

Emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del tratamiento de aguas residuales

Greenhouse gas emissions from wastewater treatment



<https://cu-id.com/2377/v31n4e07>

 Ignais de la Caridad Castillo Lemus*,  Rosemary López Lee

Instituto de Meteorología (INSMET), Loma de Casablanca, Regla, La Habana, Cuba, Apdo. 17032, C.P. 11700, Habana 17.
E-mail: rosemary.lopez@insmet.cu

RESUMEN: La cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) procedentes del tratamiento de aguas residuales es fundamental para los inventarios nacionales y la mitigación del cambio climático. Este estudio tuvo como objetivo estimar dichas emisiones para las aguas residuales domésticas e industriales en Cuba durante el período 1990-2022. La metodología aplicada siguió las Directrices del IPCC (2006) de Nivel 1, mediante factores de emisión por defecto. Se calcularon las emisiones de metano (CH_4) a partir de la carga orgánica (expresada en DBO para aguas domésticas y DQO para industriales) y de las fracciones de aguas dirigidas a distintos sistemas de tratamiento o eliminación (lagunas anaeróbicas, fosas sépticas, vertido directo a cuerpos de agua, entre otros). Las emisiones indirectas de óxido nitroso (N_2O) se estimaron en función del consumo humano de proteínas para los efluentes descargados en medios acuáticos. Los resultados mostraron que las emisiones totales en 2022 fueron de 1936.59 kt de $\text{CO}_2\text{-eq}$, lo que representa un aumento del 1.31% respecto a 1990. Se evidenció una disminución de las emisiones industriales debido al limitado desarrollo del sector, pero un aumento de las emisiones domésticas y de N_2O asociado a una mayor cobertura de saneamiento y vertidos. Se concluyó que el CH_4 fue el GEI predominante y que, si bien las emisiones cubanas son menores que las mundiales, es necesario potenciar sistemas de tratamiento más eficientes y de bajas emisiones para contribuir a la mitigación climática.

Palabras clave: Metano, IPCC, alcantarillado, saneamiento, lodos.

ABSTRACT: Quantifying greenhouse gas (GHG) emissions from wastewater treatment is fundamental for national inventories and climate change mitigation. This study aimed to estimate these emissions for domestic and industrial wastewater in Cuba during the period 1990-2022. The methodology followed the IPCC Level 1 Guidelines (2006), using default emission factors. Methane (CH_4) emissions were calculated from the organic load (expressed as BOD for domestic wastewater and COD for industrial wastewater) and the fractions of wastewater directed to different treatment or disposal systems (anaerobic lagoons, septic tanks, direct discharge into water bodies, among others). Indirect nitrous oxide (N_2O) emissions were estimated based on human protein consumption for effluents discharged into aquatic environments. The results showed that total emissions in 2022 were 1936.59 kt of $\text{CO}_2\text{-eq}$, representing a 1.31% increase compared to 1990. A decrease in industrial emissions was observed due to the sector's limited development, but an increase in domestic emissions and N_2O emissions was associated with greater sanitation coverage and wastewater disposal. It was concluded that CH_4 was the predominant GHG and that, while Cuban emissions are lower than global averages, it is necessary to promote more efficient, low-emission treatment systems to contribute to climate mitigation.

Keywords: Methane, IPCC, sewage, sanitation, sludge.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático constituye la mayor amenaza medioambiental que enfrenta la humanidad. Sus alteraciones ocurren con una velocidad e intensidad sin precedentes. Esta problemática es una realidad

con implicaciones inevitables, aunque aún es posible mitigar sus consecuencias más severas. Solo una acción enérgica y duradera para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) puede limitar su alcance (OMM, 2020).

*Autor para la correspondencia: Ignais de la Caridad Castillo Lemus. E-mail: ignais@gmail.com

Recibido: 11/06/2025

Aceptado: 12/11/2025

Conflicto de intereses: Las autoras declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores: Curación de datos; Análisis formal; Investigación; Redacción - borrador original: Ignais de la Caridad Castillo Lemus. Redacción - revisión y edición: Ignais de la Caridad Castillo Lemus, Rosemary López Lee. Conceptualización; Supervisión; Metodología: Rosemary López Lee.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Una de las fuentes más importantes de emisiones de GEI a nivel mundial corresponde al tratamiento y la eliminación de aguas residuales. Estas aguas representan una fuente de metano (CH_4) cuando reciben tratamiento o se eliminan en condiciones anaerobias. También son una fuente de óxido nítrico (N_2O) cuando se procesan en una planta o se descargan en un cuerpo de agua, según las directrices del *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (Pipatti et al., 2006).

Se definen como aguas residuales domésticas aquellas generadas en asentamientos poblacionales, escuelas, instalaciones turísticas, edificios públicos y centros comerciales. Su composición se basa fundamentalmente en desechos de origen humano. Estas aguas suelen transportarse mediante alcantarillas abiertas o cerradas con el fin de recibir tratamiento en plantas centralizadas, letrinas de hoyo o sistemas sépticos. Una alternativa es su eliminación en lagunas no gestionadas o en vías fluviales. En ciertas ciudades costeras, las aguas residuales domésticas se vierten directamente al océano (Pipatti et al., 2006).

Se definen como aguas residuales industriales aquellas que se originan de forma exclusiva a partir de procesos industriales. Su composición y su contenido de materia orgánica degradable presentan variaciones que dependen del tipo de actividad productiva. La estimación del potencial de producción de metano (CH_4) se fundamenta en la concentración de esta materia orgánica, en el volumen de agua generado y en la tendencia del sector industrial a tratar sus efluentes. Estas aguas pueden recibir tratamiento *in situ* o pueden descargarse en los sistemas de alcantarillado de uso doméstico (Pipatti et al., 2006).

