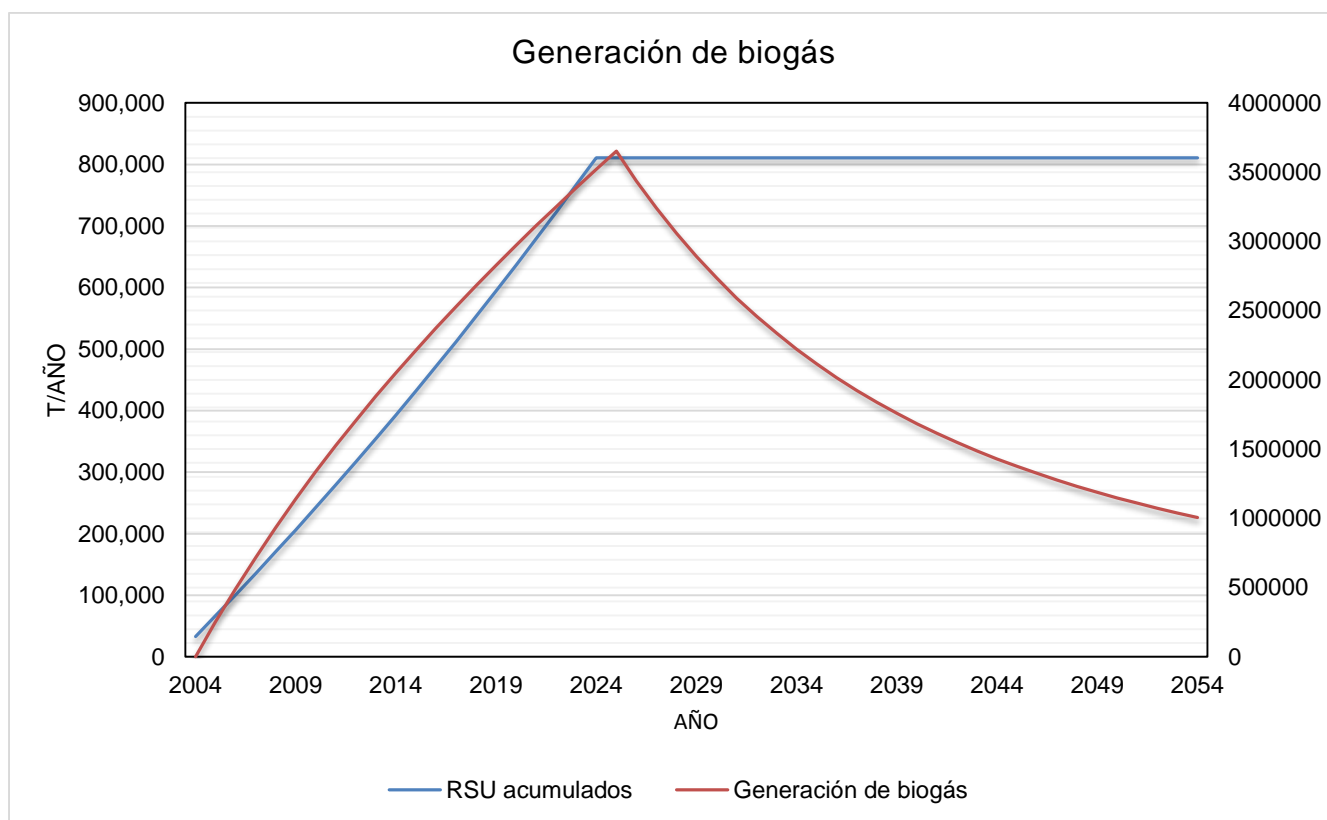


Figura 4.5. Modelado de la generación y captura de biogás en el sitio de estudio, para una eficiencia de captura de biogás del 40% y 45%.

De acuerdo a los resultados representados en la figura 4.5 la mayor generación de biogás ocurrirá en el año 2025, es decir un año después a la fecha en la que se pronostica la clausura del tiradero controlado a cielo abierto. En este caso, se cumple con la parte teórica de alcanzar

la mayor generación de biogás un año después a la clausura a diferencia de Matehuala, agregando que en este caso de estudio se percibe una mejor planeación del proyecto, de inicio se estipuló un tiempo de vida útil de 20 años, contraponiéndose con los 14 años que se consideraron para el tiradero controlado a cielo abierto de Matehuala. Otro aspecto importante, fue la profundidad (8 m), aunque de acuerdo a la teoría del MMB se sugieren como mínimo 10 m, este aspecto contrasta con los 5 m de profundidad del tiradero controlado a cielo abierto de Matehuala, ya que esto se encontrará directamente relacionado con la infiltración del aire.

4.3.1. Escenarios con base en la eficiencia de captura de biogás en el tiradero a cielo abierto controlado en Tancanhuitz

En este caso de investigación se propusieron dos escenarios de 40% y 45% de eficiencia de captura de biogás, considerando que se desconocen la forma de operación en el tiradero a cielo abierto, aunque con base en la literatura este tipo de sitios nunca podrán alcanzar porcentajes superiores al 50%. Los resultados se encuentran representados en la siguiente figura:

