



Descripción de metodologías del sector residuos para los sujetos a reporte del Registro Nacional de Emisiones (RENE)

Publicado por

Detusche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
Friedrich-Ebert-Allee 36+40
53113 Bonn, Deutschland
T +49 228 44 60-0
F +49 228 44 60-17 66
E info@giz.de
I www.giz.de/mexico-mx

Dag-Hammarskjöld-Weg 1 - 5
65760 Eschborn, Deutschland
T +49 61 96 79-0
F +49 61 96 79-11 15
E info@giz.de
I www.giz.de

Proyecto

Alianza Mexicana Alemana de Cambio Climático
Ejército Nacional 223
Col. Anáhuac, Del. Miguel Hidalgo
C.P. 11320
T +52 55 5536 2344
F +52 55 5536 2344
E giz-mexiko@giz.de

Información Adicional

www.giz.de/mexico-mx
www.international-climate-initiative.com
www.iki-alliance.mx
www.youtube.com/gizmxclimatechange

Autora

Alejandra Medina Arevalo

Coordinación y supervisión GIZ

Alianza Mexicana Alemana de Cambio Climático de la Detusche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH:

Yuriana González Ulloa

Carlos Ernesto Palma Servín

Dirección General de Políticas de Políticas para el Cambio Climático, de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (DPCC, SEMARNAT):

Diana Karin Guzmán Torres

Paula Guadalupe Macías Díaz

Este Proyecto forma parte de la Iniciativa Internacional del Clima (IKI). El Ministerio Federal de Ambiente, Protección de la Naturaleza, Construcción y Seguridad Nuclear de Alemania (BMU por sus siglas en alemán) apoya esta iniciativa con base en una decisión adoptada por el Parlamento Alemán.

Publicado en México noviembre 2018

ÍNDICE

Índice de Tablas	5
1. Antecedentes	6
2. Objetivo	8
3. Metodologías Analizadas	8
4. Descripción de las Metodologías.....	9
4.1. Metodologías que se mencionan en el Acuerdo que establece las particularidades técnicas y las fórmulas para la aplicación de metodologías para el cálculo de emisiones de gases o compuestos de efecto invernadero.	9
4.2. Metodologías que se indican en el Modelo Mexicano de Biogás	9
4.3. Metodologías que se utilizaron para la elaboración del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015	11
4.4. Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring Tool	11
4.5. Metodología de la Agencia de Protección al Ambiente (EPA) de Estados Unidos de Norteamérica, sector residuos	13
5. Ejemplos	14
5.1. Categoría de Disposición Final de Residuos Sólidos	14
5.2. Categoría de Tratamiento Biológico de Residuos Sólidos	17
5.3. Categoría de Incineración de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial	18
5.4. Categoría de Quema de Residuos Sólidos a Cielo Abierto	20
5.5. Categoría de Tratamiento y Descarga de Aguas Residuales Municipales	22
5.6. Categoría de Tratamiento y Descarga de Aguas Residuales Industriales	25
5.7. Categoría de Manejo de Lodos Provenientes de Aguas Residuales Municipales en Composta	26
5.8. Categoría de Manejo de Lodos Provenientes de Aguas Residuales Municipales en Relleno Sanitario	27
5.9. Categoría de Manejo de Lodos Provenientes de Aguas Residuales Industriales en Incineración	28
6. Bibliografía y Fuentes Adicionales de Información	29

Índice de Tablas

Tabla 1. Contribución de los CyGEI por subcategoría del sector desechos.	6
Tabla 2. Modelos para evaluar la producción de CH ₄ .	7
Tabla 3. Metodologías utilizadas.	8
Tabla 4. Consideraciones para el Modelo Mexicano de Biogás.	10
Tabla 5. Información necesaria para la aplicación del modelo del IPCC 2006.	11
Tabla 6. Hipótesis principales en nivel A	13
Tabla 7. Datos necesarios para usar el método de descomposición de primer orden.	13
Tabla 8. Valores de MCF por características del sitio de disposición final (SDF).	15
Tabla 9. Composición de cada categoría de residuos.	15
Tabla 10. Valores de DOC por categoría de residuos j.	15
Tabla 11. Valores de cada variable para Disposición Final de Residuos Sólidos por categoría de residuos j.	15
Tabla 12. Valores de la constante de descomposición k_j DOC por categoría de residuos j.	17
Tabla 13. Datos para Categoría de Tratamiento Biológico de Residuos Sólidos.	18
Tabla 14. Factores de emisión para las emisiones de CH ₄ y N ₂ O procedentes del tratamiento biológico de los residuos	18
Tabla 14. Datos para Categoría de Incineración de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial.	19
Tabla 15. Datos por defecto para Emisión de GEI para la Incineración.	20
Tabla 16. Datos por defecto para los factores de emisión de CO ₂ para la quema de residuos a cielo abierto	20
Tabla 17. Datos para Categoría de Quema de Residuos Sólidos a Cielo Abierto.	22
Tabla 18. Datos para Categoría de Tratamiento y Descarga de Aguas Residuales Municipales.	23
Tabla 19. Variables por defecto para el factor de emisión para el tratamiento y descarga de aguas residuales municipales.	24
Tabla 20. Variables por defecto para Emisiones de N ₂ O Generadas en Aguas Residuales.	25
Tabla 21. Datos para Categoría de Tratamiento y Descarga de Aguas Residuales Industriales.	25
Tabla 22. Variables para el Factor de Emisión para el Tratamiento y Descarga de Aguas Residuales Industriales	26
Tabla 23. Datos para Categoría de Tratamiento y Descarga de Aguas Residuales Industriales.	26
Tabla 24. Datos para Categoría de Manejo de Lodos Provenientes de Aguas Residuales Municipales en Relleno Sanitario.	27
Tabla 25. Datos para Categoría de Manejo de Lodos Provenientes de Aguas Residuales Industriales en Incineración.	28

1. Antecedentes

De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGyC(EI) 2015, elaborado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), el sector desechos (incluye residuos sólidos y aguas residuales) aportó 46 Mt de CO₂eq, que representa una contribución del 6.72% de las emisiones nacionales totales de Compuestos y Gases de Efecto Invernadero (CyGEI).