En Cuba, la normativa que regula esta materia incluye la Norma Cubana NC 27:2012 (ONN, 2012), sobre el "Vertimiento de Aguas Residuales a las Aguas Terrestres y al Alcantarillado". De forma complementaria, se aplica la Norma Cubana NC 521:2007 (ONN, 2007), relativa al "Vertimiento de Aguas Residuales a la Zona Costera y Aguas Marinas". Ambas normas establecen los límites y especificaciones técnicas para los vertidos de efluentes a los cuerpos de agua continentales, al sistema de alcantarillado, a las zonas costeras y al mar. Su ámbito de aplicación abarca todas las aguas residuales generadas por las actividades sociales y económicas del país.

La categoría de tratamiento y eliminación de aguas residuales constituye una parte clave del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) de Cuba. Esto implica que su estimación ejerce una influencia significativa sobre el inventario total, ya sea en el nivel absoluto de emisiones, en su tendencia temporal o en el grado de incertidumbre asociado, como se señala en la comunicación nacional (República de Cuba, 2020). La mejora de los procedimientos de recolección de datos de actividad,

según las directrices del IPCC (Pipatti et al., 2006), permite estimar las emisiones de GEI con mayor transparencia y exactitud. Este avance es un requisito fundamental del Marco de Transparencia Reforzado (MTR) establecido por el Acuerdo de París.

A pesar de su relevancia, existen limitaciones en la disponibilidad de datos de actividad que permitan una estimación exhaustiva, precisa y transparente de estas emisiones en el contexto cubano. En consecuencia, el objetivo principal de este estudio fue estimar las emisiones de gases de efecto invernadero que derivan de los diferentes tratamientos aplicados a las aguas residuales domésticas e industriales en Cuba. El análisis abarca la serie temporal completa desde el año 1990 hasta el 2022.

MATERIALES Y MÉTODOS

La estimación de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) procedentes de aguas residuales se realizó mediante una metodología de Nivel 1 y factores de emisión por defecto. Este procedimiento se ajusta a lo establecido en el Volumen 5, Capítulo 6, de las Directrices del IPCC (Pipatti et al., 2006). El período de estudio abarcó la serie temporal completa desde 1990 hasta 2022 e incluyó todo el territorio nacional de Cuba.

Las emisiones de metano (CH_4) de las aguas residuales domésticas se calcularon a partir de cuatro fuentes principales. La primera fuente corresponde a las aguas recolectadas y tratadas mediante procesos anaeróbicos, como las lagunas facultativas. También se consideraron las aguas residuales colectadas que se evacúan directamente a un cuerpo de agua, específicamente al mar. El cálculo incluyó además las aguas residuales no recolectadas que reciben tratamiento *in situ*, como las fosas sépticas y las letrinas. Por último, se tuvieron en cuenta las aguas residuales no colectadas que se descargan en cuerpos de agua continentales, como los ríos. Adicionalmente, se calcularon las emisiones indirectas de óxido nítrico (N_2O) derivadas del consumo humano de proteínas para todos los efluentes que se descargan en cuerpos de agua.

La estimación de las emisiones de CH_4 de las aguas residuales industriales sigue una metodología similar a la empleada para las domésticas. Sin embargo, esta metodología se basa en la Demanda Química de Oxígeno (COD, por sus siglas en inglés) y no en la Demanda Bioquímica de Oxígeno (BOD, por sus siglas en inglés). Las emisiones se calcularon específicamente para las aguas residuales industriales que reciben tratamiento *in situ* en cada sector identificado con un alto potencial de generación de CH_4 . De acuerdo con las Directrices del IPCC (Pipatti et al., 2006), las emisiones de N_2O de las aguas residuales industriales se consideran insignificantes; por esta razón, no se calcularon en el presente estudio.

Una vez estimadas las emisiones, se informaron los valores de GEI de forma agregada, expresados en kilotoneladas (kt) de dióxido de carbono equivalente (CO₂-eq). Para obtener estos valores, se multiplicaron las emisiones (en unidades de masa) de cada gas por su respectivo Potencial de Calentamiento Global (PCG). En Cuba se aplican, por convenio, los valores del PCG incluidos en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (Pachauri & Meyer, 2014) para un horizonte temporal de cien años. Los factores utilizados son un PCG de 28 para el CH₄ y un PCG de 265 para el N₂O.

Datos de actividad estadísticos y paramétricos para el cálculo de las emisiones de CH₄

Para el cálculo de las emisiones de CH₄ provenientes de aguas residuales domésticas se consideraron tanto las aguas colectadas mediante la red de alcantarillado como las no colectadas. La variable de actividad empleada fue la cantidad total de materia orgánica en el agua (TOW, por sus siglas en inglés). La determinación de esta variable se realizó con la siguiente ecuación:

$$TOW = P \cdot BOD \cdot 0,001 \cdot I \cdot 365 \quad (1)$$

Donde:

TOW = Total de materia orgánica en las aguas residuales domésticas del año del inventario, kg de BOD/año

P = Población del país en el año inventario, personas

BOD = emanda Bioquímica de Oxígeno *per cápita* específico del país en el año correspondiente, g/persona/día

0,001 = Factor de conversión de gramos de BOD a kilogramos de BOD

I = Factor de corrección para BOD industrial que se vierte al alcantarillado junto a las aguas residuales domésticas

Los datos de población residente anual requeridos para la estimación procedieron de la serie oficial proporcionada por la Oficina Nacional de Estadísticas e Información (Tabla 3.5, página 92, ONEI, 2023). El valor de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) utilizado en este informe corresponde al valor por defecto para los países de América Latina, establecido en 40,00 g por persona y por día (Tabla 6.4, Capítulo 6, Volumen 5, página 6.14, Directrices del IPCC (Pipatti et al., 2006).

Para el factor de corrección (*I*) se adoptó el valor de 1,25 para las aguas colectadas y el valor de 1,00 para las aguas no colectadas (Ecuación 6.3, Capítulo 6, Volumen 5, página 6.14, Directrices del IPCC (Pipatti et al., 2006). Este factor representa el DBO adicional generado por la actividad de industrias y establecimientos comerciales, como restaurantes, cuyas aguas residuales se descargan en el sistema de alcantarillado junto con las aguas domésticas.

