



Tratamiento de aguas residuales industriales en México: Una aproximación a su situación actual y retos por atender

Industrial wastewater treatment in Mexico: An approach to your current situation and challenges to attend

Hernández-Salazar Aurora B¹, Moreno-Seceña. J. C.² y Sandoval-Herazo. L.C.^{2-3*}

Recibido 27 de octubre 2017; recibido en forma revisada 30 de noviembre 2017; aceptado 20 de diciembre 2017

¹Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca, Estudiante de Maestría en Ingeniería Industrial, Desviación Lindero Tatémate S/N, La Morita, 92100 Tantoyuca, Ver. México. ²Dirección de Educación Tecnológica del Estado de Veracruz, Manuel Rodríguez 12, Unidad Veracruzana, 91030 Xalapa, Ver. México. ³Instituto Tecnológico Superior de Xalapa, Sección 5A Reserva Territorial S/N, Santa Bárbara, 91096 Xalapa Enríquez, Ver. México.

*Autor de correspondencia: lcsandovalh@gmail.com

RESUMEN

La limpieza de las aguas que contaminamos ha sido considerada como un asunto estratégico para el desarrollo sustentable de los países, en la actualidad se han hecho avances en materia de tratamiento de aguas residuales industriales; sin embargo, se han enfocado a medianas y grandes industrias formales, y no a las pequeñas y micro empresas. El objetivo de este trabajo es analizar el estado actual del tratamiento de aguas residuales industriales en México, así como las limitaciones y retos actuales para incrementar la cobertura de tratamiento en industrias de la pequeñas y micro empresas. En gran parte de los estados del país no se atiende la problemática donde es factible instalar plantas de tratamiento, más bien se ha dado prioridad a hacer más eficientes los procesos e incrementar la producción, lo que, a su vez incrementa las descargas. Los sistemas de tratamiento más empleados en las industrias son los lodos activados y lagunas estabilizadoras, estos implican altos costos de implementación y operación. Una alternativa económica y ecológicamente viable es el uso de humedales construidos, estos se han usado en países desarrollados con eficientes resultados; pero el desconocimiento de esta ecotecnología en la industria de regiones tropicales de México y la falta de diseños que permitan que sean más atractivas para el usuario final, como es el uso de plantas ornamentales, son unas de las principales limitantes que se presentan.

PALABRAS CLAVE: Contaminación del agua, humedales artificiales, aguas industriales.

ABSTRACT

The cleanliness of the water we pollute has been considered as a strategic issue for the sustainable development of the countries. Nowadays, the treatment of industrial wastewater have met some advances; however, they have focused on medium and large formal industries, and not on small and micro enterprises. The objective of this paper is to analyze the current status of industrial wastewater treatment in Mexico, as well as current limitations and challenges to increase treatment coverage in small and micro enterprise industries. In many states of the country this problem is not even fixed on those places where it is feasible to install treatment plants, it has rather been given some priority to make processes more efficient and increase production which, in turn, increases discharges. Activated sludge and stabilizing lagoons are the most commonly used treatment systems in the industry. These involve high implementation and operation costs. An economically and ecologically viable alternative is the use of constructed wetlands, these have been used in developed countries with effective results. One of the main limitations that arises has to do with the ignorance of this ecotechnology in the industry of tropical regions of Mexico and the lack of designs that allow them to be more attractive to the end user, such as the use of ornamental plants.

KEYWORDS: Water pollution, artificial wetlands, industrial waters.

INTRODUCCIÓN

La falta de tratamiento de las aguas residuales es un obstáculo en México que limita el goce con plenitud del derecho humano al agua (Núñez, 2017). Recurso que con la intervención negativa del hombre puede no ser renovable (Ramakrishna, 1997). La contaminación de cuerpos de agua generada por diferentes industrias es un problema que aqueja, en mayor grado, a países en vía de desarrollo y que influye en que los recursos hídricos se conviertan en no renovables. De acuerdo con la CONAGUA (2016), a nivel nacional existen 2,477 plantas de tratamiento municipales que solo tratan 212.0 m³/s de aguas residuales y para el sector industrial operan 2,832 plantas, en su mayoría en grades industrias y en medianas autoabastecidas, a la micro empresa le corresponde únicamente el 0.8% y en pequeñas empresas no existen plantas. Para el caso de pequeñas y microempresas, por su naturaleza de producción e ingreso económico (bajos), es poco común la instalación de sistemas para tratar las aguas residuales que se generan en los procesos de producción, en estos sectores

la atención prioritaria es la generación de productos y volver más eficiente sus procesos, por lo que, realizan sus descargas a cuerpos de aguas superficiales y redes de alcantarillado urbano, convirtiéndose en un riesgo latente para la salud humana y ambiental (Martínez, 2017). Si bien la intervención del hombre pone en peligro los ecosistemas (Sandoval-Herazo et al. 2016), el problema es más fuerte cuando estos sitios son empleados con fines recreativos o son las principales fuentes de recursos para actividades diarias (Marín-Muñiz, 2017).

