

Estimación de los gases efecto invernadero generados por las plantas de tratamiento de aguas residuales ubicadas en la cuenca del río Bogotá*

Diana Lucía Cristancho Montenegro**

Wilson Gámez Posada***

Jorge Armando Guerra Alfaro****

María Fernanda Dueñas Escudero*****

Recibido: 13/11/2018 • Aceptado: 16/04/2018

<https://doi.org/10.22395/rriium.v18n34a2>

Resumen

El presente estudio contiene un análisis de datos que relaciona la carga orgánica presente en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la cuenca del río Bogotá y su incidencia en la generación de gases efecto invernadero (GEI) durante el proceso de depuración. Dentro del análisis se recopiló una serie de consideraciones técnicas relacionadas con la generación de GEI de las diferentes PTAR que hacen parte de la cuenca. De acuerdo con las características del sistema empleado en el tratamiento de las aguas residuales, se determina cuál proceso genera mayor aporte de emisiones, teniendo en cuenta el estado actual de cada planta. Para ello, se emplea la metodología nivel 1 del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) para los inventarios de GEI. Con base en los resultados obtenidos, se identifica cuáles sistemas de tratamiento empleados en las PTAR inciden en mayor proporción en la emisión de GEI.

Palabras clave: PTAR; GEI; aguas residuales; impacto ambiental.

* Artículo de revisión derivado del proyecto de investigación titulado *Análisis multidimensional de sistemas de tratamiento de aguas residuales en la cuenca del río Bogotá. Influencia de la presión atmosférica y temperatura. Tiempo de ejecución: seis meses.* Ente financiador: Universidad Central, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas.

** Ingeniera civil, especialista en Gestión Ambiental, magíster en Ingeniería Ambiental, docente e investigador del programa de Ingeniería Ambiental, Universidad Central, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: dcristancho@ucentral.edu.co. Orcid: <http://orcid.org/0000-0001-7417-2583>

*** Ingeniero ambiental, especialista en Gestión Ambiental y Gerencia de Proyectos, asesor externo, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: asesor.utidj@gmail.com. Orcid: <http://orcid.org/0000-0001-9917-2504>

**** Ingeniero ambiental, especialista en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los Recursos Naturales, asesor externo, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: armando.galfaro@gmail.com. Orcid: <http://orcid.org/0000-0001-9917-2504>

***** Ingeniera ambiental, Universidad Central, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: mduenase@ucentral.edu.co. Orcid: <http://orcid.org/0000-0001-9917-2504>

Estimation of the effects of greenhouse gases generated by wastewater treatment plants located in the basin of the Bogotá River

Abstract

The present study contains a data analysis that links the amount of organics in the wastewater treatment plant a in the basin of the Bogotá river and its incidence in the generation of greenhouse gases during the process of depuration. A series of technical consideration regarding the generations of greenhouse gases among different treatment plants are mentioned. Accordingly with the characteristics of the system employed in the wastewater treatment is determined which is the one generating a higher amount of emissions accounting the actual status of each plant. To achieve so, the level 1 methodology of the IPCC for greenhouse emissions is employed. Based on the results is determined which of the treatment systems used in the wastewater treatment plants are producing most of the greenhouse gases emissions.

Keywords: WTP; greenhouse gases; wastewater; environmental impact.

Estimativa dos gases de efeito estufa gerados pelas plantas de tratamento de esgoto localizadas na bacia do rio Bogotá

Resumo

Este estudo contém uma análise de dados que relaciona a carga orgânica presente nas plantas de tratamento de águas residuais (PTAR) da bacia do rio Bogotá, Colômbia, e sua incidência na geração de gases de efeito estufa (GEE) durante o processo de depuração. Dentro da análise, foram compiladas considerações técnicas relacionadas com a geração de GEE das diferentes PTAR que fazem parte da bacia. De acordo com as características do sistema utilizado no tratamento das águas residuais, determina-se que processo gera maior contribuição de emissões, levando em conta o estado atual de cada planta. Para isso, emprega-se a metodologia nível 1 do Grupo Intergovernamental de Especialistas sobre a Mudança do Clima para os inventários de GEE. Com base nos resultados obtidos, são identificados quais sistemas de tratamento empregados nas PTAR afetam em maior medida a emissão de GEE.

Palavras-chave: PTAR; GEE; águas residuais; impacto ambiental.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), se construyen con el objetivo de dar cumplimiento con los parámetros contenidos en el marco regulatorio. Por tanto, la definición del sistema de tratamiento depende de la eficiencia del mismo para la remoción de agentes contaminantes [1, 2]. Los sistemas existentes para el tratamiento de aguas residuales generan emisiones de gases efecto invernadero (GEI), lo anterior, en relación con que los procesos de remoción y biodegradación de la materia orgánica presente en el agua, objeto de tratamiento, repercuten en este impacto ambiental [3-6].

Las PTAR tienen como principal característica que, a eficiencias altas de remoción de carga orgánica, disminuyen las emisiones de gases efecto invernadero que se presentarán en las fases de proceso de tratamiento de aguas residuales [7-11]. Sin embargo, la función de distancia parametrizada podría utilizarse para establecer un sistema de referencia para la vigilancia del rendimiento de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales-EDAR urbanas. La evaluación de eficiencia integrada –considerando múltiples dimensiones– y el análisis estadístico en una muestra grande permitió revelar las razones de las brechas de eficiencia. Los resultados de las pruebas estadísticas mostraron que la escala de las plantas, la tecnología y la capacidad del tratamiento terciario fueron importantes para explicar las disparidades de eficiencia. Las plantas a gran escala, las plantas con biorreactores o los procesos anaeróbico-anóxico-óxicos, y las plantas sin tratamiento terciario tendieron a ser más eficientes, lo que muestra la ventaja en cobeneficio de los contaminantes del agua y el control de GEI [12-14].

Para el presente estudio se estima, según la información obtenida ante la autoridad ambiental, que los municipios ubicados en cercanías a la cuenca del río Bogotá cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales que vierten sus líquidos sobre el cuerpo de agua en mención. Por tanto, la operación de estas PTAR repercute en las emisiones de gases efecto invernadero. Con base en los tipos de sistemas de tratamiento de aguas residuales empleados en las PTAR que vierten a la cuenca del río Bogotá, se identificaron los gases efecto invernadero que se generan en mayor proporción.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

1.1 Ubicación de la cuenca del río Bogotá

La cuenca del río Bogotá se localiza en el departamento de Cundinamarca (Colombia), cuenta con una superficie total de 589.143 hectáreas, limitando al norte con el departamento de Boyacá y al sur con el departamento del Tolima. El río Bogotá nace en el municipio de Villapinzón a 3.300 m s. n. m., desde allí recorre 380 Km hasta

el municipio de Girardot a 280 m s. n. m, donde entrega su caudal al río Magdalena [15, 16].

1.2 Clasificación y localización de las PTAR en la cuenca del río Bogotá

Inicialmente se recopiló información de 62 plantas de tratamiento de agua residuales (PTAR) evidenciadas por la autoridad ambiental Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) de la cuenca del río Bogotá, de las cuales veintitrés se encuentran en operación, treinta en proceso de optimización, seis en construcción, dos no se encuentran operando y una en estudios previos (diseños). Teniendo en cuenta lo anterior, se procedió a realizar un filtro de los datos más significativos para realizar el correspondiente análisis, en concordancia con el objeto de este trabajo.

Con base en la información anterior y como objetivo de investigación se analizaron veintiocho plantas de tratamiento teniendo en cuenta la disponibilidad de la información (tipo de sistema, caudal de tratamiento, DBO, DQO, SST, actividad económica, estado actual y población) identificando así, en la figura 1, la localización de las PTAR a lo largo de la cuenca del río Bogotá [17].