Dichas emisiones consideran las categorías de disposición final (rellenos sanitarios, sitios controlados y los tiraderos a cielo abierto), quema a cielo abierto (quema de RSU en domicilio (traspatio) y sitios de disposición final (SDF)), incineración de residuos peligrosos biológico infecciosos, tratamiento biológico de residuos (producción de composta) y tratamiento de aguas residuales (domésticas e industriales). Con los siguientes CyGEI: CH₄, CO₂ y N₂O.

Subcategoría	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total de CyGEI
1. Eliminación de residuos sólidos (total)	-	47.70%	-	47.70%
1.1. En rellenos sanitarios	-	37.00%	-	37.00%
1.2. En sitios no controlados	-	5.35%	-	5.35%
1.3. En tiraderos a cielo abierto	-	5.35%	-	5.35%
2. Tratamiento biológico de residuos (total)	-	0.30%	0.20%	0.50%
3. Incineración y quema a cielo abierto (total)	1.60%	1.40%	0.30%	3.30%
3.1. Incineración de RPBI y RPI	0.06%	-	-	0.06%
3.2. Quema a cielo abierto	1.54%	1.40%	0.30%	3.24%
4. Tratamiento de aguas residuales (total)	-	44.50%	4.00%	48.50%
4.1. Municipales	-	8.10%	4.00%	12.10%
4.2. Industriales	-	36.40%	-	36.40%
Contribución por CyGEI	1.60%	93.90%	4.50%	100.00%

Tabla 1. Contribución de los CyGEI por subcategoría del sector desechos.

Fuente: Elaboración propia con datos del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero de México 2015. INECC.

Para predecir la velocidad de producción de metano en los SDF, se han desarrollado diversos modelos, entre los que se encuentran los empíricos, estequiométricos y bioquímicos:

Modelo	Consideraciones
Balance de masa y producción teórica de gas, en las fórmulas empíricas en el balance de masa	Se asume que el 53% del carbono contenido es convertido a metano (CH ₄).
	Se asume que se producen 234 m ³ de metano por tonelada de residuos sólidos urbanos húmedos.
Metodologías teóricas de cinética de primer orden	Considera el período de tiempo involucrado.
	Los principales factores son: generación y composición de los residuos, variables ambientales (contenido de humedad, pH, temperatura y nutrientes disponibles), edad, tipo y tiempo desde el cierre del SDF (en caso de los SDF clausurados).
	Usando el contenido orgánico degradable calculado a partir del promedio ponderado del contenido de carbono de varios componentes del flujo de residuos, requiere conocimiento de: contenido de carbono de las fracciones, y composición de las fracciones en el flujo de residuos.
Método de regresión	Se basan en modelos empíricos.
	Se aplican análisis estadísticos y de regresión lineal.
Modelos matemáticos específicos	Se aplican para regiones o países que hace la investigación de campo y laboratorio.

Tabla 2. Modelos para evaluar la producción de CH₄.
Fuente: elaboración propia.

Estos modelos representan explícitamente en una función matemática de algunas o la mayoría de las variables físicas, químicas y biológicas importantes conocidas (composición, humedad, contenido, temperatura, absorción/adsorción, volatilización, evaporación, dilución, filtración, precipitación, neutralización, oxidación, etc.) que afecta a la velocidad de producción. Aunque se conoce la importancia de estas variables, no es posible describir la tasa de producción de gas con certeza sin una caracterización detallada de las condiciones reales dentro del SDF. Esto requiere una cantidad significativa de mediciones y un análisis muy detallado (Nastev, 1998).

El ecosistema de microbiano en SDF, muy complejo, está representado por un sistema de ecuaciones de primer orden. Se dan en términos de fuentes de carbono, vías y sumideros, describiendo la hidrólisis de los componentes de los residuos hidrolizables y biogasificables, el uso del carbono acuoso para el crecimiento de la biomasa acidogénica y metanogénica, la utilización de acetato y la consiguiente generación de metano y dióxido de carbono. Esto es equivalente a una cadena alimenticia microbiana simplificada.

2. Objetivo

Elaborar el acuerdo que establezca las particularidades técnicas y las fórmulas para la aplicación de metodologías para el cálculo de emisiones y compuestos de efecto invernadero generadas por el sector residuos.

3. Metodologías Analizadas

Las metodologías analizadas son:

Metodologías que se mencionan en el Acuerdo que establece las particularidades técnicas y las fórmulas para la aplicación de metodologías para el cálculo de emisiones de gases o compuestos de efecto invernadero.
Metodologías que se indican en el Modelo Mexicano de Biogás.
Metodologías que se utilizaron para la elaboración del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015.
Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring Tool.
Metodología de la Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos de Norteamérica, sector residuos.

Tabla 3. Metodologías utilizadas.
Fuente: elaboración propia.

4. Descripción de las Metodologías

4.1. Metodologías que se mencionan en el Acuerdo que establece las particularidades técnicas y las fórmulas para la aplicación de metodologías para el cálculo de emisiones de gases o compuestos de efecto invernadero.

Este acuerdo describe veintisiete métodos para calcular y reportar las Emisiones de Gases o Compuestos de Efecto Invernadero de las actividades preponderantes, el tratamiento de aguas residuales, el consumo de combustibles, el consumo y oxidación de combustibles en fuentes móviles o el consumo de energía eléctrica y térmica en sus procesos y actividades de un establecimiento.