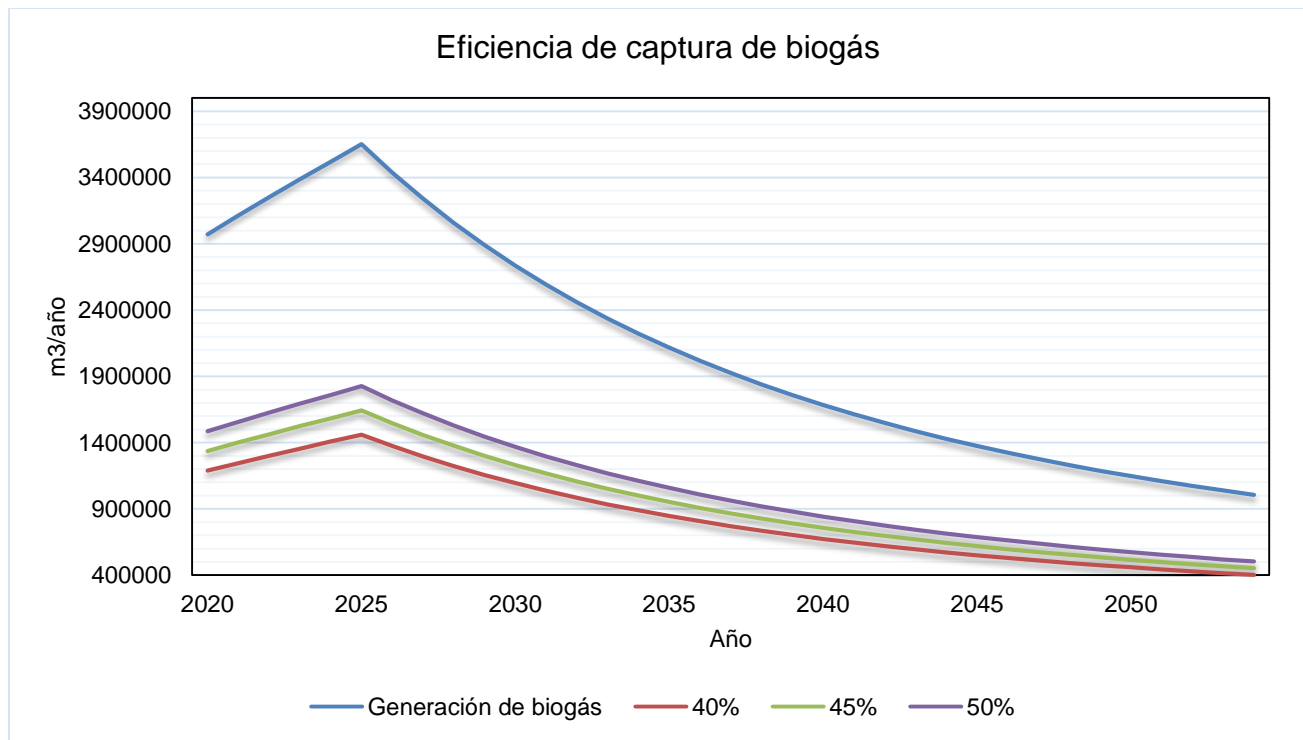


Figura 4.6. Modelado de la generación y captura de biogás en el sitio de estudio, para una eficiencia de captura de biogás del 40% y 45%.

Considerando los dos escenarios de eficiencia de captura, en el año de mayor generación de biogás (2025) se podrían llegar a capturar las siguientes cantidades: 1, 460,679 m³/año (40%) y 1, 643,264 m³/año (45%). En esta situación, considero que lo primero que se tendría que hacer es regular la parte operativa del proceso, ya que será la parte que favorecerá o no, el proceso de descomposición de la fracción orgánica presente en los residuos y, por ende la cantidad y parcialmente la calidad del biogás generado.

4.4. COMPARACIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO CON OTRAS INVESTIGACIONES

En esta sección se presenta una comparación de los resultados más representativos con los obtenidos en otras investigaciones.

Tabla 4.9. Comparación de los sitios de estudio con otras investigaciones.

Año	Sitio de estudio	RSU almacenados (t/año)	MMB (m ³ /hora)	Referencia
2	San Luis Potosí, S.L.P.	542,682	227	<u>López Díaz, 2019</u>
5		1,157,494	682	
7		1,798,794	1,125	
5	Matehuala, S.L.P.	139,216	88	
7		188,471	118	
17		429,671	240	
5	Tancanhuitz, S.L.P.	206,217	130	
7		279,217	174	
14		552,817	306	
18		722,417	371	
7	San Luis Potosí, S.L.P.	562,000	426	López Villalpando, 2013
5	Mexicali, Baja California.	700,00	572	Aguilar Virgen, et al., 2014

1. **San Luis Potosí, S.L.P.** Al comparar el año cinco con los resultados obtenidos por Aguilar Virgen, se identifica que los RSU almacenados en el relleno sanitario de San Juanico el grande son duplicados aunque en la generación de biogás es mayor en un factor de 1.19, por otro lado al comparar con el año siete correspondiente a la investigación de López Villalpando hay un factor mayor a 3.2 con relación a los RSU acumulados y en lo concerniente a la generación de biogás hay un factor de 2.6. Estas

diferencias podrían estar relacionadas a cuestiones de construcción, operación, cobertura y compactación diaria.

2. **Matehuala, S.L.P.** En este caso, los resultados obtenidos se asemejan de forma proporcional al comparar con el trabajo de López Villalpando, en donde existe un factor de 1.3 y 1.7, para los RSU acumulados y el biogás generados, respectivamente. En el tiradero de cielo abierto localizado en el municipio de Matehuala, influye aún más la óptima forma de operación al tratarse de un sitio que se controla de forma parcial y que cumple de la misma forma con la legislación correspondiente en la materia.

5. VALORIZACIÓN DEL BIOGÁS GENERADO EN EL RELLENO SANITARIO DE SAN JUANICO EL GRANDE, S.L.P.

En este capítulo se presentan las generalidades del mercado de bonos de carbono con proyectos de generación de biogás , así como los resultados del cálculo del potencial energético y de generación de energía eléctrica en el relleno sanitario de San Juanico el grande, respecto a los municipios de Matehuala y Tancanhuitz se decidió omitirlos debido a que estos no reflejan viabilidad, dado que por las condiciones de construcción y método de operación resultaría más complejo implementar un proyecto para aprovechamiento de biogás con fines energéticos, ya que se tendría que efectuar inversión adicional porque los sitios no cumplen con las características para ser considerados rellenos sanitarios, .

