

VALORACION DE HUMEDAL DE TRATAMIENTO PARA EL SANEAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN UNA POBLACION DEL LAGO DE PATZCUARO, MICHOACÁN - MEXICO

ASSESSMENT OF TREATMENT WETLAND FOR THE SANITATION OF WASTEWATER IN A POPULATION OF LAKE PATZCUARO, MICHOACÁN – MEXICO

Aldo A. Castañeda¹

(1) Universidad de Guadalajara, Centro de Universitario de Los Altos, Av. Rafael Casillas Aceves # 1200, CP 47600, Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México
(e-mail: acastaneda@cualtos.udg.mx)

Recibido: 02/08/2021 - Evaluado: 11/09/2021 - Aceptado: 30/09/2021

RESUMEN

Para el saneamiento de las aguas residuales, en México prevalece un déficit de infraestructura, altos costos de operación, falta de mantenimiento y personal capacitado. Mediante el presente estudio se evalúa la eficiencia del tratamiento que se realiza a las aguas residuales domesticas en poblaciones en la ribera del lago de Pátzcuaro, Michoacán los cuales constan de humedales artificiales, tomando como referencia la determinación analítica de parámetros de calidad de agua contenidos en las Normas Oficiales Mexicanas vigentes como: Organismos Coliformes Totales, Organismos Coliformes Fecales, Demanda Química de Oxígeno, Conductividad Especifica, Nitrógeno total y Fosforo total. Los muestreos en campo y los análisis de laboratorio se realizaron en el mes de febrero del 2021, observándose reducciones significativas del orden del 45 al 95% en prácticamente todos los parámetros estudiados, cumpliendo en su mayoría con la normatividad oficial vigente referente a aguas tratadas y agua tratadas para su reutilización.

ABSTRACT

In Mexico, there is a deficit of infrastructure, high operating costs, lack of maintenance and trained personnel for wastewater sanitation. This study evaluates the efficiency of the treatment of domestic wastewater in towns on the shore of Lake Patzcuaro, Michoacan, which consist of artificial wetlands, taking as a reference the analytical determination of water quality parameters contained in the current Mexican Official Standards such as: Total Coliform Organisms, Fecal Coliform Organisms, Chemical Oxygen Demand, Specific Conductivity, Total Nitrogen and Total Phosphorus. Field sampling and laboratory analyze were carried out in February 2021, showing significant reductions of 45 to 95% in practically all the parameters studied, most of which comply with current official standards for treated water and water treated for reuse.

Palabras clave: aguas residuales domésticas, lago de Pátzcuaro, parámetros de calidad de agua, tratamiento de aguas

Keywords: domestic wastewater, lake of Patzcuaro, water quality parameters, water treatment

INTRODUCCIÓN

En México el 58% de las aguas residuales generadas son colectadas por los sistemas formales de alcantarillado municipales, estimándose en más de 208 metros cúbicos por segundo (m^3/s), de los cuales solo el 40.2% ($83.6 m^3/s$) reciben algún tipo de tratamiento, adicionalmente se generan $190 m^3/s$ de aguas residuales de uso no municipal incluyendo a la industria de las cuales solo se tratan $33.7 m^3/s$ (17.7%) (CONAGUA, 2010).

El adecuado tratamiento de las aguas residuales, es actualmente una prioridad mundial, México en este contexto presenta déficit de infraestructura, altos costos de operación, falta de mantenimiento y personal capacitado, solo el 40.2% de las aguas residuales generadas en el país, reciben algún tipo de tratamiento (INEGI, 2020), evidenciando la necesidad de incorporar tecnologías alternativas sustentables que sean accesibles para poblaciones rurales en el saneamiento de sus aguas residuales domésticas.

Diferentes tipos y diseños de Humedales de tratamiento (HT) se están utilizando como sistemas para el saneamiento de aguas residuales principalmente de origen doméstico, reproduciendo y mejorando las condiciones de los humedales naturales, aumentando tanto su capacidad de retención de contaminantes, como disminuyendo sus tiempos de contacto, algunas experiencias son las siguientes; en instalaciones de la Universidad Autónoma de Tabasco, en Villahermosa, México, se han implementado HT de flujo libre operando con *Typha domingensis* (espadaño) y *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua), y humedales de flujo sub-superficial empleando *Paspalum paniculatum* (camalote) y *Cyperus articulatus* L. (chintul), para remover contaminantes de agua residual, utilizando análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis, cuantificando diferencias significativas entre los tratamientos y los controles, los rangos en la eficiencia de remoción de contaminantes para el de flujo libre fue de 83.4 al 97.8 %, mientras que en el de flujo sub-superficial de 52.2 al 94.8 % con Tiempos de Retención Hidráulica (TRH) de 5.5 a 7.5 días (Solís *et al.*, 2016).

