

Solk  
**UTIM**  
UNIVERSIDAD  
TECNOLÓGICA  
DE IZÚGAR DE MATAMOROS

En el marco del  
**ANIVERSARIO**  
**UUTT**

## Foro

**“El uso adecuado del agua residual y  
otras medidas para mitigar la escasez  
de agua en tiempo de sequía”**

**7 jul. 2021 10:00 a. m.  
Ciudad de México**

# *Memorias*

Las presentes memorias incluyen los resúmenes en extenso que fueron abordados en el Foro virtual **“El uso adecuado del agua residual y otras medidas para mitigar la escasez de agua en tiempo de sequía”**, que tuvo lugar el día 7 de julio de 2021. Este evento fue convocado por la Comisión de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, el Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla, la Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros, el Laboratorio Nacional del Agua CONACyT y la Red Temática Gestión de la Calidad y Disponibilidad del Agua.

Es importante destacar que los resúmenes que se incluyen fueron sometidos a dos dictámenes de pares ciegos. Su contenido es responsabilidad de quienes lo presentan como autores y no refleja ninguna postura de las Instituciones convocantes.

Dr. Amado Enrique Navarro Frómeta

Contenido	
Algunas consideraciones sobre el uso del agua residual para el riego agrícola. Dr. Amado Enrique Navarro Frómata	4
El uso de aguas residuales provenientes de la Ciudad de México en la agricultura del Valle del Mezquital, Hidalgo. Lic. Dulce María Bautista-García	10
Reúso potencial del agua residual agrícola en los Distritos de Riego del noroeste de México. Dr. Leonel Ernesto Amábilis Sosa	18
Aprovechamiento integral del agua tratada a través de la segregación previa de efluentes residuales. Dra. María del Carmen Durán Domínguez	23
El reúso del agua tratada en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales de Morelia Michoacán y el rescate urgente del Lago de Cuitzeo. Dr. Salvador Sánchez	29
Propuestas para mejorar el método para determinar la disponibilidad oficial de agua superficial en México. Dr. Sergio Arturo Rentería Guevara	33
La gestión del agua en la industria. Dra. Sofía E. Garrido Hoyos	41
Impacto del MST sobre la estabilidad de humedales en zonas áridas. El caso del Ecocampus BUAP en Valsequillo, Puebla. Dr. Jesús Ruiz Careaga	46
Instalación de Humedales Artificiales (HA) para el tratamiento y reúso de aguas residuales en zonas semiáridas de México. Dr. Aldo Antonio Castañeda Villanueva	54
Humedal artificial para tratamiento de aguas residuales del Instituto Tecnológico de Boca del Río. Dra. Fabiola Lango Reynoso	59
Baño Seco Permapreta. Ing. Fernando San Esteban	63
Sistemas de hidroponía NFT y el efecto de funcionalización con M. oleífera para el tratamiento de agua residual en la Zona Chinampera. M.C. Nury Infante	69
Remoción de fluoruro y As en agua por medio de carbonizado de hueso de pez pleco sintetizado en un horno rural. M.C. Sergio Armando Cruz-Briano	74
Remoción de triclosán del agua mediante procesos de adsorción y fotodegradación. M.C. Lázaro A. González Fernández.	79
Residuos sólidos urbanos y aguas residuales en Izúcar de Matamoros: hacia un nuevo paradigma. C. David Navarrete Rosas	84
Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de un sustrato a base de biocarbón y su efecto en <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. Lic. Isabel Jasso-Acosta	90
Adaptación de procesos de oxidación avanzada con biofiltros para el tratamiento de agua de lluvia. Dra. Refugio Rodríguez Vázquez	96
Evaluación de la remoción de Cd y Pb en mezcla y tolerancia a aguas residuales por vitroplantas de <i>Typha</i> sp. con adición de ácido cítrico. Lic. Amauri Ponce Hernández	102

# Algunas consideraciones sobre el uso del agua residual (AR) para el riego agrícola.

Amado Enrique Navarro Frómata  
Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros, navarro4899@gmail.com

**Introducción.** Con una población mundial estimada al 2030 de 8300 millones y de 9100 millones en el 2050, es fácil comprender el rol central que ocupa la gestión adecuada del agua en el desarrollo sostenible. Los cimientos de esta gestión se ven afectados por los niveles de incertidumbre. Estos están cambiando como consecuencia de los cambios en las tendencias de la demografía, patrones de consumo, la migración y el cambio climático, lo que resulta en un aumento de niveles de riesgo (Navarro, 2019). Sirva de ilustración el problema de la sequía que afecta a México (figuras 1a), afectando la disponibilidad de agua en las presas para riego (figura 1b).

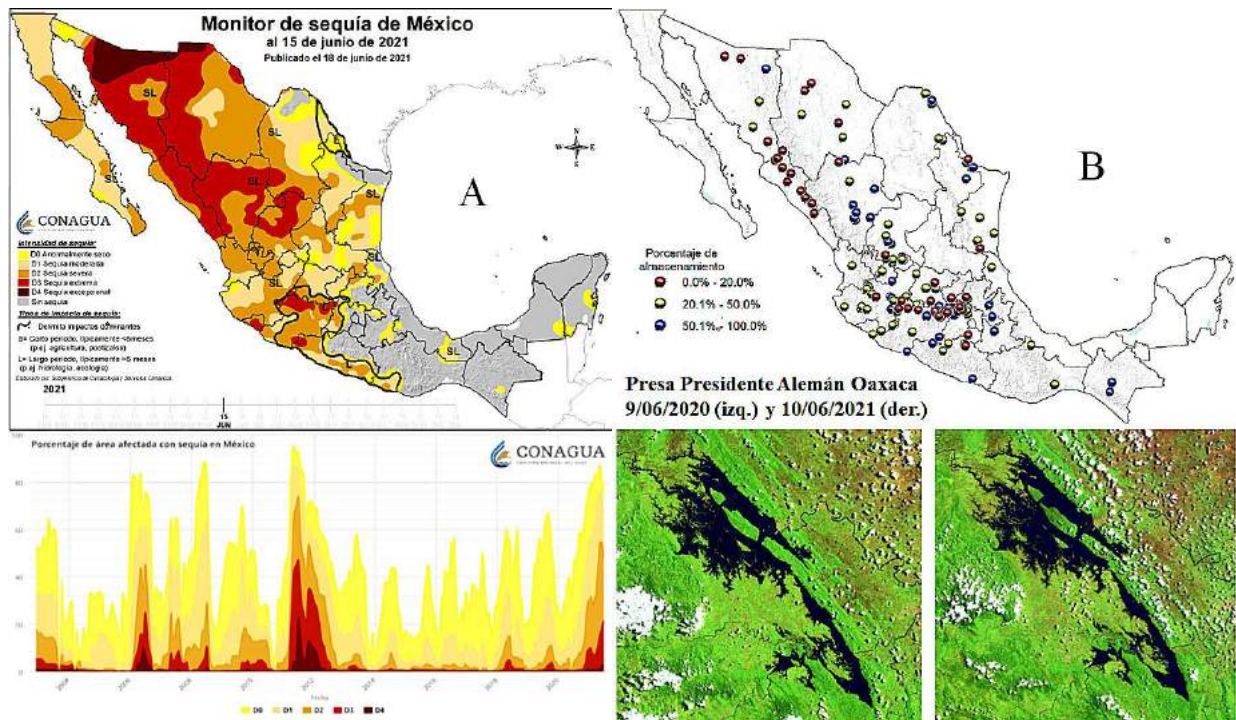


Figura 1a. La sequía en México. Figura 1b. Estado de las presas (adaptadas de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico> y [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/646790/10\\_Jun\\_2021.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/646790/10_Jun_2021.pdf)).

Considerando el concepto de las fronteras planetarias que permiten el actuar seguro de la humanidad, el uso humano del agua dulce (alteración del ciclo del agua), alcanza los 2600 km<sup>3</sup> por año. Esto supone una distancia aún segura a la frontera, propuesta generosamente, de 4000 km<sup>3</sup> anuales. Sin embargo, las fuentes de agua dulce están distribuidas desigualmente, tanto a nivel global como dentro de cada país, siendo también variable su disponibilidad temporal y su extracción para diversos usos (Navarro, 2019). Esto requiere del estudio de estas fronteras a nivel local y regional (Gleeson et al., 2020). El problema del agua no es cosa del futuro, ya está aquí. Resolverlo va más allá de sexenios y se necesita un enfoque que a su vez requiere de una democracia efectiva para su solución. Se necesita un cambio real de mentalidad y ello debe



sustentarse en el conocimiento. Por ello, hay que fortalecer el conocimiento del ciclo del agua a nivel local y regional en todo el sistema de educación. Partiendo de la escasez creciente del agua y de la necesidad de actuar localmente pensando globalmente, el ahorro del agua es imperativo. Un aspecto muy importante en ello es avanzar hacia formas más avanzadas en el riego, o sea su tecnificación. Hay ejemplos contundentes del ahorro del agua utilizando el riego tecnificado, incluso con incrementos de la producción por unidad de área (Navarro et al., 2019).

**El agua residual y su percepción.** La creciente urbanización (ver figura 2) y la preeminencia de un metabolismo urbano lineal, en el que predomina una extracción de materias primas, la demanda de energía para satisfacer las necesidades de la vida urbana, la fabricación de productos para el consumo y su desecho una vez utilizados, contribuye de manera creciente al agotamiento de los recursos naturales, a una alta dependencia de los no renovables y a la contaminación del medio ambiente.

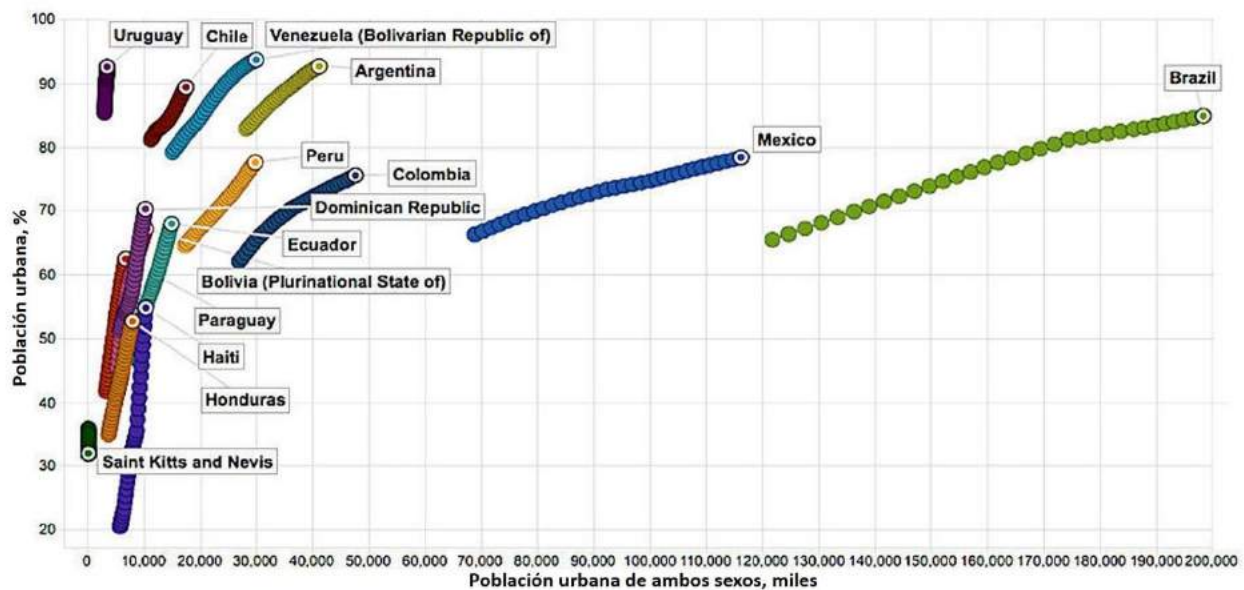


Figura 2. Crecimiento poblacional y urbanización de algunos países latinoamericanos (adaptada de FAO, 2017).

Esto por supuesto tiene que ver con el agua y conlleva, entre otros efectos, un incremento de los residuos sólidos urbanos, formados en una parte considerable por materia orgánica. Considerando el tratamiento inadecuado estos residuos, una parte considerable de esta materia orgánica no se incorpora a los suelos (Zamora y Vázquez, 2018, Mejía 2020). Es evidente que cumplir con el objetivo 6 de desarrollo del milenio de agua limpia y saneamiento implicará un crecimiento del volumen de agua residual que se va a generar, especialmente en los núcleos urbanos. La contaminación del agua superficial y subterránea por el vertido de las grandes ciudades se incrementará, especialmente en los países con menos recursos para tratar el agua residual. Si a esto se le suma la dificultad de abastecer con agua limpia, apta para el consumo, a la población urbana, por el agotamiento y contaminación de las fuentes de abastecimiento, resulta innegable que hay que mirar hacia el agua residual como un recurso y no un residuo. Esto lo han comprendido los agricultores desde hace mucho tiempo: el agua residual de las ciudades, con su alto contenido de nutrientes, es un recurso codiciado por ellos y su uso para el riego agrícola está mucho más

extendido de lo que muchas personas imaginan (ver figura 3). Baste mirar el caso del Valle del Mezquital, en el cual la actividad agrícola se ha sustentado, desde hace más de 100 años en la reutilización del AR de la Ciudad de México (García, 2019).

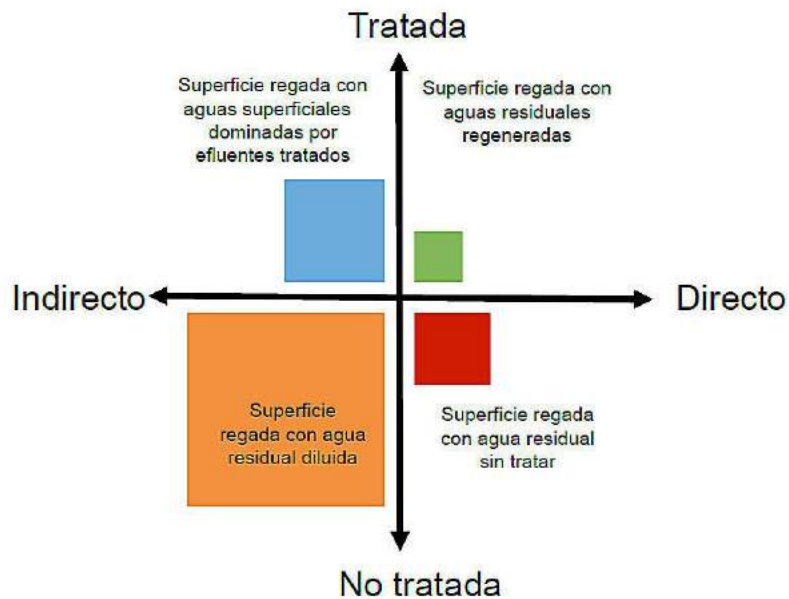


Figura 3. Comparación gráfica de la superficie regada de manera directa e indirecta con agua residual tratada y no tratada (adaptada de FAO, 2017).

En correspondencia con lo anterior, desde 2017 el AR se considera como el recurso desaprovechado. Sin embargo, su reutilización debe ser considerada cuidadosamente pues además de los agentes patógenos provenientes de las excretas de humanos y animales, las AR municipales contienen productos químicos provenientes de que en las corrientes se mezclan descargas industriales (es un hecho conocido, por ejemplo, la descarga de pequeñas industrias de la maquila textil al drenaje urbano sin tratamiento), nutrientes como el nitrógeno y el fósforo cuyo vertido al ambiente puede ser causa de eutrofización y que cada vez más se asemejan a un AR de origen industrial por la presencia de los microcontaminantes orgánicos provenientes del uso de los fármacos, productos del cuidado y aseo personal y otras muchas sustancias de uso cotidiano en los hogares, algunos de ellos disruptores endocrinos y/o con potencial cancerígeno. En México, la legislación vigente no los regula, aspecto del que hay que ocuparse. Muchas de estas sustancias no son removidas con efectividad en las plantas de tratamiento convencionales, lo que explica su presencia seudopersistente en el ambiente, por ejemplo, en los ríos y la necesidad de utilizar sistemas basados en la naturaleza para su remoción, así como valorar la inclusión de procesos más eficientes en las plantas de tratamiento (FAO, 2017; WWAP, 2017; Navarro y Durán, 2019; Navarro, 2020; Ben Mordechay et al., 2021; Jacobo y Santacruz, 2021; Ofori et al., 2021).

**El uso seguro del AR en el riego.** Al resultar indetenible el uso del agua residual en la producción agrícola, hay que adaptarse a ello instrumentando las regulaciones necesarias para que esto sea lo más seguro y transparente posible. Por ello algunas agencias regulatorias internacionales y la academia han publicado indicaciones para el uso seguro del AR en el riego. La esencia de estas debe conducir a establecer barreras, en los diferentes puntos de la cadena de producción,

distribución y consumo de los alimentos (figura 4). Estas barreras son límites para los niveles de contaminantes, medidas para la manipulación del AR, entre otras (EPA, 2004; OMS, 2006; UE, 2007; Hettiarachchi y Ardakanian, 2017; IMTA, MMAA, 2018). Para facilitar su consulta, están disponibles en la página de la Red Temática Gestión de la Calidad y Disponibilidad del agua, <https://www.aguanet.com.mx/>. Para facilitar el uso de las GUIAS del 2006, la OMS elaboró en el 2015 un Manual para elaborar Planes de Seguridad en Saneamiento (OMS, 2016).

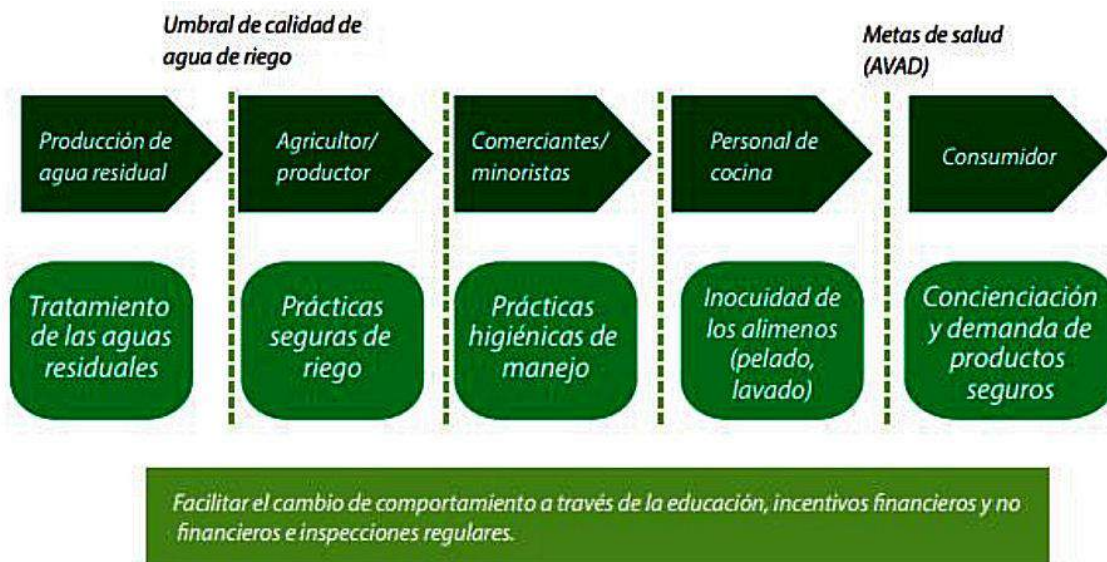


Figura 4. Barreras múltiples (tomada de <https://docplayer.es/75606974-Ingenieria-y-gestion-del-agua-residual-reuso-en-agricultura-y-otros-usos.html>)

En México el valor límite del AR para riego, establecido en la NOM-001-SEMARNAT-1996, para el caso de los parámetros microbiológicos, es de 1,000 y 2,000 como número más probable (NMP) de coliformes fecales por cada 100 ml para el promedio mensual y diario, respectivamente. Para la contaminación por parásitos utiliza como indicador los huevos de helminto. El límite máximo permisible para las descargas vertidas a suelo (uso en riego agrícola), es de un huevo de helminto por litro para riego restringido, y de cinco huevos por litro para riego no restringido. Sería necesario valorar cuidadosamente si se pueden modificar estos límites para un riego más diferenciado con AR, de acuerdo con el tipo de cultivo en que se aplique el mismo. Por ejemplo, la UE permite hasta 10,000 de E. coli, en el uso de AR para regar cultivos destinados a la industria y a la producción de energía y de semillas, por supuesto con un tratamiento secundario y desinfección. Esto permite liberar un volumen considerable de agua con mayor calidad (por ejemplo, de pozo), para los cultivos que sí necesitan de la misma. Lo que sí está claro es que los cambios no se lograrán sin inversión en infraestructura y en la gestión del AR (Saliba et al., 2018; UE, 2020). Al mismo tiempo, se debe propiciar la introducción de los resultados de la ciencia, la tecnología, las humanidades y la innovación en lo referente al uso y reutilización del agua, fortaleciendo una verdadera economía circular en ello. Eso debe considerar fortalecer las instancias regionales y locales de CTHI y la validez de la introducción de resultados en este nivel en el currículo de los que se dedican a ello. Es necesario fortalecer la publicación de resultados en nuestras lenguas, el español y las de los pueblos originarios sin menoscabo por supuesto de la publicación en medios de alto impacto.

### **Algunas conclusiones.**

El crecimiento demográfico y la urbanización conducen al incremento de la producción de aguas residuales municipales; La presencia de los microcontaminantes orgánicos en el AR complica su tratamiento convencional, representa un riesgo adicional para la salud humana y de los ecosistemas y además no está debidamente regulado en la legislación mexicana; Es necesario incrementar el uso de sistemas de tratamiento basados en la naturaleza para disminuir los riesgos de reutilizar el AR y valorar la inclusión de procesos de tratamiento más avanzados en las plantas de tratamiento; Resulta insuficiente el conocimiento de los productores y consumidores sobre los riesgos de utilizar indiscriminadamente el agua residual para el riego y de las medidas que hay que tomar para su uso diferenciado; La necesidad de utilizar volúmenes significativos de agua residual para el riego requiere de la revisión de lo regulado; Es necesario fortalecer mediante el diálogo de saberes la introducción de los resultados de la ciencia, la tecnología, las humanidades y la innovación en el riego.

### **Referencias bibliográficas.**

- Ben Mordechay E., Mordehay V., Tarchitzky J., Chefetz B., (2021). Pharmaceuticals in edible crops irrigated with reclaimed wastewater: Evidence from a large survey in Israel, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 416, 126184. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126184>.
- EPA, (2004). Camp Dresser & McKee, Inc. GUIDELINES FOR WATER REUSE. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/625/R-04/108 (NTIS PB2005 106542), 2004. [https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_record\\_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=129543](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=129543)
- FAO, (2017). Reutilización de aguas para agricultura en América Latina y el Caribe Estado, principios y necesidades. Disponible en: <http://www.fao.org/3/i7748s/i7748s.pdf>
- García Salazar, E.M. (2019). El agua residual como generadora del espacio de la actividad agrícola en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, 29(54), e19741. <https://doi.org/10.24836/es.v29i54.741>.
- Gleeson T., Wang-Erlandsson L., Zipper S.C., et al. (2020). The Water Planetary Boundary: Interrogation and Revision, *One Earth*, Volume 2, Issue 3, pp 223-234, <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.009>.
- Hettiarachchi, H. & Ardakanian, R., eds. 2017. *Uso Seguro de Aguas Residuales en la Agricultura: Ejemplos de buenas Prácticas*. Dresden: UNU-FLORES. Disponible en: [https://collections.unu.edu/eserv/UNU:5957/SafeUseOfWastewaterInAgriculture\\_ESP.pdf](https://collections.unu.edu/eserv/UNU:5957/SafeUseOfWastewaterInAgriculture_ESP.pdf)
- IMTA, MMAA, (2018). *Guía Técnica Para El Reúso De Aguas Residuales En La Agricultura*. Editor: Proyecto de Cooperación Triangular México Bolivia y Alemania. ISBN: 4-1-550-18 P.O. Autores: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y el Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/429934/guia\\_reuso\\_aguas\\_residuales.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/429934/guia_reuso_aguas_residuales.pdf)
- Jacobo Marín, D., & Santacruz de León, G. (2021). Contaminantes emergentes en el agua: Regulación en México, principio precautorio y perspectiva comparada. *Revista de Derecho Ambiental*, 15, pp. 51-75. doi:10.5354/0719-4633.2021.57414
- Mejía Rodríguez J.A. (2020). El paradigma del metabolismo urbano desde la perspectiva de los sistemas complejos hacia la sustentabilidad. *Expresión Económica*, núm. 45, 2020. Universidad de Guadalajara. Cucea, pp 101-112. <http://expresioneconomica.cucea.udg.mx/index.php/eera/article/view/1027/954>
- Navarro Frometa A.E., Herrera-López H., Castro Bravo C., (2019). Irrigation Water Challenges: A Study Case in the State of Puebla, Mexico. In: *Water Availability and Management in Mexico*. Editors: Elena María Otazo-Sánchez, Amado Enrique Navarro-Frómata, Vijay P. Singh. Springer Nature, Switzerland, AG 2020. Pages 249-265.
- Navarro Frómata A.E, Durán-Domínguez M. del C., (2019). El tratamiento descentralizado del agua residual de pequeñas localidades rurales y suburbanas: los humedales construidos, una tecnología a considerar. *Rev. Cubana Quím.* Vol. 31 (Supl. 1), pp. 87-104, e-ISSN: 2224-5421. <http://scielo.sld.cu/pdf/ind/v31s1/2224-5421-ind-31-s1-87.pdf>
- Navarro Frómata A.E., (2019). Apuntes de una reflexión sobre el agua, su gestión y su gobernanza. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias* 10(24), pp. 1 – 21. <https://rlac.buap.mx/?q=content/volumen-10-n%C3%BAmero-25-noviembre-2019-0>.



Navarro Frómata A.E., Navarrete Rosas D., (2020). Addressing Stressors to Riverine Waters Quality: The Case of the Nexapa River. In: *Water Availability and Management in Mexico*. Editors: Elena María Otazo-Sánchez, Amado Enrique Navarro-Frómata, Vijay P. Singh. Springer Nature, Switzerland, AG 2020. Pages 127-149.

Ofori, S., Puškáčová, A., Růžičková, I., & Wanner, J. (2021). Treated wastewater reuse for irrigation: Pros and cons. *Science of The Total Environment*, 760, 144026. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.144026

OMS, (2006). World Health Organization. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater in agriculture and aquaculture. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/78265>

Saliba, R., Callieris, R., D'Agostino, D., Roma, R., & Scardigno, A. (2018). *Stakeholders' attitude towards the reuse of treated wastewater for irrigation in Mediterranean agriculture*. *Agricultural Water Management*, 204, 60–68. doi:10.1016/j.agwat.2018.03.036

OMS, (2016). Organización Mundial de la Salud. Planificación de la seguridad del saneamiento: manual para el uso y la disposición seguros de aguas residuales, aguas grises y excretas. Organización Mundial de la Salud. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/250331>.

UE, 2007. Mediterranean Wastewater Reuse Report. Produced by the MEDITERRANEAN WASTEWATER REUSE WORKING GROUP (MED WWR WG) November 2007. Disponible en: [http://www.emwis.net/topics/WaterReuse/Final\\_report.doc/download/1/Final%20report.1.pdf](http://www.emwis.net/topics/WaterReuse/Final_report.doc/download/1/Final%20report.1.pdf)

UE, 2020. REGLAMENTO (UE) 2020/741 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 25 de mayo de 2020 relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua. Diario oficial de la Unión Europea. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2020/177/L00032-00055.pdf>

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. Disponible en: <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/2017-wastewater-the-untapped-resource/>

Zamora, V.H., Córdova y Vázquez A. (2018). Metabolismo urbano de nutrientes: reúso y compostaje de residuos asociados con la porcicultura en Ciudad Juárez. Chihuahua Hoy, [S.l.], v. 16, pp. 443-466. doi:<http://dx.doi.org/10.20983/chihuahuahoy.2018.16.14>.

## Propuestas.

1. Ampliar la difusión y argumentación del conocimiento sobre los riesgos que implica el uso del agua residual sin ningún tratamiento. Al mismo tiempo sensibilizar a la población rural y urbana de la necesidad de reutilizarlas con seguridad, apoyándose en las prácticas internacionalmente aceptadas, en el conocimiento de las instituciones mexicanas y en el saber de nuestros productores.
2. Es necesario considerar en los contenidos de los diferentes niveles de enseñanza sobre el ciclo del agua la situación local y regional del recurso, incluyendo la valoración actual sobre el agua residual sus riesgos y sus beneficios pues vamos a convivir con ella en lo adelante.
3. Revisar y actualizar lo establecido en el marco regulatorio nacional sobre el uso del agua residual para riego de manera que permita su uso diferenciado.
4. Promover la capacitación y la generalización de buenas prácticas en el uso adecuado del agua residual en el riego entre los productores.
5. Incrementar la capacitación y el apoyo a los agricultores para la tecnificación del riego.
6. Valorar la reconversión de la producción agrícola, en zonas de uso intensivo del AR para el riego, a cultivos que permitan la utilización del agua residual de mayor contaminación.
7. Hay que evaluar la inclusión de los microcontaminantes orgánicos, que tengan efectos de disruptores endocrinos u otros peligros demostrados ya, en el marco regulatorio que norma la presencia de sustancias peligrosas para la salud humana y el ambiente.

# El uso de aguas residuales provenientes de la Ciudad de México en la agricultura del Valle del Mezquital, Hidalgo

<sup>a</sup>Bautista-García D. M., <sup>a</sup>Otazo-Sánchez E. M., <sup>a</sup>Román-Gutiérrez A. D., <sup>b</sup>Pavón-Hernández N. P., <sup>a</sup>Prieto-García F.

<sup>a</sup>Área Académica de Química, <sup>b</sup>Área Académica de Biología, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Ciudad del Conocimiento, carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5 Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México

[ba161818@uaeh.edu.mx](mailto:ba161818@uaeh.edu.mx) [profe\\_4339@uaeh.edu.mx](mailto:profe_4339@uaeh.edu.mx)

## Introducción

El consumo de agua para la producción de alimentos es la mayor forma de uso social del agua, y la agricultura es actualmente el mayor usuario de agua a nivel mundial representando el 70% de la extracción total (Laio, Rulli, & Suweis, 2017). Desde principios de este siglo, la escala del riego agrícola se ha ido expandiendo, el agua agrícola ha ocupado cada vez más el agua del entorno ecológico (Ding, Li, & Huang, 2020). El uso eficiente y sostenible de los recursos hídricos es básico para el bienestar social, desarrollo económico y gestión ambiental (Xinchun et al., 2018).

El seguimiento de las actividades agrícolas proporciona información muy beneficiosa para los diferentes sectores políticos. La intensidad de uso, la productividad y el estado ambiental de las áreas agrícolas son importantes con respecto al medio ambiente y las condiciones globales cambiantes, como el cambio climático y el crecimiento de la población (Holtgrave, Röder, Ackermann, Erasmi, & Kleinschmit, 2020).

La utilización de datos de teledetección espectrales en el monitoreo de la vegetación se basa en el hecho de que la radiación electromagnética en su respectivo rango espectral es sensible a parámetros biofísicos y/o ecofisiológicos específicos de las plantas, como la clorofila y el contenido de agua o la estructura de hojas y plantas (Holtgrave et al., 2020). Los índices de vegetación reflejan las precipitaciones precedentes, las pérdidas por evapotranspiración y determinan el suministro de agua disponible para el crecimiento saludable de las plantas (Lu, Carbone, & Gao, 2019).