5.1. BONOS DE CARBONO EN PROYECTOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS EN RELLENOS SANITARIOS

El tema del aprovechamiento de Biogás en rellenos sanitarios con fines energéticos en México, actualmente no es viable a través del mecanismo de desarrollo limpio (MDL). Esto se debe principalmente a la caída del precio de los bonos de carbono a partir del año 2012 (menos de 20 USD por tonelada de CO₂ evitada), por otro lado es importante mencionar que no se han registrado nuevos proyectos de MDL desde 2013, los cuales resultaban viables porque eran financiados por este mecanismo (Hamrick & Gallant, 2018). Aunque hay opciones para adquirir un crédito, la inversión es alta, por tanto lo más viable es efectuar sinergia entre empresas del sector privado. Como último punto, hay que destacar que en el año 2018 se publicó un documento por parte del Instituto de Ecología y Cambio Climático denominado “Costos de las contribuciones nacionalmente determinadas en México”, donde se plantea una meta de cero emisiones de metano en Rellenos Sanitarios para 2030, y se estipula que el financiamiento será directamente por presupuesto de los municipios (INECC, 2018).

Realmente no hay bases sólidas en este momento para implementar proyectos de este tipo, empleando herramientas como el MDL, ya que ni en las oficinas correspondientes del país

saben dar una respuesta acertada e incluso en ocasiones desconocen del tema y envían a otras áreas. Otro punto desfavorable en el periodo de gestión (segundo semestre del año 2018 y parte del primer semestre del año 2019) fue el tema de cambio de gabinete en el país, ya que todo resultaba incierto por posibles cambios y modificaciones en todas las instancias gubernamentales del país. Por tal motivo, en este trabajo de investigación opté por efectuar el dimensionamiento eléctrico, considerando que la inversión será por el sector privado.

5.1.1. Máxima capacidad de planta

Considerando los tres escenarios de eficiencia de captura de biogás para el sitio de disposición final de San Juanico el Grande, se pronostican el mismo número de casos para el tema de la máxima capacidad de planta que podría ser instalada.

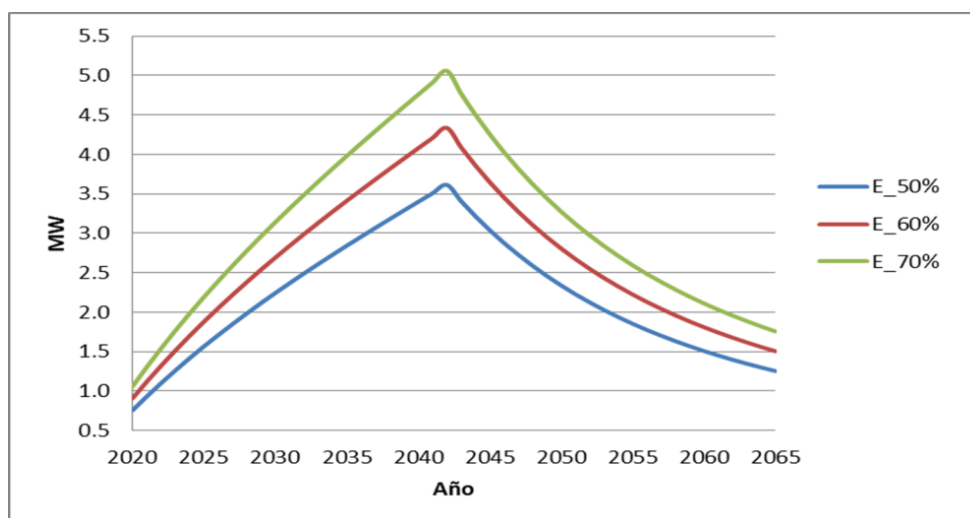


Figura 5.1. Proyección de la máxima capacidad de planta instalada en cada uno de los escenarios de eficiencia de captura de biogás (50% ,60 %y 70%).

Con base en el porcentaje de eficiencia de captura de biogás (Figura 5.1), los resultados obtenidos del potencial energético pronostican las siguientes situaciones:

1. Para una eficiencia de captura del 50%. Se estima que a partir de 2022 sería factible operar una planta con una capacidad de 1 MW; en el 2028 se podría aumentar a 2 MW, y para el 2036, a 3 MW. A partir de 2040 la generación empezaría decrecer.

2. Para una eficiencia de captura del 60%. Se estima que a partir de 2021 sería factible operar una planta con una capacidad de 1 MW; para el 2026 sería posible aumentarla a 2 MW, y para el 2032 se podrían alcanzar los 3 MW. A partir de 2044 la generación empezaría decrecer.
3. Para una eficiencia de captura del 70%. Se estima que a partir de 2020 sería factible operar una planta con una capacidad de 1 MW, en el 2024 se podría aumentar a 2 MW; en 2029, a 3 MW; en 2035, a 4 MW; y finalmente en 2042 se podrían alcanzar los 5 MW. A partir de 2045 la generación de energía eléctrica empezaría a decrecer.

Los resultados obtenidos se compararon con las capacidades autorizadas correspondientes a proyectos que se encuentran operando en algunos estados de México, considerando como base la recepción diaria de RSU

Tabla 5.1. Comparación con otros proyectos vigentes en México.

Nombre del relleno sanitario	Municipio y estado	Recepción diaria de RSU (t)	Capacidad autorizada (MW)
San Nicolás	Aguascalientes, Ags.	914	3.20
La Perseverancia	Cuautla, Morelos	800	1.065
San Juanico el Grande	San Luis Potosí, S.L.P.	800	50% 0.6-3.6 60% 0.8-4.3 70% 1.0-5.1
Querétaro	Mompaní, Querétaro	750	2.746

En la tabla que se muestra con anterioridad se puede identificar que con cualquiera de los tres escenarios propuestos en el sitio de disposición final de San Juanico el Grande se podría asemejar a la capacidad autorizada en los rellenos sanitarios de San Nicolás, La perseverancia y en Querétaro, aunque el escenario del 50% de eficiencia de captura de biogás sería el más similar a una situación real, tomando como base el sitio de disposición final de San Nicolás en donde la recepción diaria de RSU es poco mayor a la de San Juanico y, la capacidad máxima autorizada es de 3.20 MW, es decir, por debajo del límite mayor pronosticado en el sitio de estudiado en esta investigación.