En el mismo sentido, HT de flujo sub-superficial construidos con plantas macrófitas e instalados en poblaciones rurales del estado de Jalisco se han evaluados, observando TRH de 3.5 a 4.5 días, con rangos de temperaturas de 12 a 25°C, reducciones de contaminantes en las aguas tratadas del 75 al 92 %, bajo condiciones de operación que se pueden mejorar (Castañeda, 2021).

Así mismo, en otras regiones de Latinoamérica se han obtenidos resultados alentadores en la implementación de HT para la depuración de agua residual generada en centros universitarios (Antioquia, Colombia), donde utilizando principalmente *Typha latifolia* y *Cyperus papyrus*, se generan niveles de remoción del 70.4 % en Demanda Química de Oxígeno (DQO), del 96.7 % en Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y del 81.4 % en Sólidos Suspendedos Totales (SST) (Bedoya *et al.*, 2014).



Fig. 1: Ubicación del lago de Patzcuaro en el estado de Michoacan, Mexico.

El Lago de Pátzcuaro se localiza en el centro del estado de Michoacán (figura 1), es el tercero más grande del país con más de 10,167 hectáreas (ha) (Rivas & Paredes, 2014), en la actualidad se encuentra en un proceso natural y acelerado de eutrofización, donde el material de los suelos que conforman la cuenca, es acarreado por la erosión, provocando gran asolvamiento al vaso, aunada con una notable disminución en su profundidad y la descarga de aguas residuales no tratadas, así como descargas no puntuales, favoreciendo por lo tanto el desarrollo de las plantas acuáticas y semi-acuáticas en su periferia.

El principal objetivo de este trabajo es presentar los avances en la valoración de la operación de los sistemas para el saneamiento de las aguas residuales mediante Humedales de Tratamiento (HT) de poblaciones ubicadas en la ribera del lago de Pátzcuaro (figura 2).



Fig. 2: Principales poblaciones en el lago de Pátzcuaro Michoacán, México.

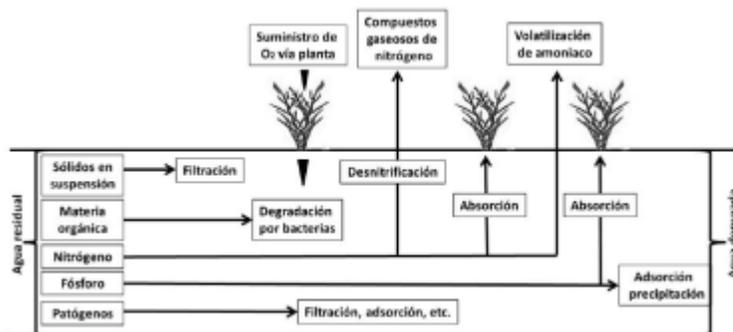


Fig. 3: Proceso de depuración de las aguas residuales en los HT.

Los HT son sistemas complejos e integrados donde se verifican interacciones entre el agua, las plantas los microorganismos, la energía solar, el sustrato y el aire, con la finalidad de mejorar la calidad del agua residual (García, *et al.*, 2005). La operación y funcionamiento de los HT, para el saneamiento de aguas residuales domésticas, se fundamenta principalmente en tres principios (figura 3):

- 1) La actividad bioquímica de los microorganismos.
- 2) El aporte de oxígeno a través de las plantas durante el día.
- 3) El soporte físico de un lecho inerte para el desarrollo de los rizomas de las plantas, además de operar como material filtrante (Kadlec *et al.*, 2015).

MATERIALES Y METODOS

En México, para medir el grado de contaminación de las aguas residuales se utilizan varios parámetros expresados en la normatividad oficial vigente contenidas principalmente en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM's): NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997. Los parámetros que se cuantificaron en el presente estudio fueron los siguientes:

- 1) Demanda Química de Oxígeno (DQO): Se define como cualquier sustancia tanto orgánica como inorgánica susceptible de ser oxidada, mediante un oxidante fuerte. La cantidad de oxidante consumida se expresa en términos de si equivalencia en oxígeno, se expresa en mg/L O₂ y en su valor numérico incluye a la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), cuyo valor regularmente es menor.
- 2) Nitrógeno total (Nt): Es un indicador utilizado comúnmente en ingeniería ambiental, el cual refleja la cantidad total de nitrógeno en el agua analizada, consiste en la suma del nitrógeno orgánico en sus diversas formas (proteínas y ácidos nucleicos en diversos estados de degradación, urea, aminas, entre otras) y el ion amonio NH₄⁺. Varios compuestos de nitrógeno son nutrientes esenciales, su presencia en las aguas en exceso es causa de eutrofización (enriquecimiento excesivo de nutrientes en un ecosistema acuático). El nitrógeno se presenta en muy diferentes formas químicas en las aguas naturales y contaminadas.
- 3) Fosforo total (Pt): Se encuentra en las aguas naturales y aguas servidas casi exclusivamente en forma de fosfatos, estos se clasifican a su vez en: orto fosfatos, fosfatos condensados (piro-, meta-, y poli fosfatos) y fosfatos orgánicamente ligados, la determinación del Pt incluye dos pasos: el primero consiste en la conversión a ortofosfato disuelto, todas las diferentes formas del fosforo presente incluyendo el fosforo reactivo, el hidrolizable y el orgánico, el segundo paso consiste en la detección del ortofosfato en solución. El fósforo, como el nitrógeno, es nutriente esencial para la vida, su exceso en el agua provoca también eutrofización.
- 4) Conductividad Especifica (CE): es la medida de las cargas iónicas, que circulan dentro del agua, esta medida nos ofrece información general de la concentración de sales e iones presentes en el agua. Los iones más habituales hallados en las aguas naturales son: sodio, calcio, magnesio, bicarbonato, sulfato y cloruro. Las descargas de aguas residuales sin tratamiento a cuerpos de aguas suelen aumentar su conductividad, la unidad básica para medir la CE son los microSiemens por centímetro (µS/cm).
- 5) Grasas y Aceites (G/A): son compuestos orgánicos constituidos principalmente por ácidos grasos de origen animal y vegetal, así como de hidrocarburos del petróleo, algunas de sus características más representativas; son baja densidad, poca solubilidad en agua, baja o nula biodegradabilidad, por ello, si no son controladas se acumulan en el agua formando natas en la superficie del líquido, su efecto en los sistemas de tratamiento de aguas residuales o en las aguas naturales se debe a que interfieren con el intercambio de gases entre el agua y la atmósfera, no permiten el libre paso del oxígeno hacia el agua, ni la salida del CO₂ del agua hacia la atmósfera.
- 6) Organismo Coliformes Totales (OCT): son todos aquellos organismos aerobios o anaerobios facultativos capaces de crecer a 35 °C en un medio líquido de lactosa, con producción de ácido y gas en un período de 48 horas.
- 7) Organismos Coliformes Fecales (OCF): son aquellos organismos termo-tolerantes coliformes aerobios o anaerobios facultativos los cuales tienen las mismas propiedades fermentativas en un periodo de 24 horas a 44.5 °C ± 0.2 °C.

Para los OCT y los OCF las muestras se recolectaron siguiendo el procedimiento establecido en la NOM-230-SSA1-2002. Los recipientes con las muestras se conservaron en condiciones de refrigeración hasta su llegada al laboratorio, donde fueron analizados en menos de 24 horas. Para realizar la prueba presuntiva, se utilizó el método del Número Más Probable en 100 ml de muestra (NMP/100 ml) en tubos múltiples, según la NOM-110-SSA1-1994.

Para concentraciones elevadas de OCT y OCF se realizaron diluciones según la NOM-210-SSA1-2014. Tanto los muestreos en campo, como los análisis de laboratorio se realizaron durante el mes de febrero del 2021 (temporal de sequía), cuando prevalecían temperaturas comprendidas entre una mínima promedio de 11.2 °C y máxima promedio de 23.3 °C.

Para la recolección de las muestras de agua, como para las determinaciones analíticas en el laboratorio, se observaron los procedimientos y técnicas contenidas en la normatividad ambiental oficial vigente en México, que contempla las técnicas establecidas por el manual de métodos estándar para análisis de aguas y aguas residuales (APHA, 2017), utilizando los siguientes técnicas y equipos:

a) Reactor digital marca HACH modelo DRB 200: para digestión de muestras de agua residual, para: DQO, Pt y Nt (figura 4).