En la actualidad existen diversas tecnologías convencionales altamente mecanizadas para tratar aguas residuales industriales, a continuación, se describen algunos tipos:

El pretratamiento industrial ya sea rejillas, tamices, microfiltros y desarenadores, o secundarios como lecho bacteriano, lodos activados, filtros verdes, etc. y avanzado o terciario tales como ósmosis inversa, destilación, coagulación, adsorción, etc. Estos tipos de tratamientos tienen costos elevados debido a que los procesos demandan un alto

consumo energético (Buitrago et al. 2018), adicionalmente estos sistemas representan altos costos de construcción, operación y mantenimiento, los pocos sistemas existentes en el sector industrial, generalmente se ubican en zonas urbanizadas (Foteinis et al. 2018).

Zurita et al. (2011) mencionan que los sistemas convencionales para el tratamiento de aguas residuales presentan tres secuelas fundamentales al medio ambiente; a) el agotamiento de recursos no renovables por altos consumos; b) la degradación ambiental por el uso desmesurado de petróleo y sus derivados; y c) el destino de grandes cantidades de productos resultantes de diferentes procesos no ambientales. Por otra parte, los sistemas convencionales no reducen el contenido de microorganismos patógenos de forma sustancial (Parr et al. 1999; Singhirunnusorn y Stenstrom, 2009; De Sanctis et al. 2017).

Otro tipo de sistemas de tratamiento son los ecológicos como son las lagunas de oxidación y humedales construidos, estos requieren grandes terrenos para su construcción, pero presentan grandes ventajas, como: nulo consumo eléctrico, bajo costo de operación, altas eficiencias de remoción de contaminantes y patógenos (Sanz et al. 2009; Zurita et al. 2011; Zhu et al. 2017). Sus características los hacen muy atractivos para los países desarrollados y subdesarrollados, en donde sus recursos y sistemas de operación convencionales son escasos, los países ricos tratan aproximadamente el 70% de las aguas residuales que generan, mientras que países con niveles medio-alto el 32% y los países de un nivel económico medio-bajo 28%, en los países pobres solo reciben algún tipo de tratamiento cercano al 8% de las aguas residuales industriales y municipales. En latinoamérica el 95% de las pequeñas y micro empresas industriales arrojan sus descargas a las redes de alcantarillado o cuerpos de aguas superficiales sin ningún tipo de tratamiento.

De los países con mayor nivel de tratamiento está República Checa con el 60.2% seguida de Bosnia y Herzegovina con el 58.5. Por otra parte, las industrias que descargan aguas residuales deben cumplir con normativas para evitar multas, por lo que se requiere de algún tipo de tratamiento, sin embargo, a las industrias les resulta más económico pagar dichas multas que invertir en tratamiento (WWAP, 2017).

En México, el tratamiento de aguas residuales industriales es una limitante a la que se enfrentan las pequeñas y micro empresas (De Dios et al. 2017), es escaso el acceso a recursos del gobierno encaminados a tratar las aguas residuales que se producen y que puedan ser reutilizadas. Asimismo, existen pocas investigaciones encaminadas a tratar aguas residuales industriales en países en vías de desarrollo con métodos ecológicos que abaraten los costos de construcción y operación de los sistemas convencionales y puedan ser instalados en pequeñas y micro industrias. El objetivo de este trabajo es analizar el estado actual del tratamiento de las aguas residuales industriales en México, así como las limitaciones y retos actuales para incrementar la cobertura de tratamiento de aguas residuales industriales en pequeñas y micro empresas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Durante la preparación de este análisis informativo y de compilación se utilizaron diferentes herramientas y fuentes bibliográficas, para la recopilación de información, uno de los instrumentos en los que fueron basados los resultados es la evolución de las plantas de tratamiento de aguas residuales industriales en México y en sus diferentes estados que lo conforman, así mismo como en el tratamiento que se le da en los distintos continentes. La información analizada se tomó de la base de datos de la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA), Secretaría de Agricultura, Ganadería,

Desarrollo Rural y Pesca (SAGARPA), y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) a través de sus sitios oficiales. La información fue complementada con documentos publicados en fuentes académicas (artículos científicos, tesis, memorias de congresos y libros) un total de 45 documentos de los últimos años.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Evolución de las plantas de tratamiento de aguas residuales

En materia de desarrollo de infraestructura de tratamiento en México, la figura 1 muestra el número de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales entre los años 2010 a 2015, lo que indica un incremento en el número de plantas con el consecuente aumento en la cantidad de agua tratada.

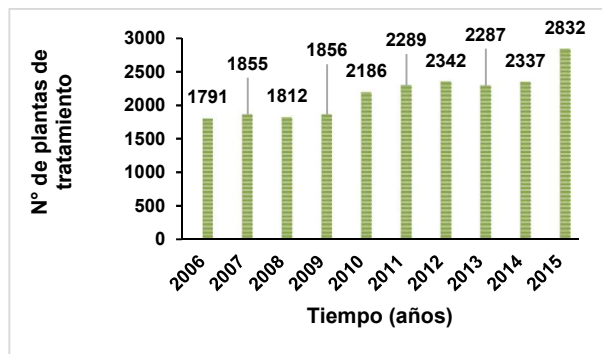


Figura 1. Plantas de tratamiento de aguas residuales industriales 2006-2015

Fuente: CONAGUA (2016)

El número de plantas de aguas residuales en México ha aumentado debido a los programas que el gobierno federal ha implementado. Esto repercute en un incremento en la cobertura de tratamiento de aguas residuales pero a un alto costo económico y ambiental, por ello, se proponen tecnologías más sofisticadas, de menor costo y que sean amigables con el medio ambiente. Al respecto, los humedales construidos son una de las mejores opciones con menores costos y

excelentes resultados en remoción de contaminantes.

La implementación de diversas plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales en diferentes zonas del país se ha incrementado considerablemente en los últimos seis años, ya que el gobierno ha mostrado mayor interés en lo ambiental, y mayormente en las características que pueden ser implementadas para mejorar el funcionamiento del tratamiento para diferentes tipos de contaminantes, sin embargo, la cantidad tratada por estado, no es ni la mitad de lo total generado (CONAGUA, 2016). La falta de implementación de sistemas de tratamiento para la mejora de la calidad del agua y los altos costos que se requiere para la instalación, manejo y operación de las plantas, sumado a elevados consumos de energía que requieren para su funcionamiento, son situaciones que se deben resolver para atender la problemática (Sandoval-Herazo et al. 2016b).

Los grandes volúmenes de aguas residuales industriales descargados sin tratamiento en ríos y arroyos o que se están utilizando en forma directa en la agricultura, afectan negativamente la salud de los ecosistemas y de las personas. Muchas fuentes de agua para consumo humano se están contaminando, en 2015 las enfermedades intestinales en México fueron la causa del 12.57% de las muertes de niños (as) menores a 5 años (1,376 casos) (Félix-Fuentes et al. 2017) y muchos de estos casos están relacionados con la contaminación del agua.

De acuerdo con Hernández-Sámano et al. (2017), el agua está contaminada cuando alguna de sus propiedades físicas, químicas o biológicas ha sido alterada de tal modo que la vida acuática se ve afectada, provocando cambios marcados en la estructura de sus comunidades. Así mismo, el agua se considera contaminada cuando se han introducido elementos en cantidades superiores a los

niveles de seguridad para los seres humanos, para el uso agrícola o industria. Se distinguen dos tipos de fuentes de contaminación: puntuales y no puntuales. La *contaminación puntual* es aquella que puede ser identificada y proviene de un punto en particular, como una tubería de drenaje descargado directamente en un cuerpo de agua. En cambio, la *contaminación no puntual o difusa* se presenta cuando los contaminantes alcanzan el agua indirectamente a través de los cambios ambientales, es más difícil de controlar y es la fuente de la mayoría de los contaminantes de ríos y lagos y mares, como vertido de sustancias químicas en forma superficial o infiltración desde tierras de cultivo.

a) Contaminación público urbano. La contaminación de los cuerpos de agua es producto de las descargas de aguas residuales sin tratamiento de tipo doméstico. A finales del año 2001, más de 70% de los cuerpos de agua del país presentaban algún indicio de contaminación (CONAGUA, 2011). Las cuencas que destacan por sus altos índices son la del Lerma-Santiago, del Balsas, las aguas del Valle de México y el sistema Cutzamala (CONAGUA, 2016).

b) Contaminación industrial: Si bien la industria autoabastecida sólo consume 10% del agua total (7.3 km³ anuales), la contaminación que genera en demanda bioquímica de oxígeno es tres veces mayor que la que producen 100 millones de habitantes. En 2002, los giros industriales con mayores descargas contaminantes sumaban un total de 170.6 m³/s. La actividad con mayor descarga es la acuicultura, con 67.6 m³/s (39.6%), seguida por la industria azucarera 45.9 m³/s (27%), la petrolera 11.4 m³/s (6.6%), los servicios 10.3 m³/s (6%) y la química 6.9 m³/s (4%) (CONAGUA, 2010). A su vez, la industria azucarera es la que produce la mayor materia orgánica contaminante, mientras que la petrolera y

química las que producen los contaminantes de mayor impacto ambiental. El sector industrial compite por el uso del agua con otros sectores productivos, particularmente con el agrícola, y en algunas regiones esto se convierte en un factor de conflicto social y político.

c) Fuentes de contaminación agropecuaria:

El agua destinada para uso agropecuario constituye el 77% del total de la extracción, esto es 2.9 millones de hectáreas en 39,492 unidades de riego; donde sólo se consume el 6% en actividades pecuarias, acuicultura y otros aprovechamientos (CONAGUA, 2010). El 77% del agua destinada a usos consuntivos se emplea para fines agropecuario y el volumen concesionado a este uso es de 56 km³, de los cuales 17.8 km³ (32%) provienen de los acuíferos; casi la totalidad de este volumen (93.7%) se destina para riego y ha logrado aumentar la productividad 3.6 veces en comparación al riego de temporal. Los usos inadecuados de la tecnología, así como el empleo excesivo de agroquímicos han causado severos daños a la calidad del agua de los acuíferos. En zonas de riesgo el agua subterránea ha bajado varias decenas de metros, incrementando el costo de la extracción y por tanto la producción de cultivos (Montero-Vargas, 2011).

Echarri (2010) clasifica a las aguas residuales, dependiendo de su origen de la siguiente manera.

- I. Domésticas. Son los vertidos que se generan en poblaciones urbanas como consecuencia de sus actividades; generan aportes como aguas negras y grises. Las aguas residuales urbanas presentan cierta homogeneidad en cuanto a composición y carga contaminante, las características de cada vertido urbano van a depender de la población, influyendo parámetros como el número de habitantes.
- II. Industriales. Aquellas que proceden de cualquier actividad o negocio derivadas de

los procesos de producción en que se utilice el agua. Son enormemente variables en cuanto a caudal y composición; las características de los vertidos no únicamente cambian de una industria a otra, sino también dentro de un mismo tipo de industria.

III. Agrícola. Proviene de actividades agrícolas, además de cría de ganado y procesamiento de productos animales y vegetales.

IV. Pluviales. Todas las formas de precipitación: lluvia, granizo, niebla y nieve.

V. De infiltración. Proceden de sistemas de drenaje, de tuberías de desagüe y del descenso artificial del nivel de las aguas subterráneas, así como de su infiltración al sistema de alcantarillado a través de tuberías y otras instalaciones defectuosas.

En México, más del 70% de los cuerpos de agua presentan algún grado de contaminación, lo que ocasiona graves problemas de disponibilidad del agua al pasar en menos de 60 años de 19,365 a 3,982 m³ por habitante al año, debido al incremento de la demanda del agua en zonas con menor disponibilidad de recursos, principalmente en el norte y centro del país (CONAGUA, 2016).

De los 214.6 m³/s de agua residual generada por el sector industrial, solo se trata 70.5 m³/s (CONAGUA, 2016), Figura 2, dejando sin ningún tipo de tratamiento el 67.06% de las aguas industriales de empresas formalmente constituidas y que reportan datos a fuente oficiales, que son las grandes y medianas empresas, mientras que las pequeñas y micro empresas que constituyen el 98.7% de la actividad industrial en el país no tratan las aguas residuales que producen y mucho menos las industrias no formales que se desarrollan en comunidades rurales alejadas.

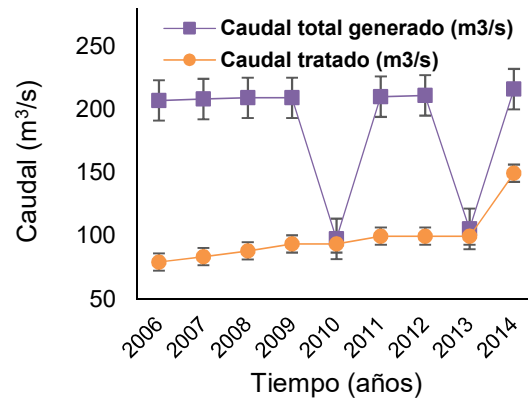


Figura 2. Caudal generado y tratado en plantas de tratamiento de aguas residuales industriales 2006-2014. Fuente: Conagua (2016).

En la actualidad se cuenta con diversos programas que permiten a pequeños y micro empresarios la implementación de plantas de tratamiento para que en coordinación con los municipios coadyuben a disminuir la alta contaminación que se generan sin control en cuerpos de aguas locales (SEMARNAT, 2015). Lo anterior permitiría prevenir la contaminación hormiga que sumada en zonas específicas pueda generar verdaderos desastres naturales.

2. Planta de tratamiento de aguas residuales industriales en México, por entidad federativa

México es uno de los países con más estados y municipios a nivel mundial, en los últimos 10 años su población ha ido en aumento considerable, existen aproximadamente 154 municipios costeros en México, únicamente la mitad cumple con una planta de tratamiento de aguas residuales, y de estas solo funcionan al 57% en promedio, sin tomar en cuenta que vierten el agua a cuerpos de agua colindantes sin antes verificar la calidad del agua tratada. En la tabla 1, se muestra la distribución de plantas de tratamiento de aguas industriales en el país, donde se puede observar que los estados con menor número de plantas de tratamiento son Quintana Roo y Guerrero, que

Estado	Plantas de tratamiento de aguas residuales industriales	Capacidad instalada (m ³ /s)	Caudal tratado (m ³ /s)
Aguascalientes	74	0.37	0.18
Baja california	71	0.61	0.61
Baja california sur	26	4.96	4.96
Campeche	134	2.89	2.88
Coahuila	62	0.8	0.53
Colima	13	0.44	0.29
Chiapas	93	8.38	5.26
Chihuahua	15	0.65	0.28
Distrito federal	7	0.01	0
Durango	41	1.08	0.62
Guanajuato	139	0.8	0.73
Guerrero	7	0.03	0.02
Hidalgo	46	1.84	1.38
Jalisco	93	1.84	1.73
México	262	3.07	2.2
Michoacán	104	5.68	5.24
Morelos	97	2.13	2.09
Nayarit	16	0.8	0.8
Nuevo León	187	4.09	2.96
Oaxaca	19	5.7	5.38
Puebla	216	0.94	0.76
Querétaro	156	1.25	0.66
Quintana Roo	4	0.06	0.05
San Luis Potosí	63	0.99	0.59
Sinaloa	96	8.37	5.07
Sonora	236	6.46	6.26
Tabasco	118	0.93	0.92
Tamaulipas	109	8.47	7.88
Tlaxcala	72	0.7	0.37
Veracruz	156	12.75	9.4
Yucatán	80	0.33	0.21
Zacatecas	20	0.2	0.17
Total nacional	2,832	87.64	70.5

además concentran gran parte del turismo, nacional y extranjero.