5.1.2. Dimensionamiento eléctrico

Los equipos más empleados en los proyectos de generación de energía eléctrica a partir de biogás generado en rellenos sanitarios, son los motores de combustión interna, seguido de las turbinas y microturbinas. Otras tecnologías como motores de Ciclo Rankine y celdas de combustible, aún se encuentran en la etapa de desarrollo (Goldstein, 2007). A continuación se presentan las principales características de las tecnologías empleadas en este tema:

Tabla 5.2. Tipos de tecnologías empleadas para la generación de energía eléctrica.

Equipo	Descripción	Ventajas	Desventajas
Motor de Combustión Interna	Motor en el que la energía mecánica se obtiene mediante la transformación de energía térmica derivada de una combustión.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bajo costo de inversión. 2. Se pueden añadir o quitar motores. 3. Aplicaciones de cogeneración. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mayor costo de mantenimiento. 2. Mayor generación de emisiones a la atmósfera.
Turbinas	Tecnología establecida para la generación de electricidad, además producen gases de escape a altas temperaturas, que pueden ser susceptibles para la generación de vapor o electricidad adicional.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mayor resistencia a la corrosión. 2. Menor generación de óxido de nitrógeno. 3. Menor costo de operación y mantenimiento. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Recomendable para proyectos de gran escala (mínimo de 3 MW). 2. Menores porcentajes de eficiencia,

Fuente: Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017; Blanco, Santalla, Córdoba, & Levy, 2017 ; IEE, 2012.

En la sección del dimensionamiento eléctrico se consideraron algunos aspectos como: Poder Calorífico Inferior (PCI) del biogás de 16.9 MJ/m^3 y eficiencia de captura de biogás de 50%. Por otro lado, se eligió un motor de combustión interna Jenbacher-J320 que funciona con biogás y tiene las características siguientes:

1. Potencia eléctrica: 1062 kW.
2. Eficiencia eléctrica: 39.4%.
3. Frecuencia 60 Hz.
4. 1800 RPM.
5. Consumo de biogás de $575 \text{ m}^3/\text{h}$.

Para más detalles, la ficha técnica del equipo se encuentra en la sección de anexos.

La siguiente tabla contiene los resultados más representativos del cálculo del dimensionamiento eléctrico:

Tabla 5.2. Dimensionamiento eléctrico.

Año	RSU acumulados	Biogás m ³ /h	Captura de biogás (m ³ /h)	Potencia total disponible (kW)	Potencia eléctrica (kWe)
2016	263,207	31	15	71.9	28
2017	542,682	227	113	532	207
2018	847,794	454	227	1,066	416
2019	1,157,494	689	344	1,617	630
2020	1,471,794	912	456	2,141	835
2021	1,790,794	1,125	563	3,119	1,030
2022	2,114,594	1,329	664	3,577	1,216
2023	2,443,294	1,524	762	4,017	1,395
2024	2,776,894	1,711	856	4,440	1,566
2025	3,115,494	1,892	946	4,849	1,732
2026	3,459,194	2,066	1,033	5,245	1,891
2027	3,808,094	2,235	1,117	5,629	2,046
2028	4,162,194	2,398	1,199	6,002	2,195
2029	4,521,594	2,557	1,279	6,365	2,341
2030	4,886,394	2,712	1,356	6,719	2,482
2031	5,256,694	2,863	1,431	7,066	2,620
2032	5,632,594	3,010	1,505	7,405	2,756
2033	6,014,094	3,155	1,578	7,739	2,888
2034	6,401,294	3,297	1,649	8,066	3,018
2035	6,794,294	3,437	1,718	8,389	3,146
2036	7,193,194	3,574	1,787	8,708	3,272
2037	7,598,094	3,710	1,855	9,023	3,396
2038	8,009,094	3,844	1,922	9,334	3,519
2039	8,426,294	3,977	1,988	9,643	3,640
2040	8,849,794	4,108	2,054	9,950	3,761
2041	9,279,694	4,239	2,120	10,225	3,880
2042	9,279,694	4,369	2,185	9,669	3,999
2043	9,279,694	4,119	2,060	9,128	3,771

Considerando la potencia eléctrica del MCI Jenbacher-J320 de 1,062 kW, se podría empezar a operar con un equipo en el año 2022, coincidiendo con la disponibilidad de biogás que este requiere para poder operar de 664 m³/h, posteriormente en 2028 se podría adicionar otro módulo de 1 MW y como máximo uno más en el año de 2036 para sumar una capacidad instalada de 3.186 MWh, debido a que a partir de 2043 la generación de biogás empezará a decrecer y por ende el potencial eléctrico.

5.2. EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EVITADAS AL GENERAR ENERGÍA ELÉCTRICA POR FUENTES ALTERNATIVAS

En esta sección se efectuó un estimado de las emisiones de CO_{2eq} que se podrían evitar por cada MWh producido de energía eléctrica. Para ello se tomó como base el Factor de emisión del sector eléctrico nacional estipulado por Comisión Federal de Electricidad de 0.527 toneladas de CO_{2eq}/MWh (CRE, 2019).

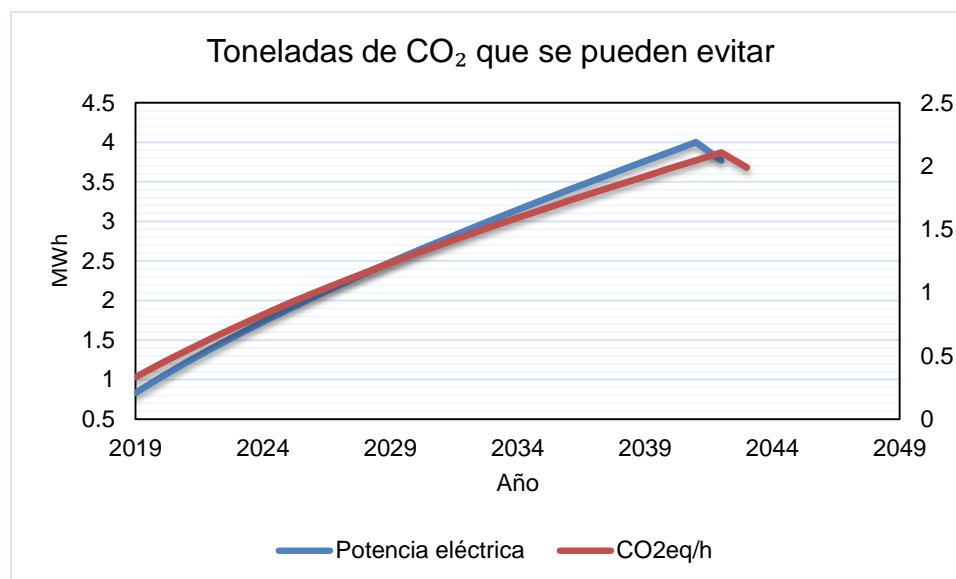


Figura 5.2. Toneladas de CO_{2eq} evitado por kWh generado.