El cálculo de las emisiones de CH₄ de aguas residuales industriales empleó como variable de actividad el TOW para cada sector industrial (*i*). La ecuación aplicada para su determinación fue la siguiente:

$$TOW_i = P_i \cdot W_i \cdot COD_i \quad (2)$$

Donde:

TOW_i = Total de materia orgánica en las aguas residuales de la industria *i* del año del inventario, kg de COD/año

P_i = Producto industrial total del sector industrial *i*, t/año

W_i = aguas residuales generadas, m³/t_{producto}

COD_i = Demanda Química de Oxígeno, kg de COD/m³

i = Sector industrial

Los datos sobre la producción industrial (*P_i*) para cada sector con alto potencial de generación de CH₄ se obtuvieron de la ONEI. En la tabla 1 se presentan los valores por defecto del IPCC para la generación de aguas residuales por sector (*W_i*) y para la Demanda Química de Oxígeno (COD) (Tabla 6.9, Capítulo 6, Volumen 5, página 6.25, Directrices del IPCC (Pipatti et al., 2006).

Tabla 1. Generación de aguas residuales (*W*) y Demanda Química de Oxígeno (COD) por tipo de industria

Tipo de industria	W (m ³ /t)	COD (kg/m ³)
Conservas de frutas	20,00	5,00
Malta y cerveza	6,30	2,90
Vino	23,00	1,50
Carnes y aves	13,00	4,10
Productos lácteos	7,00	2,70
Refinación de azúcar	11,00	3,20
Procesamiento del pescado	13,00	2,50
Aceites vegetales y grasas	3,10	0,85
Rones	24,00	11,00
Pulpa y papel	162,00	9,00
Detergentes	2,50	0,80
Refinería de petróleo	0,60	1,00

Fuente: IPCC (2006)

Factores de emisión empleados para el cálculo de las emisiones de CH₄

El análisis de la distribución de las aguas residuales domésticas según el tipo de sistema de tratamiento y eliminación permitió obtener los factores de emisión correspondientes. Para el cálculo se utilizó la siguiente ecuación:

$$EF_j = B_o \cdot MCF_j \quad (3)$$

Donde:

EF_j = factor de emisión para una vía o sistema de tratamiento y eliminación de aguas residuales domésticas *j*, kg de CH₄/kg de BOD

B_o = capacidad máxima de producción de CH_4 , kg de CH_4 /kg de BOD

MCF_j = factor corrector para el CH_4 para la vía o sistema de tratamiento j

El factor de emisión (EF , por sus siglas en inglés) se calculó con los valores por defecto para la capacidad máxima de producción de CH_4 (B_o) de 0,60 kg de CH_4 /kg de DBO (Tabla 6.2, Capítulo 6, Volumen 5, página 6.12, Directrices del IPCC (Pipatti et al., 2006)). También se utilizó el factor corrector para el CH_4 (MCF) (Tabla 6.3, Capítulo 6, Volumen 5, página 6.13, Directrices del IPCC (Pipatti et al., 2006)). En la tabla 2 se muestran los valores de MCF y los EF aplicados para cada sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas.

Tabla 2. Valor de MCF y factor de emisión por sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas

Tipo de vía o sistema de tratamiento	MCF	EF_j
Laguna anaeróbica profunda	0,80	0,48
Fosas sépticas	0,50	0,30
Letrina (clima húmedo)	0,70	0,42
Cuerpo de agua (mar o río)	0,10	0,06

Fuente: IPCC (2006)

A partir del análisis de las vías y los sistemas de tratamiento que emplea cada sector industrial, se obtuvieron los factores de emisión necesarios. Cada factor de emisión depende de la capacidad máxima de producción de CH_4 y del factor corrector para el CH_4 promedio ponderado de la industria respectiva. Para este cálculo se utilizó la misma ecuación que en las aguas residuales domésticas (3), con la diferencia de que el potencial de producción de metano (B_o) se expresó en kilogramos de CH_4 por kilogramo de DQO .

Los factores de emisión (EF_j) se calcularon con valores por defecto. Para el parámetro B_o se empleó un valor de 0,25 kg de CH_4 /kg de DQO , según el Capítulo 6, Volumen 5, página 6.23 de las Directrices del IPCC (Pipatti et al., 2006). El MCF se tomó de la Tabla 6.8 en la misma referencia. En la tabla 3 se presentan los valores de MCF , así como los factores de emisión empleados para cada sistema de tratamiento de las aguas residuales domésticas.

La fracción de los efluentes industriales tratados *in situ* en cada sector industrial, así como el tipo de tratamiento que reciben, fue obtenida de cada una de las industrias o de los ministerios responsables. Estos datos se resumen en la tabla 4.

Tabla 3. Valor de MCF y factor de emisión por sistema de tratamiento de las aguas residuales industriales

Tipo de vía o sistema de tratamiento	MCF	EF_j
Planta de tratamiento aeróbico bien operada	0,00	0,00
Planta de tratamiento aeróbico mal operada	0,30	0,08
Laguna anaeróbica profunda	0,80	0,20

Fuente: IPCC (2006)

Tabla 4. Fracción de las aguas residuales industriales tratadas en Cuba por tipo de tratamiento y sector industrial

Sector Industrial	Tratadas en:		
	Lagunas anaeróbicas	Plantas aeróbicas	Plantas aeróbicas mal operadas
Conservas de frutas ¹	0,38	-	-
Malta y cerveza ¹	0,44	-	-
Vino ¹	0,11	-	-
Carnes y aves ¹	0,44	0,05	-
Productos lácteos ¹	0,34	0,14	-
Refinación de azúcar ²	1,00	-	-
Procesamiento del pescado ¹	0,55	-	-
Aceites vegetales y grasas ¹	0,25	-	-
Rones ¹	0,33	0,16	-
Pulpa y papel ³	-	-	0,33
Detergentes ⁴	-	-	1,00
Refinería de petróleo ⁵	0,75	0,25	-