## Metodología

**Área de estudio:** El Valle del Mezquital es una de las principales áreas agrícolas de riego del estado de Hidalgo, el agua para riego se obtiene de las descargas de aguas residuales provenientes de la Ciudad de México. En el Valle del Mezquital los cultivos suelen ser regados por gravedad, debido a su clima semiárido/árido las lluvias son escasas.

La principal actividad económica es la agricultura, la cual depende de tres distritos de riego (DR), DR 003 Tula, DR 100 Alfajayucan y DR 112 Ajacuba (figura 1) los tres DR son alimentados de aguas residuales provenientes de la Ciudad de México. Los canales de riego forman una red de casi 2,000 kilómetros y el riego se realiza por inundación. Las parcelas quedan inundadas por varios días hasta que se secan y vuelven a inundarse (Chamizo, 2018).

**Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI):** El NDVI puede reflejar efectivamente el nivel de verdor de la superficie que funciona fisiológicamente y los valores más altos de NDVI representan una mayor capacidad fotosintética del dosel de la vegetación.

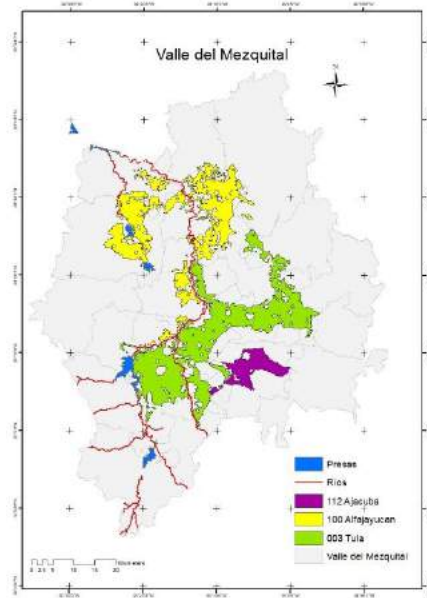


Figura 1. Distritos de riego en el Valle del Mezquital.

Los valores de NDVI de 0 a 1 para cada celda de la cuadrícula para separar los componentes relacionados con el clima de los componentes del ecosistema. Para distinguir los efectos de la sequía de otros factores ambientales (por ejemplo, humedad excesiva, plagas, enfermedades de las plantas), la información climática relacionada de la observación satelital u observación in situ podría integrarse con los datos del NDVI (de la Casa et al., 2018); (Lu et al., 2019); (Ouzemou et al., 2018); (Recuero et al., 2019).

La determinación tradicional de NDVI, que procesa datos de infrarrojo cercano (*nir*) y rojo (*r*), utiliza la fórmula (Rouse et al., 1973):

$$NDVI = \frac{(nir - r)}{(nir + r)}$$

### Resultados y discusión

La tabla 1 muestra los resultados para NDVI del Valle del Mezquital, los valores van de -0.53 y 0.91 en la mayoría de los casos, los valores de NDVI entre 0.2 y 0.4 corresponden a zonas con vegetación escasa; la vegetación moderada tiende a variar entre 0.4 y 0.6; mientras que cualquier valor por encima de 0.6 indica la mayor densidad posible de hojas verdes.

Tabla 1. Valores de NDVI obtenidos para el Valle del Mezquital

Intervalo	Rango	Descripción (Rouse et al., 1973)
1	-0.53 -0.04	
2	-0.04 0.16	Suelo sin vegetación, área urbana
3	0.16 0.22	
4	0.22 0.27	
5	0.27 0.33	Escaza vegetación
6	0.33 0.42	
7	0.42 0.53	
8	0.53 0.67	Vegetación moderada
9	0.67 0.91	Alta densidad de vegetación

En la figura 2 se observan los valores de NDVI para el área de estudio los colores verdes y azules son los índices más bajos, mientras que los colores amarillos a rojos representan la vegetación más vigorosa con índices más altos.

Los cultivos presentan colores amarillos a rojos y se encuentran dentro de la extensión regada por los tres distritos de riego, fuera de esta área se encuentra el suelo desnudo y zonas urbanas. La mayor parte de los cultivos se encuentran en el intervalo 8 y 9 de 0.53 a 0.91.

Se compararon los resultados obtenidos con reportes previos encontrando un NDVI para alfalfa óptimo de 0.83 y para el cultivo en crecimiento de 0.54 (Rossi et al., 2018). En un estudio semanal para el cultivo de alfalfa se reporta un NDVI de 0.85 en su estado óptimo (Shrestha et al., 2017).

La alfalfa es un cultivo forrajero por su alto rendimiento, su larga duración (3-4 años) y su capacidad de rebrote. Suele sembrarse de octubre a febrero. De hecho, los valores NDVI de este cultivo muestran un cambio brusco que se repite a lo largo de su ciclo de crecimiento debido a la alternancia entre cosecha y rebrote (Ouzemou et al., 2018); (Maselli et al., 2020).

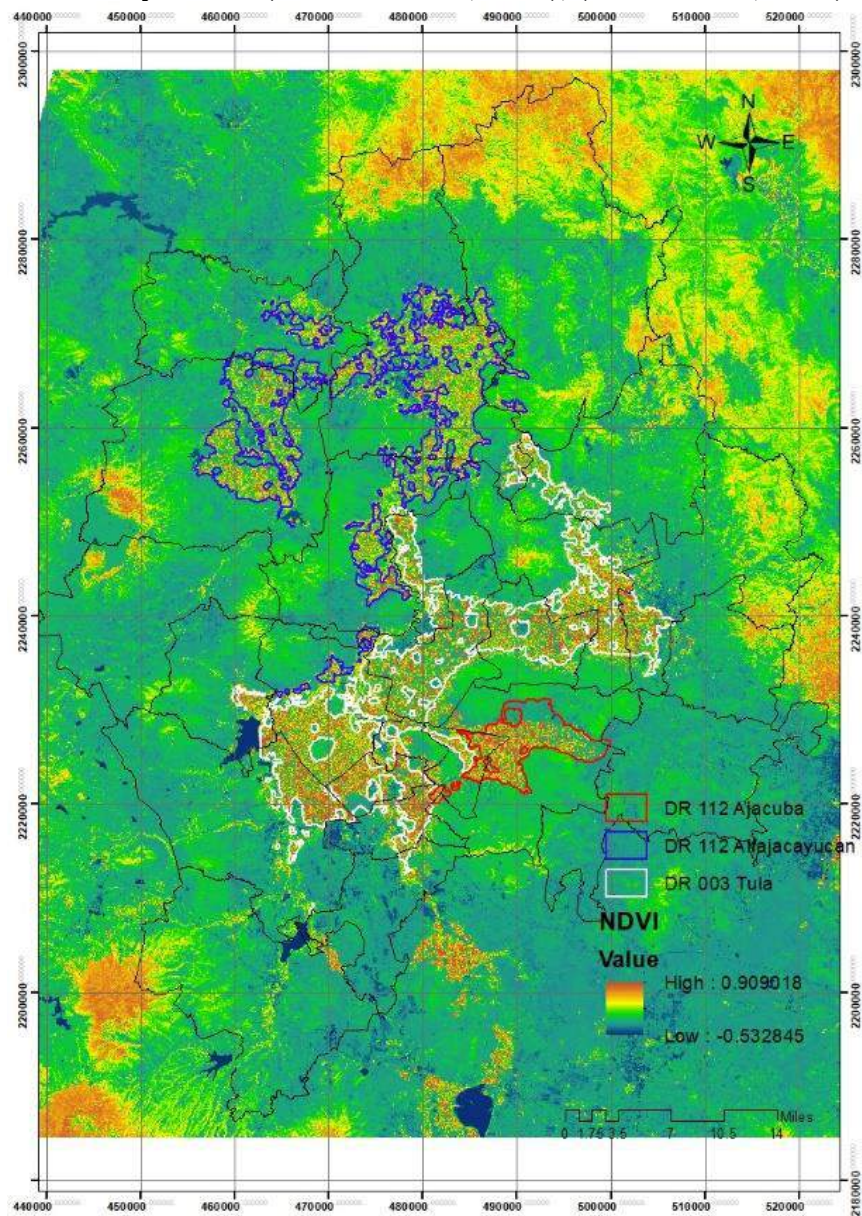


Figura 2. NDVI para el Valle del Mezquital



Los reportes para maíz muestran un NDVI de 0.2 del cultivo emergente, 0.53 para el cultivo en madurez y 0.88 para su cosecha reporta 0.76 para el mismo cultivo. Los reportes para maíz van de -0.09 a 0.8 (Ahmad, Singh, Fahad, & Waqas, 2020; Long et al., 2018; Nagy, Fehér, & Tamás, 2018).

El cálculo de NDVI muestra que dentro los distritos de riego en zonas cercanas los cultivos se presentan del intervalo 5 a 9. El modelo nos permite asumir que los valores mayores a 0.6 corresponden a la alfalfa forrajera.

Diversas referencias mencionan que para la identificación de los cultivos se debe hacer un seguimiento anual cada tres meses mediante teledetección aplicando el NDVI o anual por al menos tres años (Ahmad et al., 2020; de la Casa et al., 2018; Holtgrave et al., 2020; Karthikeyan, Chawla, & Mishra, 2020; Lu et al., 2019; Maselli et al., 2020; Nagy et al., 2018; Shammi & Meng, 2021; Shrestha et al., 2017).

## Conclusión

El NDVI es el índice de vegetación mayormente utilizado en agricultura, con este índice se identificaron reportes de los cultivos que se encuentran en el área de estudio. Además, el NDVI es el índice que se utiliza para estudios de riego con indicadores de agua a través de sensores remotos. El NDVI es un índice que puede ser calculado sin necesidad de hacer muestreos en campo, lo que le da una ventaja, además, de que se puede aplicar para un análisis histórico mientras las fechas requeridas estén disponibles por el satélite.

El NDVI mostró una cobertura vegetal sana en el Valle del Mezquital con valores óptimos para la alfalfa y maíz comparados con reportes locales. Lo que indica que a pesar de ser cultivos regados con aguas residuales, la calidad del agua no afecta el crecimiento y rendimiento de los cultivos. Se espera que con la evaluación de índices de agua y los presentes resultados se obtenga el Nexa Agua-Alimento del Valle del Mezquital.

## Referencias

- Ahmad, I., Singh, A., Fahad, M., & Waqas, M. M. (2020). Remote sensing-based framework to predict and assess the interannual variability of maize yields in Pakistan using Landsat imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 178, 105732. doi: 10.1016/j.compag.2020.105732
- de la Casa, A., Ovando, G., Bressanini, L., Martínez, J., Díaz, G., & Miranda, C. (2018). Soybean crop coverage estimation from NDVI images with different spatial resolution to evaluate yield variability in a plot. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 146, 531-547. doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.10.018>
- Ding, Y., Li, Y., & Huang, G. (2020). *The Water Footprint of Uzbekistan's Agricultural Products: 1980-2010*. Paper presented at the 2019 4th International Conference on Environmental Engineering and Sustainable Development, CEESD 2019.
- Holtgrave, A. K., Röder, N., Ackermann, A., Erasmi, S., & Kleinschmit, B. (2020). Comparing Sentinel-1 and -2 data and indices for agricultural land use monitoring. *Remote Sensing*, 12(18). doi: 10.3390/RS12182919
- Karthikeyan, L., Chawla, I., & Mishra, A. K. (2020). A review of remote sensing applications in agriculture for food security: Crop growth and yield, irrigation, and crop losses. *Journal of Hydrology*, 586, 124905. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124905
- Laio, F., Rulli, M. C., & Suweis, S. (2017). The challenge of understanding the water-food nexus complexity. *Advances in Water Resources*, 110, 406-407. doi: 10.1016/j.advwatres.2017.12.001
- Long, Y., Sun, H., Liu, H., Li, M., Han, M., & Yang, W. (2018). Spectral Sensor Calibration for Maize Detection under Different Conditions. *IFAC-PapersOnLine*, 51(17), 619-625.
- Lu, J., Carbone, G. J., & Gao, P. (2019). Mapping the agricultural drought based on the long-term AVHRR NDVI and North American Regional Reanalysis (NARR) in the United States, 1981–2013. *Applied Geography*, 104, 10-20. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.01.005>



- Maselli, F., Chiesi, M., Angeli, L., Fibbi, L., Rapi, B., Romani, M., . . . Battista, P. (2020). An improved NDVI-based method to predict actual evapotranspiration of irrigated grasses and crops. *Agricultural Water Management*, 233, 106077. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106077
- Nagy, A., Fehér, J., & Tamás, J. (2018). Wheat and maize yield forecasting for the Tisza river catchment using MODIS NDVI time series and reported crop statistics. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151, 41-49. doi: 10.1016/j.compag.2018.05.035
- Ouzemou, J.-E., El Harti, A., Lhissou, R., El Moujahid, A., Bouch, N., El Ouazzani, R., . . . El Ghmari, A. (2018). Crop type mapping from pansharpened Landsat 8 NDVI data: A case of a highly fragmented and intensive agricultural system. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 11, 94-103. doi: 10.1016/j.rsase.2018.05.002
- Recuero, L., Wiese, K., Huesca, M., Cicuéndez, V., Litago, J., Tarquis, A. M., & Palacios-Orueta, A. (2019). Following temporal patterns assessment in rainfed agricultural areas based on NDVI time series autocorrelation values. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 82, 101890. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.05.023>
- Rossi, R., Pollice, A., Bitella, G., Labella, R., Boichichio, R., & Amato, M. (2018). Modelling the non-linear relationship between soil resistivity and alfalfa NDVI: A basis for management zone delineation. *Journal of Applied Geophysics*, 159, 146-156. doi: 10.1016/j.jappgeo.2018.08.008
- Shammi, S. A., & Meng, Q. (2021). Use time series NDVI and EVI to develop dynamic crop growth metrics for yield modeling. *Ecological Indicators*, 121, 107124. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107124
- Shrestha, R., Di, L., Yu, E. G., Kang, L., Shao, Y.-z., & Bai, Y.-q. (2017). Regression model to estimate flood impact on corn yield using MODIS NDVI and USDA cropland data layer. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(2), 398-407. doi: 10.1016/s2095-3119(16)61502-2
- Xinchun, C., Mengyang, W., Rui, S., La, Z., Dan, C., Guangcheng, S., . . . Shuhai, T. (2018). Water footprint assessment for crop production based on field measurements: A case study of irrigated paddy rice in East China. *Sci Total Environ*, 610-611, 84-93. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.011
- AZUD. 30 de junio de 2021. <https://azud.com/>

## *Propuesta de valor*

### **Riego por goteo subterráneo: una medida de adaptación para el uso sostenible de aguas residuales en la agricultura del Valle del Mezquital, Hidalgo**

El uso de percepción remota para el cálculo de índices de vegetación mostró que los cultivos en el Valle del Mezquital muestran un sano desarrollo.

Además del Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) que ayuda a diferenciar la vegetación de otros tipos de cobertura del suelo (artificial) y determinar su estado general. También permite definir y visualizar áreas con vegetación en el mapa, así como detectar cambios anormales en el proceso de crecimiento se calcularon el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) que provee información del estrés hídrico de la vegetación y el Índice de Vegetación Optimizado (EVI) que es un índice de vegetación que optimiza la señal de la vegetación aumentando su sensibilidad en casos de altas densidades de biomasa, mediante la separación de la señal proveniente de la vegetación de la influencia atmosférica.

Sin embargo, estos índices no consideran el uso sostenible del agua, ni que sea proveniente de una fuente residual.

Por lo tanto, se propone una estrategia de riego que reduzca la cantidad de agua destinada para cada cultivo, especialmente para la alfalfa que es un cultivo perenne en el área de estudio.

#### ***Riego por goteo subterráneo***

El riego por goteo subterráneo (RGS) es un método de riego localizado consistente en la aplicación de agua a la zona radicular de cultivo por debajo de la superficie del suelo, utilizando para ello tuberías de microirrigación enterradas a profundidades entre 10 y 50 cm y emisores de bajo caudal desde 0.5 hasta 8 L/ha intervalos de distancia fijos, o bien tuberías goteadoras y tuberías exudantes, de manera que solo se moja una parte del suelo sin llegar a aflorar la humedad a la superficie.

El RGS es el método de riego que permite un mayor ahorro de aguas con respecto al riego por goteo superficial y sobre todo comparado con el riego de superficie y aspersión. Se fundamenta en:

- La reducción total de la evaporación directa.
- La ausencia de escorrentía.
- La reducción de la filtración profunda o percolación.
- El aumento de uniformidad de aplicación.
- La posibilidad de controlar la cantidad de agua aplicada.

#### ***Beneficios del RGS***

Evolución positiva de las propiedades físicas del suelo: estabilidad temporal del contenido de aguas en el bulbo húmedo. Aumento de la porosidad en la zona radicular. Excelente relación entre contenido de agua y la atmósfera del suelo.

Mayor eficiencia de aplicación del agua de riego: reducción del uso de agua y fertilizantes debido a un control más preciso sobre la aplicación de nutrientes, El volumen de agua es aplicado solamente donde se requiere. La ausencia de fugas debido al menor riesgo de daño favorece el ahorro

de agua y el mantenimiento de la uniformidad espacial y temporal de aplicación del agua a nivel parcela.

Incremento de la superficie de regadío: no requiere vías de acceso específicas. La geometría, tamaño y topografía de la parcela no afecta a la uniformidad de aplicación del agua.

Permite el uso de aguas residuales: ausencia de contacto entre la fuente de suministro, con potencial de infección y la parte aérea del cultivo, personal de operación y animales. Ausencia de malos olores provenientes del agua. Aporte extra de nutrientes para el cultivo.

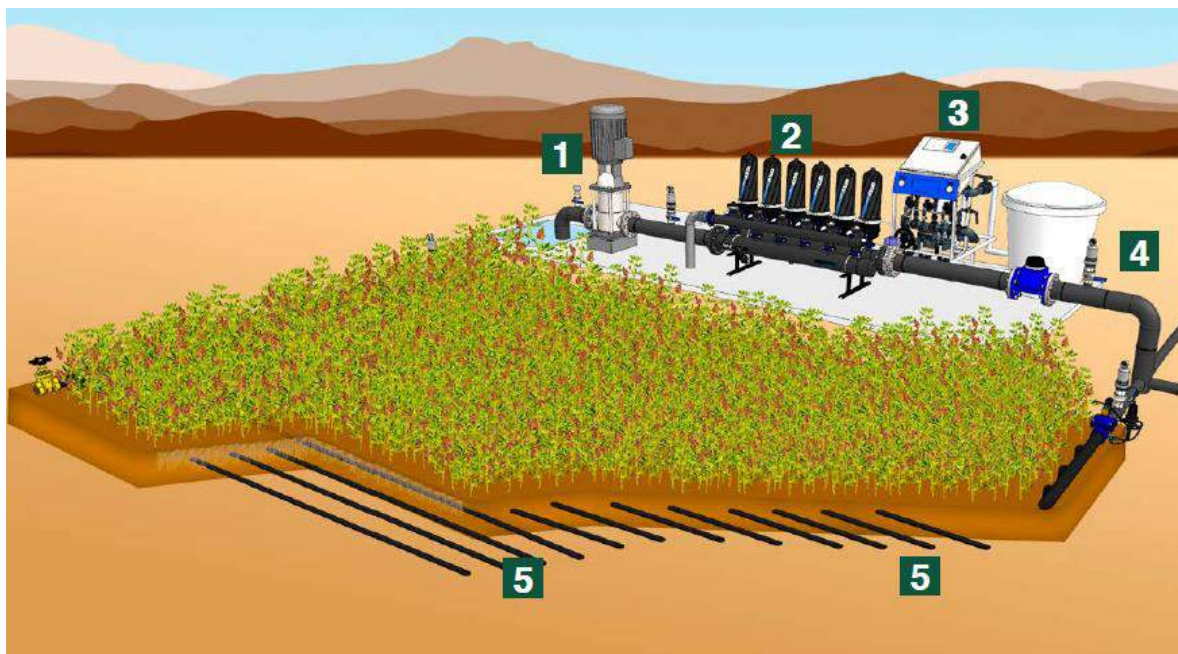
Estabilidad en la localización de los puntos de emisión: se evita que la acción fortuita del personal que realiza las labores de cultivo pueda desplazar la tubería emisora alterando la ubicación de los puntos de emisión.

Disminuye los riesgos de plagas y enfermedades: se reduce drásticamente la propagación de enfermedades que es favorecida por la presencia de agua en la superficie del suelo y el contacto de esta con las partes aéreas de las plantas.

Reducción del gasto energético: baja la presión de operación y eleva la eficiencia de aplicación.

Facilita las labores de cultivo: el personal y los equipos mecánicos pueden desplazarse y trabajar en cualquier dirección. El sistema de riego no está expuesto a los daños mecánicos fortuitos, consecuencia de la realización de las labores propias de cultivo. Posibilidad de realizar cualquier tarea durante y después del riego.

Se evita la radiación solar incidente: mayor vida útil de la tubería al no estar expuesta a la acción degradante de la radiación solar.



Esquema de riego por goteo subterráneo (RGS) (AZUD, 2021)

1. Sistema de bombeo: suministra la presión necesaria a todo el circuito de riego.
2. Sistema de filtración: el dimensionado y calidad de filtros resulta especialmente importante en una instalación de riego por goteo subterráneo.
3. Fertirrigación: aporte de fertilizantes a todos los sectores de riego de forma automatizada.
4. Elementos de control y maniobra: control de flujo, control de presiones y control del consumo de agua.
5. Tubería de microirrigación: emisor específico.

# “Reúso potencial del agua residual agrícola en los Distritos de Riego del noroeste de México”

Leonel E. Amábilis Sosa<sup>a</sup>, Adriana Roé-Sosa<sup>b</sup>, Kimberly Mendivil-García<sup>c</sup>, Cinthia Cedillo-Herrera<sup>c</sup>

<sup>a</sup> CONACYT-Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Culiacán. [leonel.as@culiacan.tenm.mx](mailto:leonel.as@culiacan.tenm.mx)

<sup>b</sup> Universidad Tecnológica de Culiacán. Departamento de Ingeniería Ambiental

<sup>c</sup> Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Culiacán.

## Resumen

En el presente trabajo se describe la aplicación de un humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFSS) a escala piloto para el tratamiento y reúso de las aguas residuales agrícolas (ARA) en el Distrito de Riego 010 (Sinaloa). Las ARA fueron caracterizadas en términos de plaguicidas, demanda química de oxígeno y nutrientes (DQO). Con el análisis de dichas caracterizaciones, el HAFSS fue diseñado y puesto en marcha en las inmediaciones de uno de los drenajes de mayor dimensión de la zona agrícola. El ARA tratada ha sido caracterizada y evaluada durante seis meses. Los resultados sugieren que las ARA pueden ser reutilizadas en la mayoría de los cultivos de la zona. Esto implicaría mayores volúmenes para irrigación, contribuyendo a reducir el estrés hídrico y a garantizar el suministro de alimentos. Además, se tienen resultados, a nivel prototipo, de un sistema fisicoquímico acoplado al HAFSS que permite recuperar nutrientes de la misma ARA tratada.

**Palabras clave:** reúso del agua; agua residual agrícola; recuperación de nutrientes

## Introducción

México ocupa el segundo nivel de mayor estrés hídrico en Latinoamérica. Los estados del noroeste y algunos del centro del país, además, tienen el índice de seguridad del agua más bajo. En particular en Sinaloa, se tienen 1,268,062 hectáreas de superficie sembrada por lo que los requerimientos del agua se hacen más exhaustivos. La preocupante sequía actual ha ocasionado que, hasta las últimas semanas, 50 de las 210 grandes presas distribuidas en el territorio nacional se encuentren por debajo del 20% de su capacidad. En Sinaloa, la situación es más crítica, ya que las 11 presas se encuentran, en promedio, al 10.13% de su capacidad (SIAP, 2021).

Los datos meteorológicos y tendencias del ciclo hidrológico indican que la sequía irá en aumento. Además del agua para consumo humano, el impacto sobre la soberanía alimentaria será muy significativo a corto plazo. Un aspecto importante es que alrededor del 37% del volumen de agua utilizada en irrigación, no es aprovechada por los cultivos ni retenida en el suelo. Así, esta agua es ARA. En Sinaloa, el ARA es transportada hacia los cuerpos de agua por medio de drenes agrícolas. Las ARA se caracterizan por contener plaguicidas y sus subproductos, además de altas cargas de nitrógeno y fósforo. Estas características en conjunto con la ubicación de los drenajes agrícolas y falta de aplicabilidad de la legislación, dificulta que las ARA sean tratadas, impactando directamente los cuerpos de agua.

Los humedales artificiales son sistemas de tratamientos caracterizados por su versatilidad en el tratamiento de diferentes tipos de contaminantes. La interacción de sus componentes bióticos y abióticos le confiere tolerar fluctuaciones tanto de cargas orgánicas como hidráulicas, principalmente los de tipo subsuperficial. Además, la desventaja de requerir amplias extensiones de terreno en comparación con los sistemas mecanizados pierde relevancia en las zonas rurales (Kadleck y Wallace, 2008). Por otra parte, en recientes investigaciones se ha demostrado que los humedales artificiales diseñados y configurados con base en pruebas preliminares, tienen



constantes de degradación más altas que lo indicado en la literatura, lo que reduce considerablemente las áreas requeridas para su implementación (Roé-Sosa y col. 2019).

Si bien la mayoría de los lineamientos para el tratamiento de aguas residuales están enfocados a descargas controladas, en la actualidad es imperante que el agua tratada pueda ser reutilizada para contribuir al estrés hídrico. En regiones agrícolas, el reúso del agua es sumamente conveniente para combatir los problemas de escasez de agua y evolucionar ante escenarios de sequía para garantizar el suministro de alimentos. Para esto, el reúso del ARA para irrigación contribuiría a que el 37% de agua irrigada sea retornada y forme parte de la disponibilidad del agua para los distritos de riego.

En la presente propuesta, se muestran los avances del desarrollo tecnológico de humedales artificiales para el reúso de ARA en los Distritos de Riego de Sinaloa. Actualmente se encuentra en las últimas fases de maduración, ya que el humedal ha sido construido y evaluado *in situ*. Además, dicha propuesta tecnológica ha sido evaluada en factibilidad técnica y económica por lo que es una promisoriosa alternativa para reducir el alto nivel de estrés hídrico de la zona y a garantizar el suministro de alimentos ante los escenarios de sequía.

### **Metodología**

Como parte del convenio de colaboración del Proyecto CONACYT-Problemas Nacionales 5021 y el Distrito de Riego 010 “El Grande” (DR010), se realizó la caracterización fisicoquímica del ARA en los drenajes del R010 en periodos de siembra y cosecha de 2019-2020. Con los resultados se realizaron pruebas de tratabilidad en humedales a escala de laboratorio. Una vez obtenidos los resultados óptimos, se procedió al dimensionamiento y puesta en marcha de un HAFSS a escala piloto en el drenaje principal del DR010. Desde la estabilización del sistema a escala piloto, se tiene información del desempeño en la remoción de plaguicidas, DQO (materia orgánica disuelta) y nutrientes. Para DQO y nutrientes se realizan determinaciones espectrofotométricas, descritas en APHA (2017). Para plaguicidas se utilizó un cromatógrafo de gases Agilent 7890 con un detector de flama para plaguicidas organofosforados (POF) y uno de captura de electrones para plaguicidas organoclorados (POC) (USEPA, 2014).

En cuanto a las dimensiones del sistema de tratamiento, se tiene 9 m de largo, 3 m de ancho y 0.7 m de profundidad. Grava típica de la zona que exhibe una porosidad del 42% y un caudal de 2.5 L/h. En la Figura 1b se aprecia el humedal a escala piloto ya configurado.

### **Resultados y discusión**

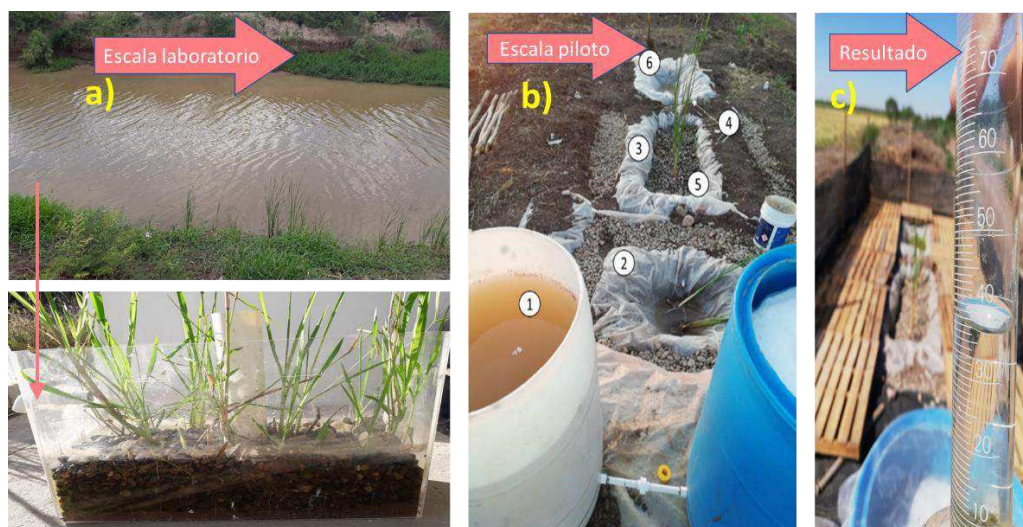
En la Tabla 1 se observan los resultados de la caracterización del ARA de la zona de estudio y los niveles de su tratamiento alcanzados con el HAFSS a escala piloto. A pesar de que la mayoría de los (POC) fueron prohibidos hace décadas, aún se encuentran remanentes en el suelo y subsuelo de las áreas agrícolas. La continua escorrentía ocasiona que sean transportados continuamente hacia los cuerpos de agua. El valor promedio de 0.19 se refiere a la suma de nueve POC caracterizados, cuyos niveles de cumplimiento varían entre (0.001-0.056). Por su parte, la suma promedio de POF fue de 0.07 µg/L. De éstos, solo fueron cuantificados el diazinón y el clorpirifos cuyos niveles de cumplimiento son de 0.04-0.17 respectivamente). A pesar de que en la actualidad se aplican alrededor de 1.8 kg/ha de POF, estos tienen tiempos de vida media de días o máximo algunas semanas (Cedillo -Herrera y col., 2020), lo cual explica por qué solo fueron cuantificados dos POF.

En cuanto a la materia orgánica disuelta, los valores de DQO en el ARA exceden por más del triple del límite máximo permisible para descarga. Por su parte, los nutrientes se encuentran cercanos a su respectivo límite máximo, pero por debajo de este. En contraste, los valores de

toxicidad son cercanos al límite máximo permisible, pero por arriba de este. Esta toxicidad puede estar relacionada con los valores ligeramente básicos de pH en conjunto con el contenido de plaguicidas. Bajas concentraciones de plaguicidas confieren características tóxicas al medio acuoso, aunado a sus subproductos que continúan siendo tóxicos (Roé-Sosa y col., 2019).

La Tabla 1 también muestra que el ARA tratada por el HAFSS cumple con los criterios establecidos por instancias nacionales e internacionales (para el caso de plaguicidas). Los mínimos valores de plaguicidas y nula toxicidad, indican que es segura para su descarga en cuerpos receptores. Además, los valores de nutrientes sugieren la conveniencia de descargar esta agua en suelos destinados para cultivos agrícolas. No se representa ningún riesgo ambiental ni de salud pública, además de aportar nutrientes al suelo.