Fig. 4: Reactor DRB 200 (HACH).

b) Fotómetro marca HACH modelo DR 2800: espectrofotómetro de espectro visible, con un rango de longitud de onda de 340 a 900 nanómetros (nm) (figura 5), para: DQO, Nt, y Pt.



Fig. 5: Fotómetro DR 2800 (HACH).

c) Medidor portátil marca HACH modelo SensION+ EC5 para CE (figura 6).



Fig. 6: Medidor portátil SensION+ EC5 (HACH).

d) Método de extracción Soxhlet y la técnica de lo norma mexicana NMX-AA-005-SCFI-2013, para G/A.

RESULTADOS

En la tabla 1, se describen las poblaciones ribereñas del lago de Pátzcuaro que cuentan con sistema para el saneamiento de sus aguas residuales mediante HT.

Tabla 1: Poblaciones en la ribera del Lago de Pátzcuaro con HT

Población	Habitantes (diseño tratamiento)	Capacidad (litros por segundo)
Cucuchucho	1,080	0.5
Santa Fe de la Laguna	2,500	3
San Gerónimo P.	950	0.5
Erongarícuaro	2,953	3.33
San Francisco U.	450	0.35

Fuente: Rivas (2018).

En esta oportunidad se valoró el sistema para el tratamiento de las aguas residuales domésticas de Erongarícuaro (figura 7), el cual se encuentra conformado por:

1) Pre-tratamiento: su objetivo es eliminar o reducir la presencia de sólidos gruesos (piedras, plásticos, entre otros) y arenas por sedimentación, que puedan obstruir las tuberías y colmatar los HT, dispone de medición de caudales mediante canal Parshall instalado a la salida, así mismo esta etapa cuenta con sistema de manejo de excedentes de agua para evitar sobrecargas de caudal, principalmente en temporada de lluvias, así mismo se separan materiales ligeros (grasas, aceites, plásticos, etc..) por flotación (González & Rivas, 2008).

2) Sedimentador secundario: fabricado en concreto armado de tipo vertical con forma cilíndrica y fondo cónico, el agua que provienen del pretratamiento entra mediante la tubería central, en este sedimentador se separa el agua de los lodos por gravedad los cuales se acumulan en el fondo retirándolos periódicamente.

3) Humedales de lodos: formadas por dos lagunas de 39 x 47 metros (m), con profundidad de 0.60 m, bordo libre de 0.20 m (talud 2:1), disponen de capas de tezontle y arena para la retención de lodos, con TRH de 3 días.

4) Lecho: formados por dos lagunas rectangulares de 60 x 47 m con profundidad de 0.60 m, un bordo de 0.20 m, el lecho está dividido en 3 secciones separadas por mamparas de geo-membrana, el agua circula por cada sección a través del tezontle y la arena que contienen, los especímenes vegetales son: carrizo común (*Phragmites Australis*), alcatraz (*Zantedeschia aethiopica*) y tule (*Typha Latifolia*), su TRH es de 1.1 días.

5) Laguna de maduración: de forma rectangular de 22 x 47 m, con profundidad de 0.60 m y un bordo libre de 0.20 m, su TRH es de 1.1 días.

6) Humedal de pulimento: es el último componente del proceso de tratamiento, tienen un TRH de 3 días, el agua tratada se descarga directamente al lago de Pátzcuaro mediante una tubería en PVC de 4 pulgadas de diámetro y de 162 m de longitud (Figura 8).

El caudal de diseño original de este sistema de tratamiento fue de 3.33 l/s, para una población de 2,953 habitantes (2005), con temperaturas de 15.9 a 22.9 °C, una precipitación anual de 1,048 mm y una vida útil de 20 años a partir del 2005, fecha de su instalación y puesta en marcha (MIA, 2005).

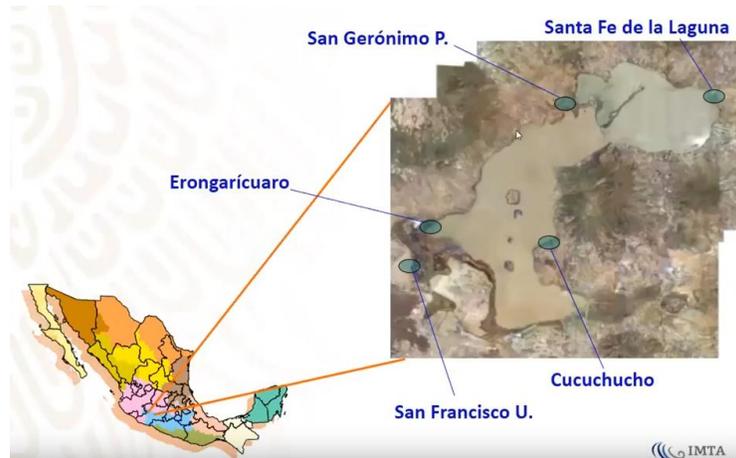


Fig. 7: Localización de Erongarícuaro en la ribera del lago de Pátzcuaro.