Para el cálculo de Emisiones de Gases o Compuestos de Efecto Invernadero de los Establecimientos Sujetos a Reporte se aplica, en las fórmulas de cada metodología, el poder calorífico medido directamente en los combustibles utilizados, o el que determine la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, o la autoridad señalada para tal efecto en la normatividad correspondiente, mediante la Lista de Combustibles que se considerarán para identificar a los Usuarios con un Patrón de Alto Consumo, así como los factores para determinar las equivalencias en términos de barriles equivalentes de petróleo, o bien, en la publicación oficial que sustituya dicha lista.

4.2. Metodologías que se indican en el Modelo Mexicano de Biogás

El Modelo Mexicano de Biogás (MMB) en su versión 2 es un modelo que está basados en la misma ecuación, solo que utilizan diferentes formas de obtener la cantidad de materia orgánica degradable. El MMB fue un análisis realizado en específico para México, el cual se basa en dos parámetros fundamentales, L_0 (potencial de generación de metano) y k (índice de generación de metano).

Dichas variables se determinaron para las cinco zonas climáticas en las que se dividió el país para un mejor análisis de las emisiones de metano en los sitios de disposición final (SDF) de residuos sólidos urbanos (RSU). El MMB fue realizado por Methane to Markets como encargo a la EPA, y tiene las siguientes consideraciones:

Divide al país en seis regiones y cinco zonas climáticas que consideran la precipitación promedio.
Composición de residuos de 31 ciudades.
Datos de recuperación del proyecto de SIMEPRODE (Monterrey, Nuevo León).
Variación del valor de k con la precipitación basado en la experiencia con EU.
Recopilación de datos de composición de residuos, la base de datos se expandió a 40 ciudades.
Los datos representan 18 Estados y la Ciudad de México (en aquella época denominado Distrito Federal).
Se calculó una composición promedio para cada estado.

Los estados que sin información utilizan el promedio regional.

Tabla 4. Consideraciones para el Modelo Mexicano de Biogás.

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Metodologías que se utilizaron para la elaboración del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015

Para la obtención del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuesto de Efecto Invernadero durante el periodo del 1990 al 2015, se utilizó el modelo del IPCC 2006, el cual se basa en el método de descomposición de primer orden en donde el carbono se degrada formando metano.

Para aplicar esta metodología es necesario conocer:

La tasa promedio anual de residuos dispuestos
El número de años que ha estado o estuvo abierto el relleno
El año de clausura para SDF cerrados
La base para el cálculo es la cantidad de carbono orgánico degradable disuelto (DDOC)
Presentan valores de k para cada categoría de residuos
El metano potencial que se genera a través de los años se estima sobre la base de las cantidades y la composición de los RSU dispuestos en los SDF y de las prácticas de gestión en los SDF

Tabla 5. Información necesaria para la aplicación del modelo del IPCC 2006.
Fuente: Elaboración propia.

4.4. Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring Tool

La Herramienta de Evaluación y Monitoreo del Desempeño Energético y de las Emisiones de Carbono (ECAM) ayuda a las empresas prestadoras de servicios de agua y saneamiento a cuantificar sus emisiones de gases de efecto invernadero y su aporte a las Contribuciones Nacionales Determinadas, ofreciendo soluciones para reducir las emisiones producidas por el uso de energía y la gestión de aguas residuales.

ECAM ha sido desarrollada con el fin de ajustarse a las Directrices para los Inventarios Nacionales de los Gases de Efecto Invernadero del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) y a literaturas revisadas por expertos. Funciona a partir de dos hipótesis:

Hipótesis principales en Nivel A	Cargas de DBO ₅ en influentes y efluentes.
	Cargas de DBO ₅ eliminadas como lodos.
	Tecnologías de factores de emisión de CH ₄ .
	Producción masiva de lodos.
	Volumen de producción de biogás.
	Volumen de biogás valorizado.
	Peso seco de lodos eliminados.
	Temperatura en el reactor de lecho fluidizado (solo para incineración de lodos).

Tabla 6. Hipótesis principales en nivel A

Fuente: IPCC, 2006.

4.5. Metodología de la Agencia de Protección al Ambiente (EPA) de Estados Unidos de Norteamérica, sector residuos

Este modelo se basa en el método de descomposición de primer orden en donde el carbono se degrada formando metano. Para utilizar este modelo es necesario conocer datos generales y de operación del SDF, tales como:

La tasa promedio anual de residuos dispuestos.
El número de años que ha estado o estuvo abierto el relleno.
El año de clausura para SDF cerrados.
El potencial de los residuos dispuestos, para generar metano.
Valores de k y L_0 , para cada categoría de residuos.

Tabla 7. Datos necesarios para usar el método de descomposición de primer orden.

Fuente: EPA, 2009.

5. Ejemplos

Los modelos basados en el método FOD (Metodología de la EPA de Estados Unidos de Norteamérica, sector residuos y modelo del IPCC 2006), consideran que el potencial de generación de metano (L_0) está en función de la composición de los residuos y la tasa constante de generación (k) depende de parámetros específicos del sitio: contenido de humedad, temperatura, composición de residuos, potencial de reducción de oxidación, alcalinidad y pH, densidad de los residuos y el tamaño de las partículas (SCS Engineers, 2009; Garg et al., 2006).

A nivel mundial se han realizado varios estudios para estimar la producción de metano de los SDF. Éstos se basan sobre todo en la ecuación de la descomposición del primer orden (método usado por el IPCC). En todos éstos, se supone que el biogás consiste en 50% de CO_2 y 50% de CH_4 , aunque existe un porcentaje de gases traza no contemplados.

Los modelos de primer orden tienen una relación lineal con el potencial máximo de producción de metano por unidad de peso de residuos, así como una relación exponencial con la tasa de decaimiento y el tiempo. Algunos modelos se clasifican como modelos de orden cero en los que se supone que la producción de metano es constante en el tiempo, situación que de acuerdo con el monitoreo en los SDF se ha demostrado que es equivocada.

Los modelos numéricos son herramientas sólidas para predecir la emisión de metano de los SDF, en los que generalmente se aplican métodos ponderados. (H. Kamalan, M. Sabour, N. Shariatmadari, 2011)

5.1. Categoría de Disposición Final de Residuos Sólidos

Se decidió aplicar la metodología utilizada en el INEGYCEI, 2018, la cual está basada en el IPCC, 2006, dado que en la composición de residuos se establecen seis categorías de residuos: residuos de comida, jardinería, papel, madera y paja, textiles, y pañales. Mientras que en el MMB a cuatro categorías de composición de residuos y está asociado a dos parámetros físicos: precipitación y temperatura, datos que corresponden a los años anteriores al 2009, los cuales han cambiado significativamente.

Ejemplo: Un sitio de disposición final ubicado en el estado de Aguascalientes tiene los siguientes datos de residuos sólidos:

$$2017: W_i = 47,450,000 \frac{kg}{año}$$

$$2016: W_i = 46,420,000 \frac{kg}{año}$$

De acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT-2003, se considera que es un relleno controlado con una altura de diseño de 7 m, por lo cual el valor de MCF que le corresponde es de 0.5, ver Tabla 8.

Manejo del SDF	Profundidad	
	< 5 m	≥ 5 m
Sin manejo (sitio no controlado)	0.4	0.8
Con manejo (relleno sanitario)	0.8	1.0
Aeróbico (relleno controlado)	0.4	0.5
Situación desconocida	0.4	0.8

Tabla 8. Valores de MCF por características del sitio de disposición final (SDF).

Fuente: Ludwig V, 2009. Landfill Methane Outreach Program. Manual del Usuario Modelo Mexicano de Biogás. Versión 2.0. Agencia para la Protección del Ambiente (U.S. EPA) Washington, D.C. marzo 2009.

Categoría de residuos j	Comida
Residuos de comida	22.38%
Jardinería	7.11%
Papel	12.45%
Madera y paja	3.54%
Textiles	4.01%
Pañales	7.34 %

Tabla 9. Composición de cada categoría de residuos.

Fuente: Elaboración propia.

Categoría de residuos j	Comida	Jardín	Papel	Madera y paja	Textiles	Pañales
DOC	0.15	0.2	0.4	0.43	0.24	0.24

Tabla 10. Valores de DOC por categoría de residuos j .

Fuente: IPCC 2006a, Vol. 5.

Categoría de residuos j	W_i	W_{i-1}	$DDOCm_{j,i}$	$DDOCm_{a_{j,i-1}}$	$DDOCm_{d_{j,i}}$	$CH_{4g_{j,i}}$
Residuos de comida	10,619,310.00	10,388,796.00	398,224.13	389,579.85	57,601.80	38,401.20
Jardinería	3,373,695.00	3,300,462.00	168,684.75	165,023.10	11,923.99	7,949.33
Papel	5,907,525.00	5,779,290.00	590,752.50	577,929.00	18,200.96	12,133.97
Madera y paja	1,679,730.00	1,643,268.00	180,570.98	176,651.31	2,803.93	1,869.29
Textiles	1,902,745.00	1,861,442.00	114,164.70	111,686.52	3,517.39	2,344.93
Pañales	3,482,830.00	3,407,228.00	208,969.80	204,433.68	30,226.79	20,151.19
Total					$\sum CH_{4g_{j,i}}$	82,849.91

Tabla 11. Valores de cada variable para Disposición Final de Residuos Sólidos por categoría de residuos j .

Fuente: IPCC 2006a, Vol. 5.

Entidades federativas	k_1 Comida	k_2 Jardín	k_3 Papel	k_4 Madera y paja	k_5 Textiles	k_6 Pañales
Aguascalientes	0.160	0.075	0.032	0.016	0.032	0.160

Tabla 12. Valores de la constante de descomposición (k_j) DOC por categoría de residuos j.

Fuente: Ludwing V, 2009. Landfill Methane Outreach Program. Manual del Usuario Modelo Mexicano de Biogás. Versión 2.0. Agencia para la Protección del Ambiente (U.S. EPA) Washington, D.C. Marzo 2009.

$$DDOC_{m_{j,i}} = W_i \times \frac{C_j}{100} \times MCF \times DOC_j \times DOC_{f_j}$$

$$DDOC_{m_{aj,i}} = DDOC_{m_{j,i}} + DDOC_{m_{aj,i-1}} \times e^{-k_j}$$

$$DDOC_{m_{dj,i}} = DDOC_{m_{aj,i-1}} \times (1 - e^{-k_j})$$

$$CH_{4g_{j,i}} = DDOC_{m_{dj,i}} \times F \times 16/12$$

$$E_{CH_4i} = \sum CH_{4g_{j,i}}$$

$$E_{CO_{2e}(CH_4)} = E_{CH_4} \times PCG_{CH_4}$$

$$E_{CO_{2e}(CH_4)} = 82,849.91 \times 28 = 2,319,797 \text{ kgCO}_2e$$

5.2. Categoría de Tratamiento Biológico de Residuos Sólidos

Ejemplo:

M_i	Masa de los residuos orgánicos sometidos al tratamiento biológico (composta) i	3,650,000	kg.
RS	Cantidad total de residuos sólidos urbanos (RSU) o residuos sólidos de manejo especial (RME) de tipo i (peso húmedo) incinerados.	7,300,000	$\frac{kg}{año}$
WF_i	Fracción de tipo / material de residuos del componente i en los residuos.	0.07	$\frac{RSU}{RME}$
dm_i	Contenido de materia seca en los residuos incinerados (fracción). Ver Tabla 17..	0.4	
CF_i	Fracción de carbono en la materia seca (contenido de carbono total). Ver Tabla 17.	0.6	