El estado de Sonora opera el mayor número de plantas de tratamiento de aguas industriales, tratando 6,626 l/s

aproximadamente. Se tratan 70,500 l/s, pero en este no se consideran las empresas que por ingreso económicos mínimos (pequeñas y micro empresas), no tratan sus aguas, lo que nos puede mostrar datos inciertos, sobre todo en estados donde operan desarrollos industriales rurales como, producción de queso, cría porcícola, entre otras actividades agropecuaria a menor escala. Del total de empresas consideradas en la ENAPROCE (2015) y publicadas por INEGI (2016), el 97.6% son microempresas, le siguen las empresas pequeñas, que son un 2% y las medianas y grandes representan 0.4% de las unidades económicas. En la tabla 2 se muestra el número de empresas micro, pequeñas, medianas y grandes en el país.

Tabla 1: Plantas de tratamiento de aguas residuales industriales por entidad federativa
Fuente: Conagua (2016)

Tabla 2. Tamaño y número de empresas en México

Tamaño	Empresas	
	Número	Participación
Micro	3,952,422	97.6
Pequeña	79,367	2
Mediana y grande	16,754	0.4
Total de empresas	4,048,543	100

Fuente: ENAPROCE (2015)

3. Humedales construidos como nueva tecnología propuesta para el tratamiento de aguas residuales industriales

En la Ley de Aguas Nacionales (2014) se define a los humedales como “las zonas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres que constituyen áreas de inundación temporal o permanente, sujetas o no a la influencia de mareas, como pantanos, ciénagas y marismas, cuyos límites los constituyen el tipo de vegetación hidrófila de presencia permanente o estacional; las áreas en donde el suelo es predominantemente

hídrico; y las áreas lacustres o de suelos permanentemente húmedos por la descarga natural de acuíferos”. Su funcionamiento ha sido replicado en humedales artificiales o construidos que son ecotecnologías donde la interacción, microorganismo-plantas-sustratos lo hacen ventajoso. En relación al costo son muy económicos en su implementación, además se caracterizan por cero gasto en su operación, cero gasto energético y alta remoción de contaminantes, pueden dar un valor estético al paisaje si se usan con plantas ornamentales. Sin embargo, al ser una tecnología nueva, hacen falta muchos estudios sobre las diversas opciones alternativas que pueden existir en estos, como es el caso de los sustratos alternativos, implementación de microorganismos externos, diseños de celdas innovadoras, la utilización de otros tipos de aguas industriales, así como el estudio de diversas plantas sembradas en estos (Hernández, 2016; Sandoval-Herazo et al. 2016b; Casierra et al. 2016; Marín-Muníz, 2017). Los humedales construidos para tratar aguas residuales han sido empleados en todos los continentes, existen registros de 138 humedales construidos en 38 países del mundo con resultados alentadores en cuanto a su función de mejorar la calidad del agua (Vymazal, 2014), al mismo tiempo que necesitan bajos costos de inversión, operación y mantenimiento, así también que no requieren personal altamente capacitado para su cuidado (Arias y Brix, 2003). En la tabla 3 se muestran diferentes tipos de aguas residuales industriales tratadas mediante humedales construidos, así como vegetación empleada y medios de soporte, lo anterior indica que se han realizado diversos estudios en el mundo sobre el tratamiento de aguas residuales industriales y con mayor proporción en regiones tropicales. Se recomienda realizar investigaciones encaminadas al tratamiento de aguas de origen piscícolas, rastros, entre otros, principalmente en países con problemas de contaminación

industrial en los cuerpos de agua, tanto macro como micro contaminación.

4. Retos en materia de tratamiento de aguas industriales

El incremento en el número de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales en las zonas urbanas de México es definitivamente optimista, de la misma manera que el incremento en porcentaje de las aguas que se tratan al año. Se puede avanzar de la misma manera en las zonas rurales, donde la población es mínima y este tipo de sistemas no llegan con tanta facilidad.

La principal desventaja de algunas lagunas de estabilización y los humedales construidos es la cantidad de terreno que se requiere en comparación con las tecnologías convencionales, un ejemplo de esto es el sistema de lodos activados. Sin embargo, puede ser un problema mínimo en las comunidades donde se cuente con amplios terrenos para implementarlos. Si tomamos en cuenta la información recabada, son numerosas empresas donde se puede implementar estos sistemas ecológicos.

Las lagunas de estabilización y los humedales artificiales se han recomendado ampliamente por múltiples autores para los países desarrollados, para la implementación en lugares donde este muy difícil instalar una planta de tratamiento y donde se relacione con los lugares de poca población, una de sus ventajas es la sencillez de operación y bajo costo. Como tecnología de tratamiento de las aguas residuales domésticas eficientes, las lagunas de estabilización, representan la tecnología más utilizada en los países subdesarrollados y han sido de gran ayuda (Romero-Aguilar et al. 2009).

Un análisis realizado a los sistemas de tratamiento de aguas residuales industriales que se utilizan en México, así como a las experimentaciones recientes debido al uso de humedales construidos, muestra algunas de las

barreras que han frenado el uso extendido de tales sistemas en México.

Una de las principales causas es el poco conocimiento de esta ecotecnología por parte del sector empresarial de México, otra de las barreras es la falta de manuales de diseño y operación accesible a las autoridades locales y a usuarios directos dedicados al tratamiento de aguas residuales industriales principalmente: lo que propicia que, en el momento de ofertar sistemas de tratamiento, solo ofrecen tecnologías convencionales (Zurita et al. 2011).

3. Investigaciones de tratamiento de aguas residuales industriales en humedales construidos

tipo de agua residual	tipo de humedal	Escala	Sustrato o medio de soporte	Vegetación	Tipo de cultivo	Remociones (%)	País	Autores
doméstica	Subsuperficial	Mesocosmos	Grava	<i>Phragmites sp</i>	Policultivos	DBO ₅ 93; NT 59; PT 76 y SS 56	Colombia	Gesama y Calveche (2005)
domésticos	híbrido	Mesocosmos	Tezontle	<i>Zantedeschia eathipioca</i> .	Policultivos	Cabacetapina 60+-4.45	México	Tejada et al (2005)
doméstica	Subsuperficial	Mesocosmos		<i>Phragmites australis, Typha latifolia y Typha angustifolia</i> .	policultivos	BOD 59, COD 54, TN 22, TP 43	Hungría	Czudar et al (2005)
domésticos	Horizontal y vertical	Mesocosmos	Grava, tezontle y piedra de río	<i>Phragmites australis, Salix viminalis L. y Helianthus tuberosus L.</i>	Policultivos	COD 93-96, TN 63-89, NH ₄ -N 62-82, TP 70-88	Japón	Kato et al. (2005)
domésticos	Horizontal y Vertical	Mesocosmos	Grava, tezontle y piedra de río	<i>Phragmites australis, Salix viminalis L. y Helianthus tuberosus L.</i>	Policultivos	COD 11-92, TKN 16-91	Japón	Kato et al. (2005)
domésticos	Horizontal	Mesocosmos	Tezontle	<i>Phragmites australis, Typha (latifolia, angustifolia, domingensis, orientalis and glauca) Scirpus (lacustris, validus, californicus and acutus) spp.</i>	Monocultivos	Aniline 99, nitrobenzene 98, sulphanic acid 99, trinitrophenol >99	Portugal	Justin et al (2005)
domésticos	Subsuperficial	Mesocosmos	Piedra de río y grava	<i>Typha angustifolia</i>	Policultivos	BOD 89, COD 68, TSS 93, TN 80, TP 76	Tailandia	Sohsalam y Sirianunpa (2008)
doméstica	Horizontal	Mesocosmos	Tezontle	<i>Phragmites australis</i>	Monocultivos	COD 77, NH ₄ -N 77, Fe 94, Mn 81	China	Huang et al (2005)
doméstica	Horizontal	Mesocosmos	Tezontle	<i>Pistia stratiotes y Pontederia cordata</i>	Policultivos	COD 97-99, TSS 76-91	USA	Grismer y Shepherd (2005)
doméstica	Horizontal	Mesocosmos	Grava	<i>Phragmites australis y Helianthus tuberosus.</i>	Policultivos	BOD 61, TSS 83, TN 62, TP 32	Tailandia	Kantawani y WaraAswa (2005)

Después de exponer ciertos puntos, podremos decir que es un verdadero reto para los investigadores en temas del agua, aportar propuestas nuevas e innovadoras que permitan el crecimiento del número de instalaciones de sistemas de tratamiento de aguas residuales industriales. Probablemente, se deba iniciar con una investigación masiva del tema en diferentes países, a través de la elaboración de guías específicas de diseño, operación y mantenimiento, y que sirva de conexión entre industrias vecinas para el buen funcionamiento de los humedales artificiales.

Mayor inversión en el tratamiento de aguas residuales industriales a pequeñas y micro empresas es un desafío que enfrenta el gobierno mexicano mediante programas que favorezcan directamente a este sector empresarial. Así como leyes más fuertes que normen la disposición final de este tipo de aguas con características que no atenten contra la salud humana y del medio ambiente.

CONCLUSIONES

La construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales en las localidades urbanas y en industrias no tan grandes como lo es la industria textil, agrícola, automotriz, entre otras, que se encuentran en lugares alejados, permitirá tener un tratamiento para sus aguas. Sin embargo, para las pequeñas industrias, es posible emplear tecnologías naturales de tratamiento, tales como las lagunas de estabilización y humedales construidos, que implican bajos costos de construcción, operación y mantenimiento. Las tecnologías de bajo costo, amigables con el ambiente, representan la opción más recomendable para países en vías de desarrollo como México.