Fuente: 1- OSDE Agroalimentaria y Ministerio de la Industria Alimentaria (MINAL); 2- AZCUBA; 3- Ministerio de Industrias (MINDUS); 4- Suchel Camacho S,A; 5- Unión Cuba Petróleo, Ministerio de Energía y Minas (CUPET, MINEM)

Las emisiones de CH_4 estimadas para las aguas residuales domésticas se calcularon mediante la sumatoria de los productos de tres elementos: los factores de emisión, las cargas orgánicas y los grados de utilización de cada tipo de tratamiento. Este método permite consolidar la contribución de cada sistema de tratamiento a las emisiones totales.

$$\text{Emisiones de } CH_4 = \left[\sum_{ij} (U_i \cdot T_{ij} \cdot EF_j) \right] \cdot (TOW - S) - R \quad (4)$$

Donde:

Emisiones de CH_4 = Emisiones neta de CH_4 , kt de CH_4

U_i = Fracción de la población del grupo de ingresos i en el año de inventario

T_{ij} = Grado de utilización de vía o sistema de tratamiento j , para cada fracción de grupo de ingreso i , en el año del inventario

EF_j = Factor de emisión para la vía o sistema de tratamiento j , kg de CH_4 /kg de DBO

TOW = Total de materia orgánica en las aguas residuales domésticas del año del inventario, kg de BOD/año

S = Componente orgánico separado como lodos durante el año de inventario, kg BOD/año

R = Cantidad de CH_4 recuperado y/o quemado en antorcha durante el año del inventario, kg de CH_4 /año

La fracción de la población de cada grupo de ingresos (U_i) se calculó a partir de los datos de población total urbana y rural de las estadísticas nacionales (Tabla 3.5, página 92, ONEI, 2023). El grado de utilización (T_{ij}) correspondió a la proporción de residentes urbanos y rurales cuyas aguas residuales domésticas recibieron un tratamiento específico. Los sistemas considerados incluyeron lagunas facultativas, fosas sépticas, letrinas o la descarga directa a un cuerpo de agua, según datos del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH).

Las emisiones de CH_4 estimadas para las aguas residuales industriales se determinaron mediante un procedimiento similar. Este resultado se constituyó por la sumatoria de los productos de la carga orgánica y el factor de emisión correspondiente a cada sector industrial:

$$\text{Emisiones de } CH_4 = \sum [(TOW_i - S_i) \cdot EF_j - R_i] \quad (5)$$

Donde:

Emisiones de CH_4 = Emisiones de CH_4 durante el año de inventario, kg de CH_4 /año

TOW_i = Total de materia orgánica en las aguas residuales de la industria i del año del inventario, kg de COD/año

S_i = Componente orgánico separado como lodo durante todo el año de inventario para el sector industrial i , kg de COD/año

R_i = Cantidad de CH_4 recuperada durante el año del inventario por el sector industrial i , kg de CH_4 /año

EF_j = Factor de emisión para la vía o sistema de tratamiento j , kg de CH_4 /kg de COD. Si en una industria se utiliza más de un tipo de tratamiento, este factor debe corresponder a un promedio ponderado

No se pudo recolectar información específica sobre el componente orgánico separado como lodo (S_i). Tampoco se obtuvo dato alguno sobre la cantidad de CH_4 recuperada (R_i). Por esta razón, se empleó el valor por defecto de 0 para ambos parámetros en los cálculos, tanto para las aguas domésticas como para las industriales.

Emisiones indirectas de N_2O

En Cuba no se implementa el proceso de nitrificación y desnitrificación en sistemas centralizados de plantas de tratamiento. Por consiguiente, las emisiones de N_2O se generan después de la descarga de los efluentes en vías fluviales, lagos o en el mar. Para la estimación de estas emisiones indirectas de N_2O se aplicó la ecuación correspondiente:

$$\text{Emisiones de } N_2O = N_{\text{efluentes}} \cdot EF_{\text{efluentes}} \quad (6)$$

Donde:

Emisiones N_2O = Emisiones de N_2O durante el año del inventario, kg de N_2O /año

$N_{\text{efluentes}}$ = Nitrógeno en el efluente eliminado en medios acuáticos, kg de N/año

$EF_{\text{efluentes}}$ = Factor de emisión para las emisiones de N_2O provenientes de las descargas de aguas servidas, kg de N_2O -N en kg de N_2O

El factor corresponde a la conversión de kg de 44/28 N_2O -N en kg de N_2O

La variable de actividad para este cálculo es el factor $N_{\text{efluentes}}$. Este factor representa la cantidad total anual de nitrógeno presente en los efluentes de aguas residuales. Su determinación se realizó mediante la aplicación de una ecuación específica:

$$N_{\text{efluentes}} = (P \cdot \text{Proteína} \cdot F_{NPR} \cdot F_{NON - CON} - F_{IND - COM}) - N_{\text{Lodo}} \quad (7)$$

Donde:

$N_{\text{efluentes}}$ = cantidad total anual de nitrógeno en los efluentes de aguas residuales, kg de N_2O /año

P = población humana

Proteína = consumo per cápita anual de proteínas, kg/persona/año

F_{NPR} = fracción de nitrógeno en las proteínas, por defecto = 0,16 kg de N/kg de proteína

$F_{NON - CON}$ = factor de las proteínas no consumidas añadidas a las aguas residuales (por defecto = 1,10)

$F_{IND - COM}$ = factor para las proteínas industriales y comerciales co-eliminadas en los sistemas de alcantarillado (por defecto = 1,25)

N_{Lodo} = nitrógeno separado con el lodo residual (por defecto = 0), kg de N/año

Los datos de población utilizados procedieron de los informes oficiales de la ONEI. Para el consumo anual de proteína per cápita se asumió el valor del suministro de proteínas de la base de datos de la FAO. Dicho valor se multiplicó por la fracción de proteínas consumidas para América Latina, la cual es 0.92 según las recomendaciones del Refinamiento de las Directrices del IPCC de 2019 (Calvo Buendía et al., 2019).