FCF_i	Fracción de carbono fósil en el carbono total. Ver Tabla 17..	0.1	
OF_i	Factor de oxidación (fracción). Ver Tabla 17.	1	
$44/12$	Factor de conversión de C en CO ₂ .	3.67	

Tabla 13. Datos para Categoría de Tratamiento Biológico de Residuos Sólidos.
Fuente: (INEGYCEI, 2018a-c, IPCC, 2006a).

$$E_{CH_4} = \sum_i (3,650,000 \times 4) \times 10^{-3} - 0$$

$$E_{N_2O} = \sum_i (3,650,000 \times 0.3) \times 10^{-3}$$

$$E_{CO_2e(CH_4)} = 14,600 \times 28 = 408,800 \text{ kgCO}_2e$$

$$E_{CO_2e(N_2O)} = 1,095 \times 265 = 290,175 \text{ kgCO}_2e$$

Tipo de tratamiento biológico	Factores de emisión de CH ₄ $\left(\frac{g_{CH_4}}{kg_{residuos\ tratados}}\right)$	Factores de emisión de N ₂ O $\left(\frac{g_{N_2O}}{kg_{residuos\ tratados}}\right)$
Preparación de abono orgánico (composta)	4 (0.03-8) sobre la base de peso húmedo	0.3 (0.06-0.6) sobre la base de peso húmedo
Digestión anaeróbica en las instalaciones de biogás	1 (0 - 8) sobre la base de peso húmedo	Se supone insignificante

Tabla 14. Factores de emisión para las emisiones de CH₄ y N₂O procedentes del tratamiento biológico de los residuos
Fuente: IPCC 2006b, Cuadro 4.1 Vol. 5.

5.3. Categoría de Incineración de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial

Ejemplo:

M_i	Masa de los residuos orgánicos sometidos al tratamiento biológico (composta) i	3,650,000	kg.
R	Cantidad total de CH ₄ recuperado durante el año.	0	kg _{CH₄} .

EF_i	Factor de emisión del tratamiento i . Ver Tabla 14.	4	$\frac{g_{CH_4 \text{ ó } N_2O}}{kg_{residuos \text{ tratados}}}$.
EF_i	Factor de emisión del tratamiento i . Ver Tabla 14.	0.3	$\frac{g_{CH_4 \text{ ó } N_2O}}{kg_{residuos \text{ tratados}}}$.
PCG_{CH_4}	Potencial de calentamiento global de metano.	28	$\frac{kg_{CO_2}}{kg_{CH_4}}$.
PCG_{N_2O}	Potencial de calentamiento global del óxido nitroso	265	$\frac{kg_{CO_2}}{kg_{N_2O}}$.

Tabla 15. Datos para Categoría de Incineración de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial.
Fuente: IPCC 2006b, Cuadro 4.1 Vol. 5.

$$E_{CO_2} = 7,300,000 \sum_i (0.07_{pañales} \times 0.40 \times 0.60 \times 0.10 \times 1) \times (44/12) = 44,968 \text{ kgCO}_2$$

Tipo de RSU/RME	RSU			RME		
	Contenido de materia seca	Fracción de carbono en materia seca	Fracción de carbono fósil en el carbono total	Contenido de materia seca	Fracción de carbono en materia seca	Fracción de carbono fósil en el carbono total
Papel/cartón	90	44	1	90	40	1
Textiles	80	30	20	80	24	16
Desechos de alimentos	40	38	-	40	15	-
Madera	85	50	-	85	43	-
Desechos de jardines y parques	40	49	0	-	-	-
Pañales	40	60	10	-	-	-
Caucho y cuero	84	47	20	84	39	17

Tipo de RSU/RME	RSU			RME		
	Contenido de materia seca	Fracción de carbono en materia seca	Fracción de carbono fósil en el carbono total	Contenido de materia seca	Fracción de carbono en materia seca	Fracción de carbono fósil en el carbono total
Plásticos	100	-	100	-	-	-
Metal	100	-	ND	-	-	-
Vidrio	100	-	ND	-	-	-
Otros, residuos inertes	90	-	100	90	1	3

Factor de oxidación = 100%
Factor de conversión = 3.6667.

Tabla 16. Datos por defecto para Emisión de GEI para la Incineración.
Fuente: IPCC 2006, Cuadros 2.4. y 2.5. cap. 5.2.

5.4. Categoría de Quema de Residuos Sólidos a Cielo Abierto

<i>MSW</i>	Cantidad total de residuos sólidos municipales en peso húmedo quemados por quema a cielo abierto.	11,680,000	$\frac{kg}{año}$
------------	---	------------	------------------

Parámetros	Papel, cartón, productos de papel	Textiles	Plásticos	Vidrios	Metales	Residuos orgánicos ^a	Otro tipo de residuos ^b
Contenido de materia seca	90%	80%	100%	100%	100%	40%	62%
Fracción de carbono en materia seca	44%	30%	75%	0%	0%	38%	54%
Fracción de carbono fósil en el carbono total	1%	20%	100%	0%	0%	0%	15%

Tabla 17. Datos por defecto para los factores de emisión de CO₂ para la quema de residuos a cielo abierto
Factor de oxidación= 58%; Factor de conversión= 3.6667.

^a En su proceso de descomposición natural, estos residuos generan una mezcla gaseosa conocida como biogás, que debe quemarse (acuerdo internacional para el control de emisiones de gases de efecto invernadero).

^b Incluye residuos finos, material de demoliciones, hules y pañales desechables, entre otros.
Fuente: IPCC 2006c. Cuadros 2.4 y 2.15, Cap. 5.