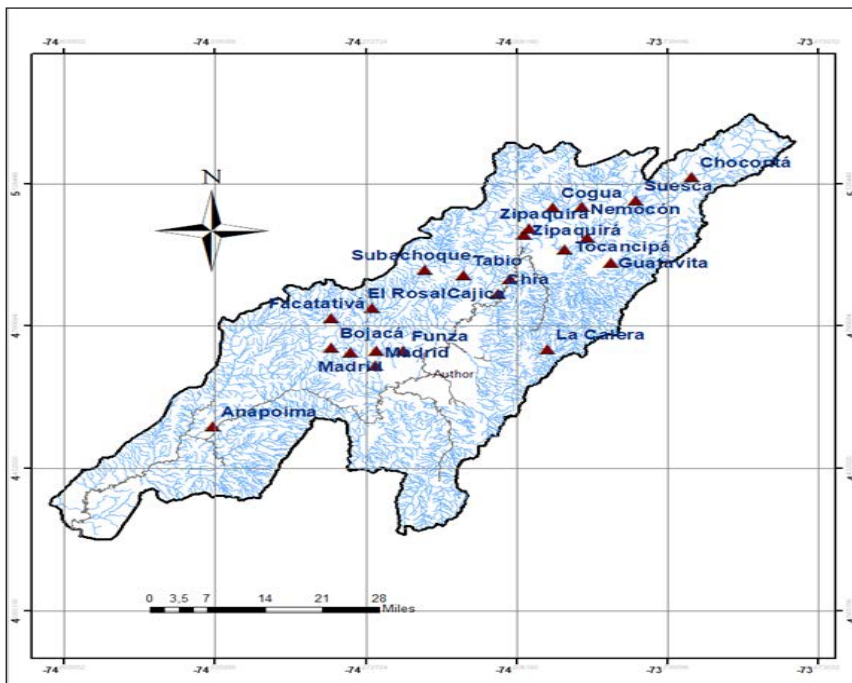


Figura 1. Ubicación de las PTAR en la cuenca del río Bogotá

Fuente: elaboración propia.

1.3 Caracterización de la información

Mediante los artículos de revisión y la metodología IPCC para realizar la estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de las plantas de tratamiento objeto de estudio, se tuvo en cuenta el procedimiento Tier 1, que permite incorporar valores por defecto para el factor de emisión y para los parámetros de proceso, dada la información que se obtuvo de cada planta [18-21].

1.4 Metodología IPCC, Tier 1

Para desarrollar la estimación de los GEI, se deben tener en cuenta las directrices del procedimiento Tier 1, realizando así la estimación del contenido total de carbono orgánico degradable en las aguas servidas, obteniendo la variable para el cálculo de las emisiones de CH₄ [22].

Paso 1: cálculo total de materia orgánica degradable en las aguas residuales se emplea la ecuación (1)

$$TOW = P * DBO * 0,001 * I * 365 \quad (1)$$

Donde TOW: total de materia orgánica en las aguas residuales del año del inventario kg de DBO/año; P: población del país en el año del inventario; DBO: DBO per cápita específico del país en el año del inventario, g/persona/día; 0,001: conversión de gramos de DBO a kilogramos de DBO; I: factor de corrección para DBO.

“El factor de emisión es una función del potencial máximo de producción (B₀) de CH₄ y del factor de corrección para el metano (MCF) para el sistema de tratamiento y eliminación de aguas residuales” [19], tomando como resultado la cantidad máxima de CH₄ que puede generarse a partir de las aguas servidas a disposición de las plantas de tratamiento y la carga orgánica tratada.

Paso 2: para el factor de emisión de CH₄ para cada vía o sistema de tratamiento y/o eliminación de aguas residuales se usa la ecuación (2)

$$EF_j = B_0 * MCF_j \quad (2)$$

Donde EF_j: factor de emisión, kg de CH₄/ kg de DBO; B₀: capacidad máxima de producción de CH₄ kg de CH₄/kg de DQO; j: cada vía o sistema de tratamiento y/eliminación; MCF_j: factor corrector.

Paso 3: se plantea la medición de emisiones de CH₄ producto de las aguas residuales mediante la ecuación (3):

$$\text{Emisiones de CH}_4 = \left[\sum_{i,j} (U_i * T_{i,j} * EF_i) \right] (TOW - S) - R \quad (3)$$

Donde TOW = total de materia orgánica en las aguas residuales; S = componente orgánico separado como lodo; U_i = fracción de la población del grupo de ingresos i ; $T_{i,j}$ = grado de utilización de vía o sistema de tratamiento y/o eliminación j ; EF_j = factor de emisión, kg. de CH_4 /kg de DBO; R = cantidad de CH_4 recuperada durante el año del inventario, $kgCH_4/año$.

1.5 Estimación de GEI de acuerdo al sistema de tratamiento

Referente a los GEI generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, y para identificar las emisiones de acuerdo con el tipo de sistema empleado o existente en las PTAR, se realizó la consulta de diferentes autores.

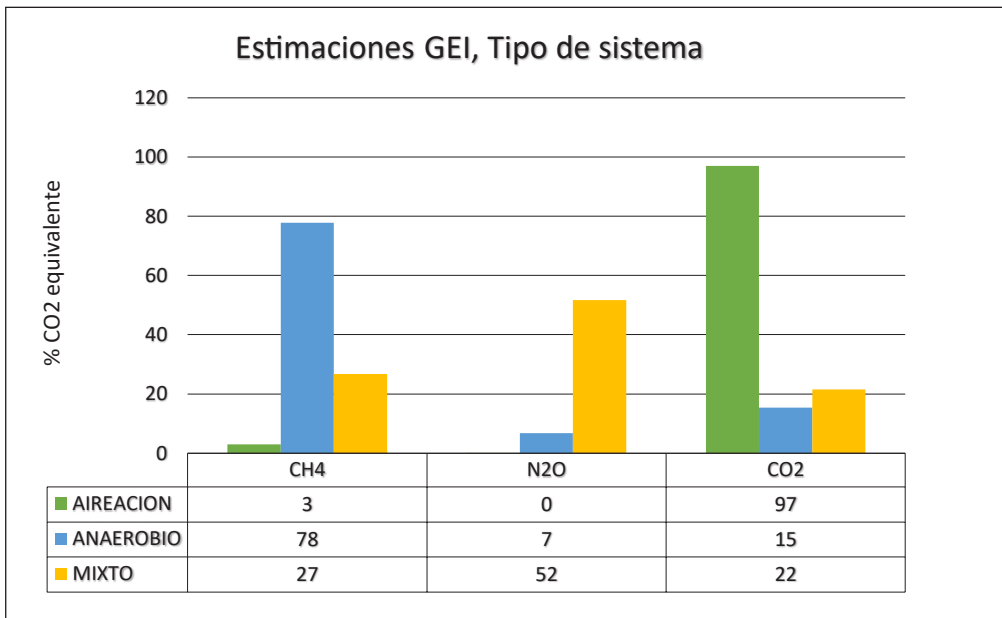


Figura 2. Estimaciones de GEI (%) generados por PTAR

Fuente: elaboración propia, basada en bibliografía [23-32]

Como se ilustra en la figura 2, con base en esta información consultada de diferentes fuentes, es posible inferir que, para sistemas aerobios, el compuesto de mayor proporción es el CO_2 con un 97 %, para mecanismos anaerobios es el CH_4 con un 78 % y para sistemas mixtos es el N_2O con un 52 %.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1 Fracción de la población