La base de datos FAOSTAT de la FAO proporcionó una serie anual de valores para el periodo 1990-2013 (FAO, 2013). Para el periodo 2014-2018, en cambio, suministró una serie de valores estimados correspondientes a un promedio de tres años (FAOSTAT, 2021). Los datos para los años 2019, 2020, 2021 y 2022 se completaron mediante técnicas de extrapolación a partir de las series disponibles.

El factor de emisión de N₂O se seleccionó con base en los valores por defecto de la metodología para N₂O de las Directrices del IPCC (Pipatti et al., 2006). Para el caso específico de los efluentes, este factor corresponde a un valor de 0,005 kg de N₂O-N por kg de N. Este coeficiente se aplicó de manera uniforme en todas las estimaciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Vías y sistemas de tratamiento y eliminación de aguas residuales domésticos identificados

La figura 1 muestra los sistemas de tratamiento y las vías de eliminación que se identificaron en Cuba para las aguas residuales domésticas entre 1990 y 2022. En las zonas urbanas, la fracción de las aguas recolectadas por el alcantarillado que recibió tratamiento se dirigió hacia lagunas facultativas con una profundidad entre 1,5 y 3 metros. El resto de las aguas recolectadas por este sistema recibió únicamente un tratamiento primario. Este proceso consistió en la separación de los sólidos más voluminosos mediante barreras físicas. Las aguas resultantes se evacuaron luego a través de un emisario submarino. Por otra parte, las aguas que no ingresaron a la red de alcantarillado se trataron mayoritariamente en sistemas sépticos.

En las zonas rurales, el tratamiento de las aguas residuales recolectadas por alcantarillado fue prácticamente nulo o muy limitado. La mayoría de estos efluentes se vertieron directamente a los ríos. Para las aguas no conectadas al alcantarillado, el sistema de tratamiento principal consistió en fosas sépticas. En una proporción menor, se emplearon letrinas.

Además, se identificó una fracción de la población, tanto urbana como rural, que careció de acceso a cualquier cobertura de saneamiento. Para este segmento, se asumió que sus aguas residuales se depositaron de manera directa en un cuerpo de agua.

En la figura 2 se presenta el comportamiento de las aguas residuales tratadas en Cuba, en contraste con las no tratadas, durante la serie de 1990 a 2022. Los primeros años de la serie mostraron una tendencia ascendente en el volumen total de aguas residuales tratadas. Entre 1993 y 1995 se evidenció una disminución en el tratamiento, producto de las coyunturas económicas del país, pero la tendencia general continuó en ascenso con pequeñas fluctuaciones interanuales.

A partir del año 2000, se inició en el país un proceso de reorganización del INRH. Este proceso dio paso a la creación del Grupo Empresarial de Acueducto y Alcantarillado (GEAAL) en 2002.

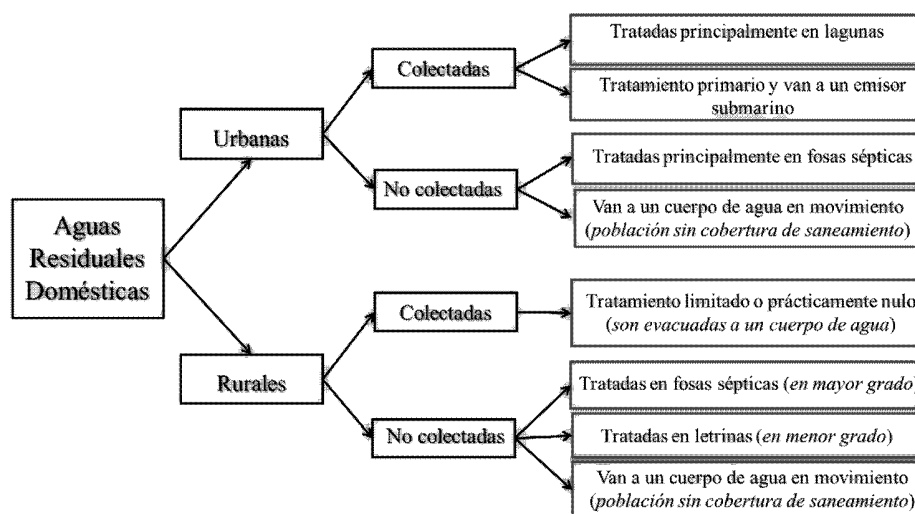


Figura 1. Sistemas de tratamiento y vías de eliminación de las aguas residuales domésticas en Cuba

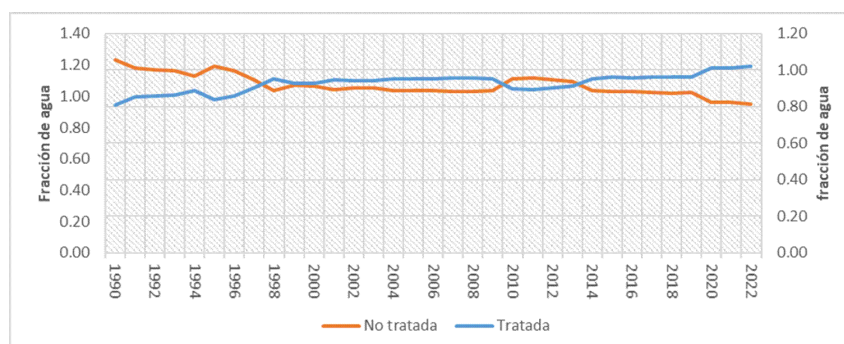


Figura 2. Evolución de las aguas residuales domésticas tratadas y no tratadas en Cuba. Serie 1990 - 2022

Como consecuencia directa de esta reorganización, se observó un aumento considerable en el total de aguas tratadas.

La explotación prolongada de la infraestructura de saneamiento, que careció del mantenimiento adecuado y necesario, provocó una disminución en el tratamiento de aguas residuales para el año 2009. Un punto de inflexión ocurrió con la aprobación de los lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución, lo que condujo a la elaboración de la Política Nacional del Agua. Dicha política, aprobada por el Consejo de Ministros en diciembre de 2012, encauzó la gestión del agua en Cuba y sus efectos positivos se reflejaron en 2013 con una mejora en los volúmenes totales tratados.