La figura 5.2 muestra una gráfica del potencial eléctrico en kWh respecto a las toneladas de CO_{2eq} evitadas por generar energía eléctrica por medio de fuentes alternativas. El año en que se estima una mayor generación de energía eléctrica y de toneladas evitadas será en 2042, el potencial eléctrico máximo pronosticado será de 3.999 MWh, mismo que será responsable de no emitir 2.11 toneladas de CO_{2eq}/hora durante ese año. La cantidad no emitida sería el

equivalente a la cantidad de CO₂ generada por una Ford Explorer modelo 2019 al recorrer 7,352 km, es decir la distancia aproximada entre San José, Costa Rica y Ottawa.

5.3. INVERSIÓN INICIAL DE UNA PLANTA GENERADORA DE ENERGÍA A PARTIR DE BIOGÁS

En México hay proyectos activos en el tema de aprovechamiento de biogás en sitios de disposición final y, a continuación se presenta un concentrado de información correspondiente a la inversión económica con base en la capacidad de planta instalada.

5.3. Inversión económica en proyectos vigentes en México.

Lugar	Capacidad de planta instalada (MW)	Inversión
Salinas Victoria, Nuevo León	7.42	10.9 millones de USD.
Ciudad Juárez, Chihuahua	6.4	206 millones de MXN.
San Nicolás, Aguascalientes.	3.20	7 millones de USD.
Durango, Durango.	1.6	5.5 millones de USD.
Puerto de Chivos, Edo. De México.	0.6	2.5 millones de USD.
Saltillo, Coahuila.	2.12	38 millones de MXN.
La Perseverancia, Morelos.	1.065	180 MXN por tonelada RSU.

Fuente: SENER, 2012

Considerando la información que se presentó en la tabla 5.3, la inversión para un proyecto de generación de electricidad a partir de biogás en un relleno sanitario es variable, estableciendo como base la capacidad instalada y los montos, el promedio de inversión es de 2.8 millones de USD por cada MW instalado. Aunque es muy interesante, la decisión que se optó en el Relleno San Sanitario de La Perseverancia, Morelos, en donde estableció una cuota fija (más alta que las convencionales), por cada tonelada de RSU confinada, debido a que la ejecución del proyecto no depende directamente de financiamientos, venta de bonos de carbono, etc.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES:

1. El **manejo integral** de los RSU en México y San Luis Potosí es **deficiente** a pesar del marco normativo existente.
2. La etapa del manejo integral de los RSU que presenta más problemas ambientales es la de disposición final.
3. Entre los **impactos ambientales principales**, derivados del manejo inadecuado de los RSU están: la **contaminación de los suelos, del agua superficial y subterránea, del paisaje, y del aire (biogás = emisión de GEI)**.
4. En el país, únicamente el **50% de los RSU** generados se confinan en rellenos sanitarios y el resto en tiraderos a cielo abierto o “controlados”.
5. **El uso de modelos** para calcular la generación de biogás en los rellenos sanitarios **es una herramienta muy útil** para cuantificar la magnitud del problema ambiental, y a partir de esto definir acciones de minimización, control y/o valorización de las emisiones.
6. **El Modelo Mexicano de Biogás** está técnicamente probado en algunos sitios del país y se seleccionó para calcular la generación aproximada de biogás, en tres sitios de disposición final del estado de San Luis Potosí.
7. Los cálculos realizados a través del modelado de la generación de biogás pronosticaron:
 - a. Para el relleno sanitario de San Juanico el Grande, S.L.P., una **generación de 27,637,362 m³/año (2019)**, y una **máxima de 38,271,892 m³/año (2042)**.
 - b. Para el tiradero a cielo abierto de Matehuala: **2,101,252 m³/año (2029)**
 - c. Para el tiradero a cielo abierto de Tancanhuitz: **3,651,699 m³/año (2025)**.
8. El aprovechamiento del biogás con fines energéticos, se **descartó** la posibilidad de efectuarlo por medio de financiamiento de un **MDL**, debido a que desde hace seis años no se ha promovido por parte de las instancias correspondientes estos proyectos. Además, los bonos de carbono que funcionaban como complemento a esto, han sufrido una **disminución en el costo de compra** de 2012 a la fecha.
9. Considerando los escenarios de eficiencia de captura de biogás (del 50%, 60% y 70%), **el modelado del aprovechamiento del biogás**, en el relleno sanitario de San Juanico el Grande, indica valores de 3.6 MW, 4.3 MW y 5.1 MW, respectivamente. Esta energía

podría abastecer el **2.5%, 3% y 3.5%** de la demanda eléctrica total requerida en el municipio estudiado.