Cabe mencionar que en paralelo al presente proyecto, se tiene un prototipo a escala de laboratorio configurado para la conversión de los nutrientes a sus formas iónicas oxidadas (nitratos y fosfatos). Esto permitiría que, durante el reúso del agua, se contaría con la presencia de fertilizantes para el aprovechamiento integral del ARA.



**Figura 1.** Etapas metodológicas de la propuesta. a) pruebas de tratabilidad del agua residual agrícola a escala de laboratorio, b) implementación del humedal a escala piloto (1.-tanque de homogeneización, 2. Pretratamiento, 3-5. Componentes del tratamiento biológico, 6.- Laguna de pulimento). C) agua tratada

**Tabla 1.** Caracterización fisicoquímica del agua residual agrícola del Distrito de Riego 010. Los valores criterio son los límites máximos estipulados para plaguicidas en USEPA (2016) y los demás parámetros por el PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017.

Parámetro	Unidades	ARA sin tratar	ARA tratada	Valor criterio
Plaguicidas organoclorados*	µg/L	0.19±0.01	0.08±0.01	0.001-0.056
Plaguicidas organofosforados**	µg/L	0.07±0.03	0.02±0.004	0.04-0.17
DQO	mg/L	505±120	110±23	150
Nitrógeno total	mg/L	22±8.4	18±2.7	25
Fósforo total	mg/L	13±5.6	12±1.3	15
Toxicidad	UT	6±1	0	5
pH		8.4±0.3	7.3±0.2	6.5-8.5

\*BHC + Fipronil + Clorfenapril + Dieldrín + Edosulfán (alfa, beta y sulfato) + Lindano

\*\* Diazinón + Clorpirifos

## Conclusiones

Las características fisicoquímicas de las ARA tratadas del DR 010 sugieren que pueden ser reutilizadas en la mayoría de los cultivos de la zona. Esto implicaría mayores volúmenes para irrigación (millones de metros cúbicos al año), contribuyendo a reducir el estrés hídrico y a garantizar el suministro de alimentos. Los procedimientos científicos realizados pueden ser replicados en otros distritos de riego, para establecer los diseños de humedales artificiales más apropiados según las características contaminantes particulares.

Es necesaria la transferencia de la tecnología hacia los agricultores de los Distritos de Riego. Para ello, los tres órdenes de gobierno deben realizar las gestiones correspondientes.

De manera paralela, se tiene el prototipo de un aditamento para los humedales artificiales capaz de convertir el nitrógeno y el fósforo del ARA a las formas más asimilables para los cultivos. Todos los estudios aquí mencionados cuentan con respaldo académico incluyendo publicaciones internacionales de prestigio. Se reitera la invitación a las instancias gubernamentales y otros sectores de la sociedad a hacer uso de los desarrollos académicos-científicos para enfrentar la sequía, estrés hídrico y soberanía alimentaria.

## Referencias bibliográficas

APHA, 2017. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Water Association, Water Environment Federation. 724 p.

Cedillo-Herrera, C. I., Roé-Sosa, A., Pat-Espadas, A. M., Ramírez, K., Rochín-Medina, J., y Amabilis-Sosa, L. E. (2020). Efficient malathion removal in constructed wetlands coupled to UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> pretreatment. *Applied Sciences*, 10(15), 5306. Doi: <https://doi.org/10.3390/app10155306>

Kadlec, R. H. & Wallace, S., 2008. Treatment wetlands. Segunda ed. Boca Ratón: CRC press.

U.S. EPA, 2014. Method 8270E (SW-846): Semivolatile Organic Compounds by Gas Chromatography/ Mass Spectrometry (GC/MS), Washington, DC.: s.n.

Roé-Sosa, A., Rangel-Peraza, J. G., Rodríguez-Mata, A. E., Pat-Espadas, A., Bustos-Terrones, Y., Diaz-Peña, I. y Amabilis-Sosa, L. E. (2019). Emulating natural wetlands oxygen conditions for the removal of N and P in agricultural wastewaters. *Journal of environmental management*, 236, 351-357. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.114>

SIAP, 2021. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. En línea. Disponible en: <https://www.gob.mx/siap/prensa/reporte-decenal-sobre-almacenamiento-en-presas-de-uso-agricola?idiom=es>

## Propuesta de valor

En el presente documento fueron presentados los resultados de un desarrollo tecnológico ya aplicado a escala piloto. Esta tecnología se basa en humedales artificiales diseñados y construidos con base en una serie de etapas científicas y experimentales previas. La principal función del humedal artificial es tratar una pequeña fracción (60 L/d) el agua residual agrícola del Distrito de Riego 010 de Sinaloa. Actualmente lleva seis meses estabilizado. En este tiempo se ha caracterizado el agua del drenaje agrícola antes y después de su ingreso al humedal. Los resultados son prometedores, porque se cumple con las normativas nacionales e internacionales para el riego agrícola. Cabe mencionar que esta tecnología se encuentra en una fase de maduración avanzada ya que está funcionando en un ambiente real. Además, por CONACYT, ya se cuenta con los estudios de ingeniería básica que incluye un análisis de costos. **Se propone** que el humedal con el que se cuenta actualmente sea llevado a gran escala para tratar la mayoría del caudal del DR 010 y poder reutilizar el agua tratada. Esta propuesta va dirigida a las autoridades de CONAGUA, SAGARPA,

cámara de diputados y cualquiera correspondiente, para que gestionen la licitación de implementar estos sistemas. En efecto, pueden ser vistos como tecnologías de recuperación del agua de riego. Una vez realizado esto, el procedimiento puede ser replicado en otros distritos de riego.

Con base en lo anterior, **también se propone** vincular al sector académico-tecnológico con las asociaciones de agricultores y a las instancias que pudieran gestionar la obra civil para la ejecución del proyecto. Como se ha mencionado, primero en el Distrito de Riego 010 en el que ya se tiene mucho trabajo realizado y posteriormente con los restantes. Los autores de la presente propuesta y los otros miembros de la Red como la Dra. Durán Domínguez, el Dr. Navarro Frómata y la Dra. Salinas Juárez pueden colaborar para el diseño y dimensionamiento de los sistemas de humedales según las características del agua residual de cada distrito de riego, además de cualquier capacitación y asesoramiento técnico en cualquiera de las etapas del proyecto.

# Propuesta para el diseño de una política pública que garantice el aprovechamiento integral del agua tratada a través de la segregación previa de efluentes residuales en la Región Hidrológica XIII

José Manuel Barrera-Andrade<sup>1</sup>, Enrique Rodolfo Bazúa-Rueda<sup>2</sup>, Marisela Bernal-González<sup>2</sup>, Alejandro Bustamante-García<sup>2</sup>, María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa<sup>2</sup>, Rolando Salvador García-Gómez<sup>2</sup>, Víctor Manuel Menéndez-Flores<sup>2</sup>, Amado Enrique Navarro-Frómata<sup>3</sup>, Landy Irene Ramírez-Burgos<sup>2</sup>, Salvador Alejandro Sánchez-Tovar<sup>2</sup>, Julio Alberto Solís-Fuentes<sup>4</sup>

\*Autora para correspondencia: mcduran@quimica.unam.mx

<sup>1</sup>Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, Ciudad de México, México (IPN-ESIQIE), <sup>2</sup>Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química, Laboratorios de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental. Ciudad de México, México (UNAM-FQ-DIQ-LIQAYQA), <sup>3</sup>Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros, Puebla, México (UTIM), <sup>4</sup>Universidad Veracruzana, Instituto de Ciencias Básicas, Xalapa de Enríquez, Veracruz, México (ICB-UV)

**Resumen.** La Región Hidrológico-Administrativa XIII incluye la Ciudad de México (CDMX) y los estados de México, Hidalgo y Tlaxcala, registrando 358 plantas de tratamiento de aguas residuales o PTAR [43% primario, 43% secundario, 10% terciario] (Conagua, 2018). En la CDMX se recolectan 52 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales-pluviales. Entre 23 hasta 35 m<sup>3</sup>/s (incorporando aguas pluviales) son enviados a la PTAR-Atotonilco donde hay pretratamiento físico, tratamiento con lodos activados, filtración-desinfección. Para la temporada de lluvias utiliza un tratamiento fisicoquímico. El agua tratada se envía a los distritos de riego de Hidalgo y los lodos de purga se estabilizan en digestores para producir metano y, con él, electricidad. Las preguntas de investigación abordadas son: ¿Esta obra mejorará las condiciones de salubridad de los hidalguenses y producirá cosechas de mayor valor agregado, minimizando los riesgos para la salud? ¿Qué papel debe jugarse desde la investigación y concientización de los sectores productivos, social, de servicios y gubernamental?

**Palabras clave.** Uso eficiente del agua, Región Hidrológico-Administrativa XIII México, plantas de tratamiento de aguas residuales o PTAR, sectores productivos, social, de servicios y gubernamental

## Introducción

El modelo de desarrollo regional y urbano del Valle de México responde a múltiples factores de orden económico, social, político y donde el agua, en su disponibilidad, manejo y gestión, ha tenido un papel de enorme relevancia. El presente trabajo hace una descripción diagnóstica y menciona diferentes elementos a considerar en el abordaje, desde una visión integral, de la problemática del agua y la conformación de una política pública de Sustentabilidad Hídrica de la Región Hidrológico-Administrativa XIII.

**Consideraciones humanas<sup>1</sup>.** La población continúa aumentando en forma exponencial. Estos habitantes han ido “robando” en esta zona tierra a los lagos (ahora al de Chalco-Xochimilco), tirando basura y desechos, contaminando las fuentes superficiales de agua de la antigua cuenca lacustre endorreica. La gente de bajos recursos tiende a irse a las áreas naturales protegidas, contaminando no solamente las fuentes de agua de lluvia, sino también las fuentes de agua subterránea ya que las descargas de las fosas sépticas o los drenajes vertidos directamente se van al subsuelo sin tratamiento. Los antiguos ríos y manantiales de la cuenca de México ya no existen como tales, sino que se han usado como sistemas de drenaje entubándolos. Los antiguos habitantes encuentran, que la venta de sus ejidos y propiedades comunales, representan un buen

<sup>1</sup> Tomado de Cambios globales en la Cuenca de México. Disponibilidad de agua y características geosféricas y su influencia en la calidad del aire. María del Carmen DURÁN-DOMÍNGUEZ-de-BAZÚA (Coordinadora Global). *Aquaforum*. 48(Enero-Marzo):19-25 (2008) y de Historical Changes in Mexico City's Basin: Water Availability and Geospheric Characteristics / Cambios históricos en la Cuenca de México: Disponibilidad de agua y características geofísicas. DURÁN-de-BAZÚA Carmen, DURÁN-MORENO Alfonso, RAMÍREZ-ZAMORA Rosa María. NEWSLETTER/BOLETÍN (Integrated Program on Urban, Regional, and Global Air Pollution / Programa Integral sobre Contaminación del Aire Urbana, Regional y Global). Molina Center for Energy and the Environment. 4(Fall/Otoño):7-9 (2003). [http://www.mce2.org/newsletter/nwstr\\_4/newsletter4.pdf](http://www.mce2.org/newsletter/nwstr_4/newsletter4.pdf)



## **Propuesta para el diseño de una política pública que garantice el aprovechamiento integral del agua tratada a través de la segregación previa de efluentes residuales en la Región Hidrológica XIII**

---

ingreso en comparación a los cultivos tradicionales. El resultado neto de este crecimiento anárquico es la contaminación de los acuíferos y de los tristes restos de lagos y ríos, el envío de basura a los lechos secos de los ríos, cañadas y barrancas, la reducción de las zonas boscosas, etc. Como consecuencia, las autoridades yendo en contra de la Naturaleza, iniciaron obras civiles para traer agua de las áreas fuera del “collar” montañoso del ahora Valle de México, como el sistema Cutzamala y el desvío del río Lerma. El otro problema, asociado con el bombeo de agua del subsuelo, que es la primera fuente de agua potable, está trayendo graves consecuencias: El agua del subsuelo está siendo contaminada por los asentamientos irregulares de las zonas montañosas, ya que estas familias pobres no tienen sistemas de drenaje ni han aprendido a mantener limpios los manantiales ni el agua de lluvia que se acumula en cauces secos y barrancas, sino que por el contrario, los usan de drenajes y para tirar su basura sólida. Otro problema y el más importante es la pérdida del equilibrio químico de las arcillas que el agua de la lluvia mantuvo húmedas por milenios. A través de la extracción desmedida de agua del subsuelo estas arcillas, que forman la base de los sistemas acuáticos subterráneos, provocan cambios químicos en sus estructuras, conocidos como fracturas. Como resultado, estas arcillas fracturadas pierden su capacidad de retención de agua. Naturalmente, los edificios construidos arriba de ellas se están hundiendo (un promedio de 6 cm por año)<sup>2</sup> y las calles y las avenidas se están agrietando también. Desafortunadamente, estos efectos se están presentando en toda la ciudad y los estados circunvecinos y no solamente donde se extrae el agua por bombeo. Adicional a este problema de hundimiento y agrietamiento está el hecho de que la CDMX y los estados de México, Hidalgo y Tlaxcala están en una zona telúrica y las arcillas húmedas podían y, de hecho, amortiguaban los movimientos de tierra dándoles un efecto oscilatorio. Ahora, estas arcillas fracturadas hacen que los movimientos sean trepidatorios y con un potencial destructivo mayor. Hay algunos estudios para promover la depuración de las aguas residuales y su reinyección al subsuelo para minimizar este enorme problema, pero nuevamente, es un esfuerzo paliativo que no viene acompañado de un programa estructural para restaurar la antigua cuenca, ya que la fracturación de las arcillas es irreversible y no se sabe cuáles siguen intactas.

**Posibles soluciones.** Dentro de las posibles soluciones para usar el agua de manera efectiva están las siguientes: a) Reducción del uso del agua y recuperación del agua de lluvia y separación de aguas residuales de tipo sanitario “grises” y “negras”, b) Instalación de PTAR que consideran el beneficio colectivo, c) Separación de aguas residuales industriales y drenajes municipales y tratamiento *in situ*, d) Políticas de reducción del bombeo de agua fuera del “valle” (cuenca) y cambio de mentalidad rescatando los ríos de la CDMX y otras ciudades de la Región Hidrológico-Administrativa XIII. A continuación, se dan algunos comentarios y ejemplos de cada uno de ellos y con esto se busca dar respuesta a las preguntas de investigación establecidas y dar la **PROPUESTA DE VALOR** de esta contribución.

**a) Reducción del uso del agua y recuperación del agua de lluvia y separación de aguas residuales de tipo sanitario “grises” y “negras”.** Los problemas de uso del agua vienen del hecho de que una cantidad significativa del agua potable se pierde debido a las rupturas de las tuberías y, además, a que se mezclan en el subsuelo el agua de los mantos freáticos con las aguas negras por rupturas de esta red también debido a los movimientos trepidatorios diarios. La primera y más importante solución es la de mantener los sistemas de tubería **visibles y no**

---

<sup>2</sup> Lesser, J.M., Cortés, M.A. El hundimiento del terreno en la Ciudad de México y sus implicaciones en el sistema de drenajes. Ingeniería Hidráulica en México. Vol. XIII (3): 13-18 (1998)

## **Propuesta para el diseño de una política pública que garantice el aprovechamiento integral del agua tratada a través de la segregación previa de efluentes residuales en la Región Hidrológica XIII**

---

**enterrados.** Esto significa que, cada vez que una tubería se rompa, en vez de estar “abriendo” las calles, reparándolas y “cerrando” las calles otra vez, las nuevas tuberías hechas de materiales durables como el acero de alta calidad puedan colocarse en soportes aladaños a las aceras pintadas de verde según la normativa (TAP), para evitar que vehículos pesados o movimientos telúricos las dañen. Basta solamente visitar una refinería para ver que son funcionales y útiles. Estas nuevas instalaciones ayudarían además a la industria de la construcción y a la industria acerera mexicana. De la misma forma, los sistemas de drenaje pueden dividirse en dos tipos principales de tuberías: La que colecta el agua de lluvia (TAU), pudiendo usarse la que existe actualmente y una tubería de acero inoxidable u otro material de alta durabilidad, localizada también en las aceras 20 cm por debajo de la TAP. La tubería sanitaria (TAS) pintada de rojo, debería recibir solamente las conexiones de agua de las casas habitación, restaurantes, edificios de oficinas, escuelas, etc., que no contengan sustancias tóxicas. Las micro, mini y medianas industrias, los hospitales y edificios de salud entre otros sectores que producen aguas residuales con compuestos tóxicos deberán tratarlas *in situ* antes de enviarlas a la TAS. Esta solución probablemente tomaría una generación para implementarse, pero valdría la pena dado que la mayor parte de esta TAS nueva recibiría aguas residuales sin diluir por el agua de lluvia (reduciendo su caudal considerablemente). El agua que transportaría la TAU, puede enviarse a las PTAR ya existentes, para su tratamiento y reutilización para riego de áreas verdes y en el campo para la producción de alimentos y uso industrial. La TAS enviaría sus caudales a PTAR más pequeñas ubicadas estratégicamente en cada “colonia” o grupos de colonias, dependiendo de la estructura geomorfológica y geográfica de las áreas, para que el agua residual tratada pudiera también ser usada por la industria y el exceso, si hubiera, se enviaría a la TAU (el actual drenaje). Las unidades habitacionales y condominios, hospitales, industrias grandes, etc., pueden separar sus líneas de drenaje para agua de lluvia de techos, patios, estacionamientos, etc., para coleccionar el agua en cisternas y tanques y reutilizarla. Para este propósito es muy necesario actualizar la normatividad de construcción introduciendo acciones obligatorias para arquitectos e ingenieros que separen el agua de lluvia de techos, estacionamientos y patios para recolectarla y usarla dentro de las áreas (en líneas de WC y para riego). El exceso, si hubiera, se iría a la TAU. La normatividad de construcción debe incluir las tuberías de aguas negras (WC, cocinas, lavado de ropa y trastos) para que sean enviadas a la TAS, mientras que las aguas grises (lavabos, tinajas y regaderas) deben enviarse a un sistema *in situ* de tratamiento y de allí al sistema de irrigación de jardines y reutilización en WC. Estas soluciones probablemente no puedan aplicarse a construcciones muy viejas, pero si todas las nuevas obras las siguen, otra vez, en una generación, tendremos ahorros de agua considerables.

**b) Instalación de PTAR que consideran el beneficio colectivo.**<sup>3</sup> En Europa, las nuevas tendencias de construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales, PTAR, se dirigen hacia un mayor número de plantas más pequeñas para evitar tuberías largas cuyo costo de mantenimiento es cada vez más elevado (el ejemplo citado en el resumen: una macroplanta que no funciona al 100%). Los autores tuvimos la oportunidad de conocer tres plantas construidas en los doce años de inicio de este milenio y muestran un desempeño deficiente. La primera nunca ha operado, un verdadero “elefante blanco” que fue sobrediseñada para cobrar más y gastar cemento de manera excesiva (por intereses en una empresa cementera). La segunda está ubicada en una zona habitacional y contamina a todo el vecindario con los aerosoles que contienen patógenos ya

---

<sup>3</sup> Consideraciones para el mejoramiento sustentable de la infraestructura de plantas de tratamiento de aguas residuales en México. Dra. María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa, Salvador Alejandro Sánchez-Tovar, Amado Enrique Navarro-Frómata. Informe técnico para la Comisión de Ciencia, Tecnología e Innovación de la H. Cámara de Diputados. EE.UU.MM. Ciudad de México, México. Documento electrónico (2019)

## **Propuesta para el diseño de una política pública que garantice el aprovechamiento integral del agua tratada a través de la segregación previa de efluentes residuales en la Región Hidrológica XIII**

---

que usa el obsoleto sistema de lodos activados. La tercera estaba ubicada en un municipio y la concesión era del presidente municipal en turno. Al terminar su período y perder su partido político el poder vandalizó la planta robándose todo lo que pudo (bombas, tuberías, accesorios, etc.) y el agua residual que trataba va a dar a un “jagüey”. En la CDMX (con 9,000 km<sup>2</sup>), estas instalaciones debieran construirse considerando la reducción de costos de mantenimiento de la red que lleve el agua residual, especialmente en una ciudad con movimientos telúricos diarios que rompen o dañan las tuberías, tanto de agua potable como de drenaje. El caso de la PTAR-Atotonilco es un anti-ejemplo. Recibe aguas mixtas que requieren de tratamientos complementarios fisicoquímicos que están produciendo residuos sólidos peligrosos que se dejarán a las generaciones futuras como un pasivo ambiental, ya que, su costo de estabilización es tan alto que nadie quiere cubrirlo (el sistema biológico no sirve para aguas mixtas). Esa planta, debido a su diseño obsoleto, debiera solamente recibir el agua de la TAS para ofrecer al Distrito de Riego lodos que sirvan como mejoradores de esos suelos agrícolas, además del agua tratada. Sus productos agrícolas serían inocuos no solamente para ellos sino para todos los que los consumimos. Es, por tanto, imprescindible realizar una reingeniería de prácticamente TODAS las PTAR existentes en México. Hay trabajo para todos los jóvenes ingenieros(as) que egresen de las instituciones y que deseen abocarse a ayudar a su patria y a sus conciudadanos a tener agua limpia en el país.

### **c) Separación de aguas residuales industriales y drenajes municipales y tratamiento *in situ*.**

Deberían existir legislaciones obligatorias, para los grupos de ingeniería ambiental de las empresas que busquen las mejores soluciones para separar las aguas residuales de tipo industrial, dependiendo de sus características químicas de las aguas residuales provenientes de las instalaciones sanitarias y de alimentos de sus empleados y obreros. De esta manera, ambas podrían recibir tratamientos específicos, las primeras *in situ*, en instalaciones mucho más pequeñas, sencillas y menos costosas. Las aguas tratadas pueden usarse para WC y sistemas de enfriamiento. Esta solución, como las acciones para minimizar la contaminación atmosférica (contingencias ambientales), tienen que estar respaldadas por reglamentaciones estrictas, ya que la mayoría de las empresas medianas, grandes y transnacionales poseen pozos de agua que no están realmente controlados por el gobierno, sino que dependen de la “buena voluntad” de los operadores de la industria y no se tienen políticas de cuidado del agua en la mayoría de ellas. Se tienen ejemplos de estas soluciones que son técnica y económicamente factibles.<sup>4</sup>

### **d) Políticas de reducción del bombeo de agua fuera del “valle” (cuenca) y cambio de mentalidad rescatando los ríos de la CDMX y otras ciudades de la Región Hidrológico-Administrativa XIII**

La educación masiva y las acciones específicas de las autoridades son las únicas formas de revertir esta forma de pensar “contaminante”. La educación pública a nivel masivo a través de “spots” de radio y televisión debe dirigirse a todos, niños, adultos, personas mayores orientándolos a cuidar el agua y sus fuentes (no tirando basura en barrancas, cauces o ríos), sino promoviendo su separación (recolectando vidrio, cartón, papel, plástico, latas de metal que, libres de basura “orgánica”, pueden ser reciclados, reduciendo considerablemente los volúmenes de basura orgánica recolectada por el sistema público y usándola para producir composta para el campo y las áreas verdes).

---

<sup>4</sup> Estudio de segregación, tratamiento y aprovechamiento eficiente de las aguas residuales generadas en Du Pont, S.A. de C.V. Antonio Isaías NÚÑEZ, Carmen DURÁN, José ROSALES, Landy Irene RAMÍREZ, Mario CASARRUBIAS GARCÍA, José Guadalupe HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ, Sonia MEDINA GARCÍA, Martín Mauricio SÁNCHEZ CORTÉS. Informe del seminario académico “PROFESOR FERNANDO OROZCO DONDE”. Patrocinado por DuPont de México, S.A. de C.V. **PROYECTO AGUA-01-96**. Convenio UNAM-Du Pont. Pub. PIQAYQA-Du Pont. 110 pags. ISBN 968-36-4871-1. México D.F. México. 200 ejemplares (1996)

## **Propuesta para el diseño de una política pública que garantice el aprovechamiento integral del agua tratada a través de la segregación previa de efluentes residuales en la Región Hidrológica XIII**

---

**PROPUESTA DE VALOR.** Yendo a las dos preguntas que dieron la pauta a esta contribución: ¿La macro-PTAR-Atotonilco mejorará las condiciones de salubridad de los hidalgenses y producirá cosechas de mayor valor agregado, minimizando los riesgos para la salud? ¿Qué papel debe jugarse desde la investigación y concientización de los sectores productivos, social, de servicios y gubernamental? a continuación se de la propuesta de valor: Las autoridades deben verificar cuidadosamente que todas las salidas de drenajes particulares estén conectadas a las líneas de drenaje (TAS) y que los techos y patios recolecten el agua de lluvia de manera separada (TAU) y que sean enviadas a la tubería de concreto actual, para que, una vez tratada en las PTAR, pueda ser enviada a los ríos. Como se dijo arriba, esto es particularmente importante para las alcaldías de Xochimilco, Tláhuac, Milpa Alta, Álvaro Obregón y Magdalena Contreras, donde las casas y negocios están contaminando los acuíferos y los pocos ríos que quedan sin entubar, así como las barrancas y cauces al tirar su basura y sus drenajes sin control y están acabando con las áreas boscosas por las construcciones irregulares. Los ríos limpios son un factor primordial para promover cambios positivos en el clima y la calidad del aire, especialmente si se siembran árboles a lo largo de las riberas y éstas están cubiertas de tezontle con bancas para los paseantes. Estos ríos limpios son una buena forma de recargar, de manera natural los acuíferos. Los resultados de este cambio de mentalidad, tanto de los ciudadanos como de las autoridades, será la recuperación del ambiente de la CDMX y sus zonas conurbadas de los estados de México, Hidalgo y Tlaxcala. Las aguas residuales tratadas y el agua de lluvia pueden combinarse en el sistema de drenaje actual, que solamente debe usarse para coleccionar el agua de lluvia, enviándolas a los lagos que todavía sobreviven en la zona sur y el este (Xochimilco y Texcoco) y los de la zona norte. Por otro lado, pueden irse sustituyendo, conforme vaya habiendo problemas en la red de drenaje nuevas líneas, solamente de aguas negras de materiales resistentes a valores de pH extremos. Esta estrategia, en menos de veinte años, permitirá a la Ciudad de México y a los estados de México, Hidalgo y Tlaxcala tener redes de aguas negras, redes de aguas tratadas y de lluvia y redes de agua potable eficaces y fáciles de mantener y reparar. Ya se inicia, aunque muy incipientemente: La Ciudad de México creó en 2019 un Programa de Sistemas de Captación de Agua de Lluvia en Viviendas de la Ciudad de México para las alcaldías Azcapotzalco, Coyoacán, Gustavo A. Madero, Iztapalapa, Magdalena Contreras, Milpa Alta, Tláhuac y Tlalpan gratuito. Los estados de México, Hidalgo y Tlaxcala y las otras alcaldías de la Ciudad de México tienen una oportunidad de mejora en este rubro.

**Protección para la población ubicada en zonas de barrancas y lacustres.** Ejemplificando con los habitantes de las zonas de Chalco y Xochimilco, deben cambiar su “*habitat*”, con el apoyo gubernamental para seguir el concepto de Venecia revirtiendo el equilibrio del agua de la cuenca a su estado original y solicitando el apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y otras agencias internacionales. Las primeras acciones debieran ser las de suspender las construcciones en estas áreas a nivel del “suelo”. Solamente debe haber “cimientos” de dos o tres metros de alto y las construcciones de la parte habitada deben estar arriba, para que se permita, en caso de inundaciones que el agua de lluvia fluya a través de los cimientos sin causar daños. En las obras ya construidas pueden aprovecharse las actuales plantas bajas como “cimientos”. Las siguientes acciones deben encaminarse a conectar los drenajes de estas construcciones a las TAS y a construir PTAR locales. Tal vez en una o dos generaciones, estas cuencas secas serán nuevamente lagos y la gente podrá transportarse en “acales” (palabra de origen azteca que significa “canoa o “casa flotante”), como se hacía todavía a principios del siglo XX desde Xochimilco hasta el centro histórico de la CDMX.

## **Propuesta para el diseño de una política pública que garantice el aprovechamiento integral del agua tratada a través de la segregación previa de efluentes residuales en la Región Hidrológica XIII**

---

**Beneficios de estos cambios de mentalidad.** Los beneficios que pueden obtenerse de estas políticas que cambien la mentalidad de ciudadanos y autoridades son: Las condiciones atmosféricas y climáticas se mejorarán considerablemente, el déficit de agua de la cuenca se reducirá considerablemente, reduciendo también la “importación” de agua de los estados vecinos y la CDMX y los estados de México, Hidalgo y Tlaxcala serán urbes con un ambiente más “humano” para todos sus habitantes, con una atmósfera más limpia, con fuentes de agua más limpias, con calles más limpias y con canales de agua que la embellezcan y le den su fisonomía original. Se debe crear una política pública de Sustentabilidad Hídrica de la Región Hidrológico-Administrativa XIII (CDMX, estados de México, Hidalgo y Tlaxcala) que sirva de ejemplo para todo el país. Consiste en (i) revertir la sobreexplotación del manto acuífero, (ii) reutilizar el agua de lluvia y el agua tratada mediante nuevas plantas de tratamiento de aguas grises específicamente en aquellas actividades en las que no se requiere agua de primer uso y destinar algunas otras PTAR que se encuentran en operación actualmente alrededor de la CDMX reconfigurándolas para el tratamiento eficiente de aguas negras, usando los efluentes tratados para el riego agrícola cumpliendo con lo establecido por la ley, (iii) descargando agua tratada terciariamente (sistemas de membranas) a los acuíferos que podrán recuperarse con costos de operación menores que los de las PTAR mal diseñadas o mal operadas. Estas últimas requieren procesos complejos ya que reciben aguas residuales municipales, industriales y pluviales mezcladas (agua residual mixta) e incumplen las normas oficiales mexicanas (NOM-003-SEMARNAT-1997) haciendo que, en el caso actual de la PTAR-Atotonilco, aproximadamente 80,000 hectáreas con cultivos de alfalfa y maíz sean irrigadas con estas aguas “mal tratadas”, manteniendo las condiciones de insalubridad de los hidalguenses y produciendo cosechas que aumentarán los riesgos para la salud de los consumidores con leche de vacas consumiendo alfalfa contaminada y personas consumiendo maíz producido con agua con microcontaminantes. Esta visión integral tiene como objetivo fomentar que los participantes interesados en el bienestar nacional, desde los investigadores, miembros de los sectores productivo, social y de servicios hasta las entidades gubernamentales y los profesionales independientes trabajen en esta política pública y compartan las metodologías utilizadas para implantarla, como lo hicieron después de la segunda guerra mundial en Europa sus colegas, mediante las siguientes acciones:

1. Valoración económica de los servicios ambientales generados por el agua
2. Concientización y ordenación de los asentamientos humanos en las alcaldías y municipios que cuentan con reservas ecológicas para proteger el agua subterránea y superficial
3. Separación del sistema unificado del agua residual y el agua pluvial, favoreciendo la recarga del acuífero y evitando que la ciudad y el campo sigan hundiéndose y agrietándose causando estragos en las edificaciones y muertes
4. Intercambio del agua de primer uso por agua residual tratada en aquellas actividades en que esta opción sea factible
5. Evaluación del impacto de la reutilización del agua de lluvia y del agua tratada mediante PTAR eficientes y a cargo del estado y no concesionadas a particulares, cuyo fin es el lucro y no el bien social, contribuyendo a la recuperación de las condiciones atmosféricas y climáticas de la otrora “región más transparente del aire”.