Parámetros	Fración de material de residuos del tipo j en los RSU y RME (en peso húmedo) WF_j .	Contenido de materia seca	Fración de carbono en materia seca	Fración de carbono fósil en el carbono inicial	$WF_j \times dm_j \times CF_j \times FCF_j \times OF_j \times (44/12)$
Papel, cartón, productos de papel	11.0%	90%	44%	1%	0.16%
Textiles	3.0%	80%	30%	20%	0.53%
Plásticos	14.0%	100%	75%	100%	38.50%
Vidrios	3.0%	100%	0%	0%	0.00%
Metales	2.0%	100%	0%	0%	0.00%
Residuos orgánicos ^a	46.0%	40%	38%	0%	0.00%
Otro tipo de residuos ^b	21.0%	62%	54%	15%	3.87%
					43.05%

Tabla 18. Datos para Categoría de Quema de Residuos Sólidos a Cielo Abierto.

Fuente: (IPCC, 2006c).

^a En su proceso de descomposición natural, estos residuos generan una mezcla gaseosa conocida como biogás, que debe quemarse (acuerdo internacional para el control de emisiones de gases de efecto invernadero).

^b Incluye residuos finos, material de demoliciones, hules y pañales desechables, entre otros.

Fuente: IPCC 2006c. Cuadros 2.4 y 2.15, Cap. 5.

$$E_{CO_2} = 11,680,000 \times 0.4305 = 5,028,794.29 \text{ kg}_{CO_2}$$

5.5. Categoría de Tratamiento y Descarga de Aguas Residuales Municipales

B_o	Capacidad máxima de producción de 0.6 CH ₄ .	0.6	$\frac{kg_{CH_4}}{kg_{BOD}}$
MCF_j	Factor de corrección para el metano (fracción). Ver ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..	0.2	Laguna anaeróbica > 2 m.
DBO_i	DBO en el influente.	250	
DBO_e	DBO en el efluente.	30	

DBO_d	$0.65 DBO_i$, DBO removido como lodo.	162.5	
E_{CH_4}	Emisiones de metano ocurridas durante el año.	1,697,227.50	$\frac{kg}{año}$
N_E	Nitrógeno en el efluente eliminado en medios acuáticos.	35,174,425.00	$\frac{kg_N}{año}$
EF_E	Factor de emisión para las emisiones de N_2O provenientes de la eliminación en aguas servidas.	0.005	$\frac{kg_{N_2O}}{kg_N}$
$\frac{44}{28}$	Factor que corresponde a la conversión de kg de N_2O -N en kg de N_2O .	1.57	
P	Población humana.	245,975.00	
PR	Consumo per cápita anual de proteínas.	650	$\frac{kg}{persona \cdot año}$
F_{NPR}	Fracción de nitrógeno en las proteínas; por defecto = $0.16 kg$ de $\frac{N}{kg_{proteína}}$. Ver ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..	0.16	
F_{NC}	Factor de las proteínas no consumidas añadidas a las aguas residuales.	1.1	
F_{IC}	Factor para las proteínas industriales y comerciales coeliminadas en los sistemas de alcantarillado.	1.25	
N_S	Nitrógeno separado con el lodo residual (por defecto = 0).	0	$\frac{kg_{proteína}}{año}$
E_{N_2O}	Emisiones de N_2O durante el año.	276,370.48	$\frac{kg_{N_2O}}{año}$

Tabla 19. Datos para Categoría de Tratamiento y Descarga de Aguas Residuales Municipales.
Fuente: (INEGYCEI, 2018a-c, IPCC, 2006a).

Tipo de tratamiento o descarga	Factor de corrección de metano MCF_j	Factor de emisión $\left(\frac{kg_{CH_4}}{kg_{BOD}}\right)$
Eliminación en ríos.	0.1	0.06
No tratada (canales/alcantarilla abierta).	0.1	0.06

Tipo de tratamiento o descarga	Factor de corrección de metano MCF_j	Factor de emisión $\left(\frac{kg_{CH_4}}{kg_{BOD}}\right)$
Tratamiento aeróbico: discos biológicos o biodiscos, filtros biológicos o rociadores o percoladores, lodos activados bien operados.	0.0	0.00
Tratamiento aeróbico mal operado.	0.3	0.18
Laguna anaeróbica menor a 2 m de profundidad.	0.2	0.12
Laguna anaeróbica mayor a 2 m de profundidad.	0.8	0.48
Primario, primario avanzado y sedimentación.	0.4	0.24
Zanjas de oxidación, humedales (wetland) y dual.	0.3	0.18
Anaerobio.	1.0	0.60
Rafa o Uasb.	0.8	0.48
Tanque Imhoff.	1.0	0.60
Reactor enzimático.	0.6	0.36
Tanque séptico o fosa séptica, clima seco, uso comunitario.	0.5	0.30
Otros procesos.	0.6	0.36

Tabla 20. Variables por defecto para el factor de emisión para el tratamiento y descarga de aguas residuales municipales.
Fuente: IPCC 2006d. Cuadro 6.3, Cap. 6, Vol 5.
ECAM, V2. 2017.

Datos por defecto para la metodología del N ₂ O	Valor
Fracción de nitrógeno en proteína $\left(\frac{kg_N}{N \cdot proteína}\right)$.	0.160
Factor de ajuste para la proteína no consumida	1.100
Fracción de proteína industrial y comercial codescargada	1.250
Nitrógeno eliminado en lodos (kg).	0.000
Factor de emisión	0.005
Factor de conversión de kg N ₂ O-N en kg N ₂ O	1.600

Tabla 21. Variables por defecto para Emisiones de N₂O Generadas en Aguas Residuales.
Fuente: IPCC 2006d. Cuadro 6.3, Cap. 6, Vol 5. ECAM, V2. 2017.