En 2019, como parte del proceso de perfeccionamiento empresarial, cambió la denominación de GEAAL mediante la Resolución 138-2019 del Ministerio de Economía y Planificación. La nueva entidad se nombró Grupo Empresarial de Agua y Saneamiento. Desde ese momento, la cobertura de saneamiento en el país ha mantenido un aumento constante.

Para el año 2022, la OSDE contaba con 29 empresas especializadas. Estas empresas tenían a su cargo la colección y el tratamiento de aguas residuales, así como la desobstrucción, reparación y sustitución de sistemas sépticos. Sus funciones también incluían el saneamiento de arroyos y cañadas, además de la evacuación de las aguas residuales.

Sectores industriales y sistemas de tratamiento y eliminación de aguas residuales identificados

Se identificaron los sectores industriales que generan flujos de aguas residuales con cargas de carbono. Estas aguas se trataron bajo condiciones anaeróbicas. Para estos casos, las Directrices del IPCC

(Pipatti et al., 2006) proporcionan valores por defecto aplicables:

- Producción de bebidas alcohólicas (incluye: producción de rones, producción de maltas y cervezas y producción de vinos).
- Producción de alimentos (incluye: productos lácteos con excepción del helado y las mantequillas, procesamiento de carnes incluidas las aves, procesamiento de pescados incluidos los mariscos y producción de aceites vegetales y grasas animales).
- Refinación del azúcar.
- Producción de pulpa y papel.
- Refinación del petróleo (incluye: todos los derivados).
- Producción de detergentes.

En el período estudiado, que abarca de 1990 a 2022, solo una parte de las aguas residuales industriales recibió tratamiento en sistemas de gestión. Los sistemas de tratamiento y eliminación consistieron principalmente en lagunas anaeróbicas profundas y en algunas plantas de tratamiento que operaron cada año. El resto de las aguas pasó por un pretratamiento con barreras físicas para separar grasas y sólidos voluminosos; posteriormente, se vertieron a un cuerpo de agua en movimiento. La información sobre la fracción de aguas residuales tratadas y el tipo de tratamiento para cada sector industrial se obtuvo directamente de las empresas correspondientes, tal como se presenta en la figura 3.

La figura 4 muestra el comportamiento del total de materia orgánica degradable (TOW) presente en las aguas residuales industriales de Cuba. Estos datos se agrupan según los procesos industriales que contienen la mayor carga orgánica en sus efluentes.

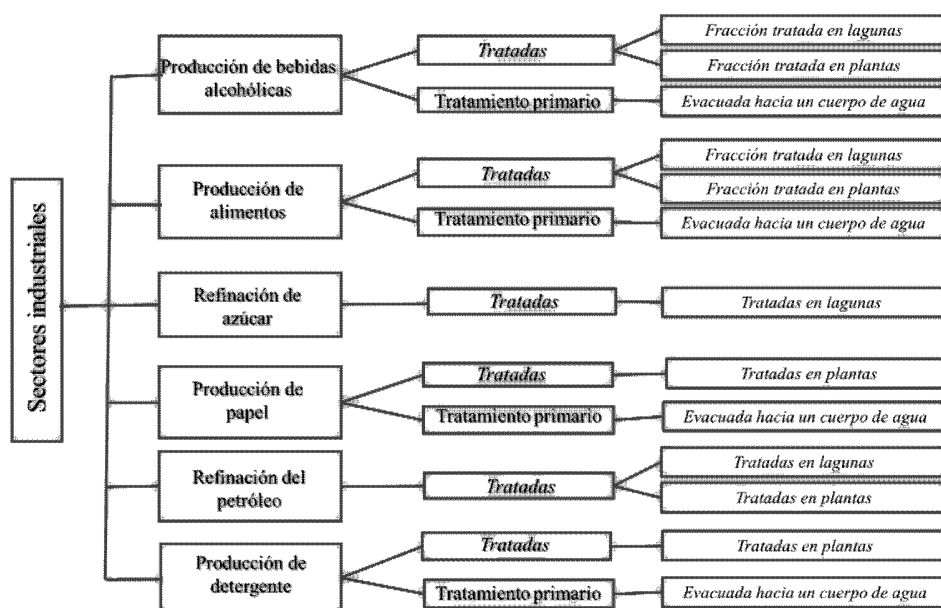


Figura 3. Sectores industriales y sistemas de gestión de sus aguas residuales colectadas

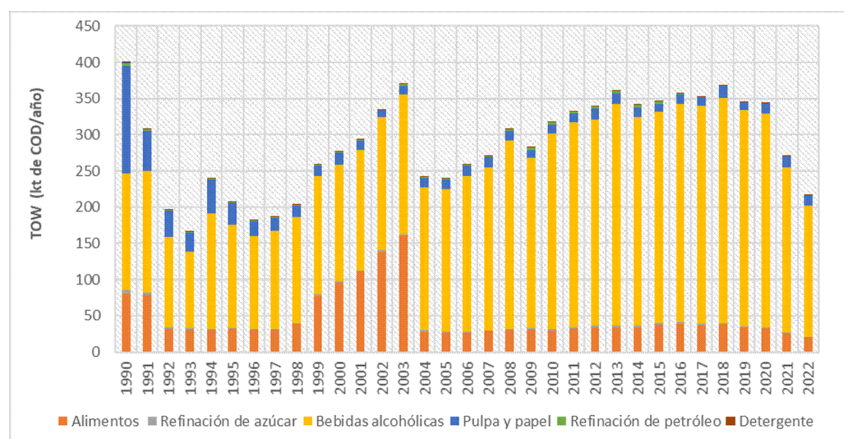


Figura 4. Total de la materia orgánica degradable (TOW) de las aguas residuales industriales generadas en Cuba. Serie 1990-2022

Durante la década de 1990, se observan reducciones notables del TOW, una consecuencia directa de la crisis económica que afectó al país. Dicha crisis provocó una depresión del sector industrial y una caída en los niveles de producción.