Un ejemplo, considerando la investigación, sería la identificación de los suelos que reciben aguas tratadas investigando la cantidad adecuada de roca fosfórica, un fertilizante efectivo no tóxico, proporcionado por Fertinal vía SADER, un apoyo gubernamental para el bienestar de la sociedad.



## **La reutilización del agua tratada en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales de Morelia Michoacán y el rescate urgente del Lago de Cuitzeo**

Dr. Ing. Salvador Alejandro Sánchez Tovar (Consultor independiente)

### **Antecedentes:**

Nuestro país está bordeado por dos océanos; el Pacífico totalmente extenso y abierto y el Atlántico al que se conecta como un “termopozo” el Golfo de México, lo cual lo hace altamente susceptible a las contingencias inevitables del cambio climático, sean estas huracanes, tormentas torrenciales o sequías prolongadas (INEGI 2020).

La región de la Cuenca del lago de Cuitzeo en Michoacán en el Bajío Mexicano, con 3,675 km<sup>2</sup>, es la segunda más grande de México después del Lago de Chapala en Jalisco (Red de Cuencas, 2021). Lo comparten los estados de Michoacán y Guanajuato. En los últimos tres años ha sufrido una sequía devastadora, perdiendo hasta dos terceras partes de su volumen (IIUNAM, 2021).

Un lago es un regulador natural del clima que lo rodea por los efectos térmicos de circulación de aire húmedo, aire frío y caliente tanto de día como de noche (Caballero y Vázquez, 2019).

Los municipios que lo rodean, así como Morelia la capital del Estado a 30.0 km del mismo, tienen una marcada escasez de agua potable y a pesar de las lluvias de este año, sus presas y reservorios no tendrán la capacidad para reponerse de la falta del preciado líquido.

Urge rescatar al lago de Cuitzeo o su desertificación se extenderá poco a poco radialmente no solamente a Guanajuato y Michoacán, sino que afectará toda la zona central de la República Mexicana con daños ecológicos de considerable magnitud.

En el caso de Morelia, con una población de 850,000 habitantes y cerca de 150,000 en su zona urbana periférica cercana al municipio, el problema ya es grave (INEGI, 2021). Si bien la red de agua potable y alcantarillado no se encuentra en las mejores condiciones, padece dos años de escasez de agua potable debido a la sequía, hasta a principios del presente año más de 190 colonias tenían alta deficiencia en el servicio (OAPAS-Quadratin, 2021).

En México se tienen registradas 2,642 (Conagua, 2019), Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR en adelante) y que aparentemente tratan cerca del 65.7% del Agua Residual Producida (ARP en adelante), 194 715.32 L/s; sin embargo, en la realidad apenas se trata menos del 50.0% debido a las malas condiciones de las mismas y a que en gran parte no existen los colectores municipales que les hagan llegar el agua residual cruda (ARC en adelante). La información gubernamental y la de la iniciativa privada al respecto es contrastante (BID 2013).

En México se permite el uso del agua residual tratada para riego agrícola diferenciado, para reinyección a mantos freáticos, así como para actividades recreativas (Lagos artificiales y fuentes), siempre y cuando no contenga metales pesados, como el arsénico y el flúor,

compuestos nitrogenados que reaccionen con el cloro de desinfección y que formen trihalometanos y cloraminas altamente cancerígenos; además, los disruptores endocrinos y restos de medicamentos y hormonas deben estar ausentes, de acuerdo con la NOM-003-SEMARNAT 1997 (DOF, 1997).

Por otra parte, existe el gravísimo problema hoy muy ignorado de la contaminación de acuíferos y mantos freáticos con metales semipesados o metaloides como son el flúor y el arsénico este altamente cancerígeno y que se registra en ocasiones en proporciones hasta cien veces arriba de lo permitido por la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 1994) que es 2.0-3.0 ppm vs. 0.025 ppm (Alarcón et al. 2013).

Más de 14 estados padecen arsenicismo en México. En las zonas cercanas a Michoacán y Morelia: El acuífero Independencia en la región Lerma-Chapala, la ribera del lago de Cuitzeo, el pueblo de Capula, entre otros, se ha encontrado contaminación sensible por arsénico y así pueden mostrarse decenas de casos (Aguirre Ortega, 2015 ¿O CUÁL?).

Potabilizar agua con metales pesados es muy caro y difícil, hasta 15.00 pesos/m<sup>3</sup>. Los medios filtrantes se agotan rápido, no son regenerables por retrolavados y hay que disponer de ellos como un residuo peligroso (datos del autor).

Ante lo anterior el agua residual tratada (ART en adelante), es una opción viable para solucionar la falta ya bastante seria de agua potable. EL ART, es agua “in situ” que ya se tiene al alcance inmediato y que puede ser re-tratada para su potabilización y reutilización por los seres humanos.

En México no existe una Norma Oficial Mexicana para la reutilización del ART y que establezca los parámetros límite, ya sea para su reinyección a las redes de agua potable o mezclarla con la ya contenida en embalses y presas; así como definir las tecnologías aplicables o a desarrollar para su reaprovechamiento directo por el ser humano. La NOM-003 requiere de estas propuestas de mejora.

En Europa ya existen normas y reglamentos que señalan los límites para la reutilización de las ART (“*Los alemanes se beben el Rhin siete veces*”), tienen que regresar el agua al principal río de Alemania tal y como la recibieron, lo que demuestra que sí es posible (Reglamento UE, 2020). Desde luego, en Europa existe más control y tratamiento de las emisiones domésticas e industriales. En México simplemente se vierten al drenaje sin separar para mejorar su calidad selectivamente y que sean usadas de manera más inteligente y sensata.

### **Propuesta de valor:**

Morelia tiene dos plantas de tratamiento de aguas residuales: PTAR Atapanco con una capacidad de tratamiento de 1,250.000 L/s (lps, coloquialmente) y San Juanito Itzicuaros de 250 L/s (lps), que tratan apenas la quinta parte del caudal de agua residual cruda, ARC. El agua tratada ART, es de muy buena calidad, pero se desecha regresándola a los ríos locales para luego enviarse al lago de Cuitzeo (datos del autor).

Para la **PROPUESTA DE VALOR** se recomienda lo siguiente:

- Urge rescatar el lago de Cuitzeo, ya que su desaparición desertificaría el Bajío. El agua de manantiales que le llega es interceptada por la agricultura y ganadería, reforestar, instalar pequeñas PTAR y humedales artificiales en pequeñas comunidades y poblaciones y reutilizar el agua (CONAGUA, SSa, SADER)
- Es necesario ampliarla sobre la PTAR Atapaneo para tratar el 100% del ARC, (hay terreno e infraestructura) y el ART represarla, rebombearla y reutilizarla en riego agrícola diferenciado y así retomar el agua potable que actualmente se use para la agricultura para la población humana (CONAGUA)
- La ART podría ser reinyectada al manto freático de inmediato (CONAGUA, SSa)
- En lo que se desarrolla la NOM de reutilización para el ART, ya que la NOM-003 es muy incompleta, la PTAR Atapaneo Morelia puede ser un excelente sitio con espacio e infraestructura para colocar en ella un laboratorio analítico, de investigación y de pruebas tecnológicas auspiciado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt en adelante) (CONAGUA, Conacyt, SSa)
- En Morelia, así como en los municipios cercanos y aledaños al Lago de Cuitzeo urge instalar PTAR para re-enviar el ART a los cuerpos de agua naturales (CONAGUA)
- Es necesario apoyar el “tratamiento celular” en las pequeñas poblaciones y colonias para obtener ART de alta calidad mediante tecnologías sencillas como son las fosas sépticas, los humedales artificiales (que eliminan de forma natural los coliformes fecales) y la tecnología de microorganismos eficientes (EM por sus siglas en inglés) del Dr. Teuro Higa; esta última ha demostrado ser excelente en el tratamiento de letrinas, pozos negros, así como la regeneración de sedimentos y aguas estancadas (datos del autor) (CONAGUA, SADER, SBienestar, SEP)
- Aplicar nuevas tecnologías de desinfección que si bien la más usada hasta ahora es el hipoclorito de sodio (peligrosa por generar cloraminas y trihalomentanos cancerígenos), existen otras como son las láminas solares, el dióxido de cloro, la luz ultravioleta y el ultrasonido (datos del autor) (CONAGUA, Conacyt, SSa, SADER)
- Llevar a cabo programas para reaprovechar la ART celular desinfectada en riego de parques, uso agrícola diferenciado, lavado de autos, banquetas, inodoros (datos del autor) (Gobiernos nacional, estatal, municipal de manera multisectorial)
- La ART celular, aunque se vierta al drenaje y no se reutilice, también contribuye a reducir el esfuerzo de tratamiento de las plantas municipales (les llega menos contaminación) (Gobiernos nacional, estatal, municipal)
- El desarrollo de las tecnologías ART celular, favorece la participación ciudadana, ya que ella misma contribuye a construir las, operarlas y cuidarlas (Sociedad civil)
- Lo anterior se traduce en la transferencia y apropiación del conocimiento a la ciudadanía (Gobiernos nacional, estatal, municipal de manera multisectorial).

Gracias

## Referencias:

- Aguirre Ortega, O. 2015. Se duplica la concentración de arsénico en la Cuenca del Río Lerma  
<https://www.eluniversal.com.mx/articulo/periodismo-de-investigacion/2015/12/1/se-duplica-arsenico-en-agua-segun-estudio>
- Alarcón, M.T., Miranda N.S., Benavides M.A., Martín. D.I. 2013. El Arsénico en el Agua. CIMAV, Durango, México  
<https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/1056/1/Libro%202013-Arsenico%20en%20el%20Agua%20con%20ISBN.pdf>
- BID. 2013. El tratamiento de aguas residuales en México. Banco Interamericano de Desarrollo BID  
[http://www.siagua.org/sites/default/files/documentos/documentos/tratamiento\\_de\\_aguas\\_residuales\\_en\\_mexico.pdf](http://www.siagua.org/sites/default/files/documentos/documentos/tratamiento_de_aguas_residuales_en_mexico.pdf)
- Caballero, M., Vázquez, G. 2019. Lagos como sensores de cambio climático: el caso de La Alberca de Tacámbaro, Michoacán, México.  
<http://tip.zaragoza.unam.mx/index.php/tip/article/view/193>
- Conagua. 2019. Inventario nacional PTAR  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/611037/Inventario\\_2019.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/611037/Inventario_2019.pdf)
- DOF. 1994. NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.  
<http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69543.pdf>
- DOF. 1997. NORMA Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se 'reúsen' en servicios al público  
<https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3297/1/nom-003-semarnat-1997.pdf>
- IIUNAM. 2021. La Sequía en el lago de Cuitzeo, Observatorio Instituto de Ingeniería UNAM  
<https://oh-iiunam.mx/sequia/mapa/graficas.html>
- INEGI. 2020. El cambio Climático en México  
<http://gaia.inegi.org.mx/sicc/>
- INEGI. 2021. Habitantes Morelia 2021. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.  
<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mich/poblacion/default.aspx?tema=me&e=16>
- OAPAS-Quadratin. 2021. Colonias sin agua en Morelia. Organismo Operador de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento de Morelia  
<https://www.quadratin.com.mx/principal/sin-agua-o-con-poco-abastecimiento-192-colonias-en-morelia/>
- Red de Cuencas. 2021. El lago de Cuitzeo, Red Mexicana de Cuencas  
<https://remexcu.org/index.php/grupos/fichas-informativas-de-lagos/mexico/lago-cuitzeo>
- Reglamento UE 2020. REGLAMENTO DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 25 de mayo de 2020 relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua UE 2020/741  
<https://www.boe.es/doue/2020/177/L00032-00055.pdf>

# Propuestas de mejora al método para determinar la disponibilidad oficial de agua superficial en México

Dr. Sergio Arturo Rentería Guevara<sup>1\*</sup>, Dr. Jesús Gabriel Rangel Peraza<sup>2</sup>, Dr. Fernando García Páez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Sinaloa. Calzada de las Américas Nte s/n, Cd. Universitaria, CP 80013 Culiacán, Sinaloa, México. [sergiorenteria@uas.edu.mx](mailto:sergiorenteria@uas.edu.mx); [fernandogarcia@uas.edu.mx](mailto:fernandogarcia@uas.edu.mx)

<sup>2</sup> División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Culiacán. Juan de Dios Bátiz 310, Col. Guadalupe, 80220. Culiacán, Sinaloa, México. [jesus.rp@culiacan.tecnm.mx](mailto:jesus.rp@culiacan.tecnm.mx)

## Introducción

En México, el uso del agua se regula a través de un esquema normativo que incluye títulos de concesión o asignación que son permisos legales para tal efecto. El principal criterio para otorgar o negar estos permisos es la disponibilidad de agua superficial o subterránea en la cuenca o acuífero, respectivamente. Dicha disponibilidad debe ser calculada mediante métodos que están establecidos en la norma oficial mexicana NOM-011-CONAGUA-2015 (NOM-011) (SEMARNAT, 2015). Los resultados de aplicar dichos métodos oficiales se publican en el Diario Oficial de la Federación (DOF) (CONAGUA, 2020), más no así los procedimientos específicos, suposiciones y cálculos que permitan verificar los resultados. Algunos de estos resultados han causado controversias que, al extremo, pueden llegar a conflictos, inclusive de índole judicial (Luz Noticias, 2017).

Al aplicar el método al caso de las aguas superficiales y realizar comparaciones con los resultados oficiales se identifican inconsistencias en el propio método, así como de su aplicación. Estas inconsistencias son evidentes dado que la misma autoridad ha publicado valores negativos de disponibilidad de agua superficial para algunas cuencas hidrológicas en México, lo cual no es físicamente factible y es una situación que confunde a los usuarios (CONAGUA, 2020). Rentería-Guevara et al. (2019) señala que la división hidrológica oficial utilizada para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales no considera unidades hidrológicas, ni el efecto de la infraestructura hidráulica en el patrón de escurrimientos. Ambos aspectos limitan la aplicación de conceptos hidrológicos desarrollados para cuencas sin influencia antropogénica significativa.

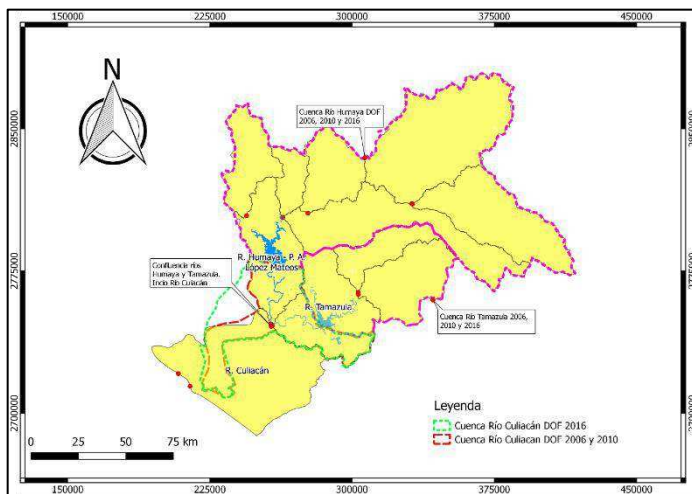
Las implicaciones de subestimar o sobreestimar la disponibilidad de agua superficial en una cuenca van desde conflictos entre usuarios y entre estos y la autoridad hasta efectos negativos en el uso sustentable del agua. En el primer caso, significa negar permisos para utilizar agua cuando existen volúmenes disponibles, con lo que se limita el desarrollo económico de la cuenca. En el segundo caso, otorgar permisos para usar el agua con base en volúmenes de agua inexistentes, es decir, se pudiera legalizar la sobreexplotación del recurso. Esta situación se agudiza en épocas de sequía, donde los usuarios exigen, sino la totalidad de los volúmenes a que tienen derecho, a cantidades por encima de la capacidad de la cuenca para suministrarlas.

En este trabajo, a través del caso de la Cuenca Río Culiacán, una de las más importantes en el país de acuerdo con su productividad agrícola, se analizan aspectos como los indicados arriba. Además, se incluye en el análisis las conexiones hidráulicas naturales y artificiales con otras cuencas. Como resultado del análisis, se enlistan las inconsistencias identificadas en el método, considerando la

naturaleza física de los términos involucrados en los balances de aguas superficiales, así como el carácter administrativo de la oferta y la demanda de agua superficial. Así mismo, se realizan propuestas que permitirán mejorar el método que hoy en día se utiliza para determinar la disponibilidad oficial de agua superficial en las cuencas hidrológicas en México.

## Metodología

### Área de estudio



La cuenca del río Culiacán (Figura 1) se ubica entre los paralelos  $26^{\circ} 03'12.98''$  N y  $24^{\circ} 27'09.78''$  N, y entre los meridianos  $107^{\circ} 45'38.81''$  W y  $105^{\circ} 48'34.16''$  W. Debido a la intensa actividad agrícola y su extensión territorial, la cuenca del río Culiacán es una de las más importantes de México. Las cuencas de los ríos Humaya y Tamazula generan escurrimientos a niveles más altos de la cuenca que se conducen a través de sus principales colectores (los ríos Humaya y Tamazula) hasta su confluencia donde forman el río Culiacán (Figura 1).

**Figura 1.** Cuenca del río Culiacán, Humaya y Tamazula. Fuente: Elaboración propia a partir de vértices publicados en CONAGUA (2006, 2010, 2016a) y archivos “shape” de INEGI, (2017c)

### Delimitación de la cuenca

La delimitación oficial de las cuencas en el área de estudio se basó en las coordenadas de sus vértices publicadas en el DOF (CONAGUA, 2016). Además, se utilizó un conjunto de datos utilizados de fuentes oficiales en México: la información incluye un mapa de cuencas a escala 1:50 000 obtenido por INEGI (INEGI, 2017d). Además, se usaron archivos vectoriales de diferentes fuentes. Los mapas fueron generados utilizando QGIS (2020). La georreferenciación de la cartografía básica fue llevada a cabo usando el sistema de referencia de coordenadas denominado WGS84 (World Geodetic System 1984) con una proyección UTM (Universal Transverse Mercator), área 13.

### Balace de agua

En México, el método oficial para determinar la disponibilidad de agua superficial se basa en un balance de agua superficial durante un año.

$$\Delta V = Ar + Cp + R + Im - Ex - Uc - Ev - Ab \quad (1)$$

En la Ecuación 1,  $\Delta V$  es el cambio de almacenamiento de agua en los embalses,  $Ar$  es el volumen medio de escurrimiento aguas arriba,  $Cp$  es el volumen de escurrimiento natural generado en la cuenca. captación,  $R$  es el volumen de retornos,  $Im$  es el volumen importado de cuencas conectadas artificialmente,  $Ex$  es el volumen exportado a cuencas conectadas artificialmente,  $Uc$  es el volumen



de usos consuntivos,  $Ev$  es el volumen evaporado de los embalses y  $Ab$  es el escurrimiento aguas abajo. Las unidades de la ecuación son millones de metros cúbicos por año.

De acuerdo con el marco normativo mexicano, el método oficial debe aplicarse a las cuencas hidrográficas oficiales, delimitadas por líneas poligonales definidas por vértices cuyas coordenadas geográficas se publicaron en el DOF. El método se aplicó a la cuenca hidrográfica oficialmente denominada “Cuenca Río Culiacán”. La implementación del método oficial en el área de estudio consistió en evaluar todos los términos de la Ecuación 1 para la Cuenca Río Culiacán.

## Resultados y discusión

La Tabla 1 muestra los balances de agua superficial publicados en el DOF en 2016 y 2020 correspondientes a la cuenca en estudio y aquellas con las que tiene conexión hidráulica natural, así como el balance realizado en este trabajo. El principal resultado es la disponibilidad media anual de agua superficial ( $D$ ) calculada con el método descrito en la NOM-011.

**Tabla 1.** Balances de las cuencas del río Culiacán, Tamazula y Humaya publicados en 2016 y 2020, y el balance obtenido mediante el método descrito en la NOM-011.

2016															
Cuenca	Cp	Ar	Uc (a)	Uc (b)	Uc (c)	R	Im	Ex	Ev	$\Delta v$	Ab	Rxy	Ab - Rxy	D	Clasf.
Hum.	1907.1	0.0	1889.3	0.0	0.0	1883.3	0.0	351.6	108.4	10.4	1430.7	1293.7	137.0	137.0	Hum.
Tam,	755.4	0.0	530.1	0.0	0.0	526.5	0.0	0.0	40.3	9.4	702.1	634.8	67.2	67.2	Tam,
<b>Cul.</b>	<b>466.1</b>	<b>2132.7</b>	<b>2613.2</b>	<b>19.6</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>312.7</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>278.8</b>	<b>0.0</b>	<b>278.8</b>	<b>278.8</b>	<b>Cul.</b>
2020															
Cuenca	Cp	Ar	Uc (a)	Uc (b)	Uc (c)	R	Im	Ex	Ev	$\Delta v$	Ab	Rxy	Ab - Rxy	D	Clasf.
Hum.	1869.4	0.0	1284.6	0.2	0.0	0.0	0.0	351.6	106.6	26.0	100.5	91.2	9.3	9.3	
Tam,	758.5	0.0	530.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.6	6.0	181.6	164.8	16.8	16.8	
<b>Cul.</b>	<b>444.5</b>	<b>282.0</b>	<b>2111.4</b>	<b>5.2</b>	<b>0.0</b>	<b>1850.2</b>	<b>309.4</b>	<b>503.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>266.5</b>	<b>0.0</b>	<b>266.5</b>	<b>266.5</b>	
Este estudio															
Cuenca	Cp	Ar	Uc (a)	Uc (b)	Uc (c)	R	Im	Ex	Ev	$\Delta v$	Ab	Rxy	Ab - Rxy	D	Clasf.
Cul.	322.9	2356.6	556.0	19.6	702.3	126.1	0.0	1428.6	5.8	0.0	93.3	717.7	-624.3	-624.3	Cul.

Se observan diferencias significativas entre los valores de algunos términos de los balances hídricos de la Cuenca Río Culiacán, versiones 2016 y 2020 publicadas oficialmente. En la versión 2016,  $Ar$  es un orden de magnitud superior al presentado en la versión 2020. Las magnitudes de  $R$  y  $Ex$  en el balance 2016 son cero, mientras que en el balance 2020 son valores de cuatro y tres cifras, respectivamente. Otra inconsistencia identificada es la incorrecta inclusión de las importaciones en la Cuenca Río Culiacán provenientes de la Cuenca Río San Lorenzo 2 a través del Canal San Lorenzo. Además, el valor del volumen anual de agua superficial asignado que se inscribe en el Registro Público de Derechos de Agua ( $Aw(a)$ ) es un orden de magnitud más alto que el valor calculado en este estudio. Esta situación se puede explicar porque la autoridad del agua no separa los volúmenes asignados al Distrito de Riego 010 correspondientes a las superficies cultivadas

ubicadas fuera de la cuenca del río Culiacán de las ubicadas dentro de esta cuenca. Otro aspecto relevante en los resultados oficiales es la omisión del volumen correspondiente al gasto ecológico. La NOM-011 establece que dicha magnitud se debe incluir en el término  $Uc(c)$ ; no obstante, en los balances oficiales es cero sin especificar la razón.

En este estudio, el principal resultado del balance hídrico es el valor negativo del volumen anual de disponibilidad de agua superficial, lo cual difiere de los resultados oficiales. Este resultado es un volumen de agua físicamente inaplicable que se obtiene de combinar la ecuación de continuidad, que considera valores físicos, con valores no físicos (valores administrativos). Sin embargo, se han reportado oficialmente valores negativos del balance hídrico en numerosas cuencas hidrográficas en México (CONAGUA, 2020), como en las cuencas del río Bajo Atoyac y del río Medio Balsas, con valores de  $-738,810 \text{ Mm}^3$  y  $-2,427,829 \text{ Mm}^3$ , respectivamente. Esta situación implica una falta de coherencia en la aplicación de los conceptos previstos en la NOM-011.

## Conclusiones

De acuerdo con los resultados presentados en este estudio, se concluye que se debe mejorar el método para determinar la disponibilidad de agua superficial en México: se debe establecer conceptualmente el método del balance hídrico, y realizar y monitorear cuidadosamente su aplicación. La actual combinación de términos de diferentes naturalezas (principios hidrológicos y volúmenes de extracción administrativa) no tiene una interpretación sólida ni en el contexto físico ni administrativo. Las concesiones de aguas superficiales pueden corresponder o no a extracciones físicas. Asimismo, la inclusión de un gasto ambiental medio anual en la ecuación del balance hídrico es inapropiada porque este término representa un uso no consuntivo.

Independientemente de los problemas técnicos mencionados anteriormente, el método de la NOM-011 es obligatorio en México y es el criterio principal bajo el cual se otorgan las concesiones de aguas superficiales. Esta situación faculta a la autoridad del agua para otorgar nuevas concesiones o asignaciones de aguas superficiales en un territorio donde, según los lineamientos de la misma autoridad, no hay disponibilidad. Las consecuencias de esto son contrarias al desarrollo sustentable en una región ya que las nuevas concesiones otorgadas en la zona por el gobierno federal implicarían la legalización de la sobreexplotación del recurso hídrico.

El tema de esta investigación incide sobre un aspecto de interés público, como lo es una NOM. Dicho instrumento jurídico es sujeto a un proceso cíclico de mejora denominado Revisión Quinquenal de las Normas Oficiales Mexicanas. Esta herramienta legal consiste en promover la participación de las personas e instituciones. Se enviarán las propuestas aquí presentadas para su evaluación por la autoridad pertinente, que en este caso es la Secretaría de Recursos Naturales y al Comité Consultivo Nacional de Normalización del Sector Agua.

## Referencias

CONAGUA. (2016). 2a Sección ACUERDO por el que se dan a conocer los límites de las 757 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 regiones hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos (continúa en la Tercera Sección). In CONAGUA (Ed.), *Diario Oficial de la Federación*. Diario Oficial de la Federación.

- CONAGUA. (2020). ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales de las 757 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 Regiones Hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos. In *Diario Oficial De La Federacion* (p. 71). Diario Oficial de la Federación.
- Luz Noticias. (2017). *Ejidatarios de El Fuerte se plantan en oficinas de Conagua en la CDMX - Luz Noticias Sinaloa -*.  
<https://www.luznoticias.mx/ejidatariosdeelfuerteseplantanenoficinasdeconaguaenlacdmx-31961/>
- Rentería-Guevara, S. A., Rangel-Peraza, J. G., Rodríguez-Mata, A. E., Amábilis-Sosa, L. E., Sanhouse-García, A. J., & Uriarte-Aceves, P. M. (2019). Effect of agricultural and urban infrastructure on river basin delineation and surface water availability: Case of the Culiacan River Basin. *Hydrology*, 6(3), 58. <https://doi.org/10.3390/HYDROLOGY6030058>
- SE. (2014). *Revisión Quinquenal de las Normas Oficiales Mexicanas*. Secretaría de Economía.  
<https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/revision-quinquenal-de-las-normas-oficiales-mexicanas-23023?state=published>
- SEMARNAT. (2015). Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. In CONAGUA (Ed.), *Diario Oficial de la Federación*. Diario Oficial de la Federación.

## Propuesta de valor

La propuesta de valor incluye dos fases:

### Fase 1.- Revisión de la NOM-011

Objetivo: Someter a consideración formal las propuestas de mejora del presente trabajo mediante el proceso de Revisión Quinquenal de las Normas Oficiales Mexicanas o mediante los canales que la Red Temática de Gestión de la Calidad y Disponibilidad del Agua gestione, a efecto de participar en las acciones para modificar la NOM-011 hasta la posible incorporación total o parcial de las propuestas.

Con base en lo anterior, se presentan las siguientes propuestas de modificación al método oficial para determinar la disponibilidad oficial de agua superficial en México (NOM-011):

- Revisar y adecuar la delimitación de las cuencas hidrológicas en México. La revisión debe buscar que las fronteras de la cuenca sean parteaguas hidrológicamente operantes, es decir, que efectivamente separen el flujo superficial que se dirige a la red hidráulica del territorio.
- Asegurar la calidad de los datos hidroclimatológicos. El método debe considerar la realización de pruebas estadísticas estandarizadas de estacionalidad, consistencia y homogeneidad para asegurar una calidad uniforme de los datos hidroclimatológicos.
- Depurar la información sobre extracción de agua superficial. La base de datos pública correspondiente a los títulos de concesión y asignación en México tiene serias inconsistencias. Al respecto, el método debe identificar la ubicación de los aprovechamientos correctamente georreferenciados en la cuenca. Además, es indispensable incluir un análisis para llevar a cabo la depuración y validación de los datos sobre volúmenes anuales de extracción de agua superficial, tanto a los títulos de concesión y asignación como a los volúmenes consumidos.
- Definir el volumen de control alrededor de los cauces de interés. En la NOM-011, la denominación del término retornos establece *a la red hidrográfica* como el sistema de análisis cuyas fronteras determinan lo que entra o sale. Sin embargo, los balances de agua superficial que la misma NOM-011 regula tienen por ámbito *la cuenca hidrológica*. Esto es motivo de ambigüedad conceptual. Por ejemplo, las extracciones para uso agrícola del agua en superficies que se ubican dentro de la cuenca hidrológica y cuyos volúmenes anuales excedentes regresan a la red de drenaje de la cuenca, nunca salen de la cuenca, por lo que no pueden retornar a ella.
- Separar los volúmenes anuales de usos consuntivos de los no consuntivos. El método debe de conservar una perspectiva sobre los volúmenes anuales físicamente disponibles de los administrativamente disponibles. En este sentido, se debe realizar un balance con los términos físicamente reales y otro con los términos física y administrativamente reales.
- Determinar el caudal ecológico. La NOM-011 indica que se incluya el volumen medio anual correspondiente al caudal ecológico, pero no indica la forma de hacerlo. Esta omisión genera ambigüedad en introducir o no el valor de dicha variable en los balances de agua superficial o en la forma de calcularlo.
- Evitar omitir o duplicar el volumen medio anual ecológico. La NOM-11 establece que se debe incluir el volumen medio anual correspondiente al gasto ecológico en el volumen anual de extracción de agua superficial. Además, estipula que el volumen anual actual comprometido aguas abajo debe considerar el uso ambiental y los volúmenes correspondientes a la

Programación Hídrica. Lo anterior conduce a interpretar que, una vez estimado el valor del volumen medio anual ecológico, éste debe distribuirse como parte de la demanda entre los factores de la oferta para formar parte de los volúmenes comprometidos. Sin embargo, la especificación del contenido del volumen anual actual comprometido hacia aguas abajo se menciona por separado en el Programa Nacional Hídrico, en el volumen adicional para uso ambiental. Es necesario clarificar esta situación en la NOM-011 y en el Programa Nacional Hídrico.