10. **La generación de energía eléctrica a partir del biogás en Matehuala y Tancanhuitz no es costeable.**

RECOMENDACIONES:

Una vez concluido el trabajo de investigación se presentan las recomendaciones siguientes:

1. **Continuar operando de manera adecuada el relleno sanitario** de San Juanico el Grande y buscar la posibilidad de aprovechar el biogás con fines energéticos
2. **Desarrollar un proyecto** en conjunto con una empresa del sector eléctrico, experta en temas de energía, para validar la posibilidad de instalar una planta (MCI) de 1 MW en el 2022, a la que posteriormente se le agreguen otros dos módulos hasta lograr los 3 MW, en el 2036.
3. Estudiar la **generación de biogás en un digestor** a escala, a partir de muestras reales de residuos sólidos urbanos, a fin de mejorar parámetros del Modelo Mexicano de Biogás, que conduzcan a mejores resultados. Validar los resultados de laboratorio con mediciones periódicas y frecuentes de la emisión de biogás en las chimeneas o respiraderos del relleno sanitario.
4. **Dar seguimiento a las condicionantes señaladas en los Resolutivos de la Evaluación de Impacto Ambiental**, así como a otras autorizaciones (estatales y municipales) establecidas para la operación de rellenos sanitarios, en el tema de la **captura, control y/o aprovechamiento de emisiones de biogás** en los sitios de disposición final del estado de San Luis Potosí y, en general, del país.
5. Desarrollar un **programa para la clausura y remediación** de los sitios de disposición final (estatales y del país), que no cumplan con los requisitos señalados en la NOM-083-SEMARNAT-2003. Sustituir éstos por rellenos sanitarios construidos y operados correctamente.
6. **Incluir en la NOM-SEMARNAT-083-2003**, una sección que obligue a **medir y regular el biogás** generado en los sitios de disposición final; así como acciones de: minimización, control y compensación.

7. Que los ayuntamientos **destinen una fracción del impuesto predial** para financiar el manejo integral de los RSU en los municipios del país.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbasi, T., Tauseef, S., & Abbasi, S. (2012). *Biogas Energy* (1° ed.). Nueva York: Springer.
- Aguilar Virgen, Q., Taboada González, P., Ojeda Benítez, S., & Cruz Sotelo, S. (2014). Powergenerationwithbiogasfrommunicipalsolidwaste:Prediction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(30), 412-419.
- Álvarez Zapata, H. D. (2013). *Balances de materia y energía* (Primera ed.). Medellín, Colombia: Art Box.
- Amini, H., Reinhart, D., & Mackie, K. (2012). Determination of first-order landfill gas modeling parameters and uncertainties. *Waste Management*(32), 305-216.
- Baskar, C., Baskar, S., & Dhillon, R. (2012). *Biomass conversion*. India: Springer.
- Blanco, G., Santalla, E., Córdoba, V., & Levy, A. (2017). *Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico-práctico*. Washington: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Boom, A., & Oonk, J. (1995). *Landfill gas formation, recovery and emissions* (Primera ed.). Apeldoorn, Netherlands: National Institute of Public Health and the Environment.
- Bozinis, N., Alexiou, I., & Pistikopoulos, E. (1996). A mathematical model for the optimal design and operation of an anaerobic co-digestion plant. *Water Science*, 34(5), 383-392.
- Burh, H., & Andrews, J. (1977). The thermophilic anaerobic digestion process. *Water Research*, 11(2), 129-143.
- Castells, X. (2012). *Valorización de residuos procedentes de grandes industrias: Reciclaje de residuos industriales*. Madrid: Díaz de Santos.
- CDM. (2012). *Querétaro landfill-gas-to-energy-project*. Querétaro: CMNUCC.
- Colomer Mendoza, F., García Darás, F., Robles Martínez, F., & Aranda, G. (2012). Análisis comparativo entre los modelos de generación de biogás aplicados a las emisiones de un relleno sanitario en México. *VSIIR-REDISA:Hacia un sistema integral de los residuos sólidos*, 3-5.

- CRE. (2019). *Factor de emisión del sistema eléctrico nacional*. Ciudad de México.
- Europea, C. (2000). *La UE apuesta por la gestión de residuos*. Luxemburgo: Dirección General de Medio Ambiente.
- Fernández, J. L., Huacuz Villamar, J., & Saldaña Méndez, J. (2006). Evaluación del potencial energético de los rellenos sanitarios. *AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*, 40-42.
- Ferran García, D., Colomer Mendoza, F., Robles Martínez, F., & Aranda, G. (2013). Análisis comparativo entre los modelos de generación de biogás aplicados a las emisiones de un relleno sanitario en México. *REDISA*(1), 2-6.
- Findikakis, A., Papelis, C., Halvadakis, C., & Leckie, J. (1988). Modelling gas production in managed sanitary landfills. *Waste Management & Research*, 6(2), 115-123.
- Gábor, K., & Encarnación, G. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Instituto Nacional de Ecología*, 40-42.
- GIZ. (2018). *Proyectos de Aprovechamiento Energético a partir de Residuos Urbanos de México*. Ciudad de México.
- Goldstein, R. (2007). Update: The State of US Landfill Gas Utilization Projects. *Cogeneration and Distributed Generation Journal*, 27-29.
- Guido, A., Rossin, A., Teixeira, P., & Zepeda, F. (1995). *El manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y el Caribe*. Washington: Banco Interamericano de Desarrollo y la Organización Panamericana.
- Hamrick, K., & Gallant, M. (2018). *Voluntary Carbon Markets Outlooks and Trends*. Nueva York: Forest trends.
- Hill, D., & Barth, C. (1977). A dynamic model for simulation of animal waste digestion. *Water Pollution Control Federation*, 49(10), 2129-2133.
- IEE. (2012). *Generación de electricidad mediante residuos sólidos urbanos*. Ciudad de México: Comisión Federal de Electricidad.

INECC. (2012). *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos*. Ciudad de México.

INECC. (2015). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Gases de Efecto Invernadero*. Ciudad de México: SEMARNAT.

INECC. (2018). *Costos de las contribuciones Nacionalmente Determinadas de México. Medidas Sectoriales No Condicionadas*. Ciudad de México: SEMARNAT.

INEGI. (2009). *Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos-San Luis Potosí, S.L.P.* Ciudad de México.

INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos-Tlaxcala, San Luis Potosí*. Ciudad de México.

INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Matehuala, San Luis Potosí*. Ciudad de México.

International Solid Waste Association. (2015). *Global Waste Management Outlook*. Viena, Austria: UNEP.

IPCC. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.

IPCC. (2006). *Directrices IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. Hayama, Japón: Institute for Global Environmental Strategies.