A partir de entonces, la carga contaminante generada continuó su variación en respuesta a las condiciones adversas que enfrenta la industria cubana. En el quinquenio 1999-2003, el TOW presentó una disminución, mientras que en los años posteriores experimentó un aumento gradual. La producción industrial volvió a decaer en el año 2021, debido a las restricciones económicas derivadas de las medidas para contener la pandemia de COVID-19.

Un análisis desglosado por industrias revela que la producción de bebidas alcohólicas es el sector que genera aguas residuales con el contenido más alto de materia orgánica degradable. A lo largo de toda la serie temporal, este sector ha mostrado una tendencia al aumento del TOW. Este incremento se deriva del crecimiento en las producciones de ron, cervezas y vinos.

Emisiones totales de GEI procedentes del tratamiento y eliminación de aguas residuales

La [figura 5](#) muestra las emisiones derivadas del tratamiento y eliminación de aguas residuales en Cuba durante el período 1990-2022. Entre 1992 y 1997,

la serie mantuvo una tendencia a la disminución con fluctuaciones pequeñas. Esta tendencia se debió principalmente a la reducción en el volumen de aguas residuales industriales tratadas. Posteriormente, entre 1998 y 2002, se observó una tendencia ascendente en respuesta al aumento del volumen de aguas residuales industriales tratadas.

En el año 2004, las producciones industriales en el país disminuyeron y, con ello, la generación de aguas residuales. Esta situación derivó en una disminución de las emisiones. A partir de ese momento se observó un aumento gradual con pequeñas variaciones, el cual se vinculó con cambios en la generación de aguas residuales industriales y, en menor medida, con el tratamiento de las domésticas.

A partir de 2020, la cobertura de saneamiento en el país mejoró y aumentaron las emisiones derivadas de las aguas domésticas. Sin embargo, la disminución de las producciones industriales provocó que las emisiones totales se redujeran en 2021 y 2022. Aun así, las emisiones de GEI en 2022 contabilizaron un total de 1936.59 kt de CO₂-eq, valor que representó un aumento del 1.31% respecto a 1990.

Al comparar con el año base 1990, se observa que en 2022 las emisiones de aguas residuales industriales habían disminuido, mientras que las emisiones de aguas residuales domésticas habían aumentado ([Figura 6](#)). La disminución identificada se debió al limitado desarrollo industrial,

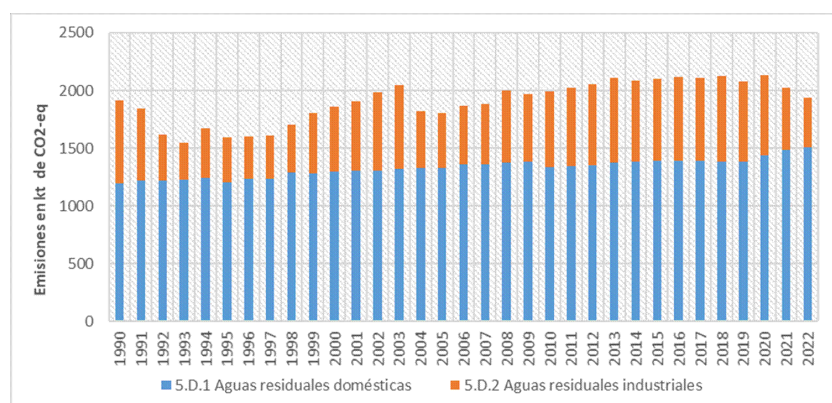


Figura. 5. Emisiones de GEI (kt de CO₂-eq) procedentes del tratamiento y eliminación de aguas residuales. Serie 1990-2022

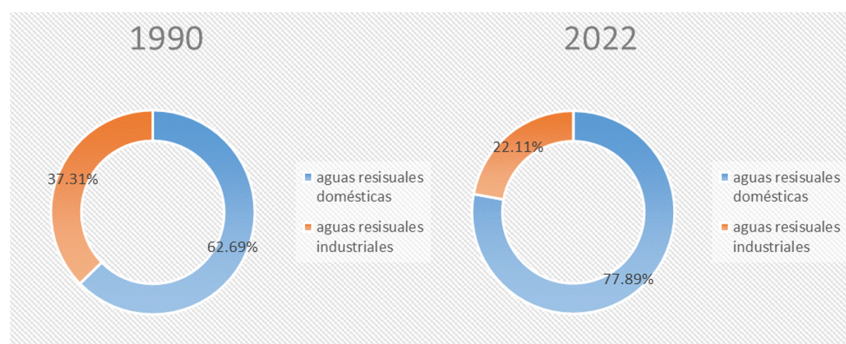


Figura 6. Emisiones de GEI (kt de CO₂-eq) procedentes del tratamiento y eliminación de aguas residuales domésticas e industriales en el año base (1990) y en el año inventariado (2022)

la caída de las producciones en cada uno de los sectores y la consecuente reducción de la generación de aguas residuales industriales. Por otra parte, el incremento en las emisiones de GEI de las aguas residuales domésticas se debió al aumento de la cobertura de saneamiento en el país.

El análisis del comportamiento de las emisiones por tipo de gas reveló que, durante toda la serie temporal, el CH₄ fue el GEI con mayor emisión por parte del tratamiento y eliminación de aguas residuales (Figura 7). Esto se debe a que las emisiones de N₂O cuantificadas solo se producen cuando los efluentes de aguas residuales domésticas se vierten a lagunas, lagos, estuarios o el mar. En contraste, las emisiones de CH₄ se producen en todos los tipos de tratamiento o vías de eliminación que se incluyen en el inventario.

Al comparar los resultados con los del año base, se identificó un incremento de las emisiones de N₂O para el año 2022. Este aumento fue de aproximadamente un 2%, tal como se muestra en la figura 8. Dicho incremento se atribuye al mayor volumen total de aguas residuales domésticas que se colectaron en alcantarillado y que posteriormente se vertieron a los cuerpos de agua.

