

ESTIMACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO GENERADOS POR EL TRATAMIENTO Y DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS: CASO DE ESTUDIO TABASCO

ESTIMATION OF GREENHOUSE GASES GENERATED BY DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT AND DISCHARGE: TABASCO CASE STUDY

Avalos-Martínez J. M.¹, Del Ángel-Meraz- E.^{1*}

¹Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Lic. Ingeniería Química. Carretera Cunduacán-Jalpa KM. 1. Col. La Esmeralda CP. 86690, Cunduacán, Tabasco, México.

*ebelia.delangel@ujat.mx

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es realizar un estudio de estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero para el periodo 2014-2020, para el Sector Desechos, específicamente en el tratamiento de las aguas residuales domésticas, utilizando la metodología y el software del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) en su versión 2006. Las emisiones atribuibles a aguas residuales domésticas estima el metano (CH₄) generado por procesos de tratamiento y descarga de aguas residuales en el estado de Tabasco; los resultados mostraron emisiones de metano en el rango de 6.1–7.6 ± 0.6 Gg de CH₄/año, siendo el año 2018 en donde se generaron más emisiones de este gas; las emisiones el óxido nitroso (N₂O) se mantuvieron en el rango de 0.248–0.283 ±

0.014 Gg de N₂O, las cuales mostraron una tendencia creciente de alrededor del 12% en el año 2020 con respecto al 2014.

Palabras clave: Aguas residuales domésticas, Calentamiento global, Gases de efecto invernadero, Inventario, IPCC.

ABSTRACT

The objective of this research is to carry out an estimation study of greenhouse gas emissions for the period 2014-2020, for the Waste Sector, specifically in the treatment of domestic wastewater, using the methodology and software of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in its 2006 version. The emissions attributable to domestic wastewater estimate methane (CH₄) generated by wastewater treatment and discharge processes in the state of Tabasco; the results showed methane

emissions in the range of $6.1-7.6 \pm 0.625$ Gg of CH_4 /year, being the year 2018 where more emissions of this gas were generated; the nitrous oxide (N_2O) emissions remained in the range of $0.248-0.283 \pm 0.014$ Gg of N_2O , which showed an increasing trend of about 12% in 2020 compared to 2014.

Keywords: Domestic wastewater, Global warming, Greenhouse gases, Inventory, IPCC.

INTRODUCCION

Los inventarios de gases de efecto invernadero (GEI), son una herramienta de gestión ambiental, de acuerdo con la Ley General de Cambio climático, en México estos deben contener información de las emisiones generadas por el Sector Energético, Sector Industrial, Sector Agricultura y el Sector Desechos. Los resultados son esenciales para la toma de decisiones que buscan mitigar el impacto en el medio ambiente de las emisiones de gases de efecto invernadero [1]. En el caso el Sector Desechos este se clasifica en las siguientes categorías: a) Disposición final de residuos sólidos urbanos; b) Tratamiento biológico de residuos sólidos; c) Incineración de

residuos peligrosos y quema de residuos a cielo abierto; d) Tratamiento y descarga de aguas residuales.

A su vez la categoría de Tratamiento y descarga de aguas residuales se clasifica en dos subcategorías: a) Tratamiento y descarga de aguas residuales domésticas y b) Tratamiento y descarga de aguas residuales industriales. La estimación de emisiones de GEI para esta categoría se realiza con información de los procesos de las plantas de tratamiento de agua residuales (PTAR) que hay en el lugar en el cual se quiere realizar el inventario de gases de efecto invernadero [2].

Las aguas residuales (AR) domésticas provienen de las aguas utilizadas en los hogares para fines de limpieza, cocina, baños, etc. La composición de las aguas residuales es muy variable, tanto en cantidad (consumo promedio de agua por habitante y por día) y calidad (hábitos alimenticios de la población) [3].

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales se clasifican en general en procesos aeróbicos propiciando la generación de óxido nitroso; y anaeróbicos propiciando la generación de metano [4].

El tratamiento de aguas residuales es la conversión del agua residual proveniente del uso de las aguas de abastecimiento en un efluente final aceptable a las condiciones del ambiente y la disposición adecuada de los sólidos obtenidos durante el proceso de purificación. Los tipos de tratamiento se agrupan en: tratamiento primario, secundario y terciario [5].