Jaramillo, J. (2002). *Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios*. Antioquia, Colombia: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

Johannessen, L. M. (1999). *Guidance Note on Recuperation of Landfills Gas from Municipal Solid Waste Landfills*. Washington, USA.: World Bank, Urban Development Division, Urban Waste Management Thematic Group.

Kanniappan, P., & Ramachandran, T. (2000). Goal programming model for sustainable electricity production. *Energy Research*, 24(1), 1-18.

- Karanjekar, R. (2012). *An improved model for predicting methane emissions from landfills based on rainfall, ambient temperature and waste composition*. Texas: The University of Texas.
- Karanjekar, R., Bhatt, A., Altouqui, S., Jangikhatoonabad, N., Durai, V., Sattler, M., . . . Chen, V. (2015). Estimating methane emissions from landfills based on rainfall, ambient temperature, and waste composition: The CLEEN model. *Waste Management*, 389-398.
- Kiely, G., Tayfur, G., Dolan, C., & Tanji, K. (1997). Physical and mathematical modelling of organic wastes. *Chemical Engineering Science*, 31(3), 534-540.
- Lagos, D., Héroux, M., Gosselin, R., & Cabral, A. (2017). Optimization of a landfill gas collection shutdown based on an adapted. *Waste Management*(63), 238-245.
- LGPGIR. (2003). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. Ciudad de México: DOF.
- Matehuala, H. A. (2018). *Informe del sitio de disposición final de Matehuala*. Matehuala.
- Medellín Millán, P., Avalos Lozano, J. A., & Magaña Rueda, V. O. (2006). *Programa de Acción Ante el Cambio Climático*. San Luis Potosí: UASLP.
- Mutz, D., Hengevoss, D., Hugi, C., & Gross, T. (2017). *Opciones para el aprovechamiento energético de residuos en la gestión de residuos sólidos urbanos*. Alemania: GIZ.
- Palomino, M. S. (2019). *El mercado de la gestión de residuos en China*. Cantón: ICEX Exportación e Inversiones.
- Potosí, H. A. (2018). *Ubicación del sitio de disposición final de San Juanico el Grande*. San Luis Potosí.
- Querétaro, H. A. (2010). *Acuerdo relativo al aprovechamiento y explotación del biogás*. Querétaro.
- Rajaram, V., Zia Siddiqui, F., & Emran Khan, M. (2011). *From Landfill Gas to Energy – Technologies and* (1° ed.). Boca Raton, Florida: CRC Press.

- Reinhold, G., Merrath, S., Lennemann, F., & Markl, H. (1995). Modelling the hydrodynamics and the liquid-mixing behaviour of biogas tower reactor . *Chemical Engineering Science*, 51(17), 4065-4073.
- Roben, E. (2002). *Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales*. Lima: DED.
- Röben, E. (2002). *Diseño, construcción, operación y Cierre de Rellenos Sanitarios*. Loja, Ecuador: Deutscher Entwicklungsdienst.
- Romo Millares, C. A. (2014). Aprovechamiento de Residuos Sólidos Urbanos. *Tendencias Tecnológicas*, 75-76.
- Rondón Toro, E., Szantó Narea, M., Pacheco, F., Contreras, E., & Gálvez, A. (2016). *Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios*. Chile: Organización de las Naciones Unidas.
- Sáez, A., & Urnadeta, J. (2014). Manejo de Residuos Sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia*, 123.124.
- SEDESOL. (2009). *Manual técnico sobre generación, recolección y transferencia de residuos sólidos municipales*. Ciudad de México.
- SEDESOL. (2011). *Incineración*. Ciudad de México: SEGOB.
- SEGAM. (2017). *Informe estatal de sitios de disposición final*. San Luis Potosí.
- SEGAM. (2018). *Informe de sitios de disposición final en el estado de San Luis Potosí*. San Luis Potosí.
- SEMARNAT. (2012). *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos*. Ciudad de México.
- SIMEPRODE. (2006). *Sistema Integral para el Manejo Ecológico y Procesamiento de Desechos-Organismo Público Descentralizado del Gobierno de Nuevo León*. Monterrey, Nuevo León: Gobierno de Nuevo León.
- Stege, A., & Davila, J. L. (2009). *Manual del Usuario Modelo Mexicano de Biogás*. Phoenix, Arizona: SCS Engineers.

Townsend, T., Powell, J., Jain, P., Xu, Q., Tolaymat, T., & Reinhart, D. (2015). *Sustainable practices for Landfill Design and Operation*. Nueva York: Springer.

Urrego Martínez, E., & Rodríguez Miranda, J. P. (2015). Aplicación de las metodologías EPA , mexicano e IPCC para la estimación de biogás , caso de estudio relleno sanitario Doña Juana , Bogotá - Colombia. *Universidad y Salud*, 340-341.

Urrego Martínez, E., & Rodríguez Miranda, J. P. (2016). Aplicación de las metodologías EPA, mexicano e IPCC para la estimación de biogás,. *Universidad y Salud*, 2(18), 338-344.

Vogt, W., & Augenstein, D. (1997). *Comparison of models for predicting landfill methane recovery*. United States: SCS Engineers.

Vranera, M. T. (2011). *Manual de biogás*. Santiago de Chile: FAO.

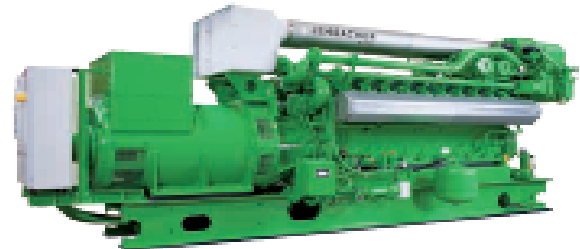
ANEXOS

JENBACHER

Jenbacher type 3

Efficient, durable, reliable

Long service intervals, maintenance-friendly engine design and low fuel consumption ensure maximum efficiency in our type 3 Jenbacher® engines. Enhanced components prolong service life even when using non-pipeline gases, such as landfill gas. Our type 3 engines offer an outstanding service interval with up to 80,000 operating hours until the major overhaul. This engine type stands out in its 400 to 1,000 kW power range due to its technical maturity and high degree of reliability.