- Mejorar el cálculo de los escurrimientos. En el caso de aplicar el método indirecto (Soil Conservation Service) para estimar el volumen medio anual de agua superficial, conviene efectuar ajustes a los valores del parámetro K con el auxilio de cuencas vecinas instrumentadas y la utilización de Sistemas de Información Geográficos.
- Suprimir los derrames de presas de la disponibilidad de agua superficial. La inclusión de los derrames de las presas como parte de la disponibilidad media anual de una cuenca puede llevar a sobrestimar la oferta de agua. Se propone que el método incluya un análisis de la situación particular de cada cuenca derivado del cual los derrames de las presas puedan formar parte o no de la oferta de aguas.
- Prevenir errores en la publicación oficial de resultados. En las publicaciones oficiales mencionadas existen errores tipográficos, de formato y contenido innecesario que conviene corregir. A fin de comunicar con mayor claridad el método y mejorar la precisión de los resultados, se propone que el método exija una consulta de los resultados previa a su publicación oficial con usuarios y personal científico y académico externo.

## Fase 2.- Aplicación de propuestas a cuencas prioritarias

Objetivo: Aplicar las propuestas de mejora de este trabajo a cuencas prioritarias de cada región hidrológica para validar, modificar o generar nuevas propuestas dirigidas a perfeccionar el método para determinar la disponibilidad oficial de agua superficial en las cuencas de México y validar o modificar los valores de esta variable.

### Posibles instituciones cooperantes

Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

### Capacitaciones

- Dirigidas al personal de aguas superficiales de la CONAGUA a nivel central y regional, así como investigadores y estudiantes de posgrado en el área de hidrología y aprovechamiento de recursos hídricos que la Red Temática considere pertinentes.
- Cursos teóricos sobre el método para determinar la disponibilidad de agua superficial.
- Talleres y asistencia técnica para aplicar los procedimientos de la NOM-011 para determinar la disponibilidad de agua superficial en cuencas específicas.

Los productos del trabajo serían:



- Un método para determinar la disponibilidad media anual de agua superficial en México que conjugue capacidades interinstitucionales.
- Un conjunto de balances de agua con el método mejorado correspondiente a las cuencas identificadas como prioritarias.
- Un grupo de trabajo capacitado para aplicar el método al resto de las cuencas.
- Una nueva versión de la NOM-011.

## LA GESTIÓN DEL AGUA EN LA INDUSTRIA

S. E. Garrido-Hoyos<sup>1</sup>, M. Zuluaga-Hernández<sup>2</sup>, D. Hernández-Roldán<sup>2</sup>, G. Rosano-Ortega<sup>2</sup>, L.I. Carrillo-Flores<sup>1,2</sup>, A.J. Alvillo-Rivera<sup>1</sup>, M.J. Alvarado-López<sup>2</sup>, D. R. MacKay<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso, C.P.62550, Jiutepec, Morelos, México.

<sup>2</sup>Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP), 21 Sur 1103, Barrio de Santiago, C.P. 72410, Puebla, Puebla, México.

<sup>3</sup>Ozono Polaris S.A. de C.V., Blvd Atlixco 4303-A, Colonia Estrella del Sur, C. P. 72190, Puebla, Puebla, México.

### Introducción

En el año 2017 según la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2018), se generaron 215.2 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales de las cuales, 191.0 m<sup>3</sup>/s son recolectadas en el alcantarillado, aportando 1.78 millones de toneladas de DBO<sub>5</sub>. Para ese año en México existían 2526 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación en el país, que trataron 135.6 m<sup>3</sup>/s, es decir, el 63% de las aguas residuales generadas, por lo que se vierten al ambiente 79.6 m<sup>3</sup>/s. Por otra parte, la industria trató 83.7 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales, en 3025 plantas en operación (CONAGUA, 2018). En la Figura 1, se observa la distribución de volúmenes concensionados por usos consultivos siendo el uso agrícola el de mayor volumen destinado a riego principalmente.

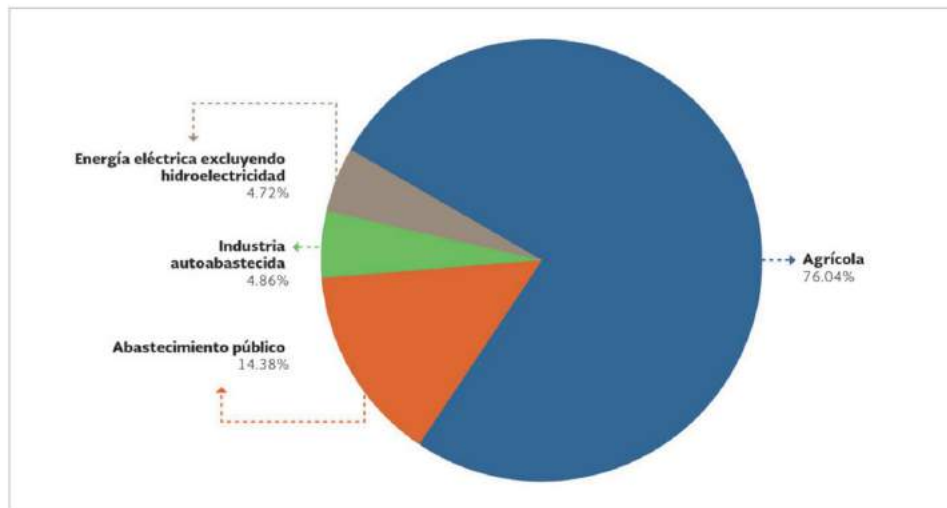


Figura 1. Distribución de volúmenes concensionados por usos consultivos, CONAGUA 2017

En el reúso de agua de origen municipal destaca la transferencia de aguas residuales colectadas en las redes de alcantarillado hacia cultivos agrícolas. En una menor proporción, se reutilizan dichas aguas en las industrias, así como en las termoeléctricas, como es el caso de las centrales termoeléctricas de Villa de Reyes en San Luis Potosí y Valle de México, Edo de México, entre otras, como suministro de agua de repuesto para torres de enfriamiento, centrándose en el ahorro de agua subterránea para la población circundante. En el reúso de

agua de origen industrial (no municipal) destacan las aguas residuales de los ingenios azucareros en el cultivo de caña en el estado de Veracruz (CONAGUA, 2011).

A continuación se describen algunos ejemplos de industrias que tratan sus aguas residuales generadas en los procesos de producción y su posterior reúso nuevamente en los procesos. Se destaca el concepto de “descarga cero”, en que la meta es reciclar las aguas residuales industriales en su totalidad o en la mayor parte posible. Significa que las aguas residuales, se tratan y se usan de nuevo en el proceso, por lo que no son vertidas en el alcantarillado o en aguas superficiales.

### **Casos de estudio:**

#### ***Industria alimentaria***

Algunas empresas como Coca-Cola y PepsiCo a nivel mundial han implementando prácticas para mejorar el uso del agua en sus operaciones. La Compañía Coca-Cola ha implementado el sistema denominado, Rainmaker, proceso de recuperación de agua de limpieza y lavado de botellas. Después del tratamiento convencional, el agua recuperada se trata adicionalmente mediante bioreactores de membrana, ósmosis inversa, ozonización y desinfección UV. Este proceso fue probado e implementado en instalaciones en Hermosillo, México, con una reducción en el consumo de agua hasta en un 35% (EPA, 2012).

Ejemplos de reutilización integral del agua y prácticas sostenibles se presentan con PepsiCo/Frito-Lay Corp con caudales medios ( $Q_{\text{medio}}$ : 28 L/s), Casa Grande, Arizona, USA; y en México PepsiCo/Sabritas de: Vallejo, Ciudad de México ( $Q_{\text{medio}}$ : 8 L/s), Zapopán Jalisco ( $Q_{\text{medio}}$ : 9 L/s) y Saltillo Coahuila ( $Q_{\text{medio}}$ : 9 L/s) (Garrido-Hoyos *et al.*, 2012, 2014, 2015), en las que se han completado proyectos ambiciosos con el objetivo de operar las plantas casi en su totalidad en la energía renovable, la recuperación y la reutilización del agua de proceso de producción, y producción con casi cero residuos vertidos al alcantarillado o suelo, a lo que la compañía se refiere como "Net Near Zero".

Estos sistemas reciclan entre un 50-75% del agua utilizada en los procesos de las instalaciones de producción como: mover y lavar las patatas y el maíz, limpiar el equipo de producción y para otras necesidades de la limpieza y de la producción en las plantas, permitiendo por ejemplo a Frito-Lay reducir su consumo de agua en 100 millones de galones ( $380.000 \text{ m}^3$ ) anuales. Algunas características medias del influente a las plantas de tratamiento de aguas residuales industriales (PTARIs) son: Demanda bioquímica de oxígeno ( $\text{DBO}_5$ ) 1,600 - 2,190 mg/L y sólidos disueltos totales (SDT) 2,054 – 3,229 mg/L. El agua residual de origen sanitario se separan y se descargan al drenaje de las ciudades correspondientes, para recibir tratamiento convencional en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (PTARs).

La calidad de reutilización establecido por Frito-Lay/PepsiCo, y Sabritas/Pepsico requieren que el agua cumpla con los estándares de agua potable primaria y secundaria de la EPA y Normas Oficiales Mexicanas para uso y consumo humano. La calidad de las aguas tratadas en las PTARIs es de mayor calidad que el suministro de agua potable local en términos generales de varios parámetros.

Por otra parte, las aguas residuales aceitosas se separan y se recupera el aceite para minimizar los efectos adversos en los biorreactores de membrana (MBR) y de la ósmosis inversa de baja presión (LPRO). Además, en las plantas se recupera el almidón de algunos pasos de la producción y así se disminuye los costos y cargas de nutrientes en las PTARIs.

## **Industria Minera**

### ***Investigación en desarrollo. Propuesta de tratamiento y reúso del agua proveniente del proceso de extracción de oro y plata***

México se caracteriza por ser un país minero, ya que a nivel mundial se encuentra como principal productor de plata y como octavo lugar en producción de oro. Durante su extracción y debido al tipo de proceso (hidrometalurgia) que utilizan este tipo de industrias, se generan relaves mineros o jales, que se caracterizan por tener altas concentraciones de cianuro y metales, los cuales tienen un impacto social y ambiental negativo debido a su toxicidad. La producción de cianuro a nivel mundial en la minería se estima en más de 14 millones kg/año (Akcil, 2003; Kuyucak y Akcil, 2013), por lo que la problemática que se plantea a nivel medioambiental y de salud pública es muy importante en las zonas mineras.

Actualmente, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP) y Ozono Polaris, llevan a cabo en colaboración, investigaciones principalmente sobre la remoción del cianuro y sus especies, además de las interferencias que presentan los metales y aniones en la remoción de este compuesto. Por una parte, se está proponiendo un tren de tratamiento, en el que se está evaluando las condiciones óptimas del proceso de oxidación avanzada con ozono acoplado a los procesos de coagulación-floculación y sedimentación en una planta piloto de un 1.0 m<sup>3</sup>/d, con una concentración inicial de 150 mg CN<sup>-</sup>/L. Como resultados principales se ha demostrado que el ozono es altamente eficiente, 99%, para la remoción de cianuro libre y débilmente acomplejado con metales. A pesar de que la variabilidad química del relave afecta de manera directa las eficiencias de remoción del tratamiento, con este método se cumple con el límite máximo permisible (LMP) para el cianuro (3 mg/L) en la normatividad mexicana. Cabe destacar que el tratamiento presentado está en proceso de la patente.

Con respecto al tratamiento biológico se ha trabajado en lote y continuo con un consorcio bacteriano aislado de una presa de jales. Los mejores resultados se han obtenido para el proceso en continuo, en el que, se utilizaron tres tipos de reactores tipo Eckendfelder, uno con biomasa suspendida (BS) y dos de lecho móvil, uno con biomasa inmovilizada sobre soportes Kaldnes K1 (BK) y otro sobre cubos de poliuretano (BCP). Se trabajaron tres etapas experimentales, en cada una de ellas se variaron las concentraciones de cianuro total. En la primera fue de 26±2 mg/L; en la segunda de 40±4 mg/L y la tercera de 55±4 mg/L. Durante toda la operación el pH y la temperatura se mantuvieron en 9.5 unidades y 25°C. Después de 141 días de operación se obtuvo una biodegradación del cianuro total contenido en los relaves mineros de un 69% (17 mg/L) en el reactor BS, mientras que en el BK fue de 93% (3.9 mg/L) y en el BCP de 95% (2.5 mg/L). Las familias bacterianas predominantes en cada uno de los reactores, así como sus respectivas abundancias relativas, fueron para el BS y para el BK de Cyclobacteriaceae (20.65% y 24.64%) y Rhizobiaceae (18.48% y 14.01%) y Halomonadaceae (46.97%) y Hyphomonadaceae (24.94%) en el BCP.

## **Bibliografía**

- Akcil A. & Mudder T. (2003). Microbial destruction of cyanide wastes in gold mining: process review. *Biotechnology Letters*. 25: 445-450.
- CONAGUA, 2017. Comisión Nacional del Agua. Estadísticas del Agua en México Edición 2017. SEMARNAT. México D.F. México.
- CONAGUA, 2018. Comisión Nacional del Agua. Estadísticas del Agua en México Edición 2018. SEMARNAT. México D.F. México.
- EPA. 2012. Environmental Protection Agency y Office of Water Programs. Guidelines for water reuse. U.S. Agency for International Development. Washington, D.C. USA.
- Garrido Hoyos S.E., Calderón Mólgora C.G., Montellano Palacio L., Rivera Huerta M.L. (2012). Evaluación de la planta de tratamiento de aguas residuales, Sabritas, Vallejo (Ciudad de México). Informe Técnico. Subcoordinación de Tratamiento y Calidad del Agua. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Mor. México.
- Garrido Hoyos S.E., Calderón Mólgora C.G., Montellano Palacio L. (2014). Evaluación de la planta de tratamiento de aguas residuales, Sabritas Zapopan (Jalisco). Informe Técnico. Subcoordinación de Tratamiento y Calidad del Agua. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Mor. México.
- Garrido Hoyos S.E., Calderón Mólgora C.G., Montellano Palacio L. (2015). Evaluación de la planta de tratamiento de aguas residuales, Sabritas Saltillo (Coahuila). Informe Técnico. Subcoordinación de Tratamiento y Calidad del Agua. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Mor. México.
- Kuyucak N. & Akcil A. (2013). Cyanide and removal options from effluents in gold mining and metallurgical processes. *Minerals Engineering*. 50-51:13-29.

## **PROPUESTA DE VALOR**

Algunos de los principales problemas derivados del vertido de aguas residuales son económicos y medioambientales. Actualmente, la mayoría de las industrias usan agua en sus procesos por lo que generan una gran cantidad de agua residual industrial.

Con el objetivo de resolver esta problemática, desde finales de 1980 la industria hizo de la “**descarga cero**” el principal objetivo y meta. Se trata de reciclar las aguas residuales industriales en su totalidad o en la mayor parte posible. Significa que las aguas residuales industriales, se tratan y se usan de nuevo en el proceso, por lo que no son vertidas en el alcantarillado, en aguas superficiales o suelos.

La producción de residuos deben ser los mínimos, los cuales se tratan hasta que cumplan con las normativas para evitar afectaciones medioambientales. Pero no solo se emplea para los residuos de las industrias sino para los efluentes que resultan de la actividad en viviendas, actividades comerciales o industriales.

Específicamente los procesos de descarga cero son muy provechosos para las industrias metalúrgica, alimentaria, minera, farmacéutica o aeronáutica, entre muchas otras. El tipo de tratamiento final depende en gran medida del uso que se le va a dar al agua en la industria.



Finalmente, se debe implementar como normatividad para las industrias el concepto de “descarga cero” como obligatorio, tratando las aguas residuales industriales y su reúso en los procesos de producción u otros usos que se destinen a ésta en la industria.

# **IMPACTO DEL MST SOBRE LA ESTABILIDAD DE HUMEDALES EN ZONAS ÁRIDAS. El caso del Ecocampus BUAP en Valsequillo, Puebla**

Jesús Ruiz Careaga, Edgar Gonzalo, Jenaro Reyes Matamoros, Abel Cruz Montalvo y Alicia Aguilar Gutiérrez.

## **INTRODUCCIÓN**

En el Ecocampus BUAP de Valsequillo se lleva a cabo una investigación sobre el beneficio de la aplicación del Sistema de Manejo Sustentable de Tierras (MST), con énfasis en la conservación, restauración de tierras y captación de agua de lluvia que impactan en la estabilidad de los suelos y los cuerpos de agua. Se trata de disminuir las pérdidas de suelo por arrastre de las aguas de escorrentía a través de la instalación de una infraestructura para la conservación, recuperación de suelo y captación de agua. La finalidad es demostrar cómo a través del cuidado de los suelos se beneficia todo un sistema integrado, que no se debe manejar de forma particular; no se trata estudiar solo el suelo, en este estudio, que apenas se inició en marzo del 2017, se integran varias especialidades como son la Edafología, principios de Manejo de Cuencas, restauración de bosques y preservación de humedales. Apenas, se comienzan a divulgar los primeros resultados, relacionados con la recuperación de suelos y la captación de agua de lluvia, que impacta de forma favorable sobre la estabilidad del entorno al humedal de la presa Manuel Ávila Camacho (Valsequillo). En este trabajo se resume la investigación realizada en una de las micro cuencas que vierten hacia la presa; se capta agua de lluvia en zanjas trincheras y represas, se limita considerablemente la cantidad de sólidos hacia este cuerpo de agua, evitando considerablemente el azolve de ésta; uno de los objetivos que se persigue en este Sector de Referencia es la capacitación e intercambio entre campesinos, especialistas, funcionarios y estudiantes ligados a las ciencias ambientales y la propuesta de un proyecto de extensión de estos resultados en la presa Valsequillo para contribuir con el alargamiento de la vida útil de este cuerpo de agua, vital para la sociedad poblana.

## **METODOLOGÍA**

Para realizar esta investigación se concibió la instalación de una infraestructura capaz de obtener resultados confiables y medibles con los medios que se contaban en su momento, se instaló un sistema de medidas basados en los conceptos de MST y antierosivo, éste último se describe grosso modo en este apartado. Esta infraestructura es capaz de brindar información sobre las formas que impactan las condiciones del entorno (formas del relieve, particularidades del clima, características de la roca, el manejo inadecuado y los niveles de erosión) en esta parte del Estado sobre la estabilidad de las tierras en zonas áridas, concepto éste que incluye todo lo observable en un paisaje (Fernández-Christlieb, 2014). En la microcuenca que se estudia se construyeron cinco muros de piedras acomodadas, protegidos con la siembra de plantas de *Vetiveria zizanioides* y *Juniperus deppeana* en la parte más alta del terreno; hacia abajo, en dirección a la presa Valsequillo se construyeron dos zanjas trincheras y en la parte más cercana a la presa se construyeron cuatro represas de mampostería. Esta infraestructura mostró la capacidad de reducir el impacto negativo de agentes externos sobre este ecosistema terrestre localizado en una zona semi áridas y su eficacia al disminuir la cantidad de sólidos hacia la presa.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

El área que se estudia tiene una extensión de 10 ha, es un Sector de Referencia para el Manejo Sustentable de Tierras, Restauración y Captación de Agua, localizado en el Ecocampus BUAP en Valsequillo, en este predio se definen tres micro cuencas, por las cuales circula el agua y contaminantes sólidos en la temporada

de lluvias hacia la presa cada año. De estas tres microcuencas se selecciona la que tiene montada la mejor infraestructura, y como todas, tributa hacia la presa Valsequillo, el largo aproximado de esta micro cuenca hasta uno de los brazos de la presa es aproximadamente de 3 kilómetros, pero la infraestructura está montada en el predio que pertenece a la BUAP, por lo que su largo es de aproximadamente unos 500 m. En la primera sección, la más alta de esta microcuenca se construyeron cinco muros de piedras acomodadas (Figura 1). Estos muros se construyeron en una cárcava cuya formación o inicio apenas tiene 5 m de ancho y se va ensanchando hacia el sur, rumbo a la presa. En la Tabla 1, se puede apreciar como en los muros (I, II y III) solo captaron 184 kg de suelo. En el muro III (Figura 2b), se puede apreciar el área de retención de suelo inferior al suelo retenido por el muro II (Figura 2a) y mucho menos que el retenido por el muro I (Figura 2c), esto está en dependencia del área de impacto de cada muro (área que tributa a cada muro) y al largo de cada muro; las dimensiones de los muros son de 8 m el muro I y sucesivamente, 11 m, 10 m, 14 m y 50 m el muro V, situado más al sur, este muro por su tamaño y ubicación recibe adicionalmente suelo arrastrado por las aguas de escorrentía que no corresponden solo a las avenidas de aguas propias de la cárcava, por ello la retención de suelo se incrementa hasta 948 kg, casi una tonelada de suelo.



Figura 1. Secuencia de los muros de piedras acomodadas en la micro cuenca estudiada

Tabla 1. Suelo retenido en la secuencia de muros de piedras acomodadas construidos

SUELO RETENIDO EN LOS MUROS DE PIEDRAS ACOMODADAS	
Muros de piedras acomodadas	Peso (kg)
Muro de piedras I	29
Muro de piedras II	23
Muro de piedras III	132
Muro de piedras IV	307
Muro de piedras V	948
Total de suelo retenido	1439



Figura 2. Muro de piedras acomodadas III (a). Área de recolección de suelo atrapado por el muro de piedras acomodadas II (b). Muro de piedras acomodadas I (c).

Después de los muros de piedras se instalaron en esta micro cuenca, 2 de las 8 zanjas trincheras construidas en el predio, algunas aún en fase de construcción a causa de la suspensión del trabajo por la pandemia. Por las dimensiones de la zanja trinchera I (Figura 3), tiene una capacidad de  $6.66 \text{ m}^3$  es decir acumula a plena capacidad 6660 litros de agua, según lo observado, después de estar llena mantiene agua hasta por 7 días en caso de no volver a llover, lo que significa poder disponer de este líquido para usos diversos. Por su parte la zanja trinchera II almacena por sus dimensiones 3708 litros de agua; en cuanto a la retención de suelos las zanjas trincheras 1 y 2 retuvieron respectivamente en esta primera temporada, 0.8 y 0.6 Ton de suelos, lo que muestra una eficacia significativa para solo dos obras de conservación. Un comentario aparte sobre la zanja trinchera III (Figura 4), que está fuera de esta micro cuenca, pero por ser la más grande del predio merece hacer la referencia, tiene dimensiones de 26 m de largo, 1 m de profundidad y 1 m de ancho, una capacidad

de almacenaje de 26000 litros de agua y está prevista además como conductora de este líquido hacia el jagüey localizado en la parte baja del predio, solo se menciona por resaltar la importancia de este tipo de obra para la captación y almacenaje de agua de lluvia en zonas áridas, en la figura mencionada se puede apreciar que aún resta por acondicionar el bordo con el suelo extraído de la zanja y la siembra de las hileras de *Vetiver zizanioides*.



a



b



c

Figura 3. Construcción de la zanja trinchera I (a). Término de la construcción, enero 2018 (b). Captación de agua, octubre 2018 (c).





Figura 4. Zanja trinchera III (a). La mayor zanja construida en el Sector de Referencia localizado en el Ecocampus BUAP en Valsequillo, contribuirá al llenado del Jagüey (b).

Finalmente; en parte más al sur, en la micro cuenca que se estudia se construyeron cuatro represas de mampostería (Figura 5), éstas son obras que demandan mayor cantidad de recursos, pero son obras permanentes y no es necesario realizar mantenimiento continuado por derrumbe de las paredes, como en las zanjas trincheras o bien por dislocación de las piedras en los muros, solo se trata de tomar decisiones según las condiciones del lugar y los recursos financieros disponibles para construir las obras que se requieran. En la Tabla 2 se pueda apreciar, como las primeras represas retienen más suelo que, siendo la represa IV, la más próxima a la presa es donde menos sólidos llega por ser atrapados en las primeras; la represa I retiene el 58% de los sólidos retenidos por este sistema de represas, la represa II, el 22% y finalmente la última represa, la IV solo retiene el 8%. La eficacia de este sistema de solo 4 represas se justifica por la retención 1.3 ton de suelo retenido.

En resumen, todo el sistema de medidas instalado en esta micro cuenca, 5 muros de piedras acomodadas, 2 zanjas trincheras y 4 represas de mampostería, retienen 4.16 ton de suelo que antes llegaba a la presa Valsequillo; en relación a la cantidad de agua captada por las dos zanjas trinchera también muestra eficacia al captar entre ambas un total de 10 368 litros de agua.



Figura 5. Represa de mampostería I. Máxima captadora de suelo y agua entre las represas (a). Represa de mampostería II. Segunda captadora de suelo y agua entre las represas (b). Represa de mampostería IV, la que menos suelo retiene entre las cuatro represas (c).

Tabla 2. Suelo retenido por las repesas de mampostería.

SUELO RETENIDO EN LAS REPESAS		
Represa	Peso (kg)	%
Represa I	761	58
Represa II	286	22
Represa III	153	12
Represa IV	113	8
Total de suelo retenido	1313	

La siembra de árboles es quizá la actividad que más contribuye a la recuperación de los suelos y a largo plazo a la captación de agua de lluvia en zonas áridas (Aguilera-Peña y Jalón de Torbay, 2018), crear bosques en predios degradados puede ser la vía para restablecer el hábitat de especies de la flora y la fauna a la vez que permite la creación de condiciones favorables para almacenar agua de lluvia.

La aplicación del sistema de MST en zonas áridas puede contribuir de manera eficaz a la preservación de los suelos y con ello favorecer de forma paulatina la generación de las condiciones originales de los ecosistemas terrestres en zonas con déficit de humedad (FAO, 1994; Machado-Guevara y Col., 2015) lo cual favorece un régimen de humedad favorable para la vida silvestre. El proceso erosivo que se desarrolla en esta parte del Estado atenta contra la seguridad alimentaria y la estabilidad económica en comunidades pobres que habitan las zonas con déficit de humedad, ya que al perderse el suelo la retención de agua que una vez era almacenada por los horizontes edáficos hoy corre libremente por la superficie del suelo hasta los cuerpos de agua.

## CONCLUSIONES

- Las obras construidas conforman una infraestructura adecuada para la conservación, restauración de suelos y captación de agua de lluvia en zonas con déficit de humedad y problemas de degradación de los suelos.
- La aplicación de este sistema de medidas presenta resultados preliminares que pueden ser aplicados en el entorno de humedales como la presa Valsequillo en el estado de Puebla, puede incrementar la vida útil de los cuerpos de agua al disminuir el azolve.
- Aplicar esta investigación en el entorno de la presa Valsequillo, favorece en lo social el incremento de empleo y en lo ambiental a la disminución del deterioro y la recuperación de los recursos naturales.
- El Sector de Referencia sobre MST, Restauración y Captación de Agua debe ser considerado como un área de capacitación o referencia en el manejo, cuidado de los suelos y la captación de agua de lluvia.
- Debe ser considerado como un proyecto de investigación dirigido a incrementar la vida útil de la presa Valsequillo en lo ambiental y en lo social a dar empleo temporal para mejorar las condiciones de vida de la población rural.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera-Peña, R. y Jalón de Torbay, A. 2018. Reforestación con especies forestales nativas para la conservación y protección de los recursos hídricos, provincia de Esmeraldas, Ecuador. *Revista DELOS Desarrollo Local Sostenible*, 11(32): 1-13.
- FAO. 1994. Aspectos claves de las estrategias para el desarrollo sostenible de las tierras áridas. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma, Italia, 61 p.
- Fernández-Christlieb, F. 2014. El nacimiento del concepto de paisaje y su contraste en dos ámbitos culturales. El viejo y el nuevo mundo. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. [Consultado el 30 de abril de 2021]. Disponible en: <http://www.igeograf.unam.mx/sigg/cultural/vista/archivos/publicacion/1449478960elanacimientoadelaconceptoapdf.pdf>
- Machado-Guevara, A.O., Rajadel-Acosta, O.N. y Ponce-Rancel, L. 2015. Manejo sostenible de tierras: Evaluación de los procesos degradativos de la Unidad Básica de Producción Cooperativa La Josefa. *Revista Científica Agroecosistemas*, 3(2): 1-12.

## PROPUESTA DE VALOR

- La investigación que se realiza desde hace 4 años en el Ecocampus BUAP de Valsequillo presenta resultados sobre la captura de suelos que antes eran arrastrados hacia la presa y hoy no son causa del azolve de este cuerpo de agua. Por otra parte, la cantidad de agua de lluvia que se puede almacenar con la infraestructura montada facilita su uso para la agricultura, uso doméstico y animal.
- Acometer un proyecto en torno a la presa Valsequillo, aplicando esta experiencia de 4 años de investigación, garantiza, en lo ambiental, alargar la vida útil de la presa. En lo económico, elevar el nivel de vida de la comunidad, pues se crearán empleos temporales para el montaje la infraestructura necesaria (obras de conservación de suelos, captura de agua de lluvia y reforestación). En lo social eleva el nivel de vida de la población y en solo 10 años se transforma el entorno a la presa y se convierte, sin lugar a dudas, en un referente en el manejo de humedales y en un centro de capacitación.

### PROYECTO RESUMIDO

#### RESTAURACIÓN AMBIENTAL Y SOCIAL DEL ENTORNO A LA PRESA VALSEQUILLO. PUEBLA

#### OBJETIVO PRINCIPAL

Restaurar el entorno original a la presa Vasquillo, incrementar la vida útil de la presa y convertir este humedal en un centro de capacitación y referente en el manejo de humedales.

#### INSTITUCIONES COOPERANTES

Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.  
Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros, Puebla.  
Red temática de “Gestión de la Calidad y Disponibilidad del Agua.

#### EMPLEO Y CAPACITACIONES

Constituir una fuente de empleo permanente, que en pocos años sea autosustentable y genere recursos a través de producciones agropecuarias y de capacitación.

# Instalación de Humedales Artificiales para el tratamiento y reúso de aguas residuales en zonas semiáridas de México.

Dr. Aldo Antonio Castañeda Villanueva  
Universidad de Guadalajara, México.

## Resumen

Actualmente más del 65% de las aguas residuales generadas en nuestro país no reciben ningún tipo de tratamiento y son descargadas a cuerpos de aguas superficiales y/o subterráneos provocando su continua contaminación. Por otra parte, existen tratamientos alternativos no convencionales como los Humedales Artificiales (HA) que a pesar de requerir de ciertas condiciones de temperatura, humedad y tiempo de retención hidráulica, han demostrado que, con bajos costos de instalación, operación y mantenimiento, son una opción sustentable para la remoción de carga orgánica y contaminantes presentes en las aguas residuales domésticas, así mismo presentan una amplia adaptabilidad ya que se construyen con plantas típicas de la región donde se instalan como las macrófitas, comunes en las regiones semiáridas del occidente y norte de nuestro país. La adecuada promoción e instalación de estos sistemas naturales contribuye a la reducción de la contaminación y la conservación de diversos cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

## Introducción

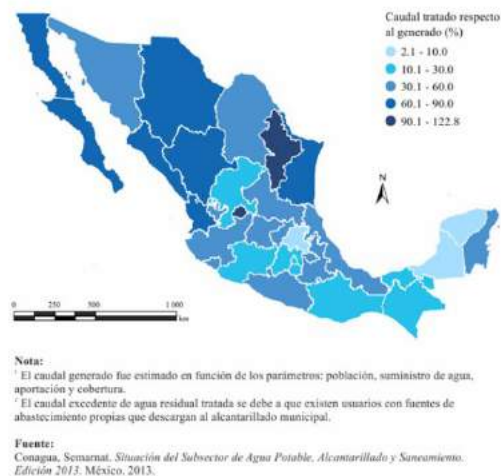
La descarga de aguas residuales domésticas, industriales, agrícolas y pecuarias sin tratamiento provoca la contaminación de los cuerpos de agua receptores disminuyendo la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, poniendo en riesgo la salud de la población y la integridad de los ecosistemas, así mismo la descarga de aguas residuales de origen urbano proviene de viviendas, edificios públicos y de la escorrentía urbana que se colecta en el drenaje, de entre sus principales contaminantes encontramos: nitrógeno y fósforo, compuestos orgánicos, bacterias coliformes fecales, materia orgánica (Jiménez y col., 2010).



Figura 1: Generación de aguas residuales por estado en la república mexicana (2012).

Durante el año 2012, en nuestro país los centros urbanos descargaron más de 230 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales (figura 1), para la remoción de los contaminantes en las aguas residuales municipales existen diversos procesos convencionales de tratamiento los más comunes son: lodos activados, lagunas de estabilización, lagunas aireadas, filtros biológicos y reactores aeróbicos, en ese año

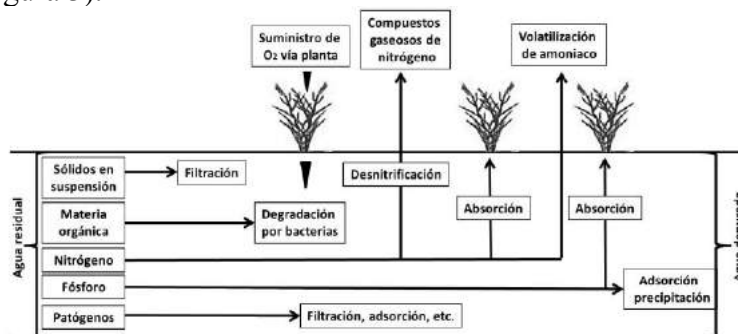
solo el 43.4% de las aguas residuales municipal recibieron algún tipo de tratamiento, siendo los más comunes las lagunas de estabilización y lodos activados (figura 2).



**Figura 2:** Caudal tratado en referencia al generado por cada estado (2012).

En la actualidad las zonas semiáridas de nuestro país se encuentran principalmente en los estados del altiplano en el norte-occidente en los estados de: San Luis Potosí, Zacatecas, Sinaloa, Baja California, Sonora, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Durango y Chihuahua.

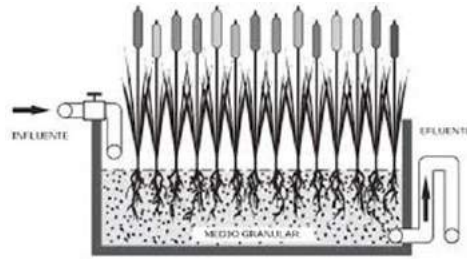
Técnicamente los HA son sistemas integrados y complejos donde se verifican interacciones entre el agua, las plantas, los microorganismos, la energía solar, el sustrato y el aire, con la finalidad de mejorar la calidad del agua residual y proveer la conservación medioambiental, su funcionamiento se apoya principalmente en tres principios básicos: 1) la actividad bioquímica de los microorganismos, 2) el aporte de oxígeno a través de las plantas durante el día y, 3) el soporte físico de un lecho inerte para el desarrollo de los rizomas de las plantas, además de operar como material filtrante (figura 3).



**Figura 3:** Proceso de depuración en los humedales artificiales.

Los HA al igual que los naturales pueden reducir una amplia gama de contaminantes del agua tales como: sólidos en suspensión, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), nutrientes, metales, patógenos y otros productos químicos (Castañeda y Flores, 2013). En la figura 4 se puede apreciar el esquema de un HA de tipo sub-superficial con flujo horizontal.





**Figura 4:** Humedal Artificial tipo sub-superficial de flujo horizontal.

### **Instalación de HA**

Las dimensiones generales y específicas del HA dependen principalmente de la cantidad de agua residual a tratar y el contenido de contaminantes, es muy común elegir a la DBO o la DQO como el parámetro de diseño (Yocum, 2019).

El tipo de HA para aguas domésticas en poblaciones rurales en regiones semiáridas del centro-occidente de México pueden ser sub-superficial con flujo horizontal, en condiciones normales un m<sup>3</sup> de HA puede tratar aproximadamente 135 litros de las aguas residuales domésticas (Jenkins, 2005), y para las zonas rurales semiáridas del país se requiere de 4 a 6 m<sup>2</sup> de HA por habitante.

Los modelos para el diseño de HA más empleados son los de: a) Reed, b) Crites and Tchobanoglous y c) Kadleck y Knight, estos se basan en los principios de Darcy a flujo laminar tipo tapón, estos modelos consideran básicamente: la concentración del contaminante a la entrada y salida, el tamaño, porosidad, profundidad y conductividad hidráulica del sustrato y la temperatura promedio del lugar donde se instalara el HA, los resultados que proporcionan son: Área superficial (ancho y largo) del HA, así como el tiempo de retención hidráulico teórico (Castañeda y col., 2018).

Regularmente los sistemas basados en HA incluyen un pre-tratamiento (desarenador gravitacional), el HA y un pos-tratamiento para el control bacteriano (laguna de oxidación, radiación solar, laberinto de oxidación, entre otros), una vez estimado el tamaño del HA para las necesidades específicas, las principales consideraciones para su instalación son, de manera sintética las siguientes:

- 1) Identificar la ubicación más adecuada para el sistema de tratamiento: definiendo el pre-tratamiento, el humedal y el pos-tratamiento, aprovechando la corriente principal de las aguas residuales, preferentemente mediante la acción de la gravedad.
- 2) Realizar pruebas de mecánica de suelos para verificar la permeabilidad del terreno, en caso de ser necesario utilizar geo-membrana u otro material que asegure al menos un 80% de impermeabilidad.
- 3) Para el humedal graduar el fondo de la excavación para que tenga una pendiente del 0.5 al 1% en terminados (1 a 5° de inclinación).
- 4) Instalar la tubería necesaria para asegurar un flujo tapón en todo momento, así como los accesorios (válvula y/o cuello de ganso) en la parte más profunda para mantener el nivel hidrodinámico adecuado de operación y motivar el crecimiento de las raíces de las plantas.
- 5) Colocar el sustrato seleccionado: el tamaño de la grava en los primeros 50 cm de entrada y los últimos 50 cm a la salida debe ser de 5 cm de diámetro, para disminuir las obstrucciones, el resto del sustrato deberá ser de entre 0.5 y 3 cm, con profundidad efectiva según los cálculos del diseño (40 a 80 cm).
- 6) Colectar y trasplantar los especímenes de macrófitas incluyendo hojas, tallo de 20 a 30 cm, raíces y retoños; la raíz debe ser colocada 5 cm debajo del sustrato. Las aneas deberán

- ser colocadas con una distancia de 1 metro entre cada planta; los carrizos, juncos, y espadañas pueden ser plantadas a 15 cm de distancia (Delgadillo y col., 2010).
- 7) Colocar una capa de tierra fértil de 5 cm de espesor sobre todo el área del humedal con planta para promover una zona de raíces consistente, bajando el nivel de agua gradualmente para motivar que las raíces crezcan a mayor profundidad.
  - 8) Saturar la celda del humedal con agua hasta 2 cm menos que la superficie, permitiendo que se evapore lentamente, manteniendo el suelo húmedo durante todo el período de propagación, que dura aproximadamente de 2 a 3 meses.
  - 9) Una vez que la vegetación se haya establecido, se debe ajustar el nivel hidrodinámico para propiciar la penetración más profunda de raíz de la planta a través del sustrato, el mayor beneficio del humedal se obtendrá cuando el 80% de la profundidad del sustrato este cubierto por la raíz de las plantas.
  - 10) Al salir el agua del humedal debe pasar a través del pos-tratamiento en el cual se realiza principalmente el control micro-orgánico mediante la luz solar u otro medio, es necesario realizar análisis periódicos tanto del agua de entrada como de salida sobre todo cuando esta última se reutiliza, por ejemplo, para el riego de cultivos.

## **Resultados**

Al evaluar periódicamente más de 10 HA, en los últimos 15 años, se ha evidenciado que los más comunes en las zonas rurales del centro-occidente de México son del tipo sub-superficial de flujo horizontal y mixto, cuantificando contaminantes a la entrada y salida se observan reducciones significativas, desde el 45 al 95% en parámetros como: DQO/DBO, Nitrógeno total, Fósforo total, Sólidos Suspendidos Totales, Conductividad Específica, Organismo Coliformes Totales, entre otros. En casi el 75% de los casos estos parámetros se encuentran dentro de los límites máximos permisibles contemplados en la normatividad oficial vigente referente a aguas tratadas y aguas tratadas para su reúso.

En comparación a los sistemas convencionales para el tratamiento de aguas residuales, los HA presentan menores costos de instalación, operación y mantenimiento, no obstante, estos requieren de mayores extensiones de terreno, mayor tiempo de tratamiento y condiciones climatológicas adecuadas.

## **Reflexiones finales**

Una alternativa sustentable y accesible para muchas poblaciones rurales en el saneamiento y reúso de sus aguas residuales domésticas es la instalación y operación de HA's, los cuales pueden ser promovidos desde las instituciones oficiales como: CONAGUA, SEMARNAT, SADER, y SEDATU, con el apoyo técnico de entidades académicas y de investigación como: CONACyT, IMTA, UdeG, UNAM, entre otras. Por tanto, dentro de la búsqueda de soluciones permanentes para la sustentabilidad hídrica de nuestro país, una tarea primordial en el compromiso de la Honorable Cámara de Diputados consiste en cristalizar esfuerzos, voluntades y visiones en sistemas como los HA's, coordinando las acciones legislativas tanto para conjuntar a los actores (poblaciones rurales, gobiernos municipales, instancias estatales y asesores técnicos), bajo un adecuado marco jurídico que permita, además de la promoción e incentivación de estos tratamientos, la gestión de recursos para su instalación, generando condiciones normativas que favorezcan la transparencia en la supervisión tanto en su operación, como en la optimización y mantenimiento, que trascienda a los periodos de las administraciones públicas.

En concreto, la propuesta es que desde la H Cámara de Diputados se promueva e incentive la instalación, operación y mantenimiento de sistema para el tratamiento y reúso de aguas residuales

domésticas con HA, en poblaciones rurales de escasos recursos y en zonas semiáridas del país, coordinando acciones para conjuntar a los gobiernos municipales con asesores técnicos (centros de investigación, universidades) y fuentes de financiamiento (gobierno estatal y federal), estableciendo un marco jurídico que asegure el buen funcionamiento de estos tratamientos durante muchos años (superando a los periodos de los gobiernos municipales y estatales), en este sentido nuestra universidad se encuentra con la mejor disposición para coadyuvar con el asesoramiento técnico y capacitación, así mismo y en lo particular sus atentos servidores para compartir experiencias tanto en el diseño como en la instalación y operación de HA's.

Acciones encaminadas a reducir de la contaminación de nuestros cuerpos de agua y conservación de los recursos naturales como el agua, son de vital importancia para el México de hoy y del mañana.

### **Referencias**

Castañeda, A., Flores, H. y Sahagún, R. (2018). Comparación de tres modelos para el diseño de un humedal artificial para el tratamiento de las aguas residuales de poblaciones rurales en Los Altos de Jalisco”, en “Las ciencias en los estudios del agua; viejos desafíos sociales y nuevos retos tecnológicos”. Editorial Universidad de Guadalajara, ISBN: 9786075473222. [en línea] <https://studylib.es/doc/7255957/%E2%80%9CComparaci%C3%B3n-de-tres-modelos-para-el-dise%C3%B1o-de-un-humedal>

Castañeda, A. y Flores, H. (2013). Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante plantas macrófitas típicas en Los Altos de Jalisco, México. En *Tecnología y Sociedad*. Año 3, número 5. México.

Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. y Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia.

Comisión Nacional del Agua (Conagua/Semarnat), (2014). Estadísticas del Agua en México. Edición 2013. México.

Jenkins, J. (2005). *Humanure Handbook*. Chelsea Green Publishing, USA.

Jiménez, C., Durán, J. y Méndez, J. (2010). Calidad del agua. En: Jiménez C., M.L. Torregrosa y L. Aboites (Eds.). *El Agua en México: cauces y encauces*. AMC-Conagua. México.

Yocum, D. (2019). *Manual de Diseño: Humedal Construido para el Tratamiento de las Aguas Grises por Biofiltración*. Bren School of Environmental Science and Management, University of California, Santa Barbara. USA.

# Humedal artificial para tratamiento de aguas residuales del Instituto Tecnológico de Boca del Río: escalamiento

Fabiola Lango Reynoso, María del Refugio Castañeda Chávez  
Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Boca del Río  
[fabiolalango@bdelrio.tecnm.mx](mailto:fabiolalango@bdelrio.tecnm.mx)  
[mariacastaneda@bdelrio.tecnm.mx](mailto:mariacastaneda@bdelrio.tecnm.mx)

## Introducción

De acuerdo a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), durante el año 2018a, en México, se trataron únicamente el 63% de las aguas residuales, debido a que la infraestructura es insuficiente y la existente no opera al 100% de su capacidad. Aunque el número de plantas de tratamiento convencionales se ha incrementado año con año, desde el 2005, gracias a programas del gobierno federal quien ha mostrado interés por los temas ambientales (Hernández-Salazar *et al.*, 2018). Para lograr la reducción de contaminantes se requiere de tratamientos específicos y una fuerte inversión económica, ya que las plantas de tratamiento convencionales generan altos costos en su construcción, operación y mantenimiento (Carbajal y González, 2012). Conforme a Hernández-Salazar *et al.*, (2018), es importante proponer tecnologías, de bajo costo y amigables con el medio ambiente para el tratamiento de aguas en México.

Una alternativa son los humedales artificiales (HA), se consideran una eco-tecnología que logra eficientemente la degradación de contaminantes de las aguas residuales a través de mecanismos que imitan los procesos naturales, los cuales no requieren de aditivos químicos ni de energía externa (CONAGUA, 2015). Se denomina como sistemas diseñados y construidos por el hombre, con la finalidad de mejorar la calidad del agua de la manera más eficiente. Los HA son sistemas complejos, donde se interrelaciona el agua, las plantas, el sustrato y los microorganismos (Solis-Silva *et al.*, 2016).

El Instituto Tecnológico del Mar 01 (ITMAR 01) dependiente de la DGECyTM, se estableció en 1982 en el margen derecho a dos kilómetros de la desembocadura del río Jamapa, Veracruz. Dentro de la infraestructura de esta nueva institución no consideró un sistema para el tratamiento de aguas residuales. En el año 2019, el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Boca del Río (ITBOCA antes ITMAR 01), después de 38 años de verter directamente su agua residuales al río Jamapa, de acuerdo a estudios básicos de la eficiencia de diferentes sustratos de la región, se realizó el diseño y escalamiento real del un humedal artificial de flujo subsuperficial. Se incorporó de acuerdo a técnicas arquitectónicas el diseño, con la finalidad de embellecer el espacio, lograr su incorporación al paisaje, con el uso de sustratos alternativos como tereftalato de polietileno (PET) y material calacario que fueron recolectados como producto de desechos que abundan en la región. Se integraron 13 especies de plantas ornamentales tropicales, con la finalidad de tener un sistema de tratamiento de aguas residuales que cumpla con la normatividad vigente, de bajo costo y que ofrezca beneficios adicionales como son: embellecimiento, espacios de experimentación, donación de plantas, capacitación a internos y externos y vinculación con la sociedad.

## Material y Métodos

El presente estudio se llevó a cabo de enero a diciembre 2019 en el Instituto Tecnológico de Boca del Río (ITBOCA), con dirección en carretera Veracruz-Córdoba Km. 12, en la ciudad de Boca del Río, Veracruz; colinda al norte con el río Jamapa, el cual desemboca en el Golfo de México (Figura 1). El ITBOCA cuenta con una superficie aproximada de 7 ha, distribuidas en diferentes áreas, destinadas a actividades administrativas, atención a estudiantes, docencia e investigación. Según el informe de rendición de cuentas 2013-2018 del ITBOCA, la matrícula total del año 2018 fue de 2,659 estudiantes más 341 docentes, administrativos y personal de servicio. El proyecto consistió en cinco fases: 1) Implementación del humedal: De acuerdo al manual de CONAGUA (2015 y 2018b) y Alarcón-Herrera *et al.* (2018) junto con de aplicación técnicas arquitectónicas se realizó el diseño y la construcción del humedal; 2) Selección de sustrato: Se divide en material de uso común y materiales alternativos, los cuales fueron seleccionados por sus características físicas, químicas y disponibilidad en la zona como material de desecho; 3) Selección de vegetación: Se utilizaron plantas ornamentales y fueron seleccionadas según su eficiencia, adaptación, estética, disponibilidad y valor comercial; 4) Validación de la eficiencia de tratamiento de aguas residuales con base a la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997; y 5) Evaluación financiera en comparación a otros sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales.

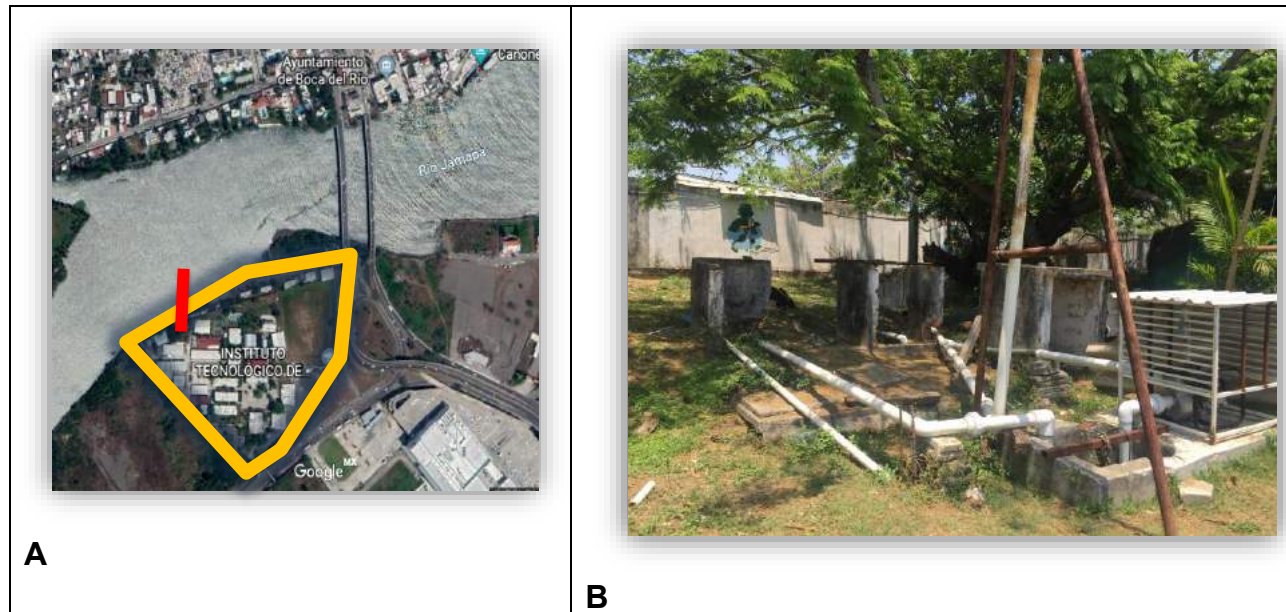


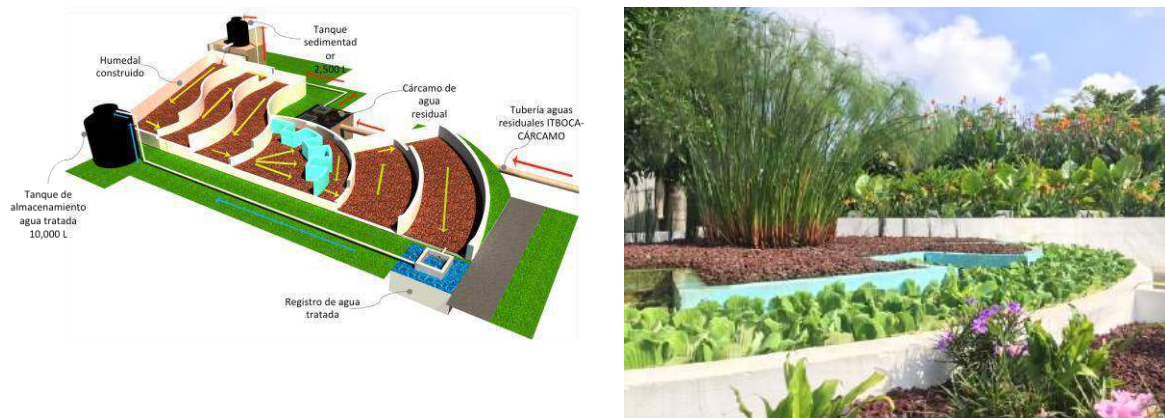
Figura 1. A) Ubicación del Humedal Artificial para tratamiento de aguas residuales del Instituto Tecnológico de Boca del Río. B) Zona antigua del cártamo.

## Resultados

Se realizó el escalamiento de acuerdo al diseño arquitectónico seleccionado de un Humedal artificial para tratamiento de aguas residuales del ITBoca (Figura 2) único e innovador; en su diseño se integro el concepto del logo del Tecnológico Nacional de



México, en su estructura esta compuesto de 7 celdas de tramientos que funcionan por gravedad; con un caudal de tratamiento por día de 31.50 m<sup>3</sup>, en una superficie de construcción de 157 m<sup>2</sup> y superficie de tratamiento 60 m<sup>3</sup>, trata agua residual de una población de 3000 personas. Al emplear sustratos alternativos impacto en la reducción de costos y el beneficio ambiental de reutilizar materiales clasificados de desechos o basura calacaria. El uso de plantas ornamentales tropicales generó un paisaje armónico, y es hábitat de aves e insectos; destacan las especies *Ruellia brittoniana* y *Pennisetum setaceum*, plantas que nunca se habían utilizado en HA, las cuales se adaptaron a las condiciones de este sistema y fue evidente su crecimiento y reproducción. Los resultados de la fitorremediación mostraron una remoción importante de turbidez (63%), DBO<sub>5</sub> (15%), DQO (15%) y nutrientes como fósforo y nitrógeno inorgánico, por encima del 70%. Los parametros monitoreados demuestran que el humedal artificial cumple con los requerimientos que marca la NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, y la NOM- SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. El costo de este humedal artificial fue de \$1,850,000.00. M.N. A la fecha tiene 1.6 años de operación y continua funcionando en el tratamiento de las aguas residuales, su matenimineto se basa en la limpieza y arreglo de las plantas. Se ha realizado dos donaciones de plantas producto de la cosecha de este humedal.



**Figura 2. Humedal Artificial para tratamiento de aguas residuales del ITBOCA.**

### **Discusión**

El HA del ITBOCA mejoró las características visuales, físicas y anímicas del espacio. Tuvo una aceptación positiva entre la comunidad del instituto, ya que es visitado con regularidad por externos. La aplicación de técnicas arquitectónicas y el uso de plantas ornamentales permitió integrar diferentes formas, colores y texturas al diseño, resultando un jardín estético, armónico y emblemático para la institución. Alarcón-Herrera *et al.*, (2018) habla sobre el valor estético de estos sistemas; al integrar vegetación ornamental mejora la calidad visual del paisaje, aumenta la biodiversidad,



regula el clima, entre otro beneficio. Benassi (2012) la problemática actual, principalmente en zonas urbanizadas, sobre la degradación de la calidad visual y la baja calidad ambiental exige mejoras espaciales y estéticas a través del instrumento de diseño paisajístico. También contribuye en la mejora del microclima urbano, mitiga efectos negativos para el hombre como las “islas de calor” producidas por los materiales de construcción y falta de vegetación, impactando positivamente el contexto cultural, económico-social y ambiental. En los últimos años, los HA han resaltado por sus bajos costos de construcción, operación y mantenimiento en contraste con las tecnologías convencionales para el tratamiento de aguas residuales, como son las plantas de lodos activos que para tratar una capacidad similar a la del ITBoca tienen un costo en el mercado de 3 a 6 millones de pesos M.N. De acuerdo a Carbajal y González (2012), Wu *et al.*, (2015) y Alarcón-Herrera *et al.*, (2018) coinciden en que los sistemas de HC tiene potencial de explotación por sus bajos costos en implementación, se utilizan materiales económicos en la construcción y no requiere maquinaria sofisticada.

### **Conclusiones**

El Humedal Artificial para tratamiento de aguas residuales del ITBoca, es un sistema de tratamiento con un nivel de desarrollo de 8, que corresponde a su capacidad de madurez para su introducción al mercado. El desarrollo como producto tecnológico esta completo y evaluado, su manufacturabilidad es probada y validada para ambiente real. Este sistema puede servir para tratar agua residuales rurales, urbanas e industriales. Cumple con la normatividad vigente y soluciona el problema de contaminación de efluentes, bienes nacionales y contribuye al medio ambiente y al bienestar de la sociedad. Puede solucionar problemas para las dependencias en la toma de decisiones y adaptación de tecnología probada para CONAGUA, SEMARNAT, SAGARPA, Comisión de Ciencia y Tecnología de la H. Cámara de Diputados, así como Gobiernos estatales y municipales en todo el país.

### **Referencias**

- Alarcon-Herrera, M., Zurita-Martinez, F., Hadad, H., Garcia-Perez, A., Vidal, G., Maine, M., y Vera-Puerto, I. (2018). *Humedales de tratamiento: alternativa de tratamiento de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Carbajal, A., y González, M. (2012). *Propiedades y funciones biológicas del agua*. Universidad Complutense de Madrid, España.
- Comisión Nacional del agua. (2015). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: humedales artificiales*. Comisión Nacional del agua.
- Comisión Nacional del Agua. (2018a). *Estadísticas del agua en México, edición 2018*. Comisión Nacional del agua.
- Comisión Nacional del Agua. (2018b). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado. 4*. Comisión Nacional del Agua.
- Hernandez Salazar, A. B., Moreno Seceña, J. C., y Sandoval Herazo, L. C. (2018). Tratamiento de aguas residuales industriales en México: Una aproximación a su situación actual y retos por atender. *RINDERESU*, 2(1-2), 75-87.
- Solís Silva, R., López Ocaña, G., Bautista Margulis, R. G., Hernandez Barajas, R., y Romellón Cerino, M. J. (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.

## **Baño Seco Permapreta**

## **Dry Toilet Permapreta**

**Autor: Fernando San Esteban**

**Fernando San Esteban, [fsesteban@gmail.com](mailto:fsesteban@gmail.com)**

Palabras Claves: Baño, Seco, Permapreta

Keyword: Toilet, Dry, Pemapreta

### **Introducción**

A fines de 2015 la Asamblea General de las Naciones Unidas, a través de su resolución A/RES/70169, reconoce el derecho humano al saneamiento como derecho autónomo e independiente del derecho al agua.

Frente al crecimiento poblacional, la creciente contaminación de fuentes de agua y los bajos niveles de cobertura de saneamiento a nivel mundial, se requiere de soluciones innovadoras a los problemas generados por la materia fecal y la orina humana, tanto sea en lo ambiental como en lo económico.

El baño seco propone un acercamiento holístico hacia un saneamiento ecológico y económicamente prudente e interpreta las tendencias modernas en gestión cíclica de residuos, ya que está basado en el principio del reciclaje, a través del aprovechamiento y recuperación completa de todos los nutrientes de las heces, orina y otros efluentes domésticos para beneficio de la agricultura y la minimización de la contaminación del agua.

Su implementación a gran escala depende de decisiones políticas que apoyen esta tecnología y desarrollen canales para su implementación.

### **Descripción de la tecnología**

El término "baño seco" es un inodoro que opera sin el uso de agua para la descarga de los excrementos (orina y heces). En este sentido se diferencia entre sistemas con o sin separación de orina. En ambos casos los excrementos caen juntos o en forma separada en un recipiente.

La separación de orina es un punto muy importante, ya que la generación de olores se debe fundamentalmente a la unificación de estas corrientes.

El baño seco con separación de orina es un sistema que, desde fines de los 90, aparece como una alternativa viable a los pozos de letrina e inodoros con cadena en países en vías de desarrollo y desarrollados, respectivamente. Sin embargo, aún existen importantes barreras culturales (no así técnicas o sanitarias) que impiden una aceptación más universal de esta tecnología. Al día de hoy, los factores que operan contra la adopción de esta tecnología incluyen la falta de conocimiento por parte del público en general sobre la existencia de esta tecnología, la escasez de componentes prefabricados necesarios para la construcción de baños secos con separación de orina, y el bajo interés en el financiamiento de estos servicios de saneamiento.

Existen distintos tipos de baños secos con separación de orina, diferenciándose fundamentalmente en el tratamiento y manejo de la materia fecal. En todos los sistemas se busca:

- Reducción de sólidos volátiles y la estabilización de la materia orgánica
- Reducción de organismos patógenos.

### **Ventajas de los baños secos**

- Ahorro de agua: Los baños secos con separación de orina y uriniales secos no utilizan agua.
- La recolección de orina permite su posterior utilización como fertilizante
- Reducen costos de infraestructura de cloacas y plantas de tratamiento
- Evitan la dispersión de la contaminación bacteriológica.
- Eliminan el problema de la contaminación por nitrógeno de los cursos de agua.
- Facilitan el reuso de aguas grises

### **Desafíos de sistemas con separación de orina**

- Aceptación social entre usuarios/as
- Cooperación de usuarios/as
- Reutilización / Disposición de orina
- Tratamiento y disposición de heces.

### **Tipos de baños secos**

#### **Baños secos con separación de orina de doble cámara de deshidratación**

Estos baños apuntan a la deshidratación *in situ* de las heces, a través del uso alternado de dos cámaras de recepción de heces una al lado de la otra. Cuando la primera se llena, se sella y se deja que el material repose. La interfaz del usuario (inodoro) se traslada a la segunda cámara. De esta forma, la operación correcta del sistema consiste de una cámara activa y otra inactiva. Por esta razón es importante calcular las dimensiones, de forma tal que ambas tarden entre seis y doce meses en llenarse y que descansen una igual cantidad de tiempo.

#### **Baños secos con separación de orina de simple cámara de deshidratación**

Estos están contruidos con una sola bóveda que contiene uno o más contenedores para recolectar el material fecal que se pueda remover rápidamente los materiales de la bóveda a tratar dejando la cámara lista para seguir activa y en uso. La mayoría de los escenarios de disposiciones finales de los baños de cámara simple contemplan un post tratamiento.

#### **Baños secos con separación de orina de cámara de compostaje**

En estos baños la materia fecal y papel higiénico usados caen en una cámara o contenedor grande y bien ventilado, instalados directamente debajo del inodoro. Si bien un inodoro con separación de orina simplificaría el manejo del lixiviado, un baño seco de compostaje puede también construirse sin que exista separación de orina. El proceso de compostaje requiere una determinada humedad y proporción carbón/nitrógeno para estimular la actividad microbiana que convierte la materia orgánica en compost. En consecuencia, el material orgánico –como los residuos de la cocina o jardín- pueden tirarse en la cámara de compostaje. Sólo el compost maduro, que se ve y huele como suelo rico o humus, debe ser removido de las cámaras. Es importante aclarar que el compostado de la materia fecal no tratada dará como resultado humus con presencia de patógenos.

### **Baño seco de humus de lombriz por flujo continuo Permapreta (R)**

La utilización de lombrices californianas aplicado a la transformación de residuos orgánicos para mejorar los suelos es un tema con muchos años de estudio, pero es relativamente nueva su investigación y uso en el campo del tratamiento de la materia fecal humana.

El baño seco de humus de lombriz por flujo continuo fue desarrollado desde septiembre de 1996 por el Instituto Argentino de Permacultura, en la Ecovilla Gaia, Navarro, Buenos Aires, Argentina, con el fin de resolver los problemas más conocidos de los baños secos, que limitaban la aceptación de estos sistema.

El diseño tuvo como objetivo lograr las mejores condiciones del desarrollo de *E. foetida* dentro de la pila de materia fecal para que las lombrices puedan tener el ambiente más conveniente para su desarrollo.

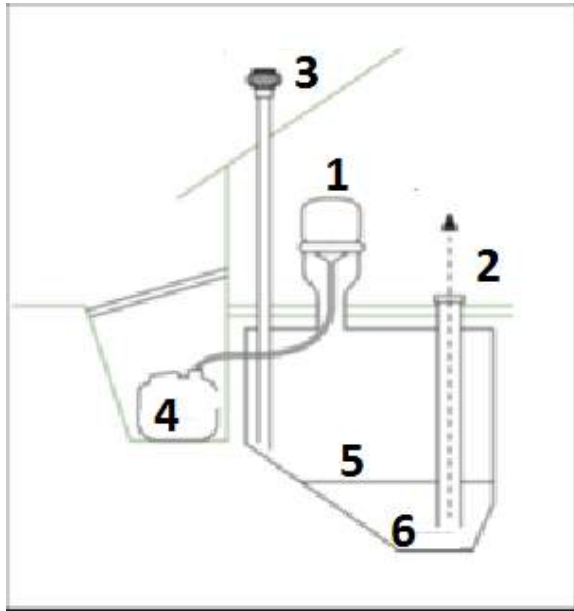
Para ello, el sistema Permapreta utiliza un sistema de doble malla para la separación de capas de sustrato y de humus y un sistema para mejorar la aireación. La operación y mantenimiento del sistema incluye el agregado de carbón pirólico, cultivo de microorganismos, factores de corrección de humedad y nivelación de la relación C/N.

Al carbón pirolítico posee una estructura aromática policíclica que es química y microbiológicamente estable y persiste en el ambiente por centurias. Con el tiempo, el carbón se oxida parcialmente, produciendo grupos carboxilos en los bordes de las cavidades del carbón. Estos grupos carboxilos son como una trampa para nutrientes en el suelo, y previenen que estos se pierdan allí. Los nutrientes atrapados en los microporos y grietas del carbón producen no solo los elementos necesarios para el crecimiento de las plantas, sino también alimento y un lugar seguro para protozoos y bacterias benéficas.

El cultivo del baño seco con microorganismos eficientes clasificados en Japón, provenientes de suelos naturales de todo el mundo, son una combinación de bacterias ácido lácticas, levaduras, bacterias fotosintéticas, actinomices y otras especies de microorganismos. Estos generan un proceso de ensilado láctico sumado al efecto de microorganismos como *Bacillus subtilis* que mejora la calidad del humus. Una de las ventajas de este sistema es que la lactofermentación trabaja de manera eficiente y en forma estable sin intercambio de aire y con un proceso inodoro.

Tanto el agregado de carbón pirolítico como el cultivo de microorganismos benéficos son estrategias ancestrales dentro de la cámara del baño que dinamizan los procesos de transformación, generando además un humus de alta calidad.

A continuación se muestra un esquema del sistema Permapreta



- 1 Inodoro con separación de orina
- 2 Acceso para extracción de humus
- 3 Sistema de ventilación
- 4 Recipiente para orina
- 5 Acumulación de heces en proceso
- 6 Acumulación de humus

## **Ventajas del baño seco con separación de orina de humus de lombriz por flujo continuo sobre los otros baños secos**

### **Volumen y estabilidad del residuo**

En relación al baño seco de doble cámara y al de simple cámara sin compostaje, el volumen y el trabajo de vaciado se reduce en forma importante. En las mediciones realizadas en un baño con *E. foetida*, el volumen se redujo en un 41% en relación a la materia seca sin tomar en cuenta los agregados de enmiendas requeridos en otros sistemas (GEeoff Hill, 2013), produciendo humus de PH neutro, maduro, con poco amoníaco libre y abundante cantidad de nitratos

### **Seguridad con patógenos**

En comparación con otros sistemas de compostaje de materia fecal, el uso de lombrices provee un mecanismo probado de reducción de patógenos. Las formas en que *E. foetida* destruye a los patógenos está basada en predación selectiva (Edward y Bohlen, 1996; Kumar y Shweta, 2011), destrucción mecánica por la acción del intestino, inhibición microbiana a través de los ácidos húmicos y colónicos y otras enzimas secretadas dentro del tracto digestivo, estimulación de microorganismos antagonistas, incluidos los géneros *Streptosporagium* y *pseudomonas* (Kumar y Shweta, 2011), e indirectamente por la estimulación de especies endémicas que compiten, antagonizan o destruyen patógenos (Edwards y Subler, 2011).

### **Accesibilidad y menor costo de infraestructura operación y mantenimiento.**

El diseño del sistema no requiere de accesos exteriores ni escaleras y lo hace apto para uso tanto en espacios abiertos como en edificios de departamentos y espacios públicos. Por la misma razón, el costo de infraestructura es mucho menor y los costos de operación y mantenimiento son hasta 10 veces menores que otros sistemas (GEeoff Hill, 2013).

## Conclusion

La tecnología de baño seco con humus de lombriz de flujo continuo Permapreta resulta un sistema sanitario de bajo costo, de gran eficiencia y mínimo costo operativo, con amplias ventajas sobre los baños secos analizados. Este diseño puede ser práctico tanto en el campo como en la ciudad, así como en diferentes tipos de espacios públicos.

## Bibliografía

Dr Gustavo Ramirez, Baño seco de humus de lombriz por flujo continuo, Publicación de Desarrollos Permaculturales N° 1, Mar 2016

Inti, Sistemas de Saneamiento Seco con Separación de Orina, Manual Técnico, May 2016.

Geoff Hill, An Evaluation of Waterless Human Waste Management Systems at North American Public Remote Sites; University of British Columbia. GEOC 699 September 16, 2013.

Kumar, R. and Shweta, 2011. Removal of Pathogens During Vermi-Stabilization. Journal of Environmental Science and Technology, 4 (6), 621-629.

Edwards, C.A. And Bohlen P.J. (1996) Biology and Ecology of Earth Worms. Chapman and Hall, London.

Edwards, C.A., and Subler, S. (2011). Human Pathogen Reduction During Vermicomposting. In Edwards, C.A., Arancon, N.Q., Sherman, R., (EDS). Vermiculture Technology (PP. 249-261). CRC Press Taylor and Francis Group, Florida.



## **Propuesta de Valor**

Se adjuntan datos de la Asociación Gaia desarrolladores del sistema

Mail: [info@gaia.org.ar](mailto:info@gaia.org.ar)

Te: (+54) 11 3963-4901

Contacto: Nicolas Gassman

## **Proyectos de Investigación y Capacitaciones**

- Desarrollar legislación que permita el uso de la orina como fertilizante o el uso de fertilizantes de origen humano.
- Elaboración de un Programa de Divulgación del sistema Permapreta con instalaciones en espacios públicos de carácter demostrativo para concientizar a la población y que permita a la vez realizar estudios de los parámetros del residuo y que incluya un sistema de huerta urbana con aplicación del humus y la orina extraídos del sistema.
- -Subsidiar con aportes no retornables o reducción de impuestos instalaciones que utilicen este tipo de tecnología.
- -Promover la instalación de este tipo de tecnología en bares y/o espacios públicos generando un servicio de recolección de heces y orina.

# Sistemas de biofiltros funcionalizados con *M. oleífera* para el tratamiento de agua residual en la Zona Chinampera

Nury Infante<sup>1</sup>, Refugio Rodríguez<sup>1</sup>, Jordi Morató<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Biotechnology and Bioengineering, Center for Research and Advanced Studies of the National Polytechnic Institute, México City <sup>2</sup>UNESCO Chair on Sustainability and Health and Environmental Microbiology Laboratory, Universitat Politècnica de Catalunya-BarcelonaTech, Edifici Gaia, Pg. Ernest Lluch/Rambla Sant Nebridi, Terrassa, 08222, SPAIN.

**Introducción:** El sistema agrohidrológico practicado durante muchas generaciones y desarrollado por los aztecas “Las chinampas en México” brindan alimento y empleo a los habitantes de la región; además de considerarse como una forma de preservación de los recursos naturales en el sector [1]. Sin embargo, la calidad del agua de la zona se encuentra severamente afectada y deteriorada debido en gran medida a las actividades antropogénicas que han provocado un incremento significativo en las concentraciones de diversos contaminantes ambientales generando impacto negativo tanto en el medio ambiente como en salud pública [2]. Una de las principales fuentes de contaminación en las chinampas es el vertimiento de aproximadamente 1200 descargas de agua residual proveniente de las zonas habitacional aledañas a los canales [3]. Adicionalmente, el uso del estiércol sin un tratamiento previo que suelen ir directamente al cuerpo de agua utilizada para el riego de los cultivos [4]. Lo anterior representa una amenaza a la salud y a la seguridad alimentaria en beneficio de la población de la Ciudad de México [5]. Entre los principales riesgos para la salud se encuentran: la infección con bacterias patógenas, principalmente *E. coli* por ser indicadora de contaminación fecal [6]; al respecto en un estudio realizado en 30 puntos de la zona canalera evidenciaron la presencia de *E. coli* [7]. La combinación de tecnologías aplicadas es esencial como tratamiento de aguas residuales para obtener productos agrícolas de calidad y para brindar un tratamiento adicional de descarga segura al medio ambiente. La biofiltración y el sistema hidropónico Nutrient film treatment (NFT) son consideradas como unas de las alternativas para la eliminación de contaminantes y patógenos implicando una combinación de procesos físico-químicos y biológicos [8]. Así mismo, la aplicación de coagulantes naturales como extractos de semillas de plantas, ha demostrado que reduce y / o neutraliza las cargas de coloides y elimina los patógenos. Por tal razón, se ha establecido el proceso de funcionalización para retener la proteína activa con capacidad antimicrobiana y clarificadora de los extractos de semillas de *Moringa oleífera* (*MoSe*) sobre materiales porosos potencializando la remoción de contaminantes con la inserción de grupos funcionales que contienen compuestos fitoquímicos con propiedades antibacterianas sobre el soporte poroso como el corcho aumentando el potencial de inhibición y reduciendo eficazmente el crecimiento de *E. coli* con un porcentaje >99.99% [9]. Por este motivo, en el presente estudio se evaluó el efecto de funcionalización del extracto de las semillas de *MoSe* sobre biofiltros de corcho (corcho-*f*) acoplado en un sistema hidropónico NFT como tratamiento terciario para remover *E. coli* del agua residual de la Zona Chinampera.

**Metodología: Caracterización del agua, identificación molecular y prueba de viabilidad de *E. coli*** La caracterización del agua residual del canal se realizó mediante la evaluación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de acuerdo con los métodos estándar [10]. La identificación molecular de una cepa presuntiva de *E. coli* se realizó mediante la secuenciación del gen 16s ARNr y el gen *LacZ* se seleccionó para su amplificación y cuantificación por

expresar la enzima ( $\beta$ -D-galactosidasa) característico de la bacteria. Así mismo, se utilizó la prueba vqPCR con propidio monoazida (PMA) para evaluar el efecto de funcionalización del corcho con los extractos de *MoSe* sobre la viabilidad de *E. coli* [11,12]

**Funcionalización de los soportes, sistema de biofiltros y sistema de hidroponía NFT:** Las pruebas de funcionalización y biofiltración se realizaron de acuerdo con los trabajos de Francesko et al. [13]. El biofiltro compuesto con soportes inorgánicos y carrizos de la región fue utilizado como tratamiento secundario acoplado al tratamiento terciario para la purificación del agua [3]. El sistema hidropónico NFT se utilizó por ser un sistema cerrado donde comprende tres secciones, la primera sección corresponde a un contenedor donde se dispone el agua tratada proveniente del biofiltro secundario permitiendo el aislamiento de sólidos disueltos, la segunda sección es un canal cubierto de material PVC con grava, este sistema presenta una longitud de 12 metros en donde se cultivaron plantas de lechuga (*Latucca Sativa*). Finalmente, la sección terciaria se adaptaron los filtros de corcho funcionalizados con *MoSe* [9]. En cada sección se cuantificó de *E. coli* mediante la técnica microgota en el medio LB y cromogénico EMB.



**Figura 1.** Sistema de biofiltros y sistema de hidroponía NFT. Biofiltro secundario (a); sistema de filtración con grava (b); cultivo de adsorción de *E. coli* (c); sistema de filtración de corcho funcionalizado con *MoSe* (d).

**Resultados y Discusión:** Según el análisis molecular de la secuencia del fragmento ribosómico 16S de la cepa, hubo un 99% de similitud con la secuencia de la cepa NBRC 102203 (n° de acceso: NR\_114042.1) de la especie *E. coli* [14]. Así mismo, la amplificación del gen *LacZ* fue consistente para la expresión de la enzima ( $\beta$ -D-galactosidasa) con un peso molecular 142 pb reportado en el estudio de Foulds et al. [10], garantizando la presencia de *E. coli*, esta cepa es de gran importancia clínica comprometiendo el sistema del tracto urinario, siendo resistente a diferentes antibióticos (ampicilina, eritromicina y vancomicina).

En cuanto a los parámetros fisicoquímicos que presentaron un mayor efecto con el uso de los sistemas fueron: el pH, los sólidos disueltos totales, el oxígeno disuelto y la disminución de *E. coli* como se observa en la tabla 1.

**Tabla 1.** Evaluación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de la Chinampa-Granja Aurora y seguimiento del sistema durante marzo del 2020.

Parámetro	Agua canal	Biofiltro	Sistema NFT	Corcho	Corcho-f	*Límites permisibles
pH	7.79	7.66	9.11	7.28	7.6	7.0-8.0
OD ( $\frac{mg}{L}$ )	0.85	3.01	2.87	1.86	1.87	>6

<b>CD</b> ( $\frac{\mu\text{S}}{\text{cm}}$ )	1115	1191	2708	1832	1972	0-300
<b>SDT</b> ( $\frac{\text{mg}}{\text{L}}$ )	567	570	1354	916	986	<1000
<b><i>E. coli</i></b> (UFC/mL)	2.5x10 <sup>1</sup>	1.5x10 <sup>1</sup>	3x10 <sup>1</sup>	<10 <sup>1</sup>	<10 <sup>1</sup>	1x10 <sup>2</sup> Ausencia

\*Límites permisibles para uso en riego agrícola de acuerdo con la norma (NOM-001-SEMARNAT-1996). Oxígeno disuelto (OD); Conductividad (CD); sólidos disueltos totales (SDT).

La inhibición de la bacteria con los biofiltros de corcho pudo deberse a sus moléculas de lignina, suberina y taninos que presentan características antimicrobianas [13]. Por lo tanto, para evidenciar el efecto de la funcionalización del extracto de *MoSe* se realizó la prueba de viabilidad vqPCR de *E. coli* como se observa en la tabla 2. Los estudios realizados por Infante-González et al. [9], confirmó la disminución de copias del gen *LacZ* y el porcentaje de viabilidad debido al mejoramiento de inhibición de *E. coli* potencializando la actividad antimicrobiana junto con algunos componentes del corcho que generan una sinergia y un mayor efecto de quimiosorción.

**Tabla 2.** Evaluación cuantitativa del gen *LacZ* con PMA mediante vqPCR

Tratamiento	Tiempo 0	Tiempo 6	*vqPCR (%)
CP	1.26X10 <sup>7</sup>	8.83X10 <sup>5</sup>	7.03
R1P	4.16X10 <sup>6</sup>	1.03X10 <sup>3</sup>	0.024
R2P	3.45X10 <sup>6</sup>	1.80X10 <sup>2</sup>	0.005
CLBP	2.24X10 <sup>7</sup>	5.45X10 <sup>6</sup>	16.40

Control de biofiltro sin corcho-*f* con PMA (CP), Replicado de biofiltro con Cork-*f* y PMA (R1P), Control de bacterias vivas con PMA (CLBP). Los datos representan la media de dos experimentos independientes realizados por duplicado. \*Los resultados se presentan como porcentaje de viabilidad.

Finalmente, se, cuantificó *E. coli* en la planta, evidenciando una alta inhibición bacteriana en el medio confirmativo EMB en las raíces a diferencia de las bacterias cultivadas en el medio LB. Estos resultados concuerdan con los estudios realizados por Ottoson et al. [15], quien reportó la inhibición de microorganismos patógenos en el sistema radicular por procesos de absorción y adsorción de la planta. Adicionalmente, la remoción de microorganismos puede deberse por antibiosis donde involucra la interacción biológica generando la reducción de su población [16].

**Tabla 3.** Cuantificación de *E. coli* en cultivo de lechuga del sistema hidropónico

<i>Latucca Sativa</i>		<i>E. coli</i> (UFC/mL)					
Muestra		Raíz		Hojas		Esponja Fenólica	
	Peso (g)	LB	EMB	LB	EMB	LB	EMB
1	9.9	36x10 <sup>2</sup>	<10 <sup>1</sup>	21.66x10 <sup>2</sup>	<10 <sup>1</sup>	50x10 <sup>2</sup>	30
2	3.1	17x10 <sup>1</sup>	<10 <sup>1</sup>	25x10 <sup>3</sup>	<10 <sup>1</sup>	21x10 <sup>1</sup>	<10 <sup>1</sup>
3	4.5	13x10 <sup>3</sup>	<10 <sup>1</sup>	50 x10 <sup>1</sup>	<10 <sup>1</sup>	32x10 <sup>1</sup>	<10 <sup>1</sup>

**Conclusión:** Se determinó la eficiencia del sistema de biofiltración con la proteína activa de (*MoSe*) inmovilizada en corcho acoplado en el sistema de hidroponía NFT mediante la

viabilidad celular por la técnica molecular vqPCR donde se demostró la eficacia de remoción de *E.coli* con un porcentaje entre 0.024 y 0.005% de microorganismos viables . Ambos sistemas se consideran fáciles de construir, de bajo costo y técnica eficiente para tratar el agua residual contaminada con patógenos y que tiene como finalidad su reutilización en el área agrícola. Finalmente, las semillas de *M. oleifera* han sido identificadas como una alternativa en el desarrollo tecnológico de bajo costo, sostenible y socialmente aceptable para el tratamiento del agua.

## Referencias

1. Robles, B., Flores, J., Martínez, J. L., & Herrera, P. 2018. *The Chinampa: An Ancient Mexican Sub-Irrigation System. Irrigation and Drainage*. doi:10.1002/ird.2310
2. González, A., Ensástiga, C., Sánchez, R., & Ruz, N. 2016. In Mexico City Government (ed). *Las Chinampas world heritage of Mexico City: Mexico City, Mexico*
3. Iturbe-Argüelles, R., Flores-Serrano, R., Pérez-Casimiro, G., Flores-Torres C., & Ramírez. A. Descargas de aguas residuales en Xochimilco: estrategias para reducir el riesgo para la salud III Congreso de la Sociedad de Análisis de Riesgos Latino Americana IPT, São Paulo, Brasil del 10 al 13 de Mayo de 2016 Desarrollo y Riesgos en el contexto Latinoamericano
4. Rodríguez-Vázquez, 2018. Reporte Final, Convenio Cinvestav-Autoridad de la Zona Patrimonial de la Ciudad de México
5. Gómez Aiza, L., Bedolla Ruiz, K., Low-Pfeng, A. M., Vallejos Escalona, L. M. L., & García-Meneses, P. M. 2020. Perceptions and sustainable actions under land degradation and climate change: the case of arenmant wetland in Mexico City. *Environ, Dev Sustain*. doi:10.1007/s10668-020-00800-3
6. Wu, J., Stewart, J. R., Sobsey, M. D., Cormency, C., Fisher, M. B., & Bartram, J. K. 2018. Rapid Detection of *Escherichia coli* in Water Using Sample Concentration and Optimized Enzymatic Hydrolysis of Chromogenic Substrates. *Current Microbiology*, 75(7), 827–834. doi:10.1007/s00284-018-1454-8
7. Rodríguez-Vázquez, 2021. Reporte Rehabilitación Biotecnológica de la Zona Chinampera para Incrementar la Productividad Agrícola. Proyecto Especial ALTEPETL, SEDEMA-CORENADR, CDMX (2019-2021).
8. Cifuentes-Torres, L., Mendoza-Espinosa, L. G., Correa-Reyes, G., & Daesslé, L. W. 2020. Hydroponics with wastewater: a review of trends and opportunities. *Water and Environment Journal*. doi:10.1111/wej.12617
9. Infante, N., Rodríguez, R., Bartolo, Y., Sánchez, O., Sanz, I., & Morató, F. Biofunctionalization effect of cork by antimicrobial *M. oleifera* seeds and use of qPCR method to detect viability of *E. coli*. *Water* 2021, 13, x.https://doi.org/10.3390/xxxxx (En proceso de publicación).
10. APHA (American Public Health Association); Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA-AWWA-WEF, Washington, DC, USA, 2005
11. Foulds, I. V., Granacki, A., Xiao, C., Krull, U. J., Castle, A., & Horgen, P. A. 2002. Quantification of microcystin-producing cyanobacteria and *E. coli* in water by 5'-nuclease PCR. *J. Appl. Microbiol.* 93, 825–834. doi:10.1046/j.1365-2672.2002.01772.x
12. Nocker, A., Fernandez, P. S., Burr, M. D., & Camper, A. K. 2007. Use of propidium monoazide for live/dead distinction in microbial ecology. *Appl. Environ. Microbiol.* 73, 5111–5117. Doi:10.1128/AEM.02987-06
13. Francesko, A., Blandón, L., Vázquez, M., Petkova, P., Morató, J., Pfeifer, A., & Tzanov, T. 2015. Enzymatic Functionalization of Cork Surface with Antimicrobial Hybrid Biopolymer/Silver Nanoparticles. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 7(18), 9792–9799. doi:10.1021/acsami.5b01670.
14. Infante, N., Rodríguez, R., Thalasso-Siret, F., López-Aguilar, R., & Morató, F.J. 20221. The effect of biosurfactant properties of *Moringa oleifera* seeds for *E. coli* growth inhibition during water bioremediation. *Bioremediation Journal* (En proceso de publicación).
15. Ottoson, J., Norstrom, A., & Dalhammar, G. 2005. Removal of micro-organisms in small scale hydroponics wastewater treatment system. *Lett Appl Microbiol.* 40:443–447

16. Martin M, Gargallo S, Hernández C, Oliver N. Phosphorus and nitrogen removal from tertiary treated urban wastewater by vertical flow constructed wetland. *Ecol. Eng.* 2013; 6:34–42

**Propuesta:** El uso de las presentes tecnologías deben ser cercanas y familiarizadas por la población para mantener la infraestructura que permita la conservación o rehabilitación del recurso hídrico mediante la implementación de un programa socio-económico y de desarrollo sostenible que impacte el actuar de la comunidad frente al desarrollo de la misma e incentive su uso.

Para llevar a cabo este programa se propone un curso con los siguientes objetivos:

- Fomentar a la población la conservación y el mejoramiento de la calidad del recurso hídrico con el uso de productos naturales, como son las semillas de *Moringa oleifera* que presentan un alto potencial para el tratamiento de aguas residuales en comunidades rurales
- El uso de productos naturales es muy atrayente en aplicaciones herbolarias y por lo mismo ofrece confianza a la población e incentiva su aplicación para la purificación del agua
- Fomentar en la población el uso de sistemas de biofiltros funcionalizados con extractos de semillas; principalmente las de *M. oleifera*, por sus propiedades antimicrobianas y clarificadoras que potencializan la purificación del agua.
- Desarrollar un programa socio-económico y de sostenibilidad que impacte el actuar de la comunidad frente a la apropiación de la tecnología e incentivar el uso del agua tratada para diversos servicios.
- Estas acciones sin duda contribuirán, al bienestar de la población con el cumplimiento en el seguimiento de la seguridad de salud pública, alimentaria y la conservación del recurso hídrico.



# Remoción de fluoruro y As en agua por medio de carbonizado de hueso de pez pleco sintetizado en un horno rural

Sergio Armando Cruz-Briano<sup>a</sup>, Nahum Andrés Medellín-Castillo<sup>ab</sup>, Pablo Delgado-Sánchez<sup>c</sup>, Guillermo Javier Castro-Larragoitia<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Programa Multidisciplinario en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Dr. M Nava No. 221, Zona Universitaria S.L.P., 78290, México. sear-11-@live.com.mx

<sup>b</sup>Centro de Investigación y Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Dr. M Nava No. 8, Zona Universitaria, S.L.P., 78290, México.

<sup>c</sup>Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Km. 14.5 Carr. San Luis - Matehuala Palma de la Cruz, Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P., 78321, México

**Palabras Clave:** adsorción, carbonizado de hueso, pez pleco.

## Introducción

La contaminación del agua de consumo humano por fluoruros y arsénico es de suma importancia debido a los daños que provocan en la salud como la fluorosis dental y esquelética en el caso del fluoruro [1] y cáncer en la piel por el arsénico [2].

La adsorción es una de las técnicas más usadas para la remoción de estos contaminantes debido a sus bajos costos de instalación, operación y mantenimiento [1,3], además, de tener la disponibilidad de una amplia gama de adsorbentes, entre ellos, los carbonizados de hueso [3]. La materia prima en este proyecto para la preparación de carbonizados de huesos son los peces pleco, originarios de la Cuenca del Amazonas [4]. En México, son considerados una plaga, por su significativa proliferación y por su adaptación a los cambios de las condiciones del agua. Actualmente, existe un solo estudio reportado sobre su aprovechamiento como adsorbentes para remover contaminantes del agua. Por lo cual, ha sido muy poco estudiado. El objetivo de este trabajo es investigar la efectividad de los carbonizados de huesos de peces pleco preparados en un horno rural, como adsorbentes en la remoción de fluoruro y arsénico en agua.

## Materiales y métodos

Preparación de CH y propiedades fisicoquímicas.

Los huesos de peces se sintetizaron por carbonización a temperaturas de entre 300-600 °C, durante 1.5 h en un horno rural (Figura 1) conocido como gasificador de flujo ascendente diseñado y usado por Caminos de Agua, una asociación sin fines de lucro que ayuda a las comunidades con escasez y contaminación del agua, en Atotonilco, Guanajuato. Para lograr estas condiciones, una cámara de retorta con huesos debe pasar por dos quemaduras utilizando tambos de 200 L con madera como fuente de combustible (tambor inferior), una que ocurre inmediatamente después de la otra. De esta manera, cuando la primera cámara de combustible comienza a arder hasta el fondo, se enciende una segunda cámara de combustible. La cámara de retorta y la cámara de combustión (tambor superior con chimenea) se mueven y se colocan encima del segundo tambor de combustible. Una vez que termina el proceso, el horno se deja enfriar por 24 h.



Figura 1. Horno rural

El área específica, volumen de los poros y el diámetro promedio de los poros, se determinaron por medio de un equipo de fisisorción, Micromeritics, modelo ASAP 2020. Los IR se realizaron en un espectrofotómetro FTIR, marca Thermo Scientific, modelo Nicolet iS10. Los sitios ácidos y básicos se obtuvieron mediante el método propuesto por Boehm [5]. La estructura cristalina de los adsorbentes se analizó utilizando un difractor de rayos X, marca Bruker, modelo Da Vinci.

La carbonización ósea óptima debe alcanzar temperaturas entre 300 ° C y 600 ° C, pero no exceder los 600 °C, durante al menos 1,5 horas.

### Datos del equilibrio de adsorción de fluoruros

La adsorción de fluoruro y arsénico sobre CH se llevó a cabo en lote, poniendo en contacto 0.2 g de CH con un volumen de 90 mL de una solución con concentraciones conocidas, 10-100 mg/L y 40-200 µg/L para fluoruros y arsénico, respectivamente, a 25 °C.

La masa de fluoruro y As adsorbido,  $q$ , en los carbonizados de hueso se calculó por medio de un balance de materia de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$q = \frac{(C_0 - C_f)V}{m}$$

Donde  $C_0$  y  $C_f$  son la concentración inicial y final, respectivamente, en mg/L;  $V$  es el volumen de la solución en L y  $m$  es la masa del adsorbente en g.

## Resultados y discusión

### Propiedades de textura y fisicoquímicas de CH

La Tabla 1 muestra las propiedades de textura, los sitios activos y el PCC del carbonizado de hueso. El área específica y el volumen de poros es de 154 m<sup>2</sup>/g y 0.381 cm<sup>3</sup>/g, respectivamente, los cuales son mayores a los valores reportados por otros autores [6,7]. El diámetro de poros es de 9.87 nm, por lo tanto, es un material mesoporoso. La concentración de sitios básicos fue mayor que la de sitios ácidos, además el PCC es de 7.75, lo anterior nos indica que es un material de carácter básico.

Tabla 1. Propiedades de textura, sitios activos y PCC del carbonizado de hueso de pez pleco

Muestra	Área específica (m <sup>2</sup> /g)	Volumen de poro (cm <sup>3</sup> /g)	Diámetro de poro (nm)	Sitios activos		PCC
				básicos (meq/g)	ácidos (meq/g)	
CH	154	0.381	9.87	1.22	0.2	7.75

### Adsorción de fluoruros y As sobre CH

Las isotermas de adsorción de fluoruro y arsénico se muestran en la Figura 2(a) y (b), respectivamente. La adsorción de ambos contaminantes reveló que la capacidad de adsorción en CH es dependiente del pH de la solución. Para el fluoruro, el CH aumentó su capacidad de adsorción al disminuir el pH por debajo del PCC (7.75), debido a la atracción por las fuerzas electrostáticas entre la superficie de CH cargada positivamente y la carga negativa del fluoruro. Por otro lado, la capacidad de CH para adsorber As mostró lo contrario, ya que ésta aumentó al elevar el pH de la solución. Este mismo comportamiento lo observaron otros autores [8,9] La razón de la mayor eficiencia de adsorción a pH más alto puede ser a la

coprecipitación entre el arseniato de hidrógeno cálcico y la hidroxiapatita y al intercambio iónico entre iones hidroxilo y As (V) [8].

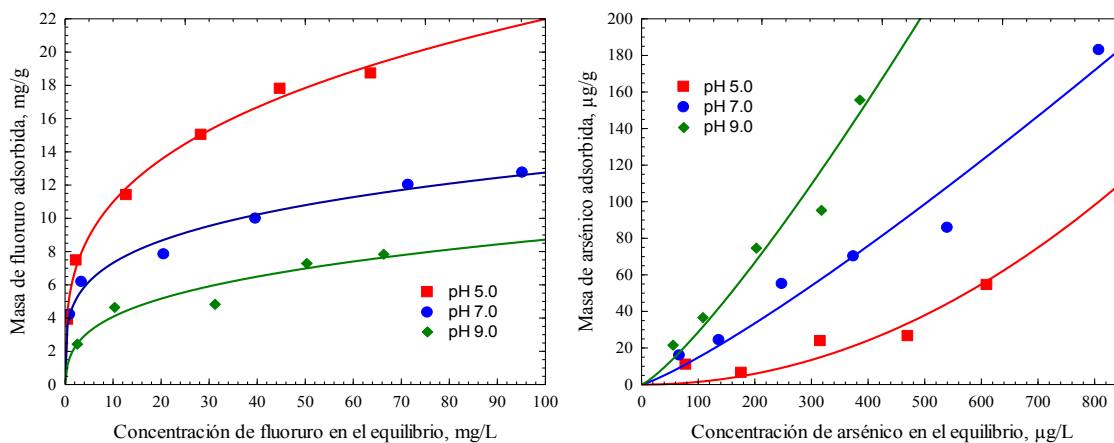


Figura 2. Isothermas de adsorción de a) fluoruro y b) As a T= 25 °C

### Espectroscopia infrarroja y difracción de rayos X

En la Figura 3 se muestran los espectros infrarrojos de las muestras de CH, CHF y CHAs. En estos, se distingue el pico de los grupos:  $\text{PO}_4^{3-}$  en la banda de  $1022 \text{ cm}^{-1}$  [10];  $\text{CO}_3^{2-}$  en las bandas de  $872$ ,  $1413$  y  $1454 \text{ cm}^{-1}$  [11] y  $\text{OH}^-$  en los  $3357 \text{ cm}^{-1}$  [10].