Las aguas residuales domésticas, generadas por la actividad humana de forma cotidiana, están conformadas de dos elementos principales; la parte líquida y un constituyente sólido, también conocido como lodo [3].

El inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015, realizado en el año 2018, por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), estimó que esta categoría de aguas residuales industriales contribuyó con el 12.2% de las emisiones totales del Sector Residuos. Por tipo de GEI, las emisiones de CH₄ contribuyen en promedio, con 91.6% de las emisiones, mientras que el restante 8.4% corresponde a emisiones de N₂O. Las emisiones del periodo entre 1990 y 2015 se duplicaron al pasar de

10,832 a 22,301 Gg de CO₂e con una Tasa de Crecimiento Medio Anual de 2.9% [2].

En el inventario de emisiones de gases de efecto invernadero para el estado de Tabasco durante el periodo 2005-2008 se reportaron emisiones netas de metano de 233.43 Gg de CH₄, en el mismo periodo en el estado de Sinaloa se registraron emisiones totales para ese mismo periodo de 79.03 Gg de CH₄, con una diferencia notable de casi 3 veces en cuanto las emisiones de estado de Sinaloa de metano, comparado con el estado de Tabasco, aunque el estado de Sinaloa tiene un 25% más de población que Tabasco, sin embargo en Tabasco se observa una disminución de las emisiones de metano durante este periodo siendo una reducción de alrededor de un 85% para el año 2008 con respecto al año 2005 [6],[7].

En este trabajo se enfoca a realizar un inventario estatal de gases de efecto invernadero del sector de desechos, específicamente del tratamiento y descarga de las aguas residuales domésticas y a la evolución de las emisiones de gases

de metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) en el periodo 2014-2020.

METODOLOGÍA

La metodología que se utilizó para la estimación de emisiones está basada en el manual y el software del IPCC versión 2006.

Estimación de metano. Para estimar las emisiones de metano nos basamos en la ecuación (1):

$$\text{Emisiones de CH}_4 = \sum_i (EF_i \cdot T_i \cdot TOW) \dots (1)$$

Donde EF_i es el factor de emisión para cada vía o sistema de tratamiento, T_i es el porcentaje de utilización de la vía o sistema de tratamiento y TOW son los compuestos orgánicos degradables.

Utilizando la ecuación 2, se calculan los compuestos orgánicos totales (TOW), en unidades de kg de DBO/año (Demanda bioquímica de oxígeno) multiplicando la suma de las poblaciones de todos los municipios del estado (P_i) para ese año por el componente orgánico degradable (BOD) en kg de BOD /persona/año y el factor de corrección para el BOD industrial eliminado en las cloacas (I).

$$TOW = \sum_i P_i \cdot BOD \times I \dots (2)$$

Se utilizó el valor propuesto por el IPCC para la cantidad de componente orgánico

degradable calculado para México, $BOD = 14.6 \text{ kg}$ de BOD /persona/año y para el factor de corrección para el BOD industrial adicional eliminado en cloacas se supuso que no era recolectado por lo que el valor usado fue de 1.

También se empleó la ecuación 3, que se utiliza para el cálculo del factor de emisión para los sistemas de tratamientos (EF_i) expresado en kg de CH₄/kg de DBO, resultado de la multiplicación de cada factor de corrección de metano utilizado para cada sistema de tratamiento MCF_i por la capacidad máxima de producción de metano (B_0).

$$EF_i = B_0 \cdot MCF_i \dots (3)$$

Los datos usados de la capacidad máxima de producción de metano (B_0) fue el propuesto por el IPCC, igual a 0.6 kg de CH₄/kg de COD, así como el de los factores de corrección para el metano MCF específicos para cada vía de tratamiento como se muestra en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Factores de corrección de metano para algunos tratamientos de aguas residuales.

| Tipo de vía o sistema de tratamiento y eliminación | MCF |
|--|--|
| Planta de tratamiento centralizado aeróbico | 0 – Bien operada 0.3–Mal operada. Sobrecargada |
| Digestor anaeróbico para lodos | 0.8 |
| Reactor anaeróbico | 0.8 |
| Laguna anaeróbica poco profunda | 0.2 |
| Laguna anaeróbica profunda | 0.8 |
| Sistema séptico | 0.5 |

Por último, se integraron en la ecuación 1 los resultados de la ecuación 2 del cálculo de TOW y la ecuación 3 del cálculo de EF_i junto con el grado de utilización de cada sistema de tratamiento (T_i) para obtener las emisiones de CH_4 en kg de CH_4 /año.