Reference installations

J312 & J320 Landfill Site in Durban, South Africa

Fuel	Engine type	Electrical output	Commissioning
landfill gas	1x J312	538 kW	2006
	1x J320	1,064 kW	

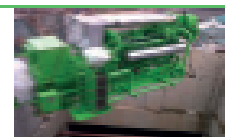
At the Durban landfill, two containerized Jenbacher generator sets with a total electrical output of 1,600 kW generate electricity for the local municipal grid. Moreover, the use of landfill gas for power generation curbs environmental pollution and health problems associated with the escaping landfill gas.



J316 Combined Cooling, Heat & Power Plant at the Hospital in Beijing Qinghe, China

Fuel	Engine type	Electrical output	Thermal output	Commissioning
Natural gas	2 x J316	3,309 kW	1,851 kW	2012

The Qinghe Hospital building and facility installed two J316 engines with a total electrical output of 3,309 kW. With a total efficiency of more than 70%, the J316 units improve the facility's energy supply security while also providing exhaust heat and hot water.



J320 Ensign Drilling Jonah Field in Wyoming, US

Fuel	Engine type	Electrical output	Commissioning
Natural gas	24 x J320	24,000 kW	2011

In southwest Wyoming, a major gas producer has deployed 24 J320 engines to repower a drilling rig using natural gas instead of diesel. In the Jonah field, available site gas allows the producer to capture cost savings and reduce overall site emissions.



J320 Amtex Textile Center in Punjab, Pakistan

Fuel	Engine type	Electrical output	Commissioning
Natural gas	12 x J320	12,072 kW	2000, 2003, 2004, 2005, 2008

A dozen J320 natural gas-driven units generate electricity for spinning mills in one of Pakistan's most important textile centers. The plant relies on the Jenbacher engines' ability to operate efficiently in a difficult environment that includes high ambient temperatures, dusty inlet air, and island mode operation.



JENBACHER

Technical data

Configuration	V 70 ¹		
Bore (mm)	135		
Stroke (mm)	170		
Displacement / cylinder (lit)	2.43		
Speed (rpm)	1,500 (50 Hz)	1,200 / 1,800 (60 Hz)	
Mean piston speed (m/s)	8.5 (1,500 1/min)	8.8 (1,200 1/min) 10.2 (1,800 1/min)	
Scope of supply	Generator set, cogeneration system, generator set / cogeneration in container		
Applicable gas types	Natural gas, flare gas, propane, biogas, landfill gas, sewage gas, Special gases (e.g. coal mine gas, coke gas, wood gas, pyrolysis gas)		
Engine type	J312	J318	J320
No. of cylinders	12	18	30
Total displacement (lit)	29.2	38.9	48.7

Dimensions l x w x h (mm)		
Generator set	J312	4,700 x 1,800 x 2,300
	J318	5,200 x 1,800 x 2,300
	J320	5,700 x 1,700 x 2,300
Cogeneration system	J312	4,700 x 2,300 x 2,300
	J318	5,300 x 2,300 x 2,300
	J320	5,700 x 1,900 x 2,300
Container	J312	12,200 x 2,500 x 2,800
	J318	12,200 x 2,500 x 2,800
	J320	12,200 x 2,500 x 2,800
Weights empty (kg)		
Generator set	J312	8,300
	J318	10,300
	J320	13,900
Cogeneration system	J312	9,500
	J318	11,200
	J320	14,400

Outputs and efficiencies

NOx ²	Type	1,500 1/min 50 Hz					1,800 1/min 60 Hz					1,200 1/min 60 Hz					
		PeI (kW) ¹	qeI (%) ¹	Pe (kW) ¹	qth (%) ¹	qtot (%) ¹	PeI (kW) ¹	qeI (%) ¹	Pe (kW) ¹	qth (%) ¹	qtot (%) ¹	PeI (kW) ¹	qeI (%) ¹	Pe (kW) ¹	qth (%) ¹	qtot (%) ¹	
500 mg/m ³	J312	398	39.4	508	51.2	90.8											
	J312	635	40.8	739	47.4	88.2	633	39.2	815	50.4	89.8	475	40.9	539	48.4	87.2	
	J318	851	40.7	968	47.3	88.0	847	39.3	1082	50.4	89.7	638	41.0	720	48.5	87.5	
	J320	999	48.2	1340	47.0	88.2											
250 mg/m ³	J312	635	39.5	798	47.8	87.1	633	39.3	835	50.5	89.8	475	40.1	548	48.3	88.4	
	J318	851	39.5	1028	47.8	87.3	847	39.4	1191	50.4	89.9	638	40.3	720	48.2	88.5	
	J320	1087	39.9	1293	48.4	89.3	1082	39.8	1391	50.5	89.0	795	40.3	914	48.3	88.5	

NOx ²	Type	1,500 1/min 50 Hz					1,800 1/min 60 Hz				
		PeI (kW) ¹	qeI (%) ¹	Pe (kW) ¹	qth (%) ¹	qtot (%) ¹	PeI (kW) ¹	qeI (%) ¹	Pe (kW) ¹	qth (%) ¹	qtot (%) ¹
500 mg/m ³	J312	548	41.9	557	42.8	84.5					
	J312	635	40.4	709	45.1	85.5	633	39.2	795	48.5	87.7
	J320	909	41.4	1089	44.2	85.8					
	J318	851	40.7	935	44.7	85.4	847	39.3	1,048	48.5	87.8
250 mg/m ³	J312	1087	40.9	1179	45.2	88.0	1082	39.4	1,307	48.5	87.9
	J312	635	39.0	720	44.8	83.8	633	39.3	807	48.8	87.1
	J318	851	39.3	954	44.5	83.7	847	39.4	1,077	48.9	87.3
	J320	1087	39.3	1,225	45.1	84.4	1082	39.8	1,347	48.9	87.4

1) technical data according to ISO 3048
 2) Total heat output with a tolerance of ±1% at 1, exhaust gas outlet temperature 100°C, for biogas gas outlet temperature 60°C
 All data according to full load and subject to technical development and modification. Further engine versions available on request.