$$E_{CO_2e(CH_4)} = 1,697,227.50 \times 28 = 47,522,370 \text{ kgCO}_2e$$

$$E_{CO_2e(N_2O)} = 276,370.48 \times 265 = 73,238,177.77 \text{ kgCO}_2e$$

5.6. Categoría de Tratamiento y Descarga de Aguas Residuales Industriales

TOW_i	Total, de materia orgánica en las aguas residuales de la industria i durante el año.	934,400.00	$\frac{kgDQO}{año}$.
i	Sector industrial.		-
S_i	Componente orgánico separado como lodo durante el año.	7,000.00	$\frac{kgDQO}{año}$.
EF_i	Factor de emisión para la industria i para el sistema de tratamiento utilizado en el año. Ver Tabla 23.	0.03	$\frac{kgCH_4}{kgDQO}$.
R_i	Cantidad de CH ₄ recuperado durante el año.	0.00	$\frac{kgCH_4}{año}$.
j	Cada sistema de tratamiento.		-
B_o	Capacidad máxima de producción de CH ₄ . Ver Tabla 23.	0.25	$\frac{kgCH_4}{kgDQO}$.
MCF_j	Factor de corrección para el metano (fracción). Ver Tabla 23.	0.10	-

Tabla 22. Datos para Categoría de Tratamiento y Descarga de Aguas Residuales Industriales.
Fuente: IPCC 2006d. Cuadro 6.2 y 6.8, Cap. 6, Vol. 5,

Tipo de tratamiento o descarga	Máxima capacidad de producción de Metano $\left(\frac{kgCH_4}{kgCOD}\right)$	Factor de corrección de Metano MCF_j	Factor de emisión $\left(\frac{kgCH_4}{kgCOD}\right)$
Primario	0.25	0.2	0.050
Secundario	0.25	0.3	0.075
Terciario	0.25	0.1	0.025
No especificado*	-	-	0.0625

Tipo de tratamiento o descarga	Máxima capacidad de producción de Metano $\left(\frac{kg_{CH_4}}{kg_{COD}}\right)$	Factor de corrección de Metano MCF_j	Factor de emisión $\left(\frac{kg_{CH_4}}{kg_{COD}}\right)$
No tratadas	0.06		0.060

*El factor de emisión para no especificado fue el promedio de los tratamientos primario y secundario.

Tabla 23. Variables para el Factor de Emisión para el Tratamiento y Descarga de Aguas Residuales Industriales
Fuente: IPCC 2006d. Cuadro 6.2 y 6.8, Cap. 6, Vol. 5,

$$E_{CH_4} = \sum_i [(934,400 - 6540)0.025 - 0] = 23,196.50$$

$$EF_j = 0.25 \times 0.10 = 0.025$$

$$E_{CO_{2e}(CH_4)} = 23,196.50 \times 28 = 649,502kgCO_{2e}$$

5.7. Categoría de Manejo de Lodos Provenientes de Aguas Residuales Municipales en Composta

L	Total de lodos tratados.	4,015,000.00	$\frac{kg}{año}$.
$\%VS$	Sólidos en los procesos: 51 en un digestor de lodos, 70 cuando no provienen de digestor anaerobio.	0.7	%.
$\%C$	Porcentaje de carbón orgánico en los sólidos volátiles = 56.	0.56	%.
CH_4/p	Factor de emisión de CH_4 en pila descubierta = 2.5	2.5	-
C/CH_4	Factor de conversión de C a CH_4 = 1.3.	1.3	-
$\%N$	Factor de nitrógeno total en el proceso = 3.	0.03	%
$N_2O/C:N$	Factor de emisión de N_2O por baja relación C:N = 1.5.	1.5	-
N/N_2O	Factor de conversión de N a N_2O = 1.57.	1.57	-
PCG_{CH_4}	Potencial de calentamiento global de metano.	28	$\frac{kgCO_2}{kgCH_4}$.
PCG_{N_2O}	Potencial de calentamiento global del óxido nitroso.	265	$\frac{kgCO_2}{kgN_2O}$.

Tabla 24. Datos para Categoría de Tratamiento y Descarga de Aguas Residuales Industriales.
Fuente: Environmental, S., 2009 y ECAM, V2. 2017

$$E_{CH_4} = 4,015,000 \times 0.56 \times 0.7 \times 2.5 \times 1.3 = 5,115,110$$

$$E_{N_2O} = 4,015,000 \times 0.03 \times 1.5 \times 1.57 = 283,659.75$$

$$E_{CO_{2e}(CH_4)} = 5,115,110 \times 28 = 143,223,080kgCO_{2e}$$

$$E_{CO_2e(N_2O)} = 283,659.75 \times 265 = 75169833.75 kgCO_2e$$

5.8. Categoría de Manejo de Lodos Provenientes de Aguas Residuales Municipales en Relleno Sanitario

L	Total, de lodos tratados.	4,015,000	$\frac{kg_{N_2O}}{año}$.
$\%C$	Porcentaje orgánicos C en volumen de sólidos.	0.56	$\frac{kg}{año}$.
$\%VS$	Sólidos en los procesos: 51 en un digestor de lodos, 70 cuando no provienen de digestor anaerobio.	0.7	%.
CH_4/RS	Factor de emisión de $CH_4 = 50$.	0.5	%
$\%D$	Porcentaje de descomposición en los primeros 3 años=69.9.	0.699	-
C/CH_4	Factor de conversión de C a $CH_4 = 1.3$.	1.3	%.
MCF_{RS}	Factor de corrección en el relleno sanitario. Ver Tabla 8.	0.9	
$\%N$	Factor de nitrógeno total en el proceso: 3.	0.03	-
$N_2O/C:N$	Factor de emisión de N_2O por baja relación C:N= 1.5.	1.5	%.
N/N_2O	Factor de conversión de N a $N_2O = 1.57$.	1.57	-
E_{N_2O}	Total, de las emisiones de N_2O durante el año.	283,659.75	kg_{N_2O}
$E_{CO_2e(CH_4)}$	Emisión de bióxido de carbono equivalente proveniente de las emisiones de metano.	16,218,295.13	kg_{CO_2e}
PCG_{CH_4}	Potencial de calentamiento global de metano.	28	$\frac{kg_{CO_2e}}{kg_{CH_4e}}$.
$E_{CO_2e(N_2O)}$	Emisión de bióxido de carbono equivalente proveniente de las emisiones de metano.	75,169,833.75	kg_{CO_2e}
PCG_{N_2O}	Potencial de calentamiento global del óxido nitroso	265	$\frac{kg_{CO_2e}}{kg_{N_2O}}$