Estimación de óxido nítrico. Para realizar el cálculo utilizamos la ecuación 5 para la estimación de emisiones de N_2O .

$$\text{Emisiones de } N_2O = (N_{EFLUENTE} \cdot EF_{EFLUENTE} \cdot \frac{44}{28}) - N_2O_{PLANTAS} \dots \dots \dots (5)$$

Para calcular el $N_{EFLUENTE}$ utilizamos la ecuación 6, la cual se compone en su mayoría por factores, lo cuales fueron obtenidos de los valores por defecto recomendado por el IPCC para la fracción de nitrógeno en las proteínas

($F_{NPR} = 0.16 \text{ kg de N/kg de proteína}$), el factor de las proteínas no consumidas añadidas a las aguas residuales ($F_{NON-CON} = 1.1$), el factor para las proteínas industriales y comerciales coeliminadas en los sistemas de alcantarillado ($F_{IND-COM}$) y el nitrógeno separado con el lodo residual ($N_{LODO} = 0 \text{ kg de N/año}$).

$$N_{EFLUENTE} = (P \cdot \text{Proteína} \cdot F_{NPR} \cdot F_{NON-CON} \cdot F_{IND-COM}) - N_{LODO} \dots \dots \dots (6)$$

Sustituyendo en la ecuación 5 de cálculo de emisiones de N_2O el valor de $N_{EFLUENTE}$ obtenido en la ecuación 6 y multiplicándolo por un factor de emisión ($EF_{EFLUENTE}$) cuyo valor recomendado por el IPCC es $0.005 \text{ kg de } N_2O\text{-N/kg de N}$ y una constante igual a $44/28$ y restándole a ello las emisiones de N_2O provenientes de PTAR cuyo valor por defecto es 0.

RESULTADOS

En la **Tabla 2**, se muestran los resultados obtenidos en fuentes de información del INEGI (2022) sobre la población del estado de Tabasco en el año 2020 [8].

De acuerdo con el análisis de los datos de la **Tabla 2**, en la **Figura 1** se muestran los resultados de los cálculos de TOW .

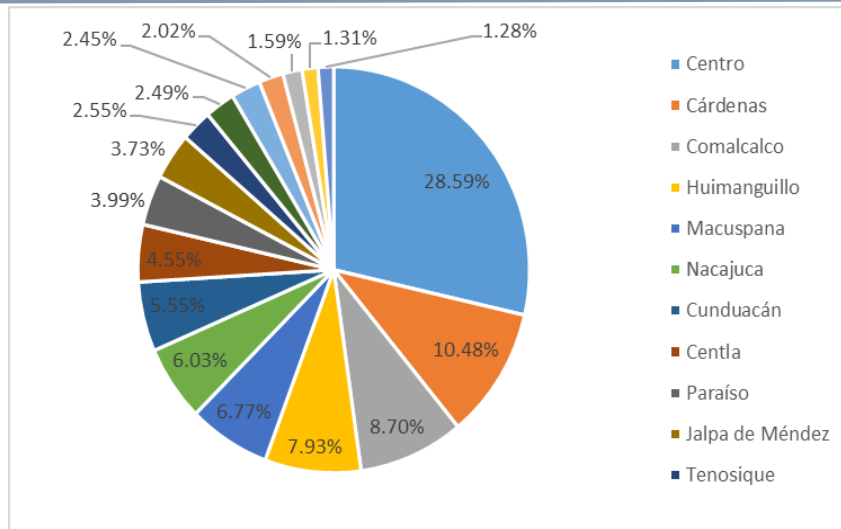


Figura 1.- Promedio de material orgánico degradable en aguas residuales en Tabasco para el periodo 2014-2020 (% TOW).