Fig. 8: Sistema para el saneamiento de aguas residuales de Erongarícuaro.

Los principales parámetros en el agua cruda considerados fueron: $DBO_5 = 340 \text{ mg/l}$, $SST = 204 \text{ mg/l}$, $Nt = 79 \text{ mg/l}$ y $Pt = 17 \text{ mg/l}$. Las expectativas de efectividad en el tratamiento incluían para el agua tratada, contenidos máximos de $Nt = 10 \text{ mg/l}$ y de $Pt = 5 \text{ mg/l}$ (González y Rivas, 2008).

En la tabla 2 se muestran las principales características físicas actuales del sistema de tratamiento.

Tabla 2: Características del sistema de tratamiento de aguas residuales domesticas de Erongarícuaro.

Características	Descripción
Superficie general (m ²)	17,500
Profundidad hidráulica efectiva (cm)	55
Área efectiva (m ²)	13,800
Tipo Humedal/flujo	Sub-superficial/horizontal
Capacidad (m ³ /día)	300
Sustrato	Grava
Densidad del humedal (m ² /hab)	5.07
Tiempo de retención hidráulica promedio (días)	2-4

Los resultados de las tres campañas de muestreo, el promedio de los análisis paramétricos de las aguas tanto a la entrada como a la salida del sistema de tratamiento, los límites máximo permisibles en la normatividad vigente, así como los porcentajes de reducción de contaminantes aparecen en la tabla 3.

Tabla 3: Valuación paramétrica de la operación del HT en Erongarícuaro (2021).

Parámetro/ unidades	Entrada				Salida				Límite máximo permisible en NOM's	Porcentaje de Reducción
	1	2	3	Prom.	1	2	3	Prom.		
Pt (mg/L)	13.11	11.92	11.33	12.12	8.6	6.05	5.21	6.62	5	45.38
Nt (mg/L)	82.6	80.81	79.98	81.13	10.44	12.32	10.45	11.07	15	86.36
DQO (mg/L)	1,420	1,350	1,310	1,360	112.8	100.5	98.4	103.9	120	92.36
CE (μ S/cm)	3,405	3,321	3,642	3,456	234.39	235.89	220.23	230.17	250	93.34
G/A (mg/L)	699	589	545	611	32.9	30.67	25.89	29.82	30	95.12
OCT (NMP/100ml)	8,100	9,800	10,000	9,300	890	874	786	850	1,000	90.86
OCF (NMP/100ml)	1,140	1,310	1,150	1,200	315	305	280	300	---	75.00

Como puede observarse el agua tratada presenta reducciones importantes en todos los contaminantes evaluados que van del 45 al 95%, así mismo se cumple con los límites máximos permisibles de las normas oficiales vigentes a excepción del fósforo total.

Estas deficiencias en la remoción de contaminantes coinciden con otros tratamientos de aguas residuales domésticas mediante HT operando en otras regiones tanto de México, como en otros países.

La actual población de Erongarícuaro es de 2,721 habitantes (2020), es decir 6.17% menos que la población original de diseño del sistema de tratamiento, lo que beneficia al proceso de tratamiento al disponer de mayores TRH.

Aunque estos sistemas alternativos para el saneamiento de aguas residuales domésticas requieren de menor mantenimiento que los sistemas convencionales, es necesario retirar periódicamente tanto los materiales retenidos en el pretratamiento como los excedentes de biomasa que se acumulan en las celdas de tratamiento, como evitar cortos circuitos en los flujos de agua en los lechos y lagunas, lo anterior para asegurar una óptima operación del sistema y garantizar la mejor calidad en las aguas tratadas.