En consideración a la estimación de población rural y urbana que se realiza en el presente artículo y, con el objetivo de identificar la fracción de ingresos de cada

municipio U y el grado de utilización de la vía del tratamiento Tij que sugieren los expertos dentro de la metodología del IPCC (Tier I), se desarrolló una revisión de la información estadística poblacional con la que cuenta el DANE [33]. Teniendo en cuenta la información recopilada en cuanto a las proyecciones de ingresos del sector rural y urbano de cada municipio, se identificaron los valores U y Tij cotejando el valor propuesto por los expertos frente al porcentaje poblacional para cada uno de los casos, información que arrojó los resultados que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Fracción poblacional estimada

<i>PTAR</i>	<i>U_i</i>	<i>T_{ij}</i>	<i>Porcentaje rural</i>	<i>Porcentaje urbano</i>	<i>PTAR</i>	<i>U_i</i>	<i>T_{ij}</i>	<i>Porcentaje rural</i>	<i>Porcentaje urbano</i>
Anapoima	0,27	0,38	57	43	Nemocón	0,26	0,37	58,21	41,79
Bojacá	0,09	0,45	19,6	80,4	Rosal	0,12	0,45	28,1	71,9
Cajicá	0,17	0,45	36,9	63,1	Subachoque	0,28	0,33	62,4	37,6
Calera	0,25	0,39	56,6	43,4	Suesca	0,23	0,44	50,36	49,64
Chía	0,097	0,45	21,5	78,5	Tabio	0,23	0,44	51,1	48,9
Chocontá	0,21	0,45	48,7	51,3	Tocancipá	0,26	0,38	57,09	42,91
Cogua	0,31	0,28	68,7	31,3	Ubaté	0,15	0,45	34,8	65,2
Faca	0,001	0,45	9,5	90,5	Zipa I	0,055	0,45	12,17	87,83
Funza	0,027	0,45	6,18	93,82	Zipa II	0,055	0,45	12,17	87,83
Gachancipá	0,19	0,45	41,77	58,23	CachipayIII	0,3	0,28	67,9	32,1
Guatavita	0,32	0,25	71,3	28,7	La Mesa	0,197	0,45	43,78	56,22
Madrid I	0,058	0,45	12,9	87,1	Sesquilé I	0,34	0,22	75,05	24,95
Madrid II	0,058	0,45	12,9	87,1	Sesquilé II	0,34	0,22	75,05	24,95
Mosquera	0,017	0,45	3,94	96,06	Bogotá	0,001	0,45	0,2	99,8

Fuente: elaboración propia.

Como se evidencia en los valores estimados de la tabla 1, U_i se incrementa cuando hay mayor población rural, caso contrario a lo que pasa con las cifras reportadas como T_{ij} que su crecimiento se genera con el aumento del porcentaje que se referencia a nivel urbano.

2.2 Totalidad de materia orgánica degradable en las aguas residuales

De acuerdo con los parámetros definidos por el IPCC para estimar la cantidad total de materia orgánica degradable en las aguas servidas (población e índice de generación de DBO por persona), para este caso se incluye la población de cada municipio, el

DBO per cápita prevista por los expertos (50 g/persona/día) y el factor de corrección para el DBO industrial adicional al que ingresan a las PTAR por intermedio de los alcantarillados (1,25).

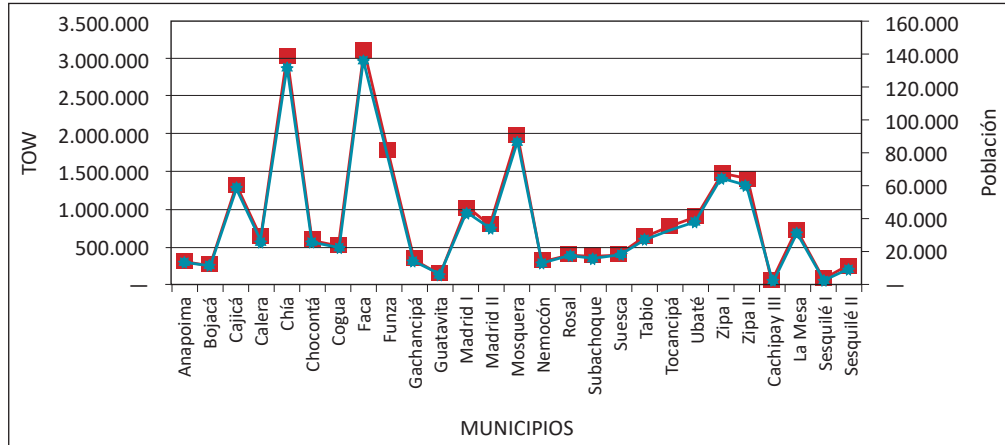


Figura 3. Materia orgánica degradable-población

Fuente: elaboración propia.

Como se muestra en la figura 3, el valor estimado para el TOW tiene una correlación con el incremento o la disminución de la población, situación por la cual se muestran mayores valores en aquellos municipios donde su población es mayor.

En la Tabla 2, se relacionan los datos obtenidos de la estimación realizada para el TOW, junto con las proyecciones de población para el año 2017 presentadas por el DANE [33].

Tabla 2. Población-materia orgánica degradable

PTAR	Población	Actividad económica	TOW	PTAR	Población	Actividad económica	TOW
Anapoima	13.713	Agropecuario	312.828	Nemocón	13.922	Minería	317.596
Bojacá	12.140	Agropecuario-turismo	276.944	Rosal	18.045	Agropecuario	411.652
Cajicá	58.198	Papel-madera	1.327.642	Subachoque	16.750	Agricultura	382.109
Calera	28.225	Minería	643.883	Suesca	18.011	Agricultura	410.876
Chía	132.691	Industrial	3.027.013	Tabio	28.373	Agricultura	647.259
Chocontá	26.562	Lácteos	605.946	Tocancipá	33.677	Industrial	768.257
Cogua	23.214	Lácteos	529.569	Ubaté	39.205	Lácteos	894.364

PTAR	Población	Actividad económica	TOW	PTAR	Población	Actividad económica	TOW
Facatativá	136.950	Industrial	3.124.172	Zipa I	65.101	Minería	1.485.108
Funza	78.156	Industrial	1.782.934	Zipa II	61.308	Agricultura	1.398.597
Gachancipá	15.223	Industrial-agrícola	347.275	Cachipay III	2.720	Agricultura	62.050
Guatavita	6.935	Agrícola	158.205	La Mesa	32.200	Agricultura	734.563
Madrid I	44.826	Industrial	1.022.589	Sesquilé I	3.668	Agropecuario	83.684
Madrid II	35.796	Industrial	816.600	Sesquilé II	11.244	Agropecuario	256.496
Mosquera	86.954	Lácteos-industrial	1.983.638	Bogotá	2.828.257	Industrial	64.519.611

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta que el TOW establece la correlación total de materia orgánica en las aguas residuales, se consideró relacionar las actividades económicas principales de cada municipio, dado el impacto negativo que genera la incorporación de actividades a gran o mediana escala que pueden llegar a incidir en el incremento en la carga orgánica y por ende en la emisión de GEI. Dicho análisis se detalla más adelante. En cuanto a factores ambientales identificados, se puede concluir que las características del suelo presentan mayor incidencia en la generación de GEI, ya que de acuerdo a la actividad económica, se halló que los municipios donde se desarrollan actividades como agricultura, ganadería e industria presentan mayor emisión de CH_4 y N_2O , con un porcentaje 49,71 % lo que genera impactos negativos para el desarrollo de la región y de su población, al punto que sectores de la academia e investigadores en el tema lo han denominado “catástrofe ecológica” [34-38].