Tabla 2. Población del estado de Tabasco por municipio en el año 2020.

| Estado | Población |
|-----------------|-----------|
| Balancán | 58524 |
| Cárdenas | 243229 |
| Centla | 107731 |
| Centro | 683607 |
| Comalcalco | 214877 |
| Cunduacán | 137257 |
| Emiliano Zapata | 32181 |
| Huimanguillo | 190885 |
| Jalapa | 37749 |
| Jalpa de Méndez | 91185 |
| Jonuta | 30798 |
| Macuspana | 158601 |
| Nacajuca | 150300 |
| Paraíso | 96741 |
| Tacotalpa | 47905 |
| Teapa | 58718 |
| Tenosique | 62310 |
| Total | 2402598 |

Se puede observar que el municipio que más material orgánico genera en las aguas residuales es el municipio de Centro con un promedio anual de 9989.71 ton de DBO·año⁻¹, lo que significa que aporta más del 28% del material orgánico degradable anual generado en el estado, seguido por Cárdenas con más del 10% y Comalcalco con poco menos del 9%.

En cuanto a las emisiones metano generado por el tratamiento y descarga de aguas residuales estimadas para el estado de Tabasco en el periodo 2014-2020, se notó un bajo crecimiento en la generación de CH₄ un promedio de 6.625 Gg de CH₄·año⁻¹ para este periodo.

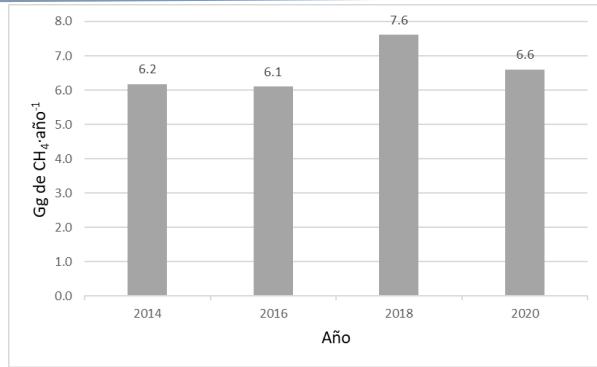


Figura 2. Emisiones netas de metano generadas por el tratamiento de aguas residuales en Tabasco, periodo 2014-2020.

Como se puede observar en la **Figura 2**, se nota un aumento notable en las emisiones de CH₄ en el año 2018 donde se emitieron a la atmósfera un estimado de 7.6 Gg de CH₄ esto podría deberse a que hubo 97 PTAR en operación en el estado de Tabasco, con la mayoría utilizando procesos de tratamiento anaerobio, favoreciendo la generación de este gas.

En cuanto las emisiones de N₂O los datos estimados anuales varían muy poco de un año a otro, teniendo emisiones en el rango de 0.248–0.283 ± 0.014 Gg de N₂O anual en el periodo de estudio 2014-2020, como se muestra en la **Figura 3**.

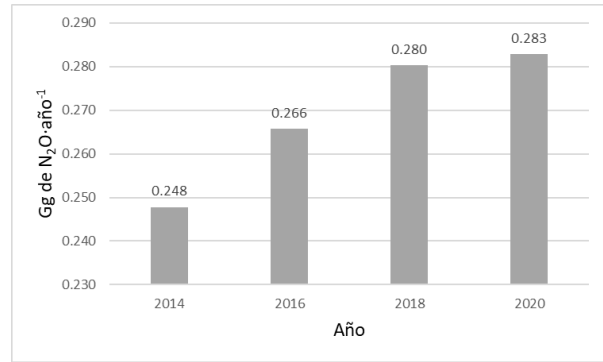


Figura 3. Emisiones de óxido nitroso en Tabasco, periodo 2014-2020.

El aumento de las emisiones está directamente relacionado al consumo de proteína anual per cápita, como se muestra en la **Figura 4**, mostrando una tendencia creciente de alrededor del 12% en el año 2020 con respecto al año 2014 según los datos del Consejo Mexicano de la Carne [9].

