



# enerLAC

Revista de  
Energía de  
Latinoamérica  
y el Caribe

Generación  
de energía  
en PTAR

Pronóstico  
energía eólica  
en Uruguay

Simulación  
sistema  
fotovoltaico  
en Haití

Operación  
óptima de  
baterías

Transición  
sistemas de  
energía eléctrica

Pronósticos  
hidrológicos y  
el sistema eléctrico

Modelo numérico  
de la combustión de  
tronco cilíndrico



© Copyright Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) 2019. Todos los derechos reservados.

ISSN: 2602-8042 (Impresa)

ISSN: 2631-2522 (Electrónica)

Dirección: Av. Mariscal Antonio José de Sucre N58-63 y  
Fernández Salvador.  
Quito - Ecuador

Página web Revista ENERLAC: <http://enerlac.olade.org>

Página web OLADE: [www.olade.org](http://www.olade.org)

Mail ENERLAC: [enerlac@olade.org](mailto:enerlac@olade.org)

Teléfonos: (+593 2) 2598-122 / 2598-280 / 2597-995



---

**COMITÉ EDITORIAL**

Alfonso Blanco  
SECRETARIO EJECUTIVO DE OLADE

Pablo Garcés  
ASESOR TÉCNICO DE OLADE

Marcelo Vega  
COORDINADOR DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DE LA  
ASOCIACIÓN DE UNIVERSIDADES GRUPO MONTEVIDEO  
(AUGM)

---

**COMITÉ AD-HONOREM**

Andrés Romero C.  
*Pontificia Universidad Católica de Chile.*

Leonardo Beltrán.  
*Institute of the Americas. México.*

Manlio Coviello.  
*Pontificia Universidad Católica de Chile.*

Mauricio Medinaceli.  
*Investigador independiente. Bolivia.*

Ubiratan Francisco Castellano.  
*Investigador independiente. Brasil.*

---

**COORDINADORES DE LA EDICIÓN**

DIRECTOR GENERAL  
Alfonso Blanco

DIRECTORES EJECUTIVOS  
Pablo Garcés  
Marcelo Vega

COORDINADORA DE PRODUCCIÓN  
Blanca Guanocunga. Bibliotecaria OLADE

---

**COLABORADORES**

Raquel Atiaja. *Técnica de Área Informática OLADE*

Ana María Arroyo. *Diseño y diagramación*

**REVISORES**

Santiago Garrido. *Universidad Nacional de Quilmes. Instituto de Estudios sobre la Ciencia y la Tecnología. Argentina.*

Emilia Ruggeri. *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET – IESCT). Universidad Nacional de Quilmes. Argentina.*

Diego Coronel Bejarano. *Universidad Nacional de Asunción. Grupo de Investigación en Sistemas Energéticos (GISE - FPUNA). Paraguay.*

Luciana Clementi. *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Argentina.*

José Javier Alonso Mateos. *Universidad Internacional de Valencia. España.*

Oscar Oviedo. *Universidad Nacional de Córdoba (UNC - INFIQC). Argentina.*

Alfredo Caguao Yagua. *Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda (UNEFM). Venezuela.*

Byron Chilibingua Mazón. *Consultor independiente. Ecuador.*

Reynaldo Payano Almanzar. *Investigador independiente. Chile.*

Iván López. *Universidad de la República (UdelaR) - FING-IMFIA. Uruguay.*

Cristhian Carrasco Villanueva. *Universidad Mayor de San Andrés (UMSA). Bolivia.*

Ojilve Ramón Medrano Pérez. *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad (CCGS). México.*

---

Diseño de la portada y contraportada Ana María Arroyo y Francisco Pérez.

**NOTA DE RESPONSABILIDAD DE CONTENIDO**

Las ideas expresadas en este documento son responsabilidad de los autores y no comprometen a las organizaciones mencionadas.

# GENERACIÓN DE ENERGÍA EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR). EL CASO DE LA PTAR ZONA NORESTE, VILLAHERMOSA, MÉXICO

Tania Patricia Ramírez López<sup>1</sup>, Ojilve Ramón Medrano Pérez<sup>2</sup>, Luis Alberto Escobedo-Cazán<sup>3</sup>

Recibido: 18/03/2020 y Aceptado: 05/04/2020  
ENERLAC. Volumen IV. Número 1. Junio, 2020 (12-30).



Foto de Ivan Bandura en Unsplash.

1 Técnico Superior Universitario en Energías Renovables Área Calidad y Ahorro de Energía por la Universidad Tecnológica de Tabasco (UTTAB). Actualmente, es estudiante de término de la Ingeniería en Energías Renovables en la UTTAB. Entre otras actividades profesionales ha realizado estadía profesional en la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y en el Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A. C. (CCGS), México. [taniaprl08@gmail.com](mailto:taniaprl08@gmail.com)

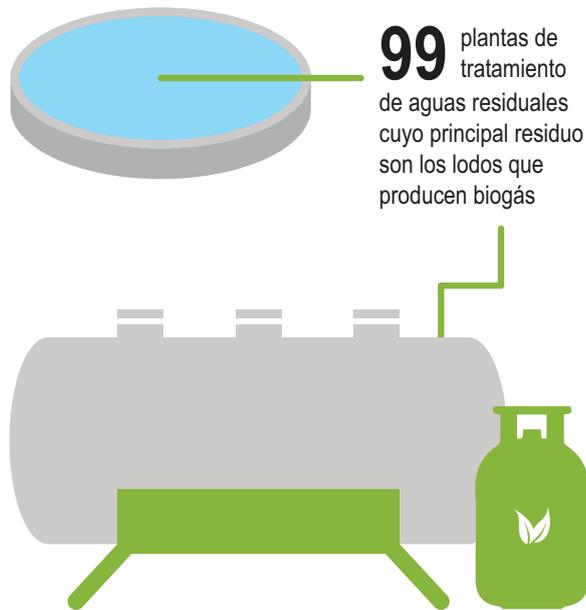
2 Ingeniero Civil por la Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD). Máster y doctor en Hidrología y Gestión de los Recursos Hídricos por la Universidad de Alcalá de Henares (UAH). Comisionado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) para desempeñarse como Cátedras-CONACYT en el Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A.C. (CCGS). Líneas de investigación: cuencas, agua (superficial y subterránea) y servicios conexos, energías renovables y eficiencia energética. Entre otros trabajos ha sido autor o coautor en artículos de investigación. [ojilve.medrano@hotmail.com](mailto:ojilve.medrano@hotmail.com)

3 Ingeniero Civil. Ha incursionado en líneas de investigación y el desarrollo de proyectos sobre caracterización y diseño de sistemas de tratamientos de aguas residuales. Ha impartido las asignaturas de sistemas hidráulicos, gestión ambiental, redes y servicios industriales en la Universidad Tecnológica de Tabasco (UTTAB). Impartió curso-taller de Topografía aplicada en el Instituto Tecnológico de los Ríos y en el Colegio de Ingenieros Civiles de Tabasco. Actualmente es director de la División Académica de Procesos Industriales en la UTTAB. [d.ppyimi@uttab.edu.mx](mailto:d.ppyimi@uttab.edu.mx)

## RESUMEN

El biogás es una fuente de energía importante y abundante en las plantas de tratamiento de aguas residuales. En Tabasco, existen alrededor de 99 plantas de tratamiento de aguas residuales cuyo principal residuo son los lodos que producen biogás, el cual actualmente no es aprovechado debido a que no existen estudios que permitan conocer el potencial de generación de biogás en las plantas del estado. Por lo que, en este trabajo tiene como objetivo estimar el potencial de generación de energía eléctrica a partir del biogás generado en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Zona Noreste mediante cuatro métodos para cuantificación de producción de biogás, siendo una de las más grandes de Tabasco y cuyas características son aptas para el estudio. Los resultados muestran una producción de biogás diaria promedio de 2,671.49 m<sup>3</sup>, cuyo potencial energético es de 17,312.59 kWh/día para una reducción del 78% las emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Por tanto, este estudio puede servir de base para determinar el potencial de generación de electricidad a través de fuentes renovables como el biogás con el que cuenta Tabasco, e impulsar y promover el desarrollo e implantación de este tipo de tecnología en el estado de Tabasco.