La implementación de algunos sistemas permitirá el reúso de las aguas residuales industriales tratadas en la irrigación de algunos cultivos, labores domésticas o en procesos propios de las diferentes industrias,

con los que se disminuiría el consumo de agua de primer uso. En México la implementación de los humedales debe ser de forma colegiada, acompañada de expertos en manejo de estos sistemas. Aún falta mucho por hacer, ya que la cantidad de agua residual emitida sigue siendo demasiada, y no existe el número de plantas que puedan tratar la totalidad del agua residual, aunque se ha avanzado en el tratamiento convencional, sus altos costos de construcción, implementación y poco personal capacitado para operar los sistemas son la principal limitante para su crecimiento.

El uso de plantas ornamentales en humedales construidos para tratar aguas residuales industriales podrá dar un valor agregado a estos sistemas, así como investigar nuevos materiales que permitan ser usados como medios de soporte que sean de fácil obtención y bajo costo o reciclables como el PET, esto permitiría a los usuarios finales mejor estética visual en los sistemas y minimizar recursos en su implementación.

BIBLIOGRAFÍA

- Arias, C. A., Brix, H. 2003. Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e ingeniería neogranadina*, 13(1), 17-24.
- Buitrago, M., Yulier, S., Romero Coca, J. A. 2018. Current state review of the industry of tanneries in its processes and products: a competitiveness analysis. *Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión*, 26(1), 113-124.
- Ley de Aguas Nacionales. 2014. Recuperado de: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lan.htm>.
- Casierra-Martínez, H., Casalins-Blanco, J., Vargas-Ramírez, X., Caselles-Osorio, A. 2016. Desinfección de agua residual doméstica mediante un

- sistema de tratamiento acoplado con fines de reúso. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(4), 97-111.
- Czudar, A., Gyulai, I., Keresztúri, P., Csatári, I., Serra-Páka, S., Lakatos, G. 2011. Removal of organic materials and plant nutrients in a constructed wetland for petrochemical wastewater treatment. *Studia Universitatis Vasile Goldis Seria Stiintele Vietii (Life Sciences Series)*, 21(1).
- De Dios, M. A. T., Sanginés, M. L. G. 2017. Estrategias empresariales es un micronegocio del giro mecánicas-automotriz en Guanajuato. *Jóvenes en la ciencia*, 3(2), 1354-1359.
- De Sanctis, M., Del Moro, G., Chimienti, S., Ritelli, P., Levantesi, C., Di Iaconi, C. 2017. Removal of pollutants and pathogens by a simplified treatment scheme for municipal wastewater reuse in agriculture. *Science of The Total Environment*, 580, 17-25.
- Echarri, L. 2010. Sustancias contaminantes del agua. En L. Echarri, ciencias de la tierra y medio ambiente.
- ENAPROCE. 2015. Difusión de la encuesta nacional sobre productividad y competitividad de las Micro, Pequeñas y Medianas empresas. Obtenido de www.inegi.org.mx/saladeprensa/boletines/2016/especiales/especial_s2016-0-02.pdf
- Félix-Fuentes, A., Campas-Baypoli, O. N., Meza-Montenegro, M. 2017. Calidad sanitaria de alimentos disponibles al público de Ciudad Obregón, Sonora, México. *Respyn*, 6(3).
- Foteinis, S., Monteagudo, J. M., Durán, A., Chatzisyneon, E. 2018. Environmental sustainability of the solar photo-Fenton process for wastewater treatment and pharmaceuticals mineralization at semi-industrial scale. *Science of The Total Environment*, 612, 605-612.
- Gesama, T. E. E., Calvache, L. T. R. 2017. Implementación de un humedal para tratamiento del efluente de la granja San Carlos. *Libros Editorial UNIMAR*.
- Grismer, M.E., Shepherd, H.L. 2011. Plants in constructed wetlands help to treat agricultural processing wastewater. *California Agric.* 65, 73-79.
- Hernández et al. 2017. Greenhouse gas emissions and pollutant removal in treatment wetlands with ornamental plants under subtropical conditions. Biotechnological Management of Resources Network, Institute of Ecology, Carretera Antigua a Coatepec # 351, El Haya, Xalapa, C.P. 91070, Veracruz, México.
- Hernández-Sámamo, A. C., Guzmán-García, X., García-Barrientos, R., Guerrero-Legarreta, I. 2017. Enzymatic activity of proteases from *Cyprinus carpio* (Cypriniformes: Cyprinidae) captured in a polluted lagoon in México. *Revista de Biología Tropical*, 65(2), 589-597.
- Hernández, M. E. 2016. Humedales ornamentales con participación comunitaria para el saneamiento de aguas municipales en México. *RINDERESU*, 1(2), 01-12.
- Huang, X.F., Ling, J., Xu, J.-C., Feng, Y., Li, G.M. 2011. Advanced treatment of wastewater from an iron and steel enterprise by a constructed wetland/ultrafiltration/reverse osmosis process. *Desalination* 269, 41-49.
- Inegi. 2016. *Instituto Nacional de Estadísticas, Geografía e informática. Información actual de la población en México.* <http://www.inegi.gob.mx>.
- Justin, M. Z., Vrhovšek, D., Stuhlbacher, A., & Bulc, T. G. 2009. Treatment of