Tabla 25. Datos para Categoría de Manejo de Lodos Provenientes de Aguas Residuales Municipales en Relleno Sanitario.
Fuente: Environmental, S., 2009 y ECAM, V2. 2017

$$E_{CH_4} = 4,015,000 \times 0.56 \times 0.7 \times 0.9 \times 0.5 \times 1.3 \times 0.699 \times 0.9 = 579,224.83$$

$$E_{N_2O} = 4,015,000 \times 0.03 \times 1.5 \times 1.57 = 283,659.75$$

$$E_{CO_2e(CH_4)} = 579,224.83 \times 28 = 16,218,295.13 kgCO_2e$$

$$E_{CO_2e(N_2O)} = 283,659.75 \times 265 = 75,169,833.75 kgCO_2e$$

5.9. Categoría de Manejo de Lodos Provenientes de Aguas Residuales Industriales en Incineración

E_{CH_4}	Emisiones de metano ocurridas durante el año.	973.6375	$\frac{kg}{año}$.
L	Total de lodos tratados.	4,015,000	$\frac{kg}{año}$.
	Relación entre masa de metano y masa de lodo seco, asumiendo que el 20 % es de sólidos.	28,105	$\frac{kg_{CH_4}}{kg_{lodo\ seco}}$.
T_{max}	Temperatura máxima en el proceso.	0.0000485	$^{\circ}C$.
$\%N$	Factor de nitrógeno total en el proceso = 3.	120	%
N/N_2O	Factor de conversión de N a N ₂ O = 1.57.	3.00%	-
E_{N_2O}	Total, de las emisiones de N ₂ O durante el año.	1.57	kg_{N_2O}
$E_{CO_2e(CH_4)}$	Emisión de bióxido de carbono equivalente proveniente de las emisiones de metano.	256,001.79	kg_{CO_2e} .
PCG_{CH_4}	Potencial de calentamiento global de metano.	27,261.85	$\frac{kg_{CO_2}}{kg_{CH_4}}$.
$E_{CO_2e(N_2O)}$	Emisión de bióxido de carbono equivalente proveniente de la emisión del óxido nitroso.	28	kg_{CO_2e} .
PCG_{N_2O}	Potencial de calentamiento global del óxido nitroso.	67,840,474.28	$\frac{kg_{CO_2}}{kg_{N_2O}}$.

Tabla 26. Datos para Categoría de Manejo de Lodos Provenientes de Aguas Residuales Industriales en Incineración.
Fuente: Environmental, S., 2009 y ECAM, V2. 2017

$$E_{CH_4} = 4,015,000 \times \frac{0.0000485}{0.2} = 973.64$$

$$E_{N_2O} = 28,105 \times 0.03 \times (161.3 - 0.140) \times 120 \times 0.01 \times 1.57 = 265,001.79$$

$$E_{CO_2e(CH_4)} = 973.64 \times 28 = 27,262 kgCO_2e$$

$$E_{CO_2e(N_2O)} = 265,001.79 \times 265 = 67,840,474 kgCO_2e$$

6. Bibliografía y Fuentes Adicionales de Información

- Acuerdo que establece las particularidades técnicas y las fórmulas para la aplicación de metodologías para el cálculo de emisiones de gases o compuestos de efecto invernadero.
[http://dof.gob.mx/nota_to_doc.php?codnota=5406149].
- ECAM, V2. 2017. Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring Tool Methodology. The Water and Wastewater Companies for Climate Mitigation (WaCCliM) project, is a joint initiative between the Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) and the International Water Association (IWA).
- Environmental, S., 2009. "The biosolids emissions assessment model (BEAM): a method for determining greenhouse gas emissions from Canadian biosolids management practices".
- INEGYCEI, 2018a. Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015. Capítulo 6, Residuos, 5ª lectura.
- INEGYCEI, 2018b Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015. Anexo D Residuos, 2ª lectura, ajustada.
- INEGYCEI, 2018c. Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015. Anexo E, Residuos, 2ª lectura ajustada.
- IPCC, 2006. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 5: Desechos, Capítulo 2: datos de generación, composición y gestión de desechos.
- IPCC, 2006a. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 5: Desechos, Capítulo 3: Eliminación de desechos sólidos.
- IPCC, 2006b. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 5: Desechos, Capítulo 4: Tratamiento biológico de los desechos sólidos.
- IPCC, 2006c. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 5: Desechos, Capítulo 5: Incineración e incineración abierta de desechos.
- IPCC, 2006d. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 5: Desechos, Capítulo 6: Tratamiento y eliminación de aguas residuales.
- LGCC, 2018. Ley General de Cambio Climático. Disponible en http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC_130718.pdf
- Ludwing V, 2009. Landfill Methane Outreach Program. Manual del Usuario Modelo Mexicano de Biogás. Versión 2.0. Agencia para la Protección del Ambiente (U.S. EPA) Washington, D.C. Marzo 2009.
- 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.
- Reglamento de la Ley General de Cambio Climático en materia del Registro Nacional de Emisiones.
[http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5365828&fecha=28/10/2014].

Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Agencia de la GIZ en México
Torre Hemicor, PH
Av. Insurgentes Sur No. 826
Col. Del Valle
03100 CDMX, México
T +52 55 5536 2344
E giz-mexiko@giz.de

| www.giz.de/mexico-mx
www.international-climate-initiative.com
www.iki-alliance.mx
www.youtube.com/gizmxclimatechange