**Palabras clave:** Tratamiento de Aguas Residuales, Lodos, Fuentes Renovables, Biogás, Electricidad, México.



## ABSTRACT

*Biogas is an important and abundant source of energy in wastewater treatment plants. In Tabasco, there are about 99 wastewater treatment plants whose main waste is the sludge that produces biogas, which is currently not used because there are no studies that allow to know the potential of biogas generation in the plants in the state. So, in this project it aims to estimate the potential of electricity generation from the biogas generated in the "Zona Noreste" Wastewater Treatment Plant using four methods for quantifying biogas production, being one of the largest in Tabasco and whose characteristics are suitable for study. The results show an average daily biogas production of 2,671.49 m<sup>3</sup>, whose energy potential is 17,312.59 kWh/day for a 78% reduction of Greenhouse Gases. Therefore, this study can serve as a basis for determining the potential of electricity generation through renewable sources such as the biogas with which Tabasco has and promote the development and implementation of this type of technology in the state of Tabasco.*

**Keywords:** Wastewater Treatment, Sludge, Renewable Sources, Biogas, Electricity, Mexico.

## INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales son aquellas cuya calidad ha sido afectada negativamente por las actividades antrópicas en centros de poblaciones y actividades productivas, siendo estas una fuente de contaminantes y desechos. El tratamiento de aguas residuales es un proceso que limpia y permite su reincorporación a los mantos acuíferos o a los sistemas de agua potable (Ceja de la Cruz, 2019) y, por lo tanto, permite que el agua retorne al medio natural sin causar externalidades.

En este sentido, en los últimos años el tratamiento de aguas residuales, como parte de la infraestructura del servicio de agua y saneamiento de los centros de población, se ha transformado en una infraestructura que ofrece mucho más que un tratamiento habitual. En la actualidad, están siendo redefinidas con proyectos innovadores que integran criterios de sostenibilidad y circularidad del recurso, como instalaciones de reutilización eficientes, de producción y aprovechamiento de biogás, así como de recuperación de nutrientes y de reducción de emisiones (CONAMA, 2019). Por lo tanto, la valorización del recurso va de la mano con el aprovechamiento de los residuos en el sector agua. Consecuentemente, los residuos de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) están siendo potenciados para usos agrícolas y para la autosuficiencia energética de estas instalaciones. En particular, el biogás, compuesto principalmente por metano, cuenta con diferentes usos debido a sus propiedades. La conversión de su energía química en energía eléctrica, térmica o en ambas permite aprovecharlo, por ejemplo, para generar electricidad de autoconsumo en una PTAR, para calentar un digester de lodos a fin de elevar la eficiencia del proceso de digestión anaerobia y/o para secar y reducir el volumen de los lodos digeridos antes de su disposición final. Además, el biogás puede emplearse como combustible vehicular, industrial o residencial (López-Hernández *et al.*, 2017).

Cabe destacar que las aguas residuales pueden ser tratadas tanto en medios anaeróbicos (en ausencia de oxígeno) como en aeróbicos (en presencia de oxígeno). En particular, las plantas anaeróbicas pueden representar una fuente de metano (CH<sub>4</sub>) y de emisiones de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) cuando no se recupera energía, en cambio las plantas aeróbicas pueden contribuir a las emisiones indirectas por su alto consumo energético. Por lo tanto, la selección entre ambos procesos de tratamiento representa un impacto en las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). En este sentido, se estima que las PTAR generan el 5% de las emisiones totales de metano en el mundo y se espera que estas emisiones incrementen alrededor de 28% de 2005 a 2030, pasando de 477 a 609 millones de toneladas métricas de CO<sub>2</sub> equivalentes (MtCO<sub>2</sub>eq) (Aguilar-Benítez & Blanco, 2018). Efectivamente, la recuperación de energía en estos procesos repercute favorablemente al reducir emisiones y promover la autosuficiencia energética de este tipo de instalaciones.

A todo ello, este tipo de actuaciones responden a metas globales planteadas por las Naciones Unidas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) N°6, N°7 y N°13 establecidos en la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible. En particular, el “Objetivo 6: **Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos**”; el “Objetivo 7: **Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos**”, y el “Objetivo 13: **Acción por el clima**” (Organización de las Naciones Unidas, 2015). En este contexto, como resultado de la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y tecnologías relativas a la energía limpia, se podrían alcanzar mejores estudios sobre el aprovechamiento de fuentes renovables que repercutan en un desarrollo consolidado de tecnologías de generación como el biogás producido en las PTAR.

A nivel internacional se han elaborado estudios relacionados con el potencial de generación de biogás en plantas de tratamiento de aguas

residuales municipales e industriales y su potencial energético. Por ejemplo, en Colombia se evaluó la eficiencia de los reactores *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) en una planta de tratamiento de aguas residuales municipal, la cual produce 37,541 m<sup>3</sup>/mes de biogás. También en el municipio de Balaguer, en la provincia de Lleida, España, se elaboró un proyecto de aprovechamiento del biogás en una PTAR mediante un sistema de cogeneración, utilizando el calor y electricidad generados dentro del proceso de la planta. Asimismo, otro proyecto innovador es el proyecto de biogás vehicular del Canal Isabel II, Madrid, España, procedente de la digestión de fangos de las estaciones depuradora de aguas residuales (CONAMA, 2019). En adición a ello, en Estados Unidos se realizaron estudios para determinar el potencial energético con el que cuentan sus plantas de tratamiento de aguas residuales teniendo como resultado que al día se generan 40 mil millones de galones de aguas residuales (151.42 millones de m<sup>3</sup>) cuyo potencial energético total es de 6.65 x 10<sup>7</sup> MMBtu/año (millones de Btu: unidades térmicas británicas), de estos 3.52 x 10<sup>7</sup> MMBtu/año corresponden a energía térmica y 9.11 x 10<sup>9</sup> kWh/año a energía eléctrica. Estas plantas utilizan biogás de manera beneficiosa para el desplazamiento y la producción de energía, incluido el calentamiento del digestor, la calefacción en el sitio y exportan energía a la red (Shen *et al.*, 2015).



Efectivamente, la recuperación de energía en estos procesos repercute favorablemente al reducir emisiones y promover la autosuficiencia energética de este tipo de instalaciones.

Igualmente, en Cataluña, España se realizó un balance energético para cinco PTAR que determinó el porcentaje de energía eléctrica que puede ser suministrada por el biogás que producen las mismas (Silvestre *et al.*, 2015). En adición a ello, en París, Francia, se elaboró un estudio similar para cinco de sus PTAR, con la finalidad estimar la cantidad de biogás producido en cada planta y su potencial energético para ser aprovechado mediante sistemas de cogeneración dentro del proceso de tratamiento de aguas residuales (Amosse y Nedelec, 2010). En este mismo contexto, en Brasil se evaluó la factibilidad técnica y económica del aprovechamiento del biogás (producido en las plantas) en sistemas de cogeneración en ocho de sus PTAR (Silva Dos Santos *et al.*, 2016).

En cuanto a México, de acuerdo con SENER (2018) entre 2007 y 2017 la capacidad de generación eléctrica con biogás creció un 24.2% en promedio anual. Además, en 2017, la capacidad instalada para generación eléctrica a partir de biogás fue 169 MW, teniendo un crecimiento respecto al año anterior de 103% equivalente a 86 MW de nueva capacidad instalada. Específicamente, en cuanto a la generación de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales, según el Atlas Nacional de Biomasa (SENER & CFE, 2016), en el 2016 México contaba con un potencial energético a partir de la producción de metano (CH<sub>4</sub>) en estas fuentes de 22,158 TJ/a. En adición a ello, cabe mencionar que de acuerdo con Aguilar-Benítez & Blanco (2018) las emisiones de gas metano se incrementaron un 126.6% entre 1990-2010, con emisiones de 3,948.2 giga gramos (Gg) de GEI y 8,946.5 giga gramos de CO<sub>2</sub>eq, con una tasa de crecimiento anual de 4.2% como consecuencia del impulso dado al tratamiento de aguas residuales en los últimos años.

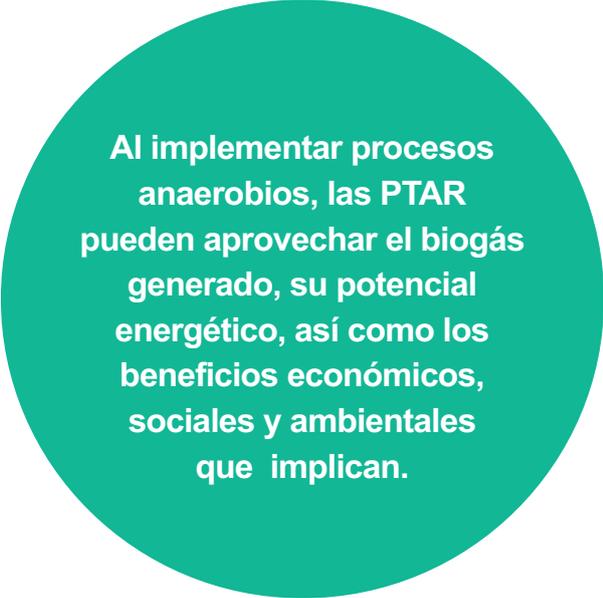
Globalmente, en México existen alrededor de 2,540 plantas de tratamiento de aguas residuales registradas, que procesan casi cien mil litros por segundo. Según datos oficiales, se reportan como tratadas el 57% de las aguas residuales

colectadas en el país. Sin embargo, más de la mitad de las plantas de tratamiento municipales presentan una calificación de mala a pésima en su funcionamiento (Ceja de la Cruz, 2019). En particular, Jalisco, Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Tabasco y Campeche son algunos de los estados con más del 50% de sus plantas de tratamiento fuera de operación, principalmente por las altas inversiones en operación y mantenimiento y el elevado consumo de energía (de Anda-Sánchez, 2017). Cabe mencionar que, en México, el tema de la calidad del agua es poco discutido y estudiado (Vidal-Álvarez, 2018), encontrándose el sector saneamiento rezagado a nivel político (Maya-Rodríguez & Pineda-Pablos, 2018) y tecnológico (Domínguez-Montero *et al.*, 2017).