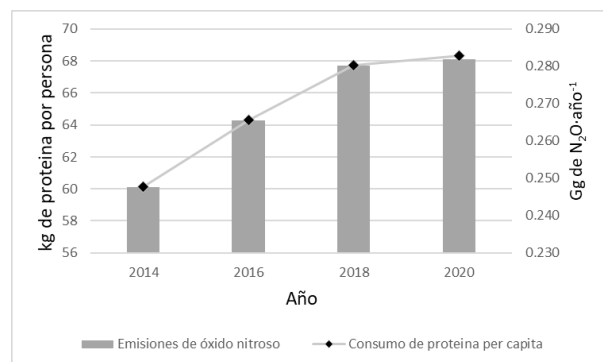


Figura 4. Comparación de las emisiones de N₂O y el consumo de proteína por persona en Tabasco, periodo 2014-2020.

DISCUSIÓN

Aunque el nivel de profundidad usado para esta investigación fue de nivel 1 y la cantidad de variables ajustables es un poco limitada, entre otras razones por la falta de datos específicos para la región, los resultados obtenidos muestran que las acciones de mitigación propuestas en el inventario realizado en 2011 ayudaron a disminuir y controlar las emisiones de GEI en el estado de Tabasco.

Analizado las emisiones de metano y comparando los resultados obtenidos para el periodo 2014-2020 con los obtenidos en inventarios realizados para el estado de Tabasco, para el periodo 2005-2008 las emisiones de metano anuales fueron menores que en años pasados y se mantuvieron estables sin un aumento considerable.

En cuanto a las emisiones de N₂O para el periodo 2014–2018 el crecimiento de las emisiones es lineal y corresponde al crecimiento de consumo de proteína anual por persona para el mismo periodo como se muestra en el Figura 4.

Ya que el valor de los factores usados para el cálculo no varía, la población y el consumo de proteína per cápita son las

únicas variables que afectan significativamente a las mediciones.

CONCLUSIONES

Con la información resumida en la Figura 2, teniendo considerado 2014 como el año base se estimó un promedio de emisiones de 6.625 ± 0.6 Gg de CH₄ o, lo que es igual, 139.1299 ± 12.6015 Gg de CO_{2e} para el tratamiento y descarga de aguas residuales domésticas en el Sector Desechos.

En comparación con el periodo 2005-2008 según los datos reportados en el Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático del Estado de Tabasco se observa una disminución significativa de las emisiones de metano pasando de 19.05 Gg de CH₄ en el año 2008, el cual también fue el año de emisiones más bajas para ese periodo, a tan solo 6.2 Gg de CH₄ en el año 2014 mostrando una disminución en las emisiones estimadas de alrededor de 67%.

En el caso de las emisiones de N₂O y de acuerdo con las estimaciones realizadas en esta investigación, el promedio anual de emisiones fue de 0.269 ± 0.014 Gg de N₂O o de 83.4945 ± 4.3374 Gg en unidades de CO_{2e}. Observándose una

tendencia creciente desde el año base 2014 relacionada al consumo de proteína por persona.

REFERENCIAS

- [1] *Ley General de Cambio Climático*. 2012, p. 66. Accedido: 29 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC.pdf>
- [2] «Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015», Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México, 2018.
- [3] W. K. Fong, M. Sotos, M. Doust, S. Schultz, A. Marques, y C. Deng-Beck, *Protocolo Global para Inventarios de Emisión de Gases de Efecto Invernadero a Escala Comunitaria*. EE. UU.: World Resources Institute, 2014.
- [4] S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, y K. Tanabe, Eds., *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, vol. 5, 5 vols. Japan: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [5] R. Rojas, «Gestión Integral del Tratamiento de Aguas Residuales», presentado en *Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales*, sep. 2002, p. 19.
- [6] L. A. Aceves Navarro, «Programa estatal de acción ante el cambio climático», Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental del Estado de Tabasco, Tabasco, México, oct. 2011.
- [7] C. Covantes Rodríguez y L. M. Flores Campaña, «Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero del Estado de Sinaloa, México», Instituto Nacional de Ecología, Sinaloa, México, oct. 2012.
- [8] «Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)», *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*, 2022. <https://www.inegi.org.mx/> (accedido 3 de septiembre de 2022).
- [9] «Consejo Mexicano de la Carne», *Consejo Mexicano de la Carne*, 2021. <https://comecarne.org> (accedido 15 de septiembre de 2022).