2.3 Factor de emisión

Teniendo en cuenta que, para estimar este parámetro en una PTAR, se necesita del potencial máximo de producción (B_0) de CH_4 y del factor de corrección para el metano (MCF), donde B_0 corresponde al valor máximo de CH_4 que puede generarse a partir de la cantidad de sustancias orgánicas (expresada en DBO y DQO) contenidas en las aguas servidas. Con base en lo anterior, para este caso no se cuenta con datos específicos donde se determine un valor B_0 , por lo cual, se toma el valor por defecto que sugieren los expertos de 0,6 kg. de CH_4/kg de DBO. De la misma forma, se estimó el valor correspondiente al MFC en consideración a los datos recomendados por los expertos, dentro de las directrices del IPCC de 2014 para los inventarios nacionales de GEI, que presentan los intervalos de la tabla 3.

Tabla 3. Valores propuestos para MFC [34]

<i>Valores de MCF por defecto para las aguas residuales domésticas</i>			
<i>Tipo de vía o sistema de tratamiento y eliminación</i>	<i>Comentarios</i>	<i>MCF1</i>	<i>Intervalo</i>
<i>Sistema sin tratamiento</i>			
Eliminación en río, lago y mar	Los ríos con alto contenido de sustancias orgánicas pueden volverse anaeróbicos.	0,1	0 - 0,2
Cloaca estancada	Abierta y caliente.	0,5	0,4 - 0,8
Cloaca en movimiento (abierta o cerrada)	Correntosa, limpia (cantidades insignificantes de CH ₄ desde las estaciones de bombeo, etc.).	0	0
<i>Sistema tratado</i>			
Planta de tratamiento centralizado aeróbico	Debe ser bien operada. Puede emitir algo de CH ₄ desde las cuencas de decantación y otros tanques.	0	0 - 0,1
Planta de tratamiento centralizado aeróbico	Mal operada. Sobrecarga.	0,3	0,2 - 0,4
Digestor anaeróbico para lodos	Aquí no se considera la recuperación de CH ₄ .	0,8	0,8 - 1,0
Reactor anaeróbico	Aquí no se considera la recuperación de CH ₄ .	0,8	0,8 - 1,0
Laguna anaeróbica poco profunda	profundidad de menos de dos metros: recurrir al dictamen de expertos.	0,2	0 - 0,3
Laguna anaeróbica profunda	profundidad de más de dos metros.	0,8	0,8 - 1,0
Sistema séptico	La mitad del BOD se decanta en tanques anaeróbicos.	0,5	0,5
Letrina	Clima seco, capa freática más baja que la letrina, familia reducida (3-5 personas).	0,1	0,05 - 0,15
Letrina	Clima seco, capa freática más baja que la letrina, uso comunitario (muchos usuarios).	0,5	0,4 - 0,6
Letrina	Clima húmedo/descarga por agua, capa freática más alta que la letrina.	0,7	0,7 - 1,0
Letrina	Extracción frecuente de sedimento para abono.	0,1	0,1

¹ En base al dictamen de expertos de los autores principales de esta sección

Fuente: elaboración propia.

Como resultado de la aplicación de los datos sugeridos para determinar el factor de emisión, se obtuvieron las estimaciones presentadas en la tabla 4.

Tabla 4. Valores resultante factor de emisión

<i>PTAR</i>	<i>Tipo de tratamiento</i>	<i>Bo</i>	<i>MFC</i>	<i>Ef</i>	<i>PTAR</i>	<i>Tipo de tratamiento</i>	<i>Bo</i>	<i>MFC</i>	<i>Ef</i>
Anapoima	Mixta	0,6	0,5	0,3	Nemocón	Aeróbico	0,6	0,3	0,18
Bojacá	Aeróbico	0,6	0,3	0,18	Rosal	Aeróbico	0,6	0,3	0,18
Cajicá	Aeróbico	0,6	0,3	0,18	Subachoque	Aeróbico	0,6	0,8	0,48
Calera	Aeróbico	0,6	0,3	0,18	Suesca	Anaeróbico	0,6	0,8	0,48
Chía	Aeróbico	0,6	0,3	0,18	Tabio	Aeróbico	0,6	0,3	0,18
Chocontá	Mixta	0,6	0,3	0,18	Tocancipá	Aeróbico	0,6	0,3	0,18
Cogua	Aeróbico	0,6	0,3	0,18	Ubaté	Mixta	0,6	0,5	0,3
Facatativá	Aeróbico	0,6	0,3	0,18	Zipa I	Aeróbico	0,6	0,3	0,18
Funza	Aeróbico	0,6	0,3	0,18	Zipa II	Anaeróbico	0,6	0,5	0,3
Gachancipá	Mixta	0,6	0,3	0,18	Cachipay III	Aeróbico	0,6	0,3	0,18
Guatavita	Aeróbico	0,6	0,3	0,18	La Mesa	Anaeróbico	0,6	0,5	0,3
Madrid I	Anaeróbico	0,6	0,8	0,48	Sesquilé I	Aeróbico	0,6	0,3	0,18
Madrid II	Anaeróbico	0,6	0,8	0,48	Sesquilé II	Anaeróbico	0,6	0,8	0,48
Mosquera	Anaeróbico	0,6	0,8	0,48	Bogotá	Aeróbico	0,6	0,3	0,18

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, los sistemas anaeróbicos son los que presentan mayor valor en lo referente al factor de la emisión, seguido de los mixtos y los aeróbicos. Esta situación resulta coherente con lo afirmado por el Banco Iberoamericano de Desarrollo que cita dentro de su nota técnica [39-41] sobre los organismos anaeróbicos que estos utilizan reacciones endógenas dado que no pueden obtener energía mediante respiración aeróbica y generan, como principales productos finales en su proceso de descomposición, el dióxido de carbono y el metano.

En condiciones aeróbicas, el carbono orgánico es oxidado y como producto final se obtiene CO₂ y agua. Por el contrario, cuando este proceso de degradación ocurre en condiciones anaeróbicas, el CO₂ actúa como aceptor de electrones y los principales productos finales son el dióxido de carbono y el metano [42-45].

2.4 Emisiones de gases efecto invernadero (GEI)

La metodología aplicada permite una estimación de las emisiones de CH₄ en las plantas de tratamiento de aguas residuales, al ser este un GEI con potencial de calentamiento

global veintiún veces superior al del CO₂, hace que sea un compuesto de especial estudio debido al grado de afectación sobre el calentamiento global si se considera el efecto invernadero que produce [46, 47]. Por otro lado, hay que tener en cuenta que las aguas residuales son una fuente de metano cuando son tratadas en medio anaeróbico, pero para el caso de las emisiones de dióxido de carbono procedentes de las aguas residuales no se consideran en las directrices del IPCC porque son de origen biogénico y no deben incorporarse en un consolidado de emisiones [48, 49]

De acuerdo con lo anterior, la proyección de emisiones realizada incluyó el N₂O y CO₂ al considerar probable su presencia en las emisiones de GEI, en las proporciones mostradas en la figura 2. Teniendo en cuenta esta serie de variables, se relaciona la estimación de gases efecto invernadero del presente artículo, referenciando cada una de las variables consideradas dentro de la metodología propuesta (por municipio) que afectó a la cuenca del río Bogotá (tabla 5).