En este contexto, durante los últimos años se ha estudiado el potencial energético por medio del biogás de diversas plantas de tratamiento de aguas residuales en los estados de Jalisco, Nuevo León, Guanajuato, Querétaro, Coahuila, Hidalgo y Sonora. Por mencionar algunas, la PTAR Agua Prieta en Jalisco produce, a través del biogás, 87.44 GWh/año de electricidad; la PTAR Dulces Nombres en Nuevo León produce alrededor de 40.2 GWh/año de electricidad gracias al biogás que se genera en la misma (Equipo técnico EnRes, 2018). En cuanto al sur de México, se tiene el caso del estado de Tabasco, donde actualmente en la PTAR Chichicapa se aprovecha el biogás producido por la misma para generación de energía eléctrica. Adicionalmente, desarrollaron un estudio de campo para 105 plantas de tratamiento de aguas residuales a lo largo del país, que trabajan bajo diversos tipos de procesos, cuya característica principal es que todas operan con un caudal mayor a 200 l/s. De estas PTAR, 51 se ubican al norte del país, 42 se encuentran en el centro y tan sólo 12 pertenecen a estados del sureste de la república. El fin de este estudio fue estimar su potencial energético, resultando 308,457.04 MWh/año en total y con ello también se estimó el número de viviendas que pueden ser alimentadas por la energía producida por las PTAR, dando como resultado un total de 101,408 viviendas

(Mantilla-Morales *et al.*, 2017). Cabe mencionar que, en México y el resto de los países de Latinoamérica, la mayor parte de las PTAR no utilizan procesos anaerobios y donde sí lo hacen no se aprovecha el biogás generado, con lo que se desperdicia su potencial energético, lo mismo que los beneficios económicos, sociales y ambientales que ello implica (López-Hernández *et al.*, 2017).

Desde esta perspectiva, el presente manuscrito tiene como objetivo estimar el potencial de generación de energía eléctrica (utilizando biogás como fuente) de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Zona Noreste en Villahermosa, Tabasco, mediante cuatro métodos para cuantificación de producción de biogás. Asimismo, se contempla estimar el efecto asociado a la reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de este tipo de instalaciones. Sobre esta base, este trabajo está organizado de la siguiente manera: a) se describe el área de estudio; b) se plantea la metodología empleada para realizar los cálculos correspondientes a la estimación del potencial de generación de energía eléctrica en las PTAR; c) se presentan los resultados y la discusión; y d) se plantea la conclusión.



**Al implementar procesos anaerobios, las PTAR pueden aprovechar el biogás generado, su potencial energético, así como los beneficios económicos, sociales y ambientales que implican.**

## MATERIALES Y MÉTODOS

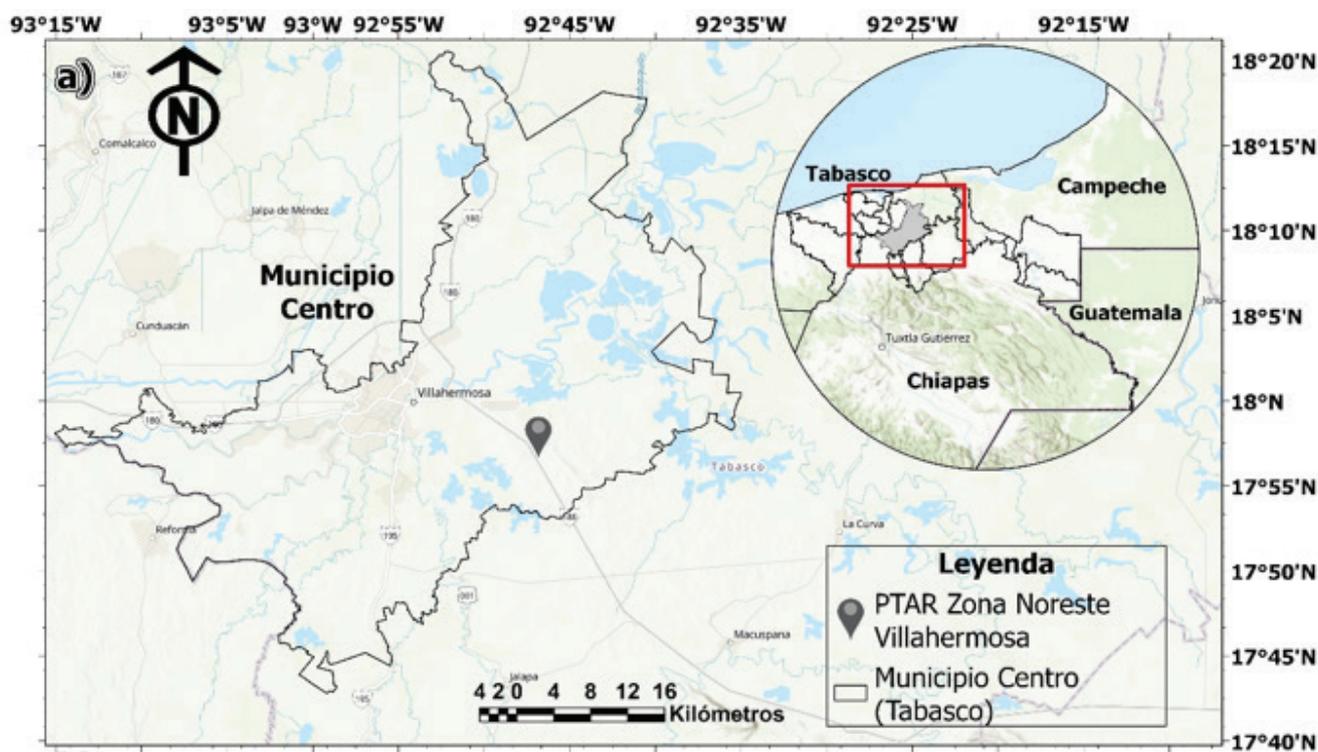
### Área de estudio

El estado de Tabasco se encuentra en la región sureste de México; desde la planicie costera del Golfo de México, hasta las montañas del norte de Chiapas. Tiene una superficie de 24,661 km<sup>2</sup> que representa el 1.3% de la superficie del país, en ella se asientan los 17 municipios que integran la división política del estado y donde se concentra una población de cerca de 2.4 millones de habitantes. Los límites del estado de Tabasco son naturales y artificiales, al norte limita con el Golfo de México y Campeche; al sur con Chiapas y la república de Guatemala; al oeste con el estado de Veracruz, mientras que, al este, con el estado de Campeche y la república de Guatemala. Su capital administrativa es la ciudad de Villahermosa, ubicada en el municipio Centro (figura 1a) (Hernández-Parra *et al.*, 2016).

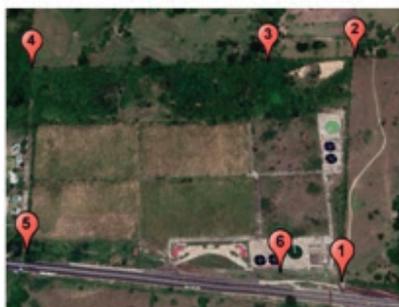
Por su ubicación en la zona tropical, su escasa elevación con respecto al nivel del mar y su cercanía con el Golfo de México a lo largo de 190 kilómetros de costa, el clima del estado se considera como clima cálido con influencia marítima. Por lo tanto, el clima tropical húmedo es una característica muy singular de la región, con temperaturas que van de los 15°C en los meses más fríos (enero y diciembre) hasta 42°C en los más calurosos (abril a agosto); la temperatura promedio es de 26°C (Hernández-Parra *et al.*, 2016) y una precipitación anual promedio de 2,550 mm.

Por otro lado, en cuanto a los aspectos socio-económicos, el municipio Centro no solo es el más poblado con una población es de 640,359 habitantes (INEGI, 2010), sino también donde convergen las actividades socioeconómicas y políticas de la entidad. Sus principales actividades económicas son el comercio y la prestación de servicios estatal como regional. Cabe mencionar que la actividad económica clave en el estado de Tabasco es la explotación petrolera (Hernández-Parra *et al.*, 2016).