CONCLUSIONES

En general, este tipo de tratamientos naturales que utiliza especímenes de plantas típicas de la región donde se instalan, representan una opción sustentable para la remoción de carga orgánica y contaminantes presentes en las aguas residuales de origen doméstico, con un bajo costo de instalación, operación y mantenimiento, principalmente para poblaciones rurales que actualmente carecen de sistemas de tratamiento y que descargan sus efluentes a cuerpos de aguas, provocando el aumento en la contaminación ambiental, afectando a los propios pobladores y poniendo en riesgo su adecuado desarrollo socioeconómico, el saneamiento de aguas mediante HT contribuyen en buena medida con la disminución de la contaminación ambiental y la conservación de los recursos naturales.

REFERENCIAS

APHA-American Public Health Association (2017). *Standard Methods for examinations of water and wastewater*. Washington, USA.

Bedoya, J., Ardila, A. & Reyes, J. (2014). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Colombia. *Rev. Int. Contam. Ambient* 30(3), 275-283. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992014000300004&lng=es&nrm=iso. [Consultado: 14-jul-2021].

Castañeda, A. (2021). Evaluación de Humedales Construidos en Los Altos de Jalisco: Los casos de Jesús María (Ojo Zarco) y Arandas (Martínez Valadez). *Revista Latinoamericana de Ambiente y las Ciencias*, 11, 45-6.

CONAGUA-Comisión Nacional del Agua (2010). *Estadísticas del agua en México 2010*. CONAGUA. México.

García, J., Aguirre, P., Barragán, J., Mujeriego, R., Matamoros, V. & Bayona, J.M. (2005). Effect of Key Design Parameters on the Efficiency of Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland. *Ecological Engineering*, 25 (4), 405-418.

González, C. y Rivas, A. (2008). Humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales generadas en áreas rurales ribereñas al lago de Pátzcuaro. *Tlaloc AMH*. 41 (2), 8-13. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

INEGI-Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020). Datos abiertos [En línea]. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#Datos_abiertos [Consultado: 10-jun-2021].

Kadlec, R.H., Knight, R.L., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P. & Haberl, R. (2015). *Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation*. IWA Specialist Group on use of Macrophytes in Water Pollution Control, IWA Publishing. USA.

MIA-Manifiesto de Impacto Ambiental (2005). *Proyecto Ejecutivo de la PTAR de la localidad de Erongarícuaro, municipio de Erongarícuaro Mich., México*. Servicios de Ingeniería e Informática S.C. Disponible en: <http://www.utzmg.edu.mx > documentos > Experiencia exitosa del uso de humedales de tratamiento- UTZMG> [Consultado: 18-jul-2021].

Normas Oficiales Mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2021). Disponibles en: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/normas-oficiales-mexicanas-54004> [Consultado: 15-jul-2021].

Norma Oficial Mexicana NOM-230-SSA1-2002, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo. Disponible en: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/230ssa102.html> [Consultado: 15-jul-2021].

NOM-110-SSA1-1994. Bienes y servicios. Preparación y dilución de muestras de alimentos para su análisis microbiológico. Disponible en: <http://www.fao.org/faolex/results/details/es/c/LEX-FAOC013544/> [Consultado: 14-jul-2021].

NOM-210-SSA1-2014 Productos y servicios. Métodos de prueba microbiológicos. Determinación de microorganismos indicadores. Determinación de microorganismos patógenos. Disponible en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5398468&fecha=26/06/2015 [Consultado: 14-jul-2021].

Norma Mexicana NMX-AA-005-SCFI-2013, Análisis de agua-medición de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba. Disponible en: <https://www.sinec.gob.mx/SINEC/Vista/Normalizacion/DetalleNMX.xhtml?pidn=SkZ3bWIRUVBUFRKdUNVbmd5MjZsdz09> [Consultado: 17-jul-2021].

Rivas, A. (2018). *Experiencia exitosa del uso de humedales de tratamiento para la protección de la calidad del agua del Lago de Pátzcuaro*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Disponible en: <https://sswm.info/index.php/es/node/11982> [Consultado: 14-jun-2021].

Rivas, A. & Paredes, D. (coords.) (2014). *Sistemas de humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua*: memorias de la Segunda Conferencia Panamericana en Sistemas de Humedales para el Manejo, Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua, Morelia, Michoacán, IMTA. ISBN 97895872231909, Jiutepec, Morelos. México.

Solís, R., López, G., Bautista, R., Hernández, J. & Romellón, M. (2016). Evaluación de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial en la remoción de contaminantes de aguas residuales utilizando diferentes especies de vegetación macrófita. *Interciencia*, 41 (1), 40-47. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33943362007> [Consultado: 17-jul-2021].