Tabla 5. Valores resultantes de factor de emisión

PTAR	DBO ₅ afluente (mg/L)	DQO (mg/L)	Caudal (L/s)	Carga orgánica DBO (Ton/mes) Afluente	Carga orgánica DBO (Ton/mes) Efluente	Total carga DBO removida (Ton/mes)	Población	Tipo de tratamiento	Actividad económica	U _i	T _{ij}	Bo	MFC	Ef	TOW	S	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	Total
Anapoima	348,50	379	18,57	16,94	2,92	14,02	13.713	Mixta	Agropecuario	0,27	0,38	0,6	0,5	0,3	312.828	168.249	4450,1407	8527,21572	120260,389	133237,75
Bojacá	719,10	-	6,23	11,74	0,58	11,15	12.140	Aeróbico	Agropecuaria-turismo	0,09	0,45	0,6	0,3	0,18	276.944	133.831	1043,29512	1937,54808	0	2980,84
Cajicá	306,58	306	68,66	45,11	11,06	34,05	58.198	Aeróbico	Papel-madera	0,17	0,45	0,6	0,3	0,18	1.327.642	408.589	12655,3599	23502,8112	0	36158,17
Calera	254,40	322,5	35,04	41,62	8,17	33,45	28.225	Aeróbico	Minería	0,25	0,39	0,6	0,3	0,18	643.883	401.407	4255,45059	7902,97966	0	12158,43
Chía	275,20	286	99,99	80,54	15,02	65,52	132.691	Aeróbico	Industrial	0,097	0,45	0,6	0,3	0,18	3.027.013	786.248	17605,6974	32696,2951	0	50301,99
Chocontá	205,70	499	44,99	23,72	4,30	19,42	26.562	Mixta	Lácteos	0,21	0,45	0,6	0,3	0,18	605.946	233.006	6343,71082	12155,6136	171432,137	189931,46
Cogua	266,07	346	37,18	25,46	4,42	21,04	23.214	Aeróbico	Lácteos	0,31	0,28	0,6	0,3	0,18	529.569	252.470	4329,4062	8040,3258	0	12369,73
Facatativá	442,60	356	161,90	181,69	68,33	113,36	136.950	Aeróbico	Industrial	0,001	0,45	0,6	0,3	0,18	3.124.172	1.360.356	142,8691	265,328329	0	408,20
Fuzca	301,00	518	98,45	72,91	19,04	53,87	78.156	Aeróbico	Industrial	0,027	0,45	0,6	0,3	0,18	1.782.934	646.429	2485,53505	4615,99366	0	7101,53
Gachancipá	255,54	232,5	28,07	18,65	3,95	14,69	15.223	Mixta	Industrial-agrícola	0,19	0,45	0,6	0,3	0,18	347.275	176.334	2630,77856	5041,01281	71094,0338	78765,83
Guatavita	409,10	186,7	6,80	7,16	0,63	6,53	6.935	Aeróbico	Agricultura	0,32	0,25	0,6	0,3	0,18	158.205	78.406	1149,09843	2134,03994	0	3283,14
Madrid I	236,40	444	50,59	22,41	7,04	15,37	44.826	Anaeróbico	Industrial	0,058	0,45	0,6	0,8	0,48	1.022.589	184.470	10499,9628	2019,22361	942,304351	13461,49
Madrid II	485,70	-	40,41	51,10	10,61	40,49	35.796	Anaeróbico	Industrial	0,058	0,45	0,6	0,8	0,48	816.600	485.825	4143,94942	796,91335	371,892897	5312,76
Mosquera	437,50	344	68,12	78,21	17,23	60,98	86.954	Anaeróbico	Lácteos-industrial	0,017	0,45	0,6	0,8	0,48	1.983.638	731.717	4597,0532	884,048691	412,556056	5893,66
Nemocón	154,87	146	11,80	4,57	1,22	3,35	13.922	Aeróbico	Minería	0,26	0,37	0,6	0,3	0,18	317.596	40.255	4802,42506	8918,78939	0	13721,21
Rosal	393,80	-	21,38	21,78	3,01	18,77	18.045	Aeróbico	Agropecuario	0,12	0,45	0,6	0,3	0,18	411.652	225.220	1812,11822	3365,3624	0	5177,48
Subachoque	287,60	433,5	11,18	7,95	3,29	4,66	16.750	Aeróbico	Agricultura	0,28	0,33	0,6	0,8	0,48	382.109	55.944	14466,0744	26865,5668	0	41331,64
Suesca	538,00	297,7	18,47	25,53	4,31	21,22	18.011	Anaeróbico	Agricultura	0,23	0,44	0,6	0,8	0,48	410.876	254.676	7587,54883	1459,14401	680,933869	9727,63
Tabio	210,38	217	18,92	10,24	2,78	7,46	28.373	Aeróbico	Agricultura	0,23	0,44	0,6	0,3	0,18	647.259	89.482	10160,4586	18869,4232	0	29029,88
Tocancipá	279,80	276	46,17	33,39	4,48	28,91	33.677	Aeróbico	Industrial	0,26	0,38	0,6	0,3	0,18	768.257	346.931	7492,85908	13915,3097	0	21408,17
Ubaté	425,50	-	45,89	51,43	27,15	24,28	39.205	Mixta	Lácteos	0,15	0,45	0,6	0,5	0,3	894.364	291.367	12210,6828	22676,9824	329980,908	364868,57

PTAR	DBO ₅ afluente (mg/L)	DQO (mg/L)	Caudal (E/s)	Carga orgánica DBO (Ton/mes) Afluente	Carga orgánica DBO (Ton/mes) Efluente	Total carga DBO removida (Ton/mes)	Población	Tipo de tratamiento	Actividad económica	Ui	Tij	Bo	MFC	Ef	TOW	S	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	Total
Zipa I	501,60	471	82,45	103,85	14,98	88,88	65.101	Aeróbico	Minería	0,055	0,45	0,6	0,3	0,18	1.485.108	1.066.529	1864,76906	3463,14253	0	5327,91
Zipa II	383,10	341	57,29	57,73	7,01	50,72	61.308	Anaeróbico	Agricultura	0,055	0,45	0,6	0,5	0,3	1.398.597	608.632	5865,49329	1127,97948	526,390423	7519,86
Cachipay III	40,03	90	1,5	0,15563664	0,08954064	0,066096	2.720	Aeróbico	Agricultura	0,3	0,28	0,6	0,3	0,18	62.050	793	926,203542	1720,09229	0	2646,30
La Mesa	270	-	20	13,9968	1,60704	12,38976	32.200	Anaeróbico	Agricultura	0,197	0,45	0,6	0,5	0,3	734.563	148.677	15581,6217	2996,46571	1398,35066	19976,44
Sesquile I	194,37	164	2,46	1,23936532	0,39565066	0,84371466	3.668	Aeróbico	Agropecuaria	0,34	0,22	0,6	0,3	0,18	83.684	10.125	990,407855	1839,32887	0	2829,74
Sesquile II	180,3	342,6	7,52	3,51437875	0,6069759	2,90740285	11.244	Anaeróbico	Agropecuaria	0,34	0,22	0,6	0,8	0,48	256.496	34.889	4972,85852	956,318945	446,282175	6375,46
Bogotá	264	564	5000	3421,44	1931,04	1490,4	2.828.257	Aeróbico	Industrial	0,001	0,45	0,6	0,3	0,18	64.519.611	17.884.800	3777,41965	7015,20793	0	10792,63

Fuente: elaboración propia.

Tomando la información referida en la tabla 5, se presenta, a continuación, el comportamiento de los GEI en cada una de las PTAR para determinado municipio.

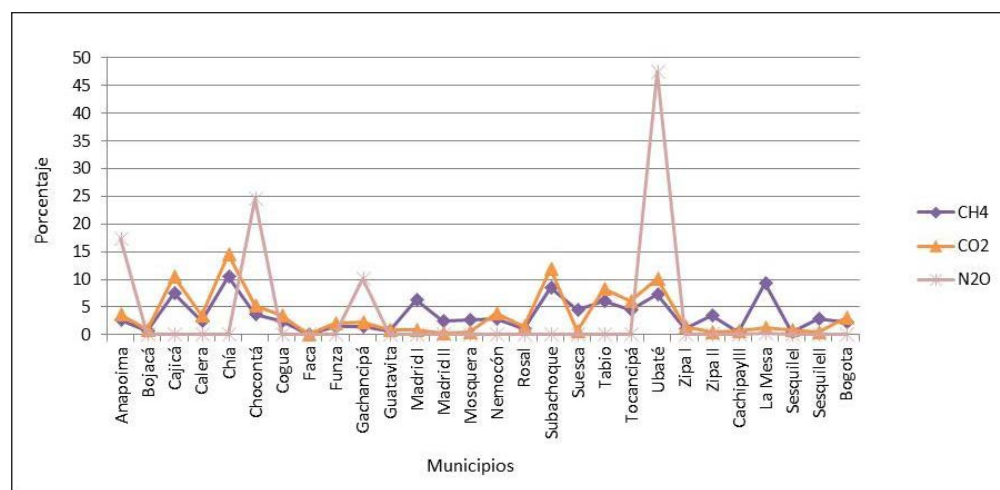


Figura 4. Resultados emisiones GEI PTAR cuenca río Bogotá

Fuente: elaboración propia.

De la figura 4 se puede afirmar que el comportamiento de cada uno de los componentes varía con relación al tipo de tratamiento que posee cada municipio. Aquellos sistemas que tienen un proceso aeróbico presentan mayor emisión de CO₂ frente al CH₄; para el caso del sistema anaeróbico su mayor emisión es de CH₄ frente al CO₂ y N₂O; respecto al mixto, el valor más alto lo reporta el N₂O seguido del CO₂ y el CH₄. Estas cifras se ser analizadas frente a los argumentos presentados en la figura 2 presentan coherencia en cuanto a su comportamiento en materia de proporción de componente.

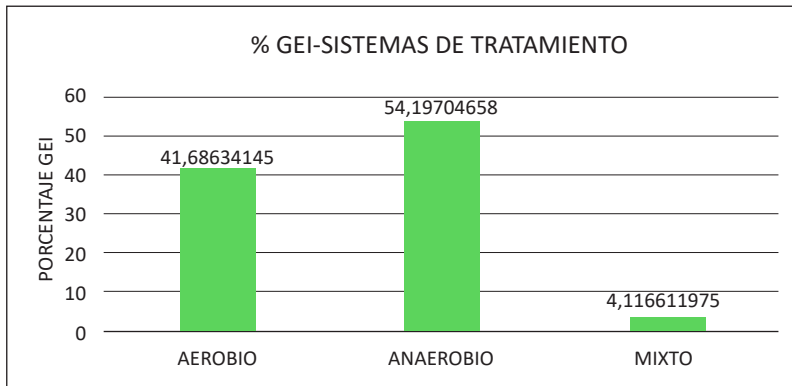


Figura 5. Resultados de porcentajes de GEI según el sistema de tratamiento

Fuente: elaboración propia.

Respecto al porcentaje de emisiones de GEI en las PTAR, con base en el sistema de tratamiento empleado, se obtuvo que las plantas mixtas emiten un 4,11 % de estos, seguido por el sistema aerobio con un 41,68 % y, por último, las plantas anaerobias con un 54,19 %. En el sistema aeróbico la emisión de metano es alta debido a que las PTAR que poseen este sistema usan tecnologías de zanjas de oxidación y lagunas aireadas en su mayoría, por lo tanto las emisiones generadas por los sistemas mixtos es baja y únicamente se evidencian en tres PTAR que hacen parte del presente estudio, y la población de cada una de éstas no supera los 26.562 habitantes. La relación de GEI y el sistema de tratamiento de aguas residuales se ve en la figura 5.

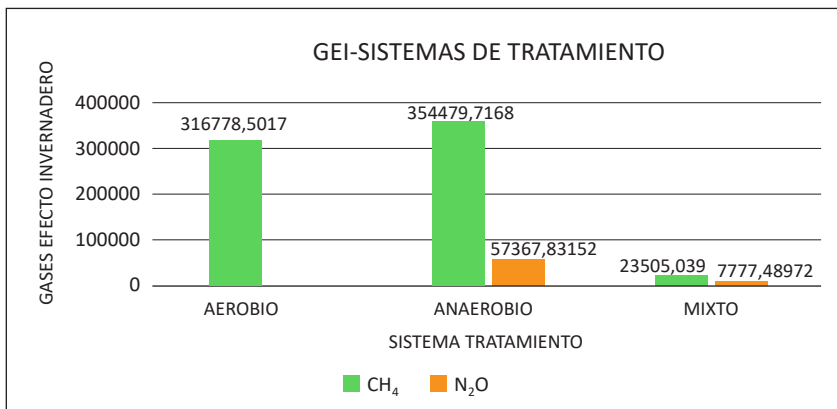


Figura 6. Resultados de GEI según el sistema de tratamiento

Fuente: elaboración propia.

En la figura 6 se puede identificar que se emite más metano en plantas aeróbicas, anaeróbicas y mixtas. En cuanto a N₂O, la emisión es más baja ya que para los procesos

aeróbicos su valor es de cero debido a la nitrificación, el cual es un proceso aeróbico que convierte el amoníaco y otros compuestos nitrogenados en nitrato (NO_3^-), mientras que la desnitrificación se produce bajo condiciones anóxicas (sin oxígeno libre) e implica la conversión biológica del nitrato en gas di-nitrógeno (N_2). El óxido de nitrógeno puede ser un producto intermedio de ambos procesos, pero suele asociarse más a menudo con la desnitrificación. Sin embargo, se evidencia que el sistema anaeróbico es donde hay mayor cantidad de emisión [50]. El porcentaje de emisión por tipo de actividad económica se ilustra en la figura 7.

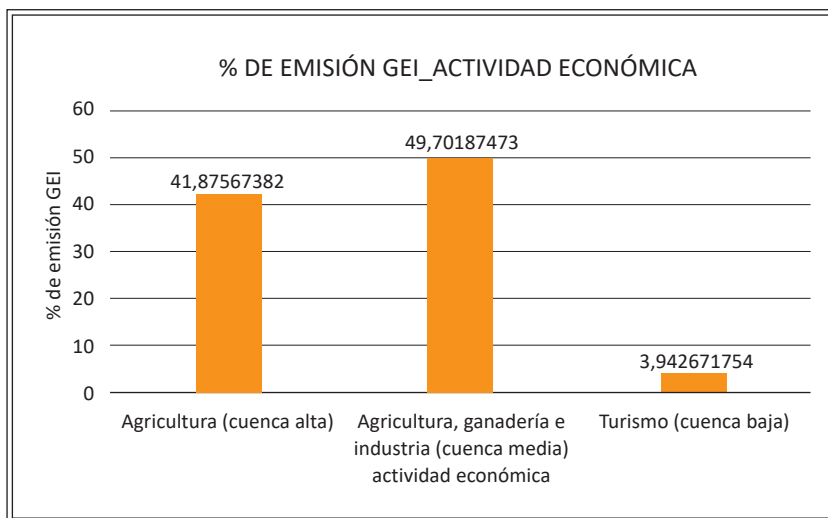


Figura 7. Resultados de porcentaje GEI según la actividad económica

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a las emisiones por actividad económica, las plantas que se ubican en la cuenca media son las que más GEI producen; el 49,70 % proviene de la actividad económica que desarrollan los cuales son la agricultura, la ganadería y la industria, seguido de esto están las PTAR de la cuenca alta que tienen como actividad económica principal la agricultura con un 41,87 % de emisión y finalmente las PTAR de la cuenca baja se representan con un 3,94 % de emisión allí la actividad principal es el turismo; se atribuye este porcentaje de emisión debido a la existencia única de tres PTAR.

Como se aprecia en la figura 8, se relaciona la dispersión de los GEI a lo largo de la cuenca del río Bogotá, según las emisiones de las PTAR objeto de estudio, se observa una mayor afectación de estos gases en la cuenca media y en la cuenca alta.

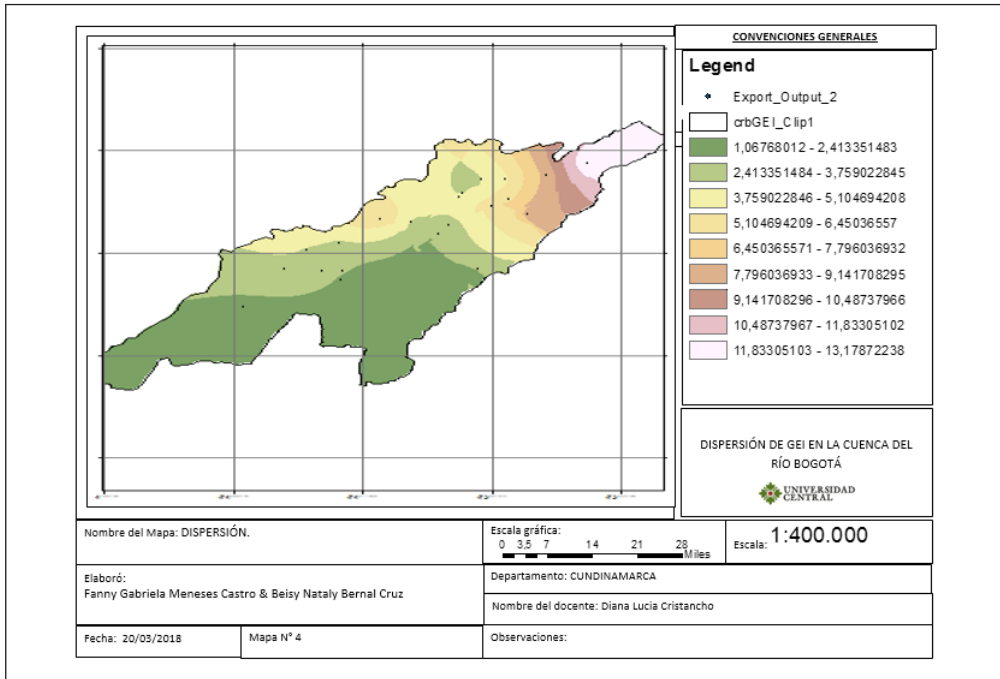


Figura 8. Mapa de dispersión de GEI en la cuenca del río Bogotá

Fuente: elaboración propia.

En lo referente al impacto directo de la población sobre la generación de vertimientos y, por ende, en las emisiones de GEI, se evidencia la correlación respecto a lo obtenido en la figura 3, esto porque los municipios con actividad agrícola, pecuaria y, en este caso en particular, industria láctea, relacionan mayor uso del recurso, es decir, aumento en el consumo, generación de desechos, aguas residuales y, por último, generación de gases efecto invernadero. Para más detalle en la tabla 5 se comparan los datos de la actividad económica, el DQO y DBO. Por tanto, con base en los resultados obtenidos, y de acuerdo con la bibliografía relacionada, se concluye que los sistemas mixtos y anaerobios por su alto potencial de generación de CH₄, pueden ser aprovechados para generación de energía mediante la implementación de tecnología que garantice su captura y posterior incineración.

3. CONCLUSIONES

Respecto a la carga orgánica del agua residual manejada en las PTAR relacionadas en la bibliografía, no es claro si dicha medición corresponde a la materia orgánica que ingresa al sistema o si hace referencia a la tratada. Por tanto, para el presente artículo se tuvo en cuenta la carga que ingresa a las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Para el presente trabajo no se incluyeron las emisiones generadas por los equipos y el consumo de energía propio de la operación de las plantas de tratamiento, contrario a lo evidenciado en la bibliografía. Esta información fue excluida dado que la carga orgánica del agua residual genera mayor variedad de gases objeto de estudio.

Las plantas de tratamiento que incluyen lagunas para la remoción de carga orgánica, de acuerdo con la bibliografía, no son sistemas óptimos para estimar las emisiones de GEI, pues el área total de dicha estructura no permite capturar en su totalidad los gases generados. Por tanto, dicho sistema tiene como característica ser un generador de CO₂.

Por último, se identificó en la bibliografía consultada, al igual que en las PTAR ubicadas en la ronda del río Bogotá, que las plantas de tratamiento de aguas residuales no poseen información relacionada con redes exclusivas de alcantarillado, lo que significa que gran parte de estas cuentan con sistemas combinados que aportan aguas lluvias al agua residual objeto de tratamiento. Esta situación incide en la dilución o, en su defecto, en el aumento de la carga orgánica del vertimiento, alterando así las condiciones para estimar las emisiones de gases efecto invernadero en los sistemas de tratamiento.

REFERENCIAS

- [1] O. Ashrafi *et al.*, "Wastewater treatment in the pulp-and-paper industry: A review of treatment processes and the associated greenhouse gas emission," *Journal of Environmental Management*, 158, pp.146-157, 2015.
- [2] R. Parra *et al.*, "Estimación de factores de emisión de gases de efecto invernadero en una planta de tratamiento de aguas residuales," *Revista Boliviana de Química*, vol. 27, n.º 2, pp. 81-88, 2010.
- [3] Z. Bao *et al.*, "Assessment of greenhouse gas emission from A/O and SBR wastewater treatment plants in Beijing, China," *International Biodeterioration and Biodegradation*, vol. 108, pp. 108-114, 2016.
- [4] R. Marques *et al.*, "Assessment of online monitoring strategies for measuring N₂O emissions from full-scale wastewater treatment systems," *Water Research*, vol. 99, pp. 171-179, 2016.
- [5] R. Boiocchi *et al.*, "Control of wastewater N₂O emissions by balancing the microbial communities using a fuzzy-logic approach," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, n.º 7, pp. 1157-1162, 2016.
- [6] I. Benitez, y Blanco, "Recuperación de metano y reducción de emisiones en PTAR Nuevo Laredo, Tamaulipas, México". TYCA, pp 88, 2017.
- [7] Y. Lorenzo-Toja *et al.*, "Beyond the conventional life cycle inventory in wastewater treatment plants," *Science of the Total Environment*, vol. 553, pp. 71-82, 2016.

- [8] B. Meléndez *et al.*, “Estudio evaluativo del manejo de biosólidos para el caso de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) El Salitre,” [En línea], Disponible: <http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/handle/6789/2280>
- [9] D. Kyung *et al.*, “Estimation of CO₂ emission from water treatment plant - Model development and application,” *Journal of Environmental Management*, vol. 131, pp. 74-81, 2013.
- [10] C. Baresel *et al.*, “Comparison of nitrous oxide (N₂O) emissions calculations at a Swedish wastewater treatment plant based on water concentrations versus off-gas concentrations,” *Advances in Climate Change Research*, vol. 7, n.º 3, pp. 1-7, 2016.
- [11] D. Blanco *et al.*, “Análisis de la huella de carbono en una planta de tratamiento de agua tipo carrusel”, *Tecnoagua*, marzo-abril, 2014.
- [12] C. Wei-Hsianh *et al.*, “Comparing volatile organic compound emissions during equalization in wastewater treatment between the flux-chamber and mass-transfer methods”, *Process Safety and Environmental Protection*, vol.109, pp. 410-419, 2017.
- [13] O. Ashrafi, L. Yerushalmi y F. Haghghat, “Mathematical modeling of GHG emission in wastewater treatment plants: steady-state vs. dynamic”, presentado en EIC Climate Change Technology Conference, Montreal, 2013.
- [14] SERVICOMUNAL S.A., “Estimación de emisiones atmosféricas”, de Proyecto “Planta de Tratamiento de Aguas Servidas Colina”, Santiago de Chile, Sustentable.cl S.A., 2009.
- [15] Alcaldía de Bogotá *et al.*, “Inventario de emisiones de gases efecto invernadero para la región Cundinamarca-Bogotá,” [En línea], Disponible: <http://www.oab.ambientebogota.gov.co/es/documentacion-e-investigaciones/resultado-busqueda/inventario-de-emisiones-de-gases-efecto-invernadero-para-la-region-bogota-cundinamarca>
- [16] CDIM y ESAP, “Plan de Ordenamiento Territorial: conceptos básicos de elaboración y aspectos relevantes para su revisión y ajuste 2017,” [En línea], Disponible: http://cdim.esap.edu.co/bancomedios/Documentos%20PDF/pot_%20lenguazaque_.pdf.
- [17] Essere Ltda., “Estudios y diseños de obras de rehabilitacion y prediseños de ampliacion de 19 PTAR”, Bogotá, 2005.
- [18] A. Pulido *et al.*, *Inventario nacional y departamental de gases efecto invernadero- Colombia*, Bogotá: Puntoaparte Bookvertising, 2016.
- [19] OCDE *et al.*, *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*, Hayama: IGES, 2006.
- [20] A. Meneses y E. Hernández, “Identificación de emisiones directas e indirectas de gel en el sector tratamiento y disposición de aguas residuales: bases para la formulación de proyectos mdl en ptar”, *Bistua*, vol. 2, n.º 1, pp. 60-69, 2004.
- [21] M. Vargas *et al.*, “Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero: un insumo en la gestión del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR)”, *Gestión y Ambiente*, vol. 18, n.º 1, pp. 61-79, 2015.
- [22] S. Eggleston *et al.*, “Tratamiento y eliminación de aguas residuales”, en *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*, Vol. 5, p. 31, 2006.

- [23] A. Prata *et al.*, "Wind friction parametrisation used in emission models for wastewater treatment plants," *Water Research*, vol. 124, pp. 49-66, 2017.
- [24] C. Wen-Hsi *et al.*, "Volatile organic compound emissions from wastewater treatment plants in Taiwan: Legal regulations and costs of control," *Journal of Environmental management*, vol. 88, n.º 4, pp. 1485-1494, 2007.
- [25] A. Aboobakar *et al.*, "Nitrous oxide emissions and dissolved oxygen profiling in a full-scale nitrifying activated sludge treatment plant," *Water Research*, vol. 47, n.º 2 pp. 524-534, 2013.
- [26] P. Czepiel *et al.*, "Methane Emissions from Municipal Wastewater Treatment Processes," *Environmental Science Technology*, vol. 27, n.º12, pp. 2472-2477, 1993.
- [27] X. Wang *et al.*, "Greenhouse gas emissions from landfill leachate treatment plants: A comparison of young and aged landfill," *Waste Management*, vol. 37, n.º 7, pp. 1-9, 2014.
- [28] C. Zhang *et al.*, "Emission factor for atmospheric ammonia from a typical municipal wastewater treatment plant in South China," *Environmental Pollution*, vol. 220, pp. 963-970, 2017.
- [29] P. Pereira *et al.*, "Controlling factors of nitrous oxide emissions from a conventional activated sludge wastewater treatment plant," *Engvista*, vol. 17, n.º 3, pp. 375-384, 2015.
- [30] Z. Bao *et al.*, "Characteristic of direct CO2 emissions in four full-scale wastewater treatment plants," *Desalination and Water Treatment*, vol. 54, n.º 4-5, pp. 1070-1079, 2015.
- [31] S. Zeng *et al.*, "Efficiency assessment of urban wastewater treatment plants in China: Considering greenhouse gas emissions," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 120, 2016.
- [32] M. J. Kampschreur *et al.*, "Dynamics of nitric oxide and nitrous oxide emission during full-scale reject treatment," *Water Research*, vol. 42, n.º 3, pp. 812-826, 2008.
- [33] Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE), Proyecciones de población [En línea], Disponible: <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>.
- [34] D. Nolasco, "Desarrollo de proyectos MDL en plantas de tratamiento de aguas residuales", Banco Interamericano de Desarrollo, 2010.
- [35] J. P. Miranda *et al.*, "El análisis del ciclo de vida aplicado a las plantas de tratamiento de aguas residuales," *Ciencia y Sociedad República Dominicana*, vol. 41, n.º 3, pp. 617-636, 2016.
- [36] Global Methane Initiative, "El metano de las aguas residuales municipales: Reducir emisiones, avanzar en la recuperación y aprovechar oportunidades", [En línea], Disponible: https://www.globalmethane.org/documents/ww_fs_spa.pdf, 2012.
- [37] R. P. Fort, "Emisión de gases de efecto invernadero en el tratamiento de aguas residuales mediante humedales construidos," Tesis, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2012.
- [38] A. R. Caballero *et al.*, "Evaluation of process conditions triggering emissions of green-house gases from a biological wastewater treatment system," *Science of the Total Environment*, vol. 493, pp. 384-391, 2014.

- [39] D. A. Nolasco, “Desarrollo de proyectos MDL en plantas de tratamiento de aguas residuales,” Banco Iberoamericano de Desarrollo, [En línea], Disponible: <https://publications.iadb.org/es/publicacion/15225/desarrollo-de-proyectos-mdl-en-plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales>, 2010.
- [40] M. A. Jurado y I. D. Mercado, “Emisiones de gases de efecto invernadero: ¿Las ecotecnologías, soluciones a un problema ambiental?,” *Retema*, noviembre-diciembre, vol. 23, pp. 54-61, 2010.
- [41] M. Goro *et al.*, “Estimation of the effects of chemically-enhanced treatment of urban sewage system based on life-cycle management,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 9, pp. 23-31, 2013.
- [42] K. Y. Park *et al.*, “Emission and Control of Nitrous Oxide from a Biological Wastewater Treatment System with Intermittent Aeration,” *Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol. 90, n.º 3, pp. 247-252, 2000.
- [43] M. Shoeib *et al.*, “Emission of poly and perfluoroalkyl substances, UV-filters and siloxanes to air from wastewater treatment plants,” *Environmental Pollution*, pp. 1-10, 2016.
- [44] D. de Hass *et al.*, “Energy and Greenhouse Footprints of Wastewater Treatment Plants in South-East Queensland,” Australian Water Association, [En línea], Disponible: https://www.researchgate.net/publication/43528396_Energy_and_greenhouse_footprints_of_wastewater_treatment_plants_in_South-east_Queensland, 2009.
- [45] T. Pan *et al.*, “Estimate of life-cycle greenhouse gas emissions from a vertical subsurface flow constructed wetland and conventional wastewater treatment plants: A case study in China,” *Ecological Engineering*, vol. 37, n.º 2, pp. 248-254, 2011.
- [46] N. Salinas y C. Bustos, “Estudio de políticas, medidas e instrumentos para la mitigación de gases de efecto invernadero en el sector aguas residuales en México,” Ciudad de México D.F., 2012.
- [47] M. A. Martínez Prado, “Estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero para el estado de Durango, México,” *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 15, n.º 2, pp. 575-601, 2016.
- [48] M. G. Melgarejo Ramírez, “Evaluación de emisiones de N₂O en sistemas de tratamiento de aguas residuales,” Tesis, Escola de Camins, Barcelona, 2016.
- [49] J. B. Carrasco Leal (consultor), “Factores de emisión considerados en la herramienta de cálculo de la huella de carbono corporativa,” [En línea], Disponible: https://www.acueducto.com.co/wps/html/resources/2018ag/huella_carbono/informe_gei/6_anexo_3Factores_Emission_Herramienta_Inventario_GEI_EAB_2014.pdf, 2015.
- [50] L. Delgado *et al.*, “Huella de carbono de la regeneración de agua,” [En línea], Disponible: http://www.veoliawatertechnologies.es/vwst-iberica/ressources/documents/1/32563,Huella-carbono_TA_JUNIO2012.pdf, 2012.