Figura 1. Ubicación del municipio Centro (a) y de la PTAR Zona Noreste, Villahermosa (b).



b)



**Coordenadas geográficas**

Vértice	Latitud N	Longitud O
1	17°56'29.06"	92°46'53.06"
2	17°56'36.53"	92°46'38.06"
3	17°56'41.45"	92°46'41.97"
4	17°56'55.00"	92°45'52.55"
5	17°56'47.40"	92°47'03.47"
6	17°56'32.61"	92°46'54.92"

Fuente. Elaboración de los autores en QGIS 3.10.0 y Google Earth Pro con información espacial del Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía (INEGI, 2020) y de Impulsora Nacional de Innovación Tecnológica S. A. de C. V. (2007).

En cuanto a infraestructura de agua y saneamiento en el estado de Tabasco, según el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), al 2018 cuenta con 99 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales ubicadas a lo largo de sus 17 municipios, con una capacidad instalada de 2.97 m<sup>3</sup>/s y un

caudal tratado de 2,665 m<sup>3</sup>/s, como se puede observar en la Tabla 1. En particular, la PTAR Zona Noreste del municipio Centro (figura 1b), con un caudal tratado de 60,480 m<sup>3</sup>/día y una población beneficiada de 232,603 habitantes es una de las más importantes del estado.

Tabla 1. Plantas de tratamiento de aguas residuales, 2018.

	Residual Municipal	Residual Industrial
Número en operación	99	152
Capacidad instalada (m <sup>3</sup> /s)	2.970	1.522
Caudal procesado (m <sup>3</sup> /s)	2.665	1.372

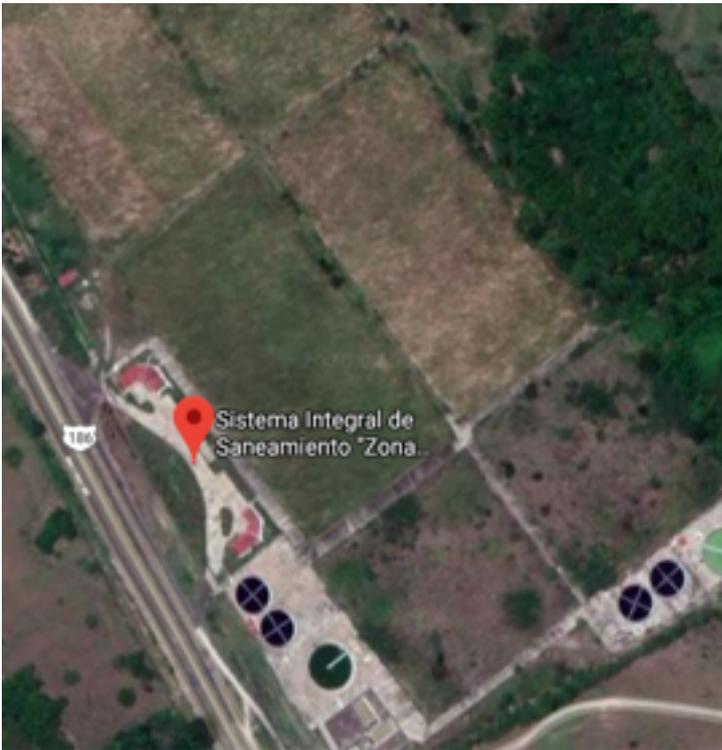
Fuente. CONAGUA (2018). Subdirección General Técnica, Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento.

### Características de la PTAR Zona Noreste y su afluente

La PTAR Zona Noreste ubicada en el municipio Centro del estado de Tabasco. Se localiza en

el kilómetro 18 de la carretera Villahermosa-Macuspana, en la Ranchería Coronel Traconis 3ra sección, municipio de Centro, Tabasco, México. Las principales características de la PTAR se describen en la Tabla 2.

Tabla 2. Principales características de la PTAR Zona Noreste y su afluente.

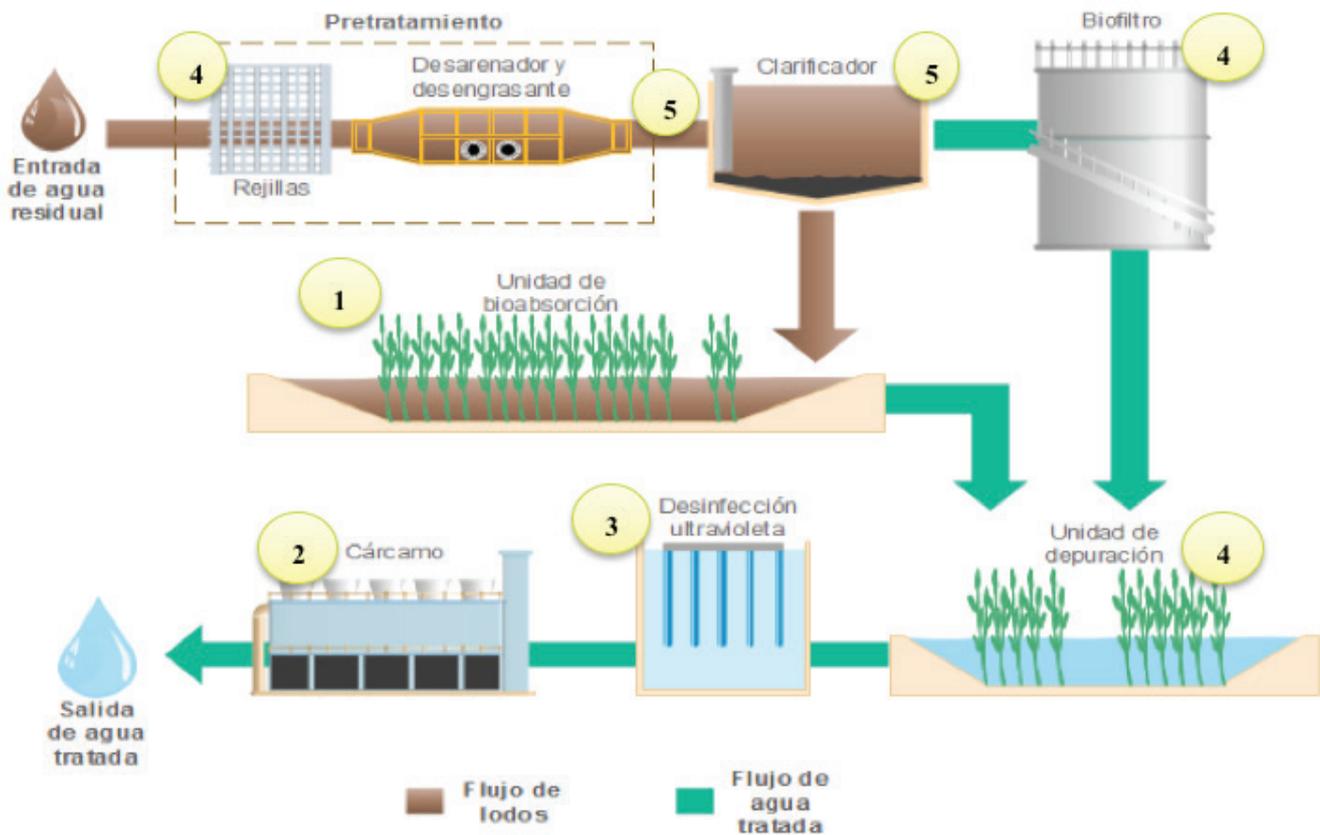
	Caudal tratado	700 l/s 60,480 m <sup>3</sup> /día
	Capacidad instalada	700 l/s 60,480 m <sup>3</sup> /día
	Estatus	Activa
	Tipo de proceso	Filtros biológicos, rociadores o percoladores
	Tiempo de proceso	5 días
	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	142.07 mg/l
	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	211.5 mg/l
	Sólidos Volátiles (SV)	128.71 mg/l
	Población beneficiada	232,603 habitantes
	Superficie ocupada	299,378.59 m <sup>2</sup>

Fuente. Elaboración de los autores basada en información solicitada a la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento (CEAS), Tabasco.

En relación al proceso de operación de la PTAR Zona Noreste, éste se ejemplifica en la figura 2, la cual se describe brevemente a continuación:

1. **Pretratamiento** de las aguas residuales para eliminar basura de gran tamaño (distribuidor con rejillas y rampas laterales).
2. **Distribución** de aguas residuales a cada módulo de la PTAR (mediante fuerza de gravedad).
3. **Tratamiento primario** (clarificador que trabaja mediante principios físicos).
4. **Tratamiento secundario** (biofiltro reductor de carga orgánica en agua residual, unidad de bioabsorción de lodos drenados del clarificador, unidades depuradoras de la corriente líquida del clarificador).
5. El agua tratada es **desinfectada** en una unidad ultravioleta y posteriormente se descarga al arroyo El Zapote.

Figura 2. Diagrama de proceso de la PTAR Zona Noreste.



Fuente. Elaboración de los autores en *EdrawMax*.

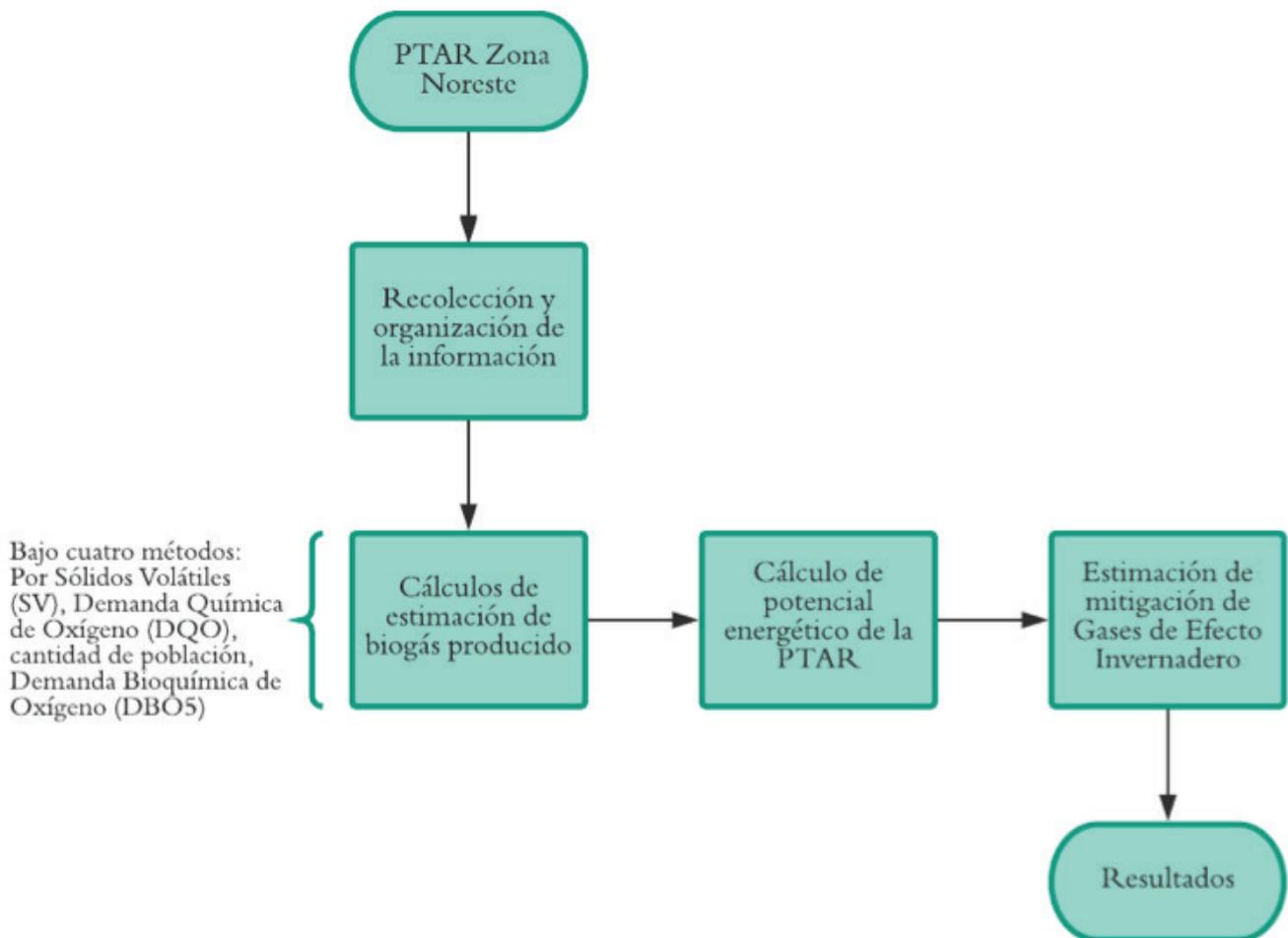
**Nota.** Características técnicas PTAR Zona Noreste: **(1)** Tanto las rejillas como las rampas laterales ocupan una superficie de 143.64 m<sup>2</sup> por unidad. **(2)** El canal de distribución ocupa una superficie de 85.68 m<sup>2</sup>. **(3)** Cada clarificador requiere una superficie de 2,207 m<sup>2</sup>, siendo utilizadas tres unidades en total. **(4)** Se utilizan 2 biofiltros de PVC hidráulico marca *Brentwood* y cada uno ocupa 615.09 m<sup>2</sup>. La unidad de bioabsorción se extiende 17,523 m<sup>2</sup>, mientras que las unidades depuradoras tipo A 31,307.76 m<sup>2</sup> y las de tipo B 30,866.44 m<sup>2</sup>, en éstas se utilizan plantas macrófitas como el espadaño (*Typha latifolia*), carrizo (*Phragmites australis*) y el junco (*Scirpus lacustris*). **(5)** La unidad UV ocupa 17.57 m<sup>2</sup> mientras que el cárcamo de salida unos 86.59 m<sup>2</sup> (Impulsora Nacional de Innovación Tecnológica, S. A. de. C. V., 2007).

## METODOLOGÍA

La metodología seguida en este manuscrito, en primer lugar, ha estado apoyada en artículos, bases de datos e información institucional nacional e internacional relacionada al tema estudiado. En segundo lugar, para realizar los cálculos correspondientes a la estimación del biogás en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Zona Noreste se siguieron cuatro métodos de cuantificación: cantidad de sólidos volátiles, cantidad de Demanda Química de Oxígeno (DQO), cantidad de población beneficiada, cantidad de Demanda Bioquímica de

Oxígeno ( $DBO_5$ ). Posteriormente, se procedió a realizar un promedio de cada uno de ellos, y sobre esta base, determinar el potencial energético, así como el porcentaje de dicho potencial que podría abastecer la PTAR en cuanto a electricidad y energía térmica, teniendo en cuenta estudios previos como Cordero-Álvarez (2017). La información necesaria para estos procedimientos fue proporcionada por la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento (CEAS), del estado de Tabasco (figura 3).

Figura 3. Flujograma metodológico.



Fuente. Elaboración de los autores en Lucidchart (<https://www.lucidchart.com/pages/es>).

## 1. Método por cantidad de Sólidos Volátiles (SV)

El cálculo de la cantidad de biogás a partir de la cantidad de sólidos volátiles (SV) se ha estimado considerando la fórmula sugerida por (Berkday & Nas, 2007). En particular, con este criterio se tiene que la cantidad de biogás producido se encuentra entre 0.75 a 1.12 m<sup>3</sup>/kg de sólidos volátiles digeridos.

En este caso, la PTAR en su afluente tiene una cantidad de 128.71 mg/l de Sólidos Volátiles (SV). Para el cálculo se consideró el criterio de 0.8 m<sup>3</sup>/kg SV y un porcentaje de sedimentación de los lodos de 51%. Las fórmulas utilizadas fueron:



Revalorizar los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales y aprovechar su potencial energético, genera importantes beneficios medioambientales.

$$\text{(Ec. 1)} \quad \text{SV afluentes diario} = \text{SV del afluente} * \text{caudal de operación (m}^3/\text{día)}$$

El resultado se convirtió a kg/día para estar bajo la misma unidad del criterio utilizado. Posteriormente, el resultado en kg/día se

multiplica por el porcentaje de sedimentación de los lodos considerados:

$$\text{(Ec. 2)} \quad \text{SV sedimentados} = (\text{SV afluentes diario}) * 0.51$$

Por último, este resultado se multiplica por el criterio de SV considerado anteriormente:

$$\text{(Ec. 3)} \quad \text{Volumen de biogás producido} = (\text{SV sedimentados}) * 0.8 \text{ m}^3 / \text{kg SV}$$

## 2. Método por cantidad de Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Este criterio establece que se producen 0.35 m<sup>3</sup> de biogás/kg de Demanda Química de Oxígeno (DQO) que contiene el afluente y que puede ser digerido. Sin embargo, el rendimiento depende de las condiciones ambientales y se le considera del 60% (Berkday & Nas, 2007).

La PTAR Zona Noreste en su afluente cuenta con una cantidad de 211.5 mg/l de DQO. Se consideró para el cálculo el criterio de 0.35 m<sup>3</sup>/kg DQO y un porcentaje de sedimentación de lodos del 51%. Las fórmulas utilizadas fueron las siguientes:

$$\text{(Ec. 4)} \quad \text{DQO afluentes diario} = \text{DQO del afluente (mg/l)} * \text{caudal de operación en m}^3/\text{día}$$

El resultado se convirtió a kg/día y, posteriormente, se multiplicó el resultado por el porcentaje de sedimentación de lodos considerado.

$$\text{(Ec. 5)} \quad \text{DQO sedimentados} = (\text{DQO afluentes diario}) * 0.51$$

Tomando en cuenta el criterio mencionado previamente:

$$\text{(Ec. 6)} \quad \text{Volumen de biogás producido} = (\text{DQO sedimentados}) * 0.35 \text{ m}^3/\text{kg DQO}$$

### 3. Método por población beneficiada

La producción de biogás también puede estimarse en términos per cápita. En este caso, la generación normal en plantas domésticas de tratamiento está entre 15 a 22 l/persona por día (Berkday & Nas, 2007).

La PTAR Zona Noreste beneficia a 232,603 personas y para el cálculo de cuantificación de biogás se consideró el criterio de 16 l/persona. La fórmula utilizada fue:

$$\text{(Ec. 7)} \quad \text{Volumen de CH}_4 \text{ producido por día} = \text{personas beneficiadas} * 0.016 \text{ m}^3/\text{persona}$$

### 4. Método por cantidad de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)

Por último, se puede calcular la producción de biogás conociendo la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>). Para ello se utilizó *Biogas Wastewater Assessment Technology Tool v1.0*, (BioWATT, por sus siglas en inglés) elaborada por *Global Methane Initiative* y *World Bank Group* en 2016, cuyo propósito es proporcionar una evaluación rápida y preliminar de proyectos de producción de energía a partir de aguas residuales basándose en solo dos datos provistos por el usuario (carga hidráulica promedio y concentración de DBO<sub>5</sub> promedio). Con ella se puede obtener un resumen específico de estimaciones de producción de biogás, potencial de generación de electricidad a partir del biogás producido y ahorro de Gases de Efecto Invernadero asociadas a la electricidad generada por el biogás (*Global Methane*

*Initiative*, 2016)<sup>1</sup>. En la herramienta se introdujo el dato de 142.07 mg/l de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>), que es la cifra correspondiente a la característica del afluente de la PTAR Zona Noreste.

#### Potencial energético del biogás producido

Al obtener la cuantificación de biogás por los cuatro métodos anteriores se procedió a determinar el potencial energético y el porcentaje de energía que podría ser utilizado con base en la energía eléctrica (40%) y térmica (38%) que puede ser recuperada por el tipo de planta de cogeneración a emplear y la capacidad en kW que puede generar. En este caso se consideró una planta con motor de encendido por

1 Para más información sobre esta herramienta visitar su sitio web: [https://www.globalmethane.org/tools-resources/resource\\_details.aspx?r=1913](https://www.globalmethane.org/tools-resources/resource_details.aspx?r=1913)

compresión (diésel) con capacidad entre 51-100 kW de acuerdo con las necesidades de la PTAR Zona Noreste para su autoabastecimiento de acuerdo a las recomendaciones de López-Hernández *et al.*, (2017). Por ello se utilizó la siguiente expresión:

**(Ec. 8)**

$$\text{Promedio de biogás producido} = (\text{cuantificación por SV} + \text{cuantificación por DQO} + \text{cuantificación per cápita} + \text{cuantificación por DBO}_5) \div 4$$

Considerando una concentración de 65% de metano en el biogás y un poder calórico del mismo de 9.97 kWh/m<sup>3</sup>, su potencial energético se calculó de la siguiente manera:

**(Ec. 9)**

$$\text{Potencial energético del biogás producido} = (\text{promedio de biogás producido}) * (0.65) * (9.97 \text{ kWh/m}^3)$$

### Emisiones de GEI evitadas

Para realizar la estimación de las emisiones de GEI evitadas con el aprovechamiento del biogás generado por la PTAR Zona Noreste, se utilizó la metodología aprobada para proyectos de Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) en PTAR AMS IIIH “Recuperación de

Metano en Tratamiento de Aguas Residuales”<sup>2</sup> (Aguilar-Benitez & Blanco, 2018). Con ella se estima la disminución de las emisiones de GEI con la implementación de proyectos de aprovechamiento del biogás. Las ecuaciones 10, 11 y 12 se emplearon con ese fin.

**(Ec. 10)**

$$E_R = B_E - P_E$$

Donde E<sub>R</sub> es la reducción de emisiones, B<sub>E</sub> son las emisiones de base calculadas con la ecuación 11 (las que actualmente genera

la planta) y P<sub>E</sub> son las emisiones con la implementación del proyecto, calculadas con la ecuación 12.

**(Ec. 11)**  $B_E = (QL) (DOC) (MCF_S) (DOC_F) (F) (16/12) (UF) (GWP_{CH_4}) + (EC) (EF)$

**(Ec. 12)**  $P_E = (QL) (DOC) (DOC_F) (F) (16/12) (L) - ((EG) (EF))$

<sup>2</sup> Esta metodología estima la disminución de emisiones GEI con la implementación de proyectos MDL, contrastándola con las emisiones de una línea base (aquellas liberadas bajo las condiciones actuales de operación de la planta). Incluye medidas para la recuperación de biogás de materia orgánica por medio de varias opciones.

Donde:

$QL$  = cantidad de lodo (t/año).

$DOC$  = contenido de materia orgánica en el lodo generado (0.05 para lodo doméstico).

$MCF_S$  = factor de corrección de metano para el sistema de tratamiento del lodo.

$F$  = fracción de metano en el biogás (0.7).

$UF$  = factor de corrección por incertidumbre (0.94).

$GWP_{CH_4}$  = potencial de calentamiento global del metano (21 kgCO<sub>2</sub>e/kgCH<sub>4</sub>).

$L$  = fracción de biogás que se pierde en el sistema de captura, ruteo y utilización (valor sugerido 0.2).

$EG$  = excedente de energía (generación - consumo del proyecto), que desplace el uso de combustibles fósiles o electricidad (MWh/año).

$EC$  = energía consumida en forma de electricidad, consumo de la planta (MWh/año).

$EF$  = factor de emisión de la red eléctrica. (tCO<sub>2</sub>e/MWh)

Por otra parte, se utilizó nuevamente la herramienta BioWATT para el cálculo de las emisiones evitadas con la implementación del proyecto. Entonces, tomando el resultado de la herramienta y el obtenido con la metodología empleada para proyectos de MDL, se realizó un promedio de emisiones de GEI evitadas y se comparó con las actuales de la planta, haciendo una comparación entre ambos escenarios.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La PTAR Zona Noreste, de acuerdo con su caudal de operación, tiene un consumo eléctrico de 17,781.12 kWh/día. Los resultados obtenidos

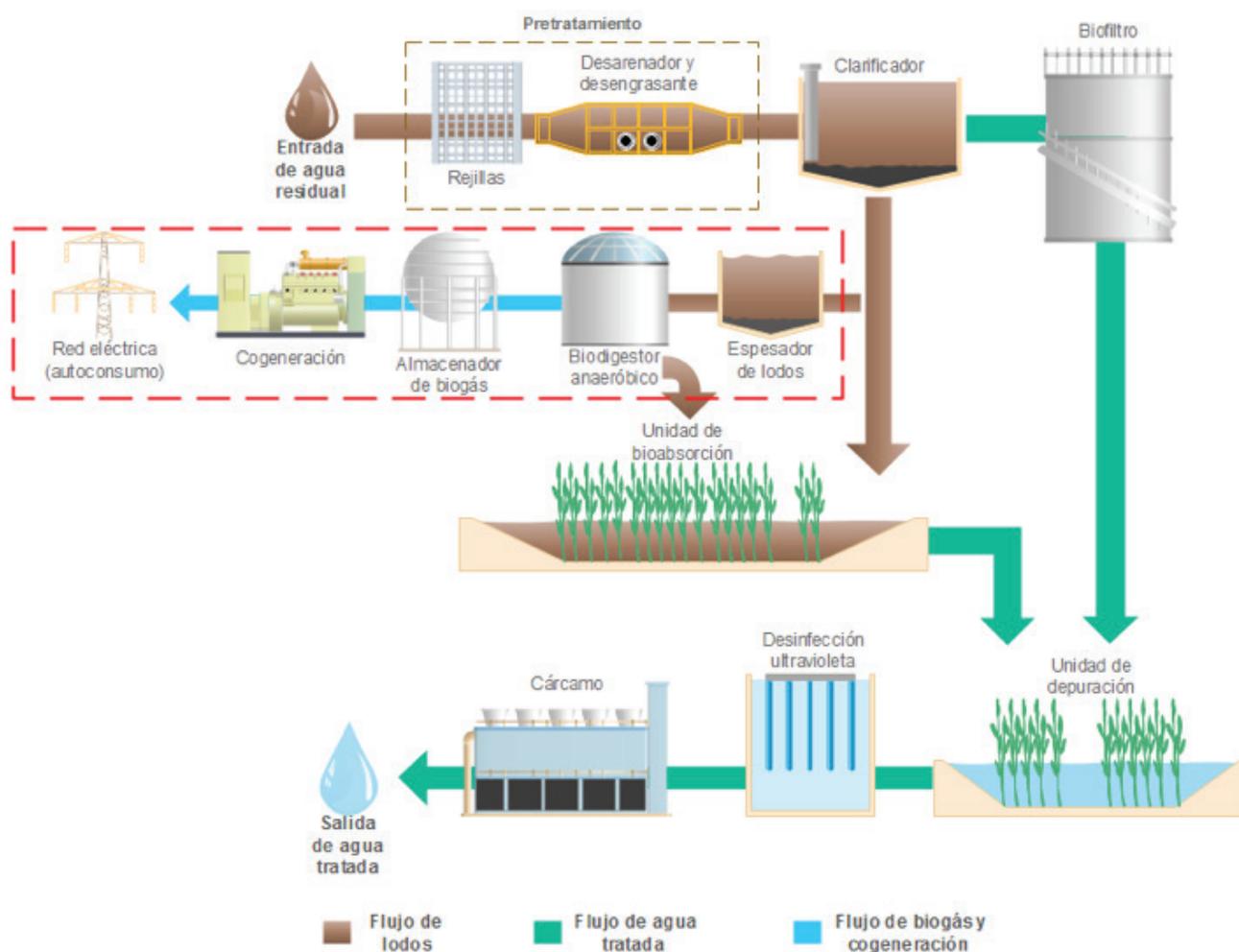
en el presente estudio presentados en la tabla 4 muestran que es posible abastecer de electricidad la planta en un 40% y aún queda potencial disponible para ser utilizado un 38% para energía térmica necesaria dentro del proceso de digestión anaeróbica. Entonces, con la producción promedio de biogás al día de la PTAR de 2,671.49 m<sup>3</sup>, cuyo potencial energético es de 17,312.59 kWh/día, se pueden abastecer 13,503.82 kWh que consume la planta al día. Cabe señalar que dichos cálculos consideraron el aprovechamiento hipotético del 100% de los lodos obtenidos en la PTAR Zona Noreste al operar con su máximo caudal y con la implementación de los equipos necesarios que se muestran en la figura 4. En particular, se tiene un espesador de lodos: para aprovechar al máximo sus propiedades; un biodigestor anaeróbico: para generar el biogás sin que escape a la atmósfera; un almacenador de biogás; y un equipo de cogeneración: que trabaje bajo el principio de un motor de combustión interna.

Tabla 3. Resultados obtenidos por cada método y promedio de biogás producido.

Método	Volumen de biogás producido (m <sup>3</sup> /día)
Cantidad de Sólidos Volátiles (SV)	3,176.03
Cantidad de Demanda Química de Oxígeno (DQO)	2,283.29
Producción per cápita (población beneficiada)	3,721.65
Cantidad de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	1,505
Promedio	2,671.49
Potencial energético del biogás producido (kWh/día)	17,312.59

Fuente. Elaboración de los autores

Figura 4. Proceso de la PTAR Zona Noreste con tecnología de aprovechamiento del biogás.



Fuente. Elaboración de los autores en *EdrawMax* (<https://www.edrawsoft.com/es/>)

Al abastecer la PTAR con estos valores, quedan libres alrededor de 3,808.77 kWh/día de su potencial energético que pueden ser inyectados a la red, o bien, esta energía restante podría alimentar viviendas cercanas a la planta. En tal sentido, tomando como referencia los estudios realizados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en el 2012 el consumo promedio mensual de los hogares fue de 250 kWh, con ello se determinó que la PTAR Zona Noreste cuenta con la capacidad de alimentar alrededor de 457 viviendas, esto es 65 viviendas más que la PTAR Piedras Negras en Coahuila, la cual opera también con un caudal de 700 l/s

y sólo puede abastecer 392 viviendas (Mantilla-Morales *et al.*, 2017). Tanto esta alternativa como la del autoconsumo en la PTAR Zona Noreste representan un beneficio económico para las autoridades municipales y estatales encargadas de la administración de la misma, así como también los beneficios socioambientales asociados para las viviendas que podrían resultar favorecidas con la implementación de este proyecto.

En términos ambientales, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) elaboró rutas tecnológicas y de instrumentación cuya

finalidad es recoger la información necesaria sobre las medidas de mitigación priorizadas en el sector de las aguas residuales de México (Coordinación General de Mitigación del Cambio Climático & INECC, 2018). Una de las medidas M3 (medida de mitigación M3: Captura y aprovechamiento del biogás generado en PTAR) propone la producción de biogás por tratamiento anaerobio de los lodos procedentes de las aguas residuales municipales tratadas en las PTAR y su posterior aprovechamiento para la generación de energía térmica y eléctrica para el autoabastecimiento de estas instalaciones (Coordinación General de Mitigación del Cambio Climático & INECC, 2018). Por lo que, al aplicarlo se podría contribuir a estas acciones de preservación del medio ambiente, sirviendo de base para la consolidación y desarrollo de este tipo de proyectos.

En cuanto a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de la PTAR Zona Noreste, los resultados obtenidos muestran un total de emisiones base de 3,450.69 ton CO<sub>2</sub>eq/año y un promedio de emisiones evitadas de 2,691.45 ton CO<sub>2</sub>eq/año al implementar el proyecto, traduciéndose en una disminución del 78% de las emisiones (tabla 4). Asimismo, comparando los resultados obtenidos y mostrados en la tabla 4, las emisiones evitadas en la PTAR Piedras Negras en Coahuila de 546.65 toneladas de CO<sub>2</sub>e al año, es relativamente menor a las obtenidas para la PTAR Zona Noreste (Mantilla-Morales *et al.*, 2017). Por tanto, los beneficios medioambientales de este tipo de proyectos pueden considerarse significativos.

Tabla 4. Emisiones de GEI evitadas.

Tipo de emisión	Cantidad de emisiones (ton CO <sub>2</sub> eq/año)
Emisiones base (actuales)	3,450.69
Emisiones con proyecto (metodología MDL)	90.49
Emisiones con proyecto (herramienta <i>BioWATT</i> )	1,428
<b>Promedio de emisiones evitadas</b>	<b>759.25</b>
Reducción total	2,691.45 (78%)

Fuente. Elaboración de los autores

Si bien la PTAR Zona Noreste opera con un caudal pequeño en comparación con otras plantas de México que trabajan bajo procesos biológicos, tal como se menciona en la publicación “Proyectos de Aprovechamiento Energético a partir de Residuos Urbanos en México” (Equipo técnico EnRes, 2018), su potencial es significativo para autoabastecimiento energético. Actualmente, se cuenta con el potencial energético de algunas PTAR del estado de Tabasco en el Atlas Nacional de Biomasa (SENER & CFE, 2016), la cual no es información suficiente para analizar la viabilidad y potencial aprovechamiento del biogás de estos proyectos. Por ello, este estudio representa una contribución base para determinar el potencial estatal de generación de electricidad por medio



de fuentes renovables como el biogás en PTAR, pudiendo promover estudios adicionales y apoyo financiero para el desarrollo e implementación de proyectos de para el aprovechamiento del biogás.

Cabe señalar que, si bien para el presente estudio se tuvo acceso a la información técnica de la PTAR Zona Noreste, un estudio de estatal se vería limitado por las dificultades asociadas al acceso a la información de las características del afluente de la planta. Otro aspecto limitante para el estudio fue la ausencia de visitas a la planta para familiarizarse con el proceso de tratamiento de aguas residuales. No obstante, el presente estudio representa una contribución para impulsar y promover el desarrollo e implantación de este tipo de tecnología en el estado de Tabasco y el país.

## CONCLUSIÓN

Este estudio permitió reconocer la importancia de reutilizar los lodos que generan las plantas de tratamiento de aguas residuales bajo procesos biológicos, pues gracias al gran potencial energético contenido en su subproducto principal, el biogás, se puede disminuir el consumo de energía de las PTAR y, en consecuencia, los altos costos asociados. El aprovechamiento del biogás permite reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) dentro del proceso de tratamiento de aguas residuales, lo que significa un gran beneficio ambiental. De acuerdo con los resultados obtenidos, la PTAR Zona Noreste podría generar al día alrededor de 2,671.49 m<sup>3</sup> de biogás, con un potencial energético de 17,312.59 kWh/día; de dicho potencial, se considera que la PTAR se autoabastecería con 13,503.82 kWh/día (de éstos el 40% es para electricidad y 38% sería destinado para energía térmica). Además, quedan libres al menos 3,808.77 kWh al día que pueden ser suministrados al menos a 457 viviendas cercanas, inyectarse a la red eléctrica o servir como combustible para vehículos. Por tanto, esto significa que la PTAR

Zona Noreste cuenta con las características adecuadas para ser generadora de energía, permitiéndoles a las autoridades municipales reducir sus costos operativos y de mantenimiento al evitar gastos excesivos por el consumo de electricidad dentro de esta PTAR. Por otro lado, con los resultados obtenidos en términos de emisiones de GEI se determinó que la PTAR Zona Noreste podría reducir en un 78% comparado con las actuales, pasando de 3,450.69 a 2,691.45 toneladas de CO<sub>2</sub>eq al año. Con ello, cabe mencionar que, al ser uno de los primeros estudios de este tipo en el estado de Tabasco, es necesario dar mayor impulso al desarrollo de este tipo de tecnología, pues buscan revalorizar los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales y aprovechar su potencial energético, con importantes beneficios medioambientales. En esta tarea, es clave contar con instrumentos políticos-financieros y capacidades técnicas que faciliten el desarrollo de este tipo de proyectos.

...

## AGRADECIMIENTOS

*Los autores desean agradecer al Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A.C. (CCGS) por las facilidades durante la realización de esta investigación. Igualmente, agradecer a la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento (CEAS), Tabasco, por las facilidades en la obtención de la información. Además, desean expresar su agradecimiento a los revisores anónimos por sus comentarios y recomendaciones en la mejora de esta investigación. ORMP desea agradecer al programa Cátedras- CONACYT y al proyecto Cátedras-CCGS no. 963 "Hacia un manejo sustentable del agua en el sureste de México y áreas adyacentes de Centroamérica".*

## REFERENCIAS

- Aguilar-Benítez, I., & Blanco, P. A. (2018). Recuperación de metano y reducción de emisiones en PTAR Nuevo Laredo, Tamaulipas, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(2), 73-96. doi: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-02-04>
- Amosse, S., & Nedelec, R. (2010). Uses of biogas produced by digestion of wastewater sludge. The SIAAP'S experience feedback and projects [Utilisation du biogaz issu de la digestion des boues d'épuration des eaux résiduaires urbaines Retour d'expérience et projets du SIAAP]. *Techniques - Sciences - Methodes*, 3, 57-65. Obtenido de <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-77950302046&origin=inward&txGid=aa8cdac7514dbcf0568748c0bce45343>
- Berkday, A., & Nas, B. (2007, Noviembre). Biogas production and utilization potential of wastewater treatment sludge. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 30, pp. 179-188. doi: <https://doi.org/10.1080/00908310600712489>
- Ceja de la Cruz, Z. T. (2019). Tratamiento de aguas residuales. Oficina de Información Científica y Tecnológica para el Congreso de la Unión (INCYTU)(028), 1-6. Obtenido de [https://foroconsultivo.org.mx/INCYTU/documentos/Completa/INCYTU\\_19-028.pdf](https://foroconsultivo.org.mx/INCYTU/documentos/Completa/INCYTU_19-028.pdf)
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2018). Sistema Nacional de Información del Agua. - Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. Obtenido de <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=plantasTratamiento&n=estatal>
- CONAMA (Congreso Nacional de Medio Ambiente). (2019). Agua y Economía Circular. Anexo II: Fichas de proyectos de innovación en materia de agua y economía circular. Informe CONAMA. Madrid, España. Obtenido de <http://www.fundacionconama.org/wp-content/uploads/2019/09/Agua-y-Economia%CC%81a-Circular-Anexo-II.pdf>
- Coordinación General de Mitigación del Cambio Climático; Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2018). Desarrollo de rutas de instrumentación de las contribuciones nacionalmente determinadas en materia de mitigación de gases y compuestos de efecto invernadero (GyCEI) del Sector Aguas Residuales de México. Ciudad de México: SEMARNAT. Obtenido de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/461753/Aguas\\_residuales.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/461753/Aguas_residuales.pdf)
- Cordero-Álvarez, J. P. (2017). Evaluación del potencial energético de las aguas residuales urbanas generadas en ciudades de altura. Cuenca: Universidad de Cuenca. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/browse?type=author&value=Cordero+Alvarez%2C+Juan+Pa%C3%BAI>
- de Anda-Sánchez, J. (2017, julio-octubre). Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México. *Sociedad y Ambiente*, (14), 119-143. Obtenido de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-65762017000200119&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-65762017000200119&script=sci_arttext)
- Domínguez-Montero, L., Poggi-Varaldo, H., Pérez Angón, M., Jiménez Cisneros, B., Cañizares Villanueva, R., Caffarel Méndez, S., & Frixione Garduño, E. (2017). Instrumentos tecnológicos patentados en México para tratar aguas residuales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33, 43-51. doi: <http://dx.doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp01.04>
- Equipo técnico EnRes. (2018). Proyectos de aprovechamiento energético a partir de residuos urbanos en México. Plantas de producción de energía en hornos cementeros, rellenos sanitarios y plantas de tratamiento de aguas residuales. Ciudad de México: GIZ México, SEMARNAT, SENER. Obtenido de <https://www.giz.de/de/downloads/giz2019-ES-EnRes-Proyectos-de-Aprovechamiento.pdf>

- Global Methane Initiative. (2016). Global Methane Initiative. Obtenido de [http://www.globalmethane.org/tools-resources/resource\\_details.aspx?r=1913](http://www.globalmethane.org/tools-resources/resource_details.aspx?r=1913)
- Hernández-Parra, R., Ballina Baños, R., & Hernández Barranco, S. (2016). Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México. Obtenido de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM27tabasco/municipios/27005a.html>
- Impulsora Nacional de Innovación Tecnológica S. A. de C. V. (2007). Manifestación de impacto ambiental. Proyecto ejecutivo para la construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (Zona Noreste), Cd. de Villahermosa (pp. 4-81). Villahermosa: CONAGUA. Obtenido de <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/tab/estudios/2008/27TA2008HD029.pdf>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2010, junio 12). INEGI. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=27>
- \_\_\_\_\_. (2020, abril 07). Biblioteca digital de mapas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>
- López Hernández, J. E., Ramírez Higareda, B. L., Gomes Cabral, C. B., & Morgan-Sagastume, J. M. (2017). Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales. Ciudad de México: Cooperación Alemana al Desarrollo Sustentable en México, SENER, SEMARNAT, CONAGUA, ANEAS. Obtenido de <http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2017/10/guialodos2017-dig.pdf>
- Mantilla Morales, G., Sandoval Yoval, L., Ramírez Camperos, E. M., Gasca Álvarez, S., Navarro Franco, J., Hernández Cruz, N., . . . Calderón Mólgora, C. G. (2017). Estudio de campo. En G. Mantilla Morales, L. Sandoval Yoval, E. M. Ramírez Camperos, S. Gasca Álvarez, J. Navarro Franco, N. Hernández Cruz, . . . C. G. Calderón Mólgora, Energía limpia del agua sucia: aprovechamiento de lodos residuales (págs. 56-77). Ciudad de México: Asociación Mexicana de Empresas de Agua y Saneamiento, IMTA, SENER. Obtenido de [https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros\\_html/energia-limpia/files/assets/common/downloads/publication.pdf](https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/energia-limpia/files/assets/common/downloads/publication.pdf)
- Maya-Rodríguez, J.M., & Pineda-Pablos, N. (2018). Avances, estancamiento y limitaciones de la política de saneamiento en México 1998-2014. *Entreciencias*, 6(17), 35-50. doi: <http://dx.doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2018.17.63059>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es>
- Secretaría de Energía (SENER). (2018). Prospectiva de energías renovables 2018-2032. México: Secretaría de Energía. Obtenido de <https://www.gob.mx/sener/documentos/prospectivas-del-sector-energetico>
- Secretaría de Energía, Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2016). Atlas nacional de biomasa. Obtenido de <https://dgel.energia.gob.mx/ANBIO/mapa.html?lang=es>
- Shen, Y., Linville, J. L., Urgun-Demirtas, M., Mintz, M. M., & Snyder, S. W. (Octubre de 2015). An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 346-362. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.129>
- Silva Dos Santos, I. F., Mambeli Barros, R., & Tiago Filho, G. L. (2016, julio 10). Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: an assessment of feasibility and potential. *Journal of Cleaner Production*, 126, 504-514. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.072>
- Silvestre, G., Fernández, B., & Bonmatí, A. (2015). Significance of anaerobic digestion as a source of clean energy in wastewater treatment plants. *Energy Conversion and Management*, 101, 255-262. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.033>
- Vidal-Álvarez, M. (2018). Tratamiento de aguas residuales en México: problemáticas de salud pública y oportunidad de uso de ecotecnologías sustentables. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable (RINDERESU)*, 3 (1-2), pp. 41-58. Disponible en: <http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/download/32/38>