CONCLUSIONES

El tratamiento de aguas residuales domésticas en Cuba presenta diferencias entre zonas urbanas y rurales. En áreas urbanas predominan el alcantarillado con tratamiento primario o en lagunas,

mientras que en las rurales el sistema de alcantarillado es muy limitado o inexistente, con vertidos directos a ríos y uso de fosas sépticas como sistema de tratamiento. Existe, además, una fracción pequeña de la población sin acceso a saneamiento.

La cobertura y el volumen de aguas residuales domésticas tratadas han mostrado una tendencia general al aumento, con fluctuaciones vinculadas a coyunturas económicas y cambios institucionales. La creación de entidades especializadas y la implementación de la Política Nacional del Agua han sido factores clave para mejorar el tratamiento, especialmente a partir de 2012.

Las emisiones de gases de efecto invernadero provienen mayoritariamente de las aguas residuales domésticas. La evolución de estas emisiones se encuentran ligadas a la cobertura de saneamiento nacional. En el caso de las aguas industriales, derivan particularmente de la producción de bebidas alcohólicas, actividad que genera la mayor carga orgánica. La evolución de estas emisiones responde directamente a la actividad industrial nacional, siendo más sensibles a las crisis económicas.

El metano es el gas de efecto invernadero principal emitido por el tratamiento de aguas residuales en toda la serie estudiada. En 2022, aunque las emisiones totales superaron las de 1990, se observa un cambio en su composición: disminuyeron las de origen industrial pero aumentaron las domésticas y las de óxido nítrico, debido a una mayor cobertura de saneamiento y vertidos.

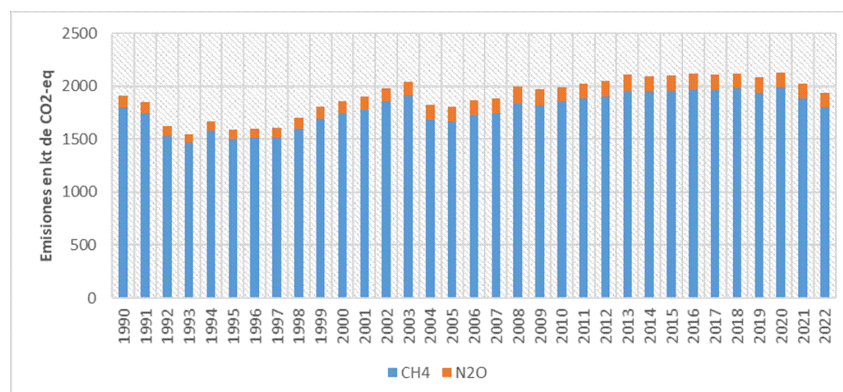


Figura 7. Emisiones por tipo de GEI (kt de CO₂-eq) procedentes del tratamiento y eliminación de aguas residuales. Serie 1990-2022

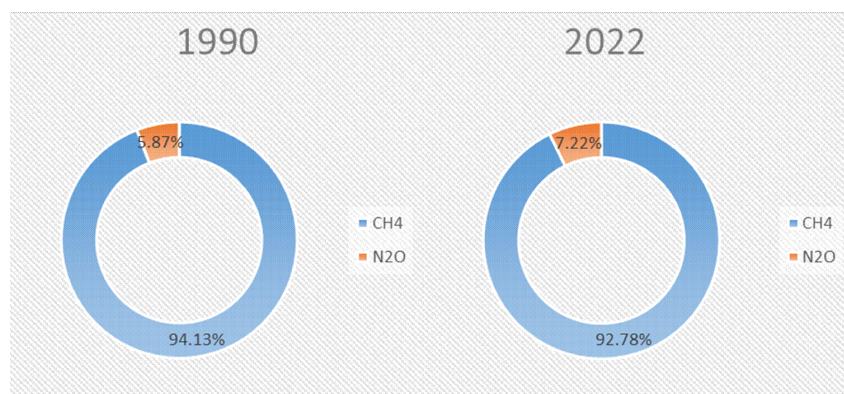


Figura 8. Emisiones por tipo de GEI (kt de CO₂-eq) procedentes del tratamiento y eliminación de aguas residuales domésticas e industriales en el año base (1990) y en el año inventariado (2022)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P., & Federici, S. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (E. Calvo Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc, J. Baasansuren, M. Fukuda, S. Ngarize, A. Osako, Y. Pyrozhenko, P. Shermanau, & S. Federici, Eds.). Intergovernmental Panel on Climate Change. https://beta.ghg.inergy.vn/upload/others/2025/03/27/19R_V5_IPCC%202019_Waste_B%E1%BA%A3n%20%C4%91%E1%BA%A7y%20%C4%91%E1%BB%A7-94cf79b7-a22f-4339-8c0c-36763a149144.pdf
- FAO. (2013). *Food Balances*. Food and Agriculture Organization of the United Nations; FAO. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FBSH>
- FAOSTAT. (2021). *Food and Agriculture Data. Average protein supply*. FAO. <https://www.fao.org/faostat/en/#country/49>
- OMM. (2020). *Boletín de la Organización Meteorológica Mundial sobre los gases de efecto invernadero*. http://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21819
- ONEI. (2023). *Anuario Estadístico 2022*. Oficina Nacional de Estadísticas e Información. <http://www.onei.gob.cu>
- ONN. (2007). *Norma Cubana NC 521:2007. Vertimiento de aguas residuales a la zona costera y aguas marinas*. Oficina Nacional de Normalización (ONN).
- ONN. (2012). *Norma Cubana NC 27:2012. Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado*. Oficina Nacional de Normalización.
- Pachauri, R. K., & Meyer, L. A. (Eds.). (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. <https://epic.awi.de/id/eprint/37530/>
- Pipatti, R., Svardal, P., Silvana, J. W., Gao, Q., López, C., Mareckova, K., Oonk, H., Scheehle, E., Sharma, C., Smith, A., Yamada, M., Sabin, G. H., Koch, M., Svardal, P., & Manso, S. M. (Eds.). (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5: Waste*. Institute for Global Environmental Strategies (IGES).
- República de Cuba. (2020). *Tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente.