

Ensayo expositivo

El tratamiento de aguas residuales y sus efectos sobre el calentamiento global

Recibido: 09-07-2019 Aceptado: 08-05-2020 (Artículo Arbitrado)

Resumen

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales han mejorado la calidad del agua de reuso de las civilizaciones, así como la salud ambiental y humana; sin embargo los procesos derivados del saneamiento, el almacenamiento y la disposición de aguas residuales provoca la emisión directa e indirecta de gases de efecto invernadero (GEI), tales como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y los óxidos nitrosos (N₂O), los cuales han incrementado sus concentraciones atmosféricas durante los últimos 200 años, por lo tanto, estos sistemas están relacionados directamente con el cambio climático. Por ello México y más de 100 países se han comprometido a implementar estrategias con el objetivo de reducir sus emisiones. En el caso de México, se estableció la Ley General para el Cambio Climático, fijándose la meta para los años 2020 y 2050 de reducir las emisiones de CO₂ y CH₄ entre 30 y 50 % respectivamente. En este sentido, el desarrollo de tecnologías sostenibles y eficientes para el tratamiento de aguas residuales es una solución efectiva para coadyuvar a la disminución y el aprovechamiento de los gases de efecto invernadero, así como una alternativa sostenible para contrarrestar la escasez mundial del agua.

Ilse Guadalupe Sierra Sánchez
Efraín Neri Ramírez
Néstor Guevara García
René Ventura Houle
Lorenzo Heyer Rodríguez*

Facultad de Ingeniería y Ciencias
Universidad Autónoma de Tamaulipas

Correspondencia:
*lheyer@docentes.uat.edu.mx

Abstract

Wastewater treatment systems have improved water quality for reuse by local communities as well environmental and human wellbeing. However, the processes used for the sanitation, storage and disposal of water services cause the emission of greenhouse gases (GHG) such as carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O), which have increased their atmospheric concentrations over the last 200 years. Therefore, these systems are directly related to climate change. This has led to Mexico and more than 100 countries committing to implement strategies for reducing emissions. In the case of Mexico, climate change legislation has been passed and targets have been set for 2020 and 2050 to reduce CO₂ and CH₄ emissions by between 30 and 50%, respectively. In this context, the development of sustainable and efficient technologies for wastewater treatment is an effective solution to help reduce and take advantage of greenhouse gases, as well as a sustainable alternative to counteract the global water shortage.

Palabras clave: Cambio climático, fuentes de emisión, gases de efecto invernadero, metano.

Keywords: Climate change, emission sources, greenhouse gases, methane.

Mots-clés: Uchangement climatique, sources d'émissions, gaz à effet de serre, methane.

Résumé

Les systèmes de traitement des eaux usées ont amélioré la qualité de la réutilisation des eaux des civilisations, ainsi que la santé environnementale et humaine; cependant, les processus dérivés de l'assainissement, du stockage et de l'élimination des eaux usées provoquent l'émission directe et indirecte de gaz à effet de serre (GES), tels que le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et les oxydes nitreux (N₂O), qui ont augmenté leurs concentrations atmosphériques au cours des 200 dernières années, ces systèmes sont donc directement liés au changement climatique. Pour cette raison, le Mexique et plus de 100 pays se sont engagés à mettre en œuvre des stratégies visant à réduire leurs émissions. Dans le cas du Mexique, la loi générale sur le changement climatique a été établie, fixant l'objectif pour les années 2020 et 2050 de réduire les émissions de CO₂ et de CH₄ entre 30 et 50 % respectivement. En ce sens, le développement de technologies durables et efficaces pour le traitement des eaux usées est une solution efficace pour aider à réduire et à tirer parti des gaz à effet de serre, ainsi qu'une alternative durable pour lutter contre la pénurie mondiale d'eau.

Introducción

Globalmente 1100 millones de personas no tienen acceso a agua potable y más de 2600 millones no cuentan con sistemas de saneamiento (OMS, 2017); en México, el 43 % de sus habitantes viven en la pobreza, de los cuales el 22 % se encuentran en zonas rurales, en donde existe un alto índice de analfabetismo y desempleo, en estos sectores las fami-

lias viven sin servicios de energía y sin acceso al agua y/o el saneamiento (Turrén-Cruz et al., 2019). En las áreas rurales menos del 1 % de las aguas residuales son tratadas debido a que no se cuenta con los sistemas de recolección y tratamiento (Lutterbeck et al., 2017), por lo que el agua residual es vertida en ríos y lagunas cercanos dañando la salud de las personas, la flora y la fauna (Ma, et al., 2019).

El saneamiento y el tratamiento de las aguas residuales son procesos necesarios para el desarrollo sostenible así como para mantener la salud ambiental y humana (Arroyo y Molinos-Senante, 2018), sin embargo, el aumento de los niveles de contaminación derivados del crecimiento de la población y la urbanización y el rápido desarrollo económico ha provocado la excesiva descarga de aguas residuales hacia el medio ambiente (Rezania et al., 2015). Por lo tanto, se requiere contar con sistemas de tratamiento de aguas residuales, los cuales se encargan de recolectar, tratar y recuperar las aguas; así como de tratar y eliminar los lodos residuales generados durante el proceso (Zhang et al., 2017). Los sistemas de tratamiento tienen el objetivo de mejorar la calidad del agua residual, para que pueda ser vertida a los distintos cuerpos de agua (Noyola et al., 2018).

Dado que el agua residual puede contener entre el 20 y 40 % de la materia orgánica, al ser tratada se emiten de forma directa e indirecta GEI tales como el CO₂, el CH₄ y el N₂O, por lo que se ha clasificado a esta actividad como una importante fuente de emisión de gases de efecto invernadero (Ma et al., 2019).

Acuerdos de mitigación de gases de efecto invernadero

En la Conferencia de París sobre el Clima (COP21), celebrada en diciembre de 2015, 195 países firmaron el primer acuerdo vinculante mundial sobre el clima, el cual tiene como uno de sus objetivos reducir las emisiones de GEI. En el Acuerdo de París, en el artículo cuarto se establece la necesidad de los países de proponer objetivos para la reducción de sus emisiones; en el caso de México, se ratificó el acuerdo el 22 de abril de 2016, entrando en vigor a partir del 4 de noviembre de 2016, comprometiéndose a reducir sus emisiones de GEI para el 2020 y 2050 en un 30 y 50 % respecto a la línea base del año 2000. Se estima que el 6.7 % de los GEI generados en México provienen de rellenos sanitarios y aguas residuales (INECC, 2018a), por lo cual una de las estrategias planteadas para lograr los com-

promisos internacionales es reducir la emisión de CH₄ proveniente de estas fuentes (INECC, 2018b).

Características del agua residual

El aumento en la cantidad de aguas residuales está relacionado con el incremento de la población (INECC, 2018b). El agua residual se define como aquella en la que ha ocurrido un cambio en su composición física y química debido al uso previo (Rezania et al., 2015), suelen contener diversos contaminantes dependiendo de las distintas fuentes de descarga como las provenientes de servicios municipales, industriales, comerciales, agrícolas, pecuarios, domésticos y pluviales (Romero-Aguilar et al., 2009), así como la mezcla entre ellas (Rezania et al., 2015). Entre los principales contaminantes de las aguas residuales se encuentran la materia orgánica, los microorganismos patógenos y diversos compuestos tóxicos como pesticidas y fertilizantes (Dixit, Dixit y Goswami, 2011), compuestos farmacológicos (ya sea como compuesto original o sus metabolitos) derivados de su ingesta y posterior eliminación mediante la orina y materia fecal (Lutterbeck et al., 2017; Yadav et al., 2019). En la tabla 1 se muestra los principales contaminantes de las aguas residuales dependiendo de las fuentes de descarga.

La descarga de las aguas residuales a los distintos cuerpos de agua, lagos o ríos, requiere de un tratamiento adecuado para disminuir los contaminantes antes de su vertido final (López-Pacheco et al., 2019), ya que la reutilización o la descarga directa sin tratar produce riesgos al ambiente y a la salud pública (Pang et al., 2017). Por lo tanto, los sistemas de tratamiento de agua residual son una importante medida para el control de la contaminación del agua (Hu, Tian y Chen, 2019) y la protección del medio ambiente (Gallego-Schmid y Zepon, 2019).

Tabla 1. Principales contaminantes de las aguas residuales

Tipo de agua residual	Origen	Contaminante
Doméstica	Las producidas por el metabolismo humano y actividades domésticas	Orina, materia fecal, detergentes, aceites y grasas
Industrial	Las vertidas desde un sitio de ámbito comercial o industrial además de agricultura y ganadería	Residuos de compuestos químicos, detergentes, grasas, pesticidas y desechos de explotación ganadera
Urbana	Incluyen aguas residuales domésticas, industriales y de origen pluvial	Sólidos suspendidos en el aire, basura orgánica e inorgánica

Fuente: Elaboración propia (2019)

Tratamiento de aguas residuales

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales son procesos que se emplean para degradar o eliminar los residuos presentes en las aguas residuales; los subproductos derivados de estos tratamientos como la bioenergía, los nutrientes y el agua para reuso se utilizan en actividades de conservación, reciclaje, recuperación y reutilización (Zeng et al., 2017).

Los tratamientos de agua residual pueden ser procesos físicos, químicos y biológicos, los cuales se pueden utilizar solos o combinados y se eligen en función del tipo de contaminantes que se requiere disminuir o eliminar (López-Pacheco et al., 2019; Ahmed et al., 2017). La elección del proceso requiere una caracterización química del agua residual, siendo los principales componentes analizados: la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la cual estima la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua; la demanda química de oxígeno (DQO), que determina la cantidad de materia orgánica e inorgánica susceptible a ser oxidada; el carbono orgánico total (COT), el pH, el nitrógeno y el fósforo total (Zhang et al., 2015). Entre los métodos comúnmente utilizados en el tratamiento de agua residual se encuentran las Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR), los humedales y lagunas de oxidación.

Las PTAR suelen consistir en tratamientos primarios, secundarios y terciarios. Los primarios se encargan del tratamiento físico, es decir, de remover los sólidos de mayor tamaño, posteriormente los secundarios se caracterizan por ser procesos biológicos en donde intervienen microorganismos que se encargan de la degradación de la materia orgánica presente y pueden ser aerobios o anaerobios según la disponibilidad de oxígeno y la vía metabólica de los microorganismos presentes en el medio (Aguilar-Benítez y Blanco, 2018; INECC 2018b). En los procesos de degradación anaerobia ocurre la estabilización de los desechos complejos por medio de tres etapas: la hidrólisis, la fermentación ácida y por último la metanogénesis, en donde se puede liberar CH_4 ; mientras que los procesos aerobios consisten en la conversión de residuos orgánicos en biomasa y CO_2 , el cual es desarrollado mediante un cultivo bacteriano aeróbico, que demanda altas cantidades de energía y genera una gran cantidad de lodos residuales; en este

tipo de tratamiento no se produce CH_4 , sin embargo, puede ocurrir si los biosólidos son digeridos anaerómicamente (Cakir y Stenstrom, 2005). Por último, se lleva a cabo el tratamiento terciario, en donde ocurren procesos para la remoción de nutrientes como nitrógeno y fósforo (Arias et al., 2010).

Los humedales artificiales fueron diseñados en la década de los años sesenta por Seidel y Kickut (Luna y Ramírez, 2004) para generar una interacción entre el agua tratada con el suelo, las plantas, los microorganismos y la atmósfera, llevándose a cabo simultáneamente procesos de degradación físicos, químicos y biológicos (Ahmed et al., 2017; Dixit et al., 2011). Los humedales artificiales pueden describirse como cuerpos de agua cuya profundidad no excede los seis metros, en donde ocurre de manera controlada la purificación del agua con base en procesos naturales (Luna y Ramírez, 2004), que propician el establecimiento de diferentes especies de plantas acuáticas como el jacinto de agua (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms), la lechuga de agua (*Pistia stratiotes* (L.)) y los pastos vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.)) (Gupta, Roy y Mahindrakar, 2012), los cuales presentan la capacidad de fijar una biopelícula bacteriana en la interfase planta-agua-suelo y de este modo, ayudan en la biofiltración de las aguas residuales (Tanner, Clayton y Upsdell, 1995). Los humedales artificiales generalmente son utilizados para el tratamiento de aguas residuales de tipo doméstico (Romero-Aguilar et al., 2009).

El papel del tratamiento de aguas residuales en el cambio climático

Los sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales generan grandes beneficios ambientales, sin embargo, también representan una fuente importante para la emisión de GEI (Gupta y Singh, 2015), por lo que contribuyen directamente con el cambio climático (Nguyen et al., 2019). Se estima que las PTAR biológicas aportan el 5 % de las emisiones de GEI mundiales (Aguilar-Benítez y Blanco, 2018). Las emisiones directas se generan durante la eliminación de la materia orgánica (Lim et al., 2012) mediante la actividad de los microorganismos durante los procesos de tratamiento (Hu et al., 2019), mientras que las emisiones indirectas representan el 60 % de las emisiones totales (Hu et al., 2019), resultan de las ac-

tividades de producción y consumo de energía, así como del transporte de combustibles y materiales químicos para el consumo en la PTAR (Shahabadi, Yerushalmi y Haghghat, 2009; Shahabadi, Yerushalmi y Haghghat, 2010).

La alteración en el clima (cambio climático) se debe al aumento de las concentraciones en la atmósfera de GEI, ya sea por causas naturales o debido a las actividades antropogénicas (es decir, provocadas por el hombre) (Shahabadi et al., 2010). En la tabla 2 se muestran los principales GEI ordenados de mayor a menor impacto; la contribución de estos gases al calentamiento global se indica a través de su potencial de calentamiento global (Cakir y Stenstrom, 2005) el cual, es una comparación del impacto a través de un gas de referencia que comúnmente es el CO₂ sobre un horizonte de 100 años (Shahabadi et al., 2010); en este sentido el potencial de calentamiento global del CO₂, CH₄ y N₂O son 1, 34 y 298, respectivamente (Rodríguez-García et al., 2012; Noyola, et al., 2018).

Las PTAR son clasificadas entre las principales fuentes de emisión de GEI (Min, Lee y Park, 2018) tanto directa como indirectamente (Somlai, Knappe y Gill, 2019). En México la cobertura de saneamiento de aguas residuales corresponde al 43.4 % (CONAGUA, 2010), se encuentran en operación 2,477 PTAR municipales y 2,832 industriales (Aguilar-Benítez y Blanco, 2018) de las que se estima aportan el 3.3 % de las emisiones anuales, que suman hasta 46 Mt de CO_{2e} (millones de toneladas de CO₂ equivalente) (INECC, 2018b).

En la tabla 3 se muestra el porcentaje de emisiones del 2015 del sector residuos. Los gases que se emiten por los sistemas de tratamiento de agua residual tienen en común su producción debido a los procesos de descomposición de la materia orgánica (Rodríguez-García et al., 2012; Noyola et al., 2018), de los cuales, el más importante es el CH₄ debido a sus

propiedades radiativas, las cuales le brindan una mayor absorción y retención de la energía infrarroja del sol con una capacidad de 21 a 25 veces más que el CO₂ (Cambra-López et al., 2008) y durante los últimos 150 años se han incrementado sus concentraciones atmosféricas en un 150 % (Hernández, 2010).

Estrategias de reducción de emisiones de GEI

Los sistemas de tratamiento de agua residual son una importante fuente de emisión de GEI, por lo que la determinación de sus tasas de emisión de GEI se ha vuelto un tema importante para su control. En el caso particular del CH₄ al ser el principal compuesto del biogás generado en los sistemas de tratamiento de aguas residuales es posible el aprovechamiento energético de este recurso (Hernández, 1996) en diferentes procesos tanto para motores de combustión, sistemas de iluminación y refrigeración, así como para quemadores industriales y domésticos (Arango, Sierra y Silva, 2014), por lo que en los últimos años se han propuesto varias técnicas para su medición y monitoreo ya sea directamente en la superficie y/o debajo del nivel del agua (Lucernoni et al., 2017).

Los GEI que son emitidos desde los sistemas de tratamiento de agua residual dependerán de la tecnología empleada en el proceso de saneamiento (Gupta y Singh, 2015), por ello es necesario seleccionar una tecnología de tratamiento que consideren los problemas económicos, sociales y ambientales para garantizar la sostenibilidad a largo plazo (Arroyo y Molinos-Senante, 2018). Para ello existen herramientas de modelación para estimar la emisión de GEI y evaluar los diferentes esquemas de operación para minimizar su generación en los sistemas de tratamiento de aguas residuales (Corominas et al., 2012).

Se han descrito diversos modelos basados en tres diferentes enfoques. Un primer enfoque es el uso de modelos empíricos como el propuesto por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), este modelo presenta mucha incertidumbre y varia-

Tabla 2. Principales gases de efecto invernadero

Gas	Origen
Vapor de agua (H ₂ O)	Niebla, bruma y nubes
Dióxido de carbono (CO ₂)	Respiración celular y combustibles fósiles
Metano (CH ₄)	Gas natural y conversión de la materia orgánica
Óxidos de nitrógeno (N ₂ O)	Descomposición bacteriana de nitratos orgánicos
Clorofluoro-carbonos (CFC)	Industria de la refrigeración

Fuente: Elaboración propia (2019)

Tabla 3. Emisiones por sector residuos

Categoría	Porcentaje (%) de emisiones
Tratamiento y eliminación de aguas residuales	3.27%
Eliminación de residuos sólidos	3.21%
Incineración a cielo abierto	0.22%
Tratamiento biológico de residuos sólidos	0.03%

Fuente: Elaboración propia (2019) con base en INECC (2018b).

bilidad al estar basado en suposiciones generales no siempre aplicables a todos los casos (Pagilla et al., 2009). Un segundo enfoque es el uso de modelos simplificados de los procesos de tratamiento de agua (Cakir y Stenstrom, 2005; Shahabadi et al., 2009). Y finalmente el tercer enfoque son modelos mecánicos que describen dinámicamente la producción de GEI, como el Modelo de Digestión Anaeróbica 1 (ADM1) el cual describe la producción de CO_2 y CH_4 durante la digestión de lodos (Batstone et al., 2002).

Corominas et al., (2012) realizaron comparaciones entre el uso de modelos con enfoque simplificado y modelos mecánicos encontrando que estos últimos presentan las siguientes ventajas: una mayor precisión, una mayor comprensión de los mecanismos de emisión de GEI, se pueden aplicar en el análisis de un contexto más amplio de la planta tanto para la optimización y control; no obstante, tienen la desventaja de que su implementación es más compleja y requieren de equipos de cómputo con mayor poder de procesamiento de la información.

Tecnologías de reducción

La emisión de GEI en plantas de tratamiento convencionales que utilizan un sistema biológico aerobio, en el cual las emisiones de CH_4 generados en los reactores no suelen ser significativas y frecuentemente son ignoradas en el cálculo de emisiones de GEI, sin embargo, usualmente los lodos generados son estabilizados mediante una digestión anaeróbica, en la cual se produce una gran cantidad de CH_4 . Para evitar su emisión a la atmósfera, diversos autores proponen la captación de este gas para generar energía. Aguilar-Benítez y Blanco (2018) examinaron la recuperación de energía proveniente de lodos de aguas residuales mediante el aprovechamiento del CH_4 generado durante los procesos aerobios de la PTAR de Nuevo Laredo, Tamaulipas, evaluando la eficiencia energética de la planta, demostrando que el aprovechamiento del CH_4 proveniente de lodos residuales disminuyó las emisiones de GEI en un 21 %.

Jung-Jeng, Bee-Yang y Yuan-Chie, (2004), mencionan que es posible reducir la emisión de CH_4 de los tratamientos anaerobios de agua residual de granjas porcinas mediante dos estrategias: reduciendo el tiempo de almacenamiento realizando una separación líquido/sólido inmediatamente después del filtrado de los desechos, lo cual puede lograr una

reducción del 62 % o bien, inhibiendo la metanogénesis por adición de 10 mg L^{-1} de bromoclorometano diariamente en el biodigestor, lo que inhibe completamente la producción de biogás en cuatro días sin afectar significativamente el proceso de tratamiento del agua.

Conclusiones

En México, los sistemas de tratamiento de aguas residuales son utilizados principalmente para la protección de la salud pública, sin embargo, con la finalidad de lograr la sustentabilidad del país a largo plazo se requiere ir más allá del saneamiento del agua. Es necesario reducir los impactos negativos en la calidad del medio ambiente, originados por los GEI generados durante los procesos del tratamiento, con lo cual se pueden obtener los siguientes beneficios: reutilización de los subproductos como los nutrientes y el agua tratada, así como la obtención de energía, la cual es la técnica más conveniente para minimizar los impactos del CH_4 en el calentamiento global.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), a la Universidad Autónoma de Tamaulipas y al Doctor Jacinto Treviño Carreón, por su revisión y aportación para la mejora del presente trabajo.

Bibliografía

- Aguilar-Benítez, I., y Blanco P. A. (2018). Recuperación de metano y reducción de emisiones en PTAR Nuevo Laredo, Tamaulipas, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(2),86-114.
- Ahmed, M. B., Zhou, J. L., Ngo, H. H., Guo, W., Thomaidis, N. S., and Xu, J. (2017). Progress in the biological and chemical treatment technologies for emerging contaminant removal from wastewater: a critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 323(2017),274-298.
- Arango, G. J. E., Sierra, V. F. E. y Silva, L. V. (2014). Análisis exploratorio de investigaciones sobre los motores de combustión interna que trabajan con biogás. *Tecnura*, 18(39), 152-164.
- Arias, M. S. A., Betancur, T. F. M., Gómez, R. G., Salazar, G. J. P. y Hernández, A. M. L. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador Técnico (Colombia)*, 74, 12-22.

- Arroyo, P. and Molinos-Senante, M. (2018). Selecting appropriate wastewater treatment technologies using a choosing-by-advantages approach. *Science of the Total Environment*, 625(2018),819-827.
- Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I, Kayuznyi, S. V, Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W. T. M., Siegrist, H and Vavilin, V. A. (2002). Anaerobic Digestion Model No 1. *IWA STR* No. 13. London, UK: IWA Publishing.
- Cakir, F. Y., and Stenstrom, M. K. (2005). Greenhouse gas Production: a comparison between aerobic and anaerobic wastewater treatment technology. *Water Research*, 39(2005),4197-4203.
- Cambra-López, M. P, García, R., Estellés, F y Torres, A. (2008). Estimación de las emisiones de los rumiantes en España: El factor de conversión de metano. *Archivos de Zootecnia*, 57, 89-101.
- CONAGUA. (2010). *Estadísticas del agua en México*, edición 2010. Tlalpan, México, D.F: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Corominas, L., Flores-Alisina, X., Snip, L. and Vanrolleghem, P. (2012). Comparison of different modeling approaches to better evaluate greenhouse gas emissions from whole wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management*, 91(5), 193-1201.
- Dixit, A., Dixit, S. and Goswami, C. S. (2011). Process and plants for wastewater remediation: a review. *Scientific Reviews & Chemical Communications*, 1(1),71-77.
- Gallego-Schmid, A., and Zepon T. R. R. (2019). Life cycle assessment of wastewater treatment in developing countries: a review. *Water Research*, 153(2019),63-79.
- Gupta, D. and S. K. Singh. (2015). Energy use and greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants. International. *Journal of Environmental Engineering* 7(1):1-10.
- Gupta, P., Roy, S. and Mahindrakar, A. B. (2012). Treatment of water using water hyacinth, water lettuce and vetiver grass – a review. *Resources and environment*, 2(5),202-215.
- Hernández, A. L. A. (1996). Tecnologías para el aprovechamiento del gas producido por la digestión anaeróbica de la materia orgánica. *Agronomía Colombiana*, XIII (1), 76-90.
- Hernández, M. E. (2010). Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. *Terra Latinoamericana*, 28, 139-147.
- Hu, W., Tian, J. and Chen, L. (2019). Greenhouse gas emission by centralized wastewater treatment plants in Chinese industrial parks: inventory and mitigation measures. *Journal of Cleaner Production*, 225(2019),883-897.
- INECC (2018a). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. Recuperado en enero de 2020, de <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>
- INECC (2018b). 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. Recuperado en enero de 2020 de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/461753/Aguas_residuales.pdf.
- Jung-Jeng, S., Bee-Yang, L and Yuan-Chie, C. (2004). Reduction of Greenhouse Gases from Anaerobic Piggery Wastewater Treatment by Bromochloromethane in Taiwan. *Journal of Environmental Science and Health Part B—Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes* Vol. B39, Nos. 5-6, pp. 889-902.
- Lim, J., Sankarrao, B., Oh, T., Kim, M., Kang, O., Kim, J., and Yoo, C. (2012). Estimation of nitrous oxide emissions (GHG) from wastewater treatment plants using closed-loop mass balance and data reconciliation. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 29(9),1123-1128.
- López-Pacheco, I. Y., Carrillo-Nieves, D., Salinas-Salazar, C., Silva-Núñez, A., Arévalo-Gallegos, A., Barceló, D., Afewerki, S., Iqbal, H. M. N., and Parra-Saldívar, R. (2019). Combination of nejayote and swine wastewater as a medium for *Arthrospira maxima* and *Chlorella vulgaris* production and wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 676(2019),356-367.
- Lucernoni, F., Rizzotto, M., Capelli, L., Busini, V., Del Rosso, R., and Sironi S. (2017). Sampling method for the determination of methane emissions from landfill surfaces. *Waste Management & Research*, 37(10), 1034-1044.
- Luna P., V. M. y Ramírez C., H. F. (2004). Medios de soporte alternativos para la remoción de fósforo en humedales artificiales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 20(1),31-38.
- Lutterbeck, C. A., Kist, L. T., López, D. R., Zerwes, F. V. and Machado, E. L. (2017). Life cycle assessment of integrated wastewater treatment systems with constructed wetlands in rural areas. *Journal of Cleaner Production*, 148(2017),527-536.
- Ma, L., Lui, W., Tan, Q., Zhou, Q., Wu, Z., and He, F. (2019). Quantitative response of nitrogen dynamic processes to functional gene abundances in a pond-ditch circulation system for rural wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 134(2019),101-111.
- Min, K. J., Lee, J. and Park, K. Y. (2018). Advanced wastewater treatment using filamentous algae in raceway ponds with underwater light. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*.
- Nguyen, T. K. L., Ngo, H. H., Guo, W., Chang, S. W., Nguyen, D. D., Nghiem, L. D., Liu, Y., Ni, B., and Hai, F. I. (2019). Insight into greenhouse gases emissions from the two popular treatment technologies in municipal wastewater treatment processes. *Science of the Total Environment* 671, (2019),1302-1313.
- Noyola, A., Paredes, M. G., Güereca, L. P., Molina, L. T. and Zavala, M. (2018). Methane correction factors for estimating emissions from aerobic wastewater treatment facilities based on field data in Mexico and on literature review. *Science of the Total Environment*, 639(2018),84-91.

- OMS (2017). 2.1 billion people lack safe drinking water at home, more than twice as many lack safe sanitation. Recuperado en enero de 2020, de <https://www.who.int/es/news-room/detail/12-07-2017-2-1-billion-people-lack-safe-drinking-water-at-home-more-than-twice-as-many-lack-safe-sanitation>.
- Pang, H., Wu, P., Li, L., Yu, Z., and Zhang, Z. (2017). Effective biodegradation of organic matter and biogas reuse in a novel integrated modular anaerobic system for rural wastewater treatment: a pilot case study. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 119,131-139.
- Pagilla, K., Shaw, A., Kunetz, T., and Schiltz, M. (2009). A systematic approach to establishing carbon footprints for wastewater treatment plants. In: *Proceedings of WEF-TEC 2009* (pp. 10-14) Orlando, Florida, USA.
- Rezania S., Ponraj, M., Talaiekhosani, A., Mohamad, S. E., Din, M. F. M., Taib, S. M., Sabbagh, F., and Sairan, F. M. (2015). Perspectives of phytoremediation using water hyacinth for removal of heavy metals, organic and inorganic pollutants in wastewater. *Journal of Environmental Management*, 163(2015),125-133.
- Rodríguez-García, G., Hospido, A., Bagley, D. M., Moreira, M. T., and Feijoo, G. (2012). A methodology to estimate greenhouse gases emissions in Life Cycle Inventories of wastewater treatment plants. *Environmental Impact Assessment Review*, 37(2012),37-46.
- Romero-Aguilar, M., Colín-Cruz, A., Sánchez-Salinas, E., y Ortiz-Hernández, M. L. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25(3),157-167.
- Shahabadi, M. B., Yerushalmi, L. and Haghghat, F. (2009). Impact of process design on greenhouse gas (GHG) generation by wastewater treatment plants. *Water research*, 43(2009),2679-2687.
- Shahabadi, M. B., Yerushalmi, L., and Haghghat, F. (2010). Estimation of greenhouse gas generation in wastewater treatment plants – Model development and application. *Chemosphere*, 78(2010),1085-1092.
- Somlai, C., Knappe, J. and Gill, L. (2019). Spatial and temporal variation of CO₂ and CH₄ emissions from a septic tank soakaway. *Science of the Total Environment*, 679 (2019),185-195.
- Tanner, C. C., Clayton, J. S., and Upsdell, M. P. (1995). Effect of loading rate and planting on treatment of dairy farm wastewaters in constructed wetlands II. Removal of nitrogen and phosphorus. *Water Research*, 29(1),27-34.
- Turrén-Cruz, T., García-Rodríguez, J. A., and López-Zavala, M. A. (2019). Evaluation of sanitation strategies and initiatives implemented in Mexico from community capitals point of view. *Water*, 11(2),1-19.
- Yadav, M. K., Short, M. D., Gerber, C., Awad, J., van den Akker, B., and Saint, C. P. (2019). Removal of emerging drugs of addiction by wastewater treatment and water recycling processes and impacts on effluent-associated environmental risk. *Science of the Total Environment*, 680(2019),13-22.
- Zeng, S., Chen, X., Dong, X., and Liu, Y. (2017). Efficiency assessment of urban wastewater treatment plants in China: considering greenhouse gas emissions. *Resources, Conservation and Recycling*, 120(2017),157-165.
- Zhang, Q., Nakatani, J., Wang, T., Chai, C., and Moriguchi, Y. (2017). Hidden greenhouse gas emissions for water utilities in China's cities. *Journal of Cleaner Production*, 162(2017),665-677.
- Zhang, Y., Sun, Q., Zhou, J., Masunaga, S., and Ma, F. (2015). Reduction in toxicity of wastewater from three wastewater treatment plants to alga (*Scenedesmus obliquus*) in northeast China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 119(2015),132-139.