- wastewater in hybrid constructed wetland from the production of vinegar and packaging of detergents. *Desalination*, 246(1-3), 100-109.
- Kantawanichkul, S., Wara-Aswapati, S. 2005. LAS removal by a horizontal flow constructed wetland in tropical climat. In: Vymazal, J. (Ed.), *Natural and Constructed Wetlands: Nutrients, Metals and Management*. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, pp. 261–270.
- Kato, K., Inoue, T., Ietsugu, H., Koba, T., Sasaki, H., Miyaji, N. & Nagasawa, T. 2010. Design and performance of hybrid reed bed systems for treating high content wastewater in the cold climate. In *12th international conference on Wetland systems for water pollution control*.
- Marín-Muñiz, J. L. 2017. Humedales construidos en México para el tratamiento de aguas residuales, producción de plantas ornamentales y reuso del agua. *Agroproductividad*, 10(5).
- Martínez, D. V. S. 2017. Contaminantes biológicos en el agua y riesgo a la salud pública. *Boletín Científico de la Escuela Superior de Atotonilco de Tula*, 4(7).
- Núñez, J. 2017. Los Derechos Humanos y el Nuevo Orden Económico Mundial. *Revista AFESE*, 12(12).
- Parr, J.; Smith, M. and Shaw, R. 1999. Wastewater treatment options. *Water and Environmental Health at London and Loughborough (WELL)*. URL: http://www.lboro.ac.uk/well/resources/technical-briefs/64wastewater_treatment-options.pdf.
- Ramakrishna, B. 1997. Estrategias de extensión para el manejo integrado de cuencas hidrográficas: conceptos y experiencias (No. 3). *Iica*.
- Romero-Aguilar, M., Colín-Cruz, A., Sánchez-Salinas, E., Ortiz-Hernández, M. A. 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.
- Sandoval-Herazo, L. C. S., Castro, S. A. Z., Díaz, E. D. P. 2016. Procesos urbanísticos no sustentables en municipio de Colosó de Sucre, Colombia. *RINDERESU (REVISTA INTERNACIONAL DE DESARROLLO REGIONAL SUSTENTABLE)*, 1(1), 64-76.
- Sandoval-Herazo, Marín-Muñiz, Alvarado, Castelán y Ramírez. 2016. Diseño de un Mesocosmo de Humedal Construidos con Materiales Alternativos Para el Tratamiento de Aguas Residuales en la Comunidad de Pastorías Actopan, Ver. In *Congreso Interdisciplinario de Ingenierías* (p. 35).
- Sanz, J. M., Martín, N., Camacho, J. V. 2009. Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos. *Castilla, España: CONAMA*.
- Secretaría de Medioambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Comisión Nacional del Agua (Conagua). 2015. Guía de políticas públicas en el ámbito estatal en materia de agua potable y saneamiento. 90p Secretaría de Finanzas y Planeación del estado de Veracruz (SEFIPLAN). 2014. Cuadernillos Municipales de Xalapa.

- SEMARNAT (Secretaría Del Medio Ambiente y Recursos Naturales), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2011). Estadísticas del Agua en México. Edición 2011.
- SEMARNAT (Secretaría Del Medio Ambiente y Recursos Naturales), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2010. Estadísticas del Agua en México. Edición 2010.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), Comisión nacional del agua (CONAGUA), 2016. Estadísticas del agua en México. Edición 2016.
- Singhirunnusorn, W., & Stenstrom, M. K. 2009. Appropriate wastewater treatment systems for developing countries: criteria and indicator assessment in Thailand. *Water science and technology*, 59(9), 1873-1884.
- Sohsalam, P., Sirianuntapiboon, S. 2008. Feasibility of using constructed wetland treatment for molasses wastewater treatment. *Bioresource technology*, 99(13), 5610-5616.
- Tejeda, A., López, Z., Rojas, D., Reyna, M. Z., Barrera, A., & Zurita, F. 2015. Eficiencia de tres sistemas de humedales híbridos para la remoción de carbamazepina. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(6), 19-31.
- Vymazal, J. 2014. Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: a review. *Ecological Engineering*, 73, 724-751.
- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). 2017. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado. París, UNESCO.
- Zhu, B., Bradford, L., Huang, S., Szalay, A., Leix, C., Weissbach, M., Lueders, T. 2017. Unexpected diversity and high abundance of putative nitric oxide dismutase (Nod) genes in contaminated aquifers and wastewater treatment systems. *Applied and environmental microbiology*, 83(4), e02750-16.
- Zurita-Martínez, F., Castellanos-Hernández, O. A., Rodríguez-Sahagún, A. 2011. El tratamiento de las aguas residuales municipales en las comunidades rurales de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(spe1), 139-150.
- Montero-Vargas, M. J. 2011. Visualizador: "Usos de la tierra del Humedal Nacional Terraba Sierpe"