La banda correspondiente al grupo  $\text{PO}_4^{3-}$  se atenúa en el espectro de CHF, lo que puede indicar que existe una interacción entre los fosfatos y el ion fluoruro. Por otro lado, el espectro de CHAs no presenta un cambio significativo respecto a CH.

Los difractogramas de CH, CHF y CHAs se muestran en la Figura 4. Se identificaron los picos distintivos de la hidroxiapatita que se encuentran en los ángulos de difracción  $2\theta$  de  $25,9^\circ$ ,  $31,7^\circ$ ,  $46,7^\circ$  y  $49,5^\circ$  [12]. El difractograma de CH aumentó la cristalinidad con la incorporación de fluoruro sobre la estructura y se logró identificar la fluorapatita, y para el caso de CHAs no se logró identificar algún cambio respecto a CH.

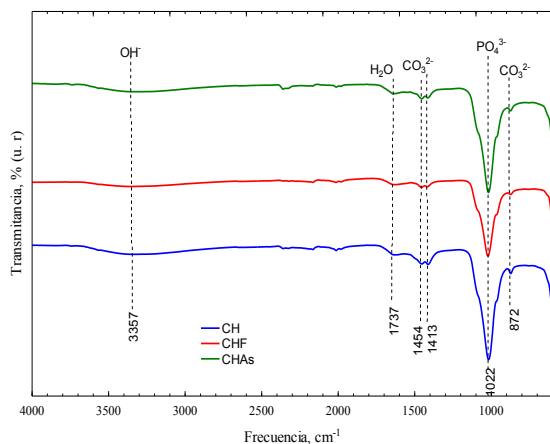


Figura 3. IR de CH, CHF y CHAs

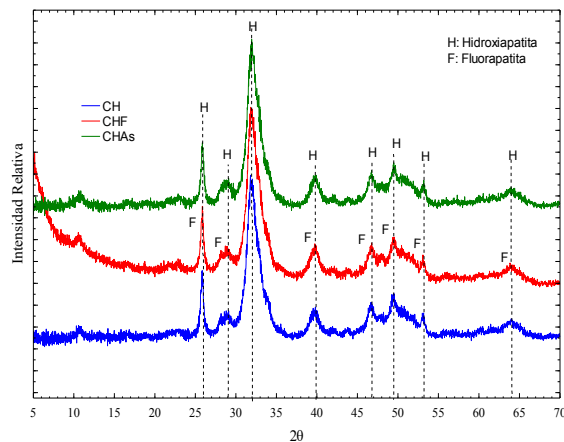


Figura 4. Difractogramas de CH, CHF y CHAs

## Conclusiones

Los carbonizados de huesos de peces pleco obtenidos en el horno rural pueden ser una alternativa para la remoción de fluoruros y As del agua.

## Referencias bibliográficas

1. Collivignarelli, M.C., Abbà, A., Carnevale, M., Torretta, V., Rada, E.C., Caccamo, F.M., Sorlini. (2020). Adsorption of Fluorides in Drinking Water by Palm Residues. *Sustainability* **12** 3786.
2. Kumar, A., Kumar, A., Adarsh, A. (2020). Analytical study on the removal of arsenic species and its compound by applying magnetic field. *Int. J. Eng. Sci.*
3. Medellín-Castillo, N.A., Cruz-Briano, S.A., Leyva-Ramos, R., Moreno, J.C., Torres, A., Giraldo-Gutiérrez, L., Labrada, G.J., Ocampo, R., Rodríguez, J.P., Reyes, S.Y., Berber, M.S. (2020). Use of bone char prepared from an invasive species, pleco fish (*Pterygoplichthys* spp.), to remove fluoride and Cadmium(II) in water. *J. Environ. Manag.* **256**, 109956.
4. Ramírez-Albores, E.O., Méndez, N., Castañon, J.H., Lagunas, S., Farrera, R., Rosales, A., Villalobos, J.J (2018). ¿Es comestible el pez diablo (*Hypostomus Plecostomus* L.), que habita en el ecosistema de plan de Ayala, Ostuacán, Chiapas?. *Agroproductividad* **11**(12), 85-90.
5. Boehm, H.P. (1994). Some aspects of the surface chemistry of carbon blacks and other carbons. *Carbon* **32**, 759-69.
6. Alkurdi, S.S.A., Al-Jubooria, R.A, Bundschuha. (2019). Bone char as a green sorbent for removing health threatening fluoride from drinking water. *Environ. Int.* **127**, 704–719.
7. Villela-Martínez, D.E., Leyva-Ramos, R., Aragón-Piña, A., Navarro-Tovar, R. (2020). Arsenic Elimination from Water Solutions by Adsorption on Bone Char. Effect of Operating Conditions and Removal from Actual Drinking Water. *Water Air Soil Pollut* **231**(5).
8. Chen, Y.N., Chai, L.Y. Shu, Y.D. (2008). Study of arsenic(V) adsorption on bone char from aqueous solution. *J. Haz. Mat.*, **160**, 168-172.
9. Liu, J., He, L., Dong, F., Hudson-Edwards, K.A. (2016). The role of nano-sized manganese coatings on bone char in removing arsenic(V) from solution: Implications for permeable reactive barrier technologies. *Chemosphere* **153**, 146-154.
10. Mendoza-Castillo, D.I., Bonilla-Petriciolet, A., Jauregui-Rincon, J. (2016). Análisis estadístico y modelación de la sorción multicomponente de metales pesados en agua empleando carbonizado de hueso. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* **15**(2), 525-542.
11. Kashif-Shahid, M., Young-Kim, J., Young-Gyun C. (2018). Synthesis of bone char from cattle bones and its application for fluoride removal from the contaminated water. *Groundwater for Sustainable Development*.
12. Kashif-Shahida, M., Young-Kima, J., Shinb, G., Choi, Y. (2020). Effect of pyrolysis conditions on characteristics and fluoride adsorptive performance of bone char derived from bone residue. *J. Water Process Eng.*, **37**,101499.

### **Propuesta de valor**

Existen comunidades en el país con problemas de contaminación de agua por fluoruros y As, que pueden provocar problemas a la salud como fluorosis dental y esquelética, trastorno en el desarrollo de los niños, problemas de la piel e incluso cáncer, y no cuentan con los recursos necesarios para implementar un sistema de tratamiento de agua. Por lo anterior, es importante explorar nuevas tecnologías eficaces y de bajo costo para el tratamiento de agua, claro ejemplo es este trabajo, en el cual se busca obtener materiales económicos para el tratamiento de agua a partir de la síntesis, de los huesos de una especie invasora, en un horno rural que puede ser fabricado con materiales que están al alcance de dichas comunidades.

Por lo anterior, este proyecto está encaminado a que los carbonizados obtenidos puedan ser utilizados para el tratamiento de agua a una mayor escala, en la que las comunidades puedan hacer uso de ellos y puedan tratar el agua de sus pozos contaminados con fluoruro y/o arsénico. Para esto, en colaboración con Caminos de Agua se puede llevar a cabo la implementación de nuestro material en un sistema de tratamiento de agua de pozo como puede ser la planta piloto de dicha organización, para evaluar el comportamiento de nuestro material a una escala real. El Sistema de Tratamiento de Agua Subterránea de Caminos de Agua no requiere electricidad, no desperdicia agua y puede diseñarse y adaptarse para solucionar el problema de arsénico y fluoruro de una población específica, en el cual, el agua se bombea de un pozo contaminado a un tanque elevado de almacenamiento para distribuirse por gravedad a través del sistema. Desde allí, el agua contaminada pasa a través de una serie de filtros para eliminar sedimentos, arsénico, fluoruro y patógenos biológicos.

Con lo anterior, dar una posible solución a 2 problemáticas existentes, 1) la especie invasora que no tiene un aprovechamiento, ni valor económico, y 2) la contaminación del agua.

# Remoción de triclosán del agua mediante procesos de adsorción y fotodegradación

Lázaro A. González Fernández<sup>1</sup>, Nahum A. Medellín C.<sup>1</sup>, Raúl Ocampo P.<sup>1</sup>, Héctor Hernández M.<sup>2</sup>, María Selene Berber M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Dr. Manuel Nava No. 8, Col. Zona Universitaria Poniente, C.P. 78290, San Luis Potosí, México, lazaroadrian1995@gmail.com; <sup>2</sup>Instituto de Investigación de Zonas Desérticas, Altair No. 200, Col. del Llano, C.P. 78377, S.L.P, México

## 1. Introducción

Con el incremento de la actividad industrial en el mundo, los cuerpos de agua reciben continuamente descargas de contaminantes tóxicos de tipo metálico, orgánico, etc. que exceden su capacidad de autodepuración, trayendo como consecuencia graves problemas de contaminación ambiental y alto riesgo toxicológico para todos los seres vivos. Dentro de los contaminantes que más preocupan a la comunidad internacional están los denominados contaminantes emergentes, los cuales han tomado auge porque se hace necesario tanto su remoción como su legislación.

El triclosán es un potente agente antibacteriano y fungicida. En condiciones normales se trata de un sólido incoloro con un ligero olor a fenol. En caso de ser ingerido, puede llegar a causar enfermedades graves, dependiendo la cantidad de esta que entre a la boca (Singer et al., 2002).

El triclosán es un compuesto que se añade como conservante o como un agente antiséptico en una variedad de productos de consumo de uso diario, tales como jabones de manos, cremas, desodorantes, productos farmacéuticos, pastas de dientes, limpiadores domésticos (Singer et al., 2002) e incluso textiles y como un agente estabilizante en una multitud de detergentes y cosméticos (Adolfsson-Erici et al., 2002).

El consumo de varios productos que contienen triclosán se descarga directamente al alcantarillado sanitario y finalmente a las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Aunque el proceso de tratamiento de aguas residuales puede dar lugar a una aparente eficiencia de eliminación del triclosán (Bester, 2003; Heidler & Halden, 2007; Sabaliunas et al., 2003; Thomas & Foster, 2005), los residuos del orden de las trazas aún persisten en los efluentes y pueden detectarse en aguas receptoras y ambientes acuáticos.

Aunque el impacto adverso en la salud humana no se comprende completamente, se ha informado que el triclosán es un probable disruptor endocrino (Allmyr, Adolfsson-Erici, et al., 2006; Franz et al., 2008), interrumpe la homeostasis de la hormona tiroidea (Allmyr, McLachlan, et al., 2006) y las respuestas dependientes de estrógenos (Calafat et al., 2007).

Aunque existen algunas referencias en la literatura sobre la efectividad de estos procesos, los resultados siguen siendo poco conclusivos y la cantidad de información disponible es escasa. El objetivo de este trabajo es estudiar el equilibrio de adsorción de triclosán sobre carbones activados comercial y nanotubos de carbono de pared simple, así como la fotodegradación de este contaminante y la relación entre ambos procesos de tratamiento de agua.

## 2. Metodología

Las disoluciones madre de triclosán se preparan disolviendo directamente polvo de triclosán en ACN de grado HPLC, y se almacenan a 48 °C en la oscuridad. Las soluciones de muestra se preparan añadiendo la solución madre en agua desionizada. Para ajustar los valores de pH se usa NaOH o HCl. Las propiedades de textura son medidas por fisisorción de nitrógeno.

La adsorción de triclosán se realiza utilizando un enfoque de equilibrio por lotes en una serie de viales. Las soluciones se mantienen a pH definidos con NaOH o HCl. Luego, los viales se instalan

en un agitador orbital con temperatura controlada a una velocidad de rotación constante. Se realizan estudios cinéticos para investigar el efecto del tiempo sobre el proceso de adsorción. Se realizan experimentos de isothermas de equilibrio a temperatura ambiente y experimentos cinéticos sobre distintas concentraciones iniciales de triclosán. Al finalizar los experimentos de adsorción, se toma una muestra de cada vial y se filtra a través de un filtro de membrana para su análisis. La concentración de triclosán se mide utilizando un UV-Vis a una longitud de onda de 280nm.

Se llevan a cabo los experimentos de fotodegradación con una lámpara de radiación UV con una longitud de onda que permita la degradación del compuesto (254 nm). Se añaden radicales sulfato al sistema para elevar el rendimiento de la degradación fotolítica. El análisis cualitativo por GC/MS se utiliza con el fin de investigar los intermedios de la fotólisis de triclosán.

### 3. Resultados y Discusión

Las propiedades de textura de los cuatro materiales estudiados se muestran en la Tabla 1. Varios autores (Carrales-Alvarado et al., 2016; Moral-Rodríguez et al., 2016; Segovia-Sandoval et al., 2019) han determinado el área específica y volumen de los poros de los carbones activados utilizados en este trabajo, y los valores reportados se describen a continuación.

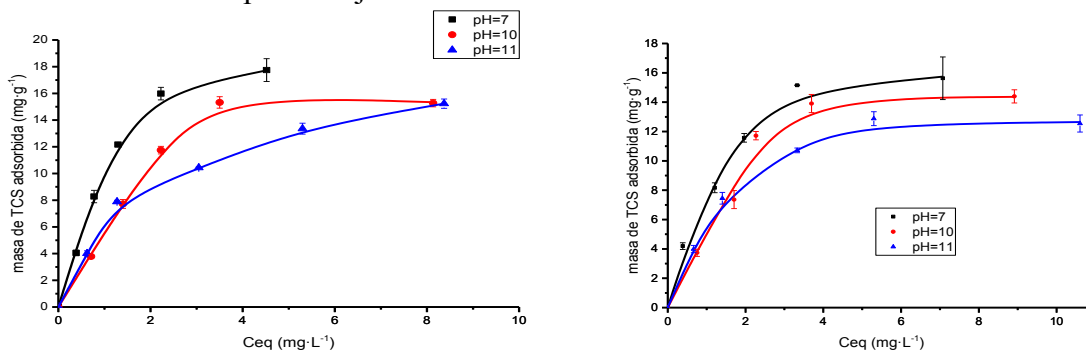
Tabla 1 Propiedades de textura de los materiales adsorbentes

Material	$S_{BET}$ ( $m^2 \cdot g^{-1}$ )	$W_0(N_2)$ ( $cm^3 \cdot g^{-1}$ )	$L_0(N_2)$ (nm)	$V_{0.95}$ ( $cm^3 \cdot g^{-1}$ )	$V_{meso}$ (BJH) ( $cm^3 \cdot g^{-1}$ )
DARCO	651	0.285	1.83	0.593	0.504
NORIT	943	0.331	1.14	0.491	0.089
F400	756	0.317	1.27	0.360	0.066
NTC	582	1.626	1.18	1.626	0.819

Segovia-Sandoval *et al.* (2019) reportaron, para los carbones activados Darco, Norit y F 400, superficies específicas de 627, 971 y 871  $m^2 \cdot g^{-1}$  respectivamente. Estos valores son referentes a materiales con tamaños de partícula en malla 20-40. Estos valores, como se puede observar, son cercanos a los obtenidos en este trabajo.

Para el caso de nanotubos de pared simple se ha reportado que su área superficial específica varía en el intervalo de 500 a 600  $m^2 \cdot g^{-1}$ , principalmente. En nuestro caso se obtiene un valor en este rango, semejante al valor de 577  $m^2 \cdot g^{-1}$  reportado por Lu & Liu (2006) y un poco más alejada del valor de 507  $m^2 \cdot g^{-1}$  reportado por Lu & Su (2007).

Las isothermas de adsorción para los cuatro adsorbentes a 25 °C y los tres valores de pH se muestran en la Figura 1. Los datos experimentales de las isothermas de adsorción de triclosán a diferentes valores de pH se correlacionaron con las isothermas de Freundlich, Langmuir y Prausnitz-Radke y se encontró que, de acuerdo con un criterio de menor porcentaje de desviación, la isoterma de Prausnitz-Radke interpreto mejor los datos.





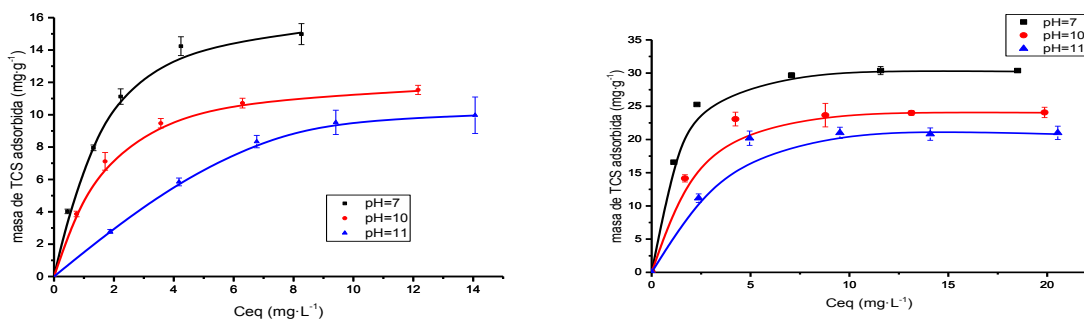


Figura 1 Isothermas de adsorción: a) Darco, b) Norit, c) F400 y d) NTC

En las isothermas obtenidas para todos los materiales se puede observar que a medida que aumenta el pH del medio, la capacidad de adsorción disminuye. Para un valor de pH de 7 la capacidad de adsorción es la mayor entre las estudiadas, y esto se debe a que el triclosán se encuentra, mayoritariamente, en su especie molecular ( $\text{pH} < \text{pKa}$ ), a diferencia de a valores de pH de 10 y 11 ( $\text{pH} > \text{pKa}$ ) en donde la especie del triclosán que predomina es la que está cargada negativamente. Se pudo observar que el modelo de pseudo segundo orden describe adecuadamente los resultados experimentales del decaimiento de la concentración de triclosán en presencia de luz UV debido a que los coeficientes de correlación son superiores al 90 % en todos los casos. El muy bajo rendimiento cuántico del TCS indicó que la fotodegradación directa no fue muy eficaz, y cuanto más aumenta la concentración, menos eficiente es el proceso. La eficacia de la luz ultravioleta para degradar el TCS se puede mejorar añadiendo pequeñas cantidades de persulfato de potasio a la disolución del reactor. Por ejemplo, a una concentración inicial de persulfato de potasio de 0.5 mM, el valor de  $k_{\text{TCS}}$  es  $30 \cdot 10^{-6} \text{ L} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , que es 15 veces mayor que el de  $k_{\text{TCS}}$  para la fotodegradación directa de TCS.

La fotodegradación de triclosán en presencia de luz UV conduce a la ruptura de la molécula en diferentes subproductos de degradación. La muestra de  $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  de triclosán degradada con luz UV durante 30 minutos fue analizada en un Cromatógrafo de Gases acoplado a un detector de Espectrometría de Masas. El análisis resultó en la identificación de triclosán y el 2,4-diclorofenol como subproductos de degradación del triclosán.

#### 4. Conclusiones

Los carbones activados y nanotubos de carbono utilizados en este trabajo mostraron una alta capacidad de adsorción para eliminar TCS en disolución acuosa con una capacidad de adsorción de entre  $16.0$  y  $18.50 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  para los carbones y de aproximadamente  $30.0 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  para los nanotubos de carbono. El mecanismo de adsorción de TCS en los materiales adsorbentes se atribuyó principalmente a las interacciones entre los electrones  $\pi$  de los anillos aromáticos del TCS con electrones  $\pi$  de los planos de grafeno de los carbones y nanotubos.

El proceso de fotodegradación mostró que la concentración inicial de TCS afecta significativamente la eficiencia de degradación de este y el modelo cinético de segundo orden se ajustó satisfactoriamente a los datos experimentales. Al añadir un iniciador de radicales (persulfato de potasio) se produjo un aumento en la tasa de fotodegradación porque la concentración de los radicales añadidos acentúa la ruptura de la molécula de triclosán. El producto de degradación 2,4-diclorofenol se obtiene a bajas concentraciones y no representa un riesgo ambiental.

La adsorción en carbones activados y nanotubos de carbono es un proceso relativamente simple, económico y apropiado para remover TCS del agua, y en este caso su tiempo para alcanzar el equilibrio es comparable con el de la tecnología basada en PAO's como UV y  $\text{UV}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ . El sistema  $\text{UV}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$  fue el más eficiente para eliminar el TCS del agua, pero solo se hace necesario su uso a concentraciones más elevadas del contaminante en disolución.

## 5. Referencias

- Adolfsson-Erici, M., Pettersson, M., Parkkonen, J., & Sturve, J. (2002). Triclosan, a commonly used bactericide found in human milk and in the aquatic environment in Sweden. *Chemosphere*, 46(9–10), 1485–1489.
- Allmyr, M., Adolfsson-Erici, M., McLachlan, M. S., & Sandborgh-Englund, G. (2006). Triclosan in plasma and milk from Swedish nursing mothers and their exposure via personal care products. *Science of the Total Environment*, 372(1), 87–93.
- Allmyr, M., McLachlan, M. S., Sandborgh-Englund, G., & Adolfsson-Erici, M. (2006). Determination of triclosan as its pentafluorobenzoyl ester in human plasma and milk using electron capture negative ionization mass spectrometry. *Analytical Chemistry*, 78(18), 6542–6546.
- Bester, K. (2003). Triclosan in a sewage treatment process—balances and monitoring data. *Water Research*, 37(16), 3891–3896.
- Calafat, A. M., Ye, X., Wong, L.-Y., Reidy, J. A., & Needham, L. L. (2007). Urinary concentrations of triclosan in the US population: 2003–2004. *Environmental Health Perspectives*, 116(3), 303–307.
- Carrales-Alvarado, D. H., Ocampo-Pérez, R., Leyva-Ramos, R., Rivera-Utrilla, J., Moral-Rodríguez, A. I., Leyva-Ramos, R., Ocampo-Pérez, R., Mendoza-Barron, J., Serratos-Alvarez, I. N., Salazar-Rabago, J. J., Dimović, S., Smičiklas, I., Plečáš, I., Antonović, D., & Mitrić, M. (2016). Removal of the antibiotic metronidazole by adsorption on various carbon materials from aqueous phase. *Journal of Colloid and Interface Science*, 22(1), 276–285.
- Franz, S., Altenburger, R., Heilmeier, H., & Schmitt-Jansen, M. (2008). What contributes to the sensitivity of microalgae to triclosan? *Aquatic Toxicology*, 90(2), 102–108.
- Heidler, J., & Halden, R. U. (2007). Mass balance assessment of triclosan removal during conventional sewage treatment. *Chemosphere*, 66(2), 362–369.
- Liang, C., Wang, Z.-S., & Mohanty, N. (2006). Influences of carbonate and chloride ions on persulfate oxidation of trichloroethylene at 20 °C. *Science of the Total Environment*, 370(2–3), 271–277.
- Lu, C., & Liu, C. (2006). Removal of nickel (II) from aqueous solution by carbon nanotubes. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology*, 81(12), 1932–1940.
- Lu, C., & Su, F. (2007). Adsorption of natural organic matter by carbon nanotubes. *Separation and Purification Technology*, 58(1), 113–121.
- Moral-Rodríguez, A. I., Leyva-Ramos, R., Ocampo-Pérez, R., Mendoza-Barron, J., Serratos-Alvarez, I. N., & Salazar-Rabago, J. J. (2016). Removal of ronidazole and sulfamethoxazole from water solutions by adsorption on granular activated carbon: equilibrium and intraparticle diffusion mechanisms. *Adsorption*, 22(1), 89–103.
- Nghiem, L. D., & Coleman, P. J. (2008). NF/RO filtration of the hydrophobic ionogenic compound triclosan: transport mechanisms and the influence of membrane fouling. *Separation and Purification Technology*, 62(3), 709–716.
- Sabaliunas, D., Webb, S. F., Hauk, A., Jacob, M., & Eckhoff, W. S. (2003). Environmental fate of triclosan in the River Aire Basin, UK. *Water Research*, 37(13), 3145–3154.
- Segovia-Sandoval, S. J., Padilla-Ortega, E., Carrasco-Marín, F., Berber-Mendoza, M. S., & Ocampo-Pérez, R. (2019). Simultaneous removal of metronidazole and Pb (II) from aqueous solution onto bifunctional activated carbons. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(25), 25916–25931.
- Singer, H., Müller, S., Tixier, C., & Pillonel, L. (2002). Triclosan: occurrence and fate of a widely used biocide in the aquatic environment: field measurements in wastewater treatment plants, surface waters, and lake sediments. *Environmental Science & Technology*, 36(23), 4998–5004.
- Thomas, P. M., & Foster, G. D. (2005). Tracking acidic pharmaceuticals, caffeine, and triclosan through the wastewater treatment process. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 24(1), 25–30.
- Wang, S.-L., Tzou, Y.-M., Lu, Y.-H., & Sheng, G. (2007). Removal of 3-chlorophenol from water using rice-straw-based carbon. *Journal of Hazardous Materials*, 147(1–2), 313–318.

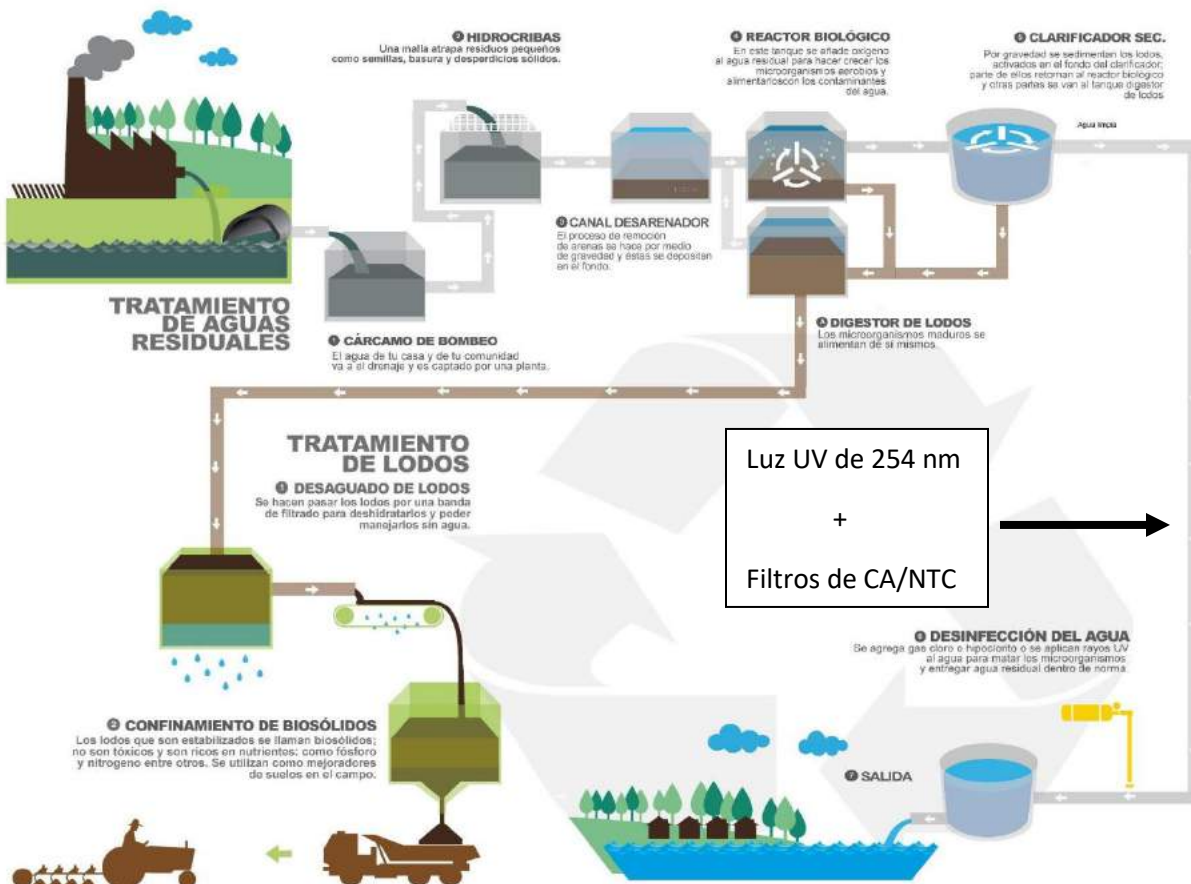
## 6. Propuesta de valor

La propuesta de esta investigación consiste en la introducción de estas metodologías a las PTAR para la remoción de contaminantes emergentes del agua como el triclosán o contaminantes de semejante composición química y naturaleza (fenoles policlorados, polifenoles policlorados, etc.).

Con la introducción de estas metodologías en las etapas de tratamiento terciario del agua se logrará remover más del 80 % de la concentración de estos contaminantes que lleguen a esta etapa, reduciendo considerablemente su presencia en el efluente. Es importante considerar que los posibles subproductos formados no constituyen un riesgo ambiental por su baja concentración.

Para el caso de los materiales adsorbentes se proponen filtros empacados con cualquiera de los cuatro materiales utilizados con tiempo de contacto de 30 minutos (garantizar el volumen del filtro o sistema de filtros para tratar el caudal máximo de la PTAR) y para la luz UV que se instale una lámpara o un sistema de lámparas de luz UV de 254 nm que irradie durante 30 minutos el agua en la última etapa del proceso, esto logrará escindir las moléculas orgánicas presentes. Es necesario monitorear a escala piloto la presencia de fenoles policlorados a la salida para ajustar parámetros de diseño.

Tipos de agua residual: aguas residuales domésticas cruda, aguas residuales de las industrias textiles, farmacéutica, cosmética, de producción de productos de higiene personal y aguas residuales municipales cuya concentración de TCS en el influente no sobrepase los  $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .



# RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y AGUAS RESIDUALES EN IZÚCAR DE MATAMOROS: HACIA UN NUEVO PARADIGMA

Herrera, Jorge A. Departamento de Investigación y Desarrollo, UTIM, [investigacionydesarrollo@utim.edu.mx](mailto:investigacionydesarrollo@utim.edu.mx); Navarrete, David. Dirección de Ecología H. Ayuntamiento de Izúcar de Matamoros, [proteccionambientalizucar@gmail.com](mailto:proteccionambientalizucar@gmail.com).

## INTRODUCCIÓN

Durante el año 2003 inicia operaciones el Relleno Sanitario Intermunicipal en el municipio de Izúcar de Matamoros, Puebla; originalmente diseñado para recibir residuos sólidos urbanos (RSU) de siete municipios: Izúcar de Matamoros, Atzala, Tilapa, Tlapanala, San Martín Totoltepec, Xochiltepec y Epatlán. Inicialmente administrado por el Ayuntamiento de Izúcar de Matamoros, para el año 2010 éste se concesiona a una empresa privada con vigencia al 3 de mayo de 2025; información recabada por el actual Ayuntamiento refiere que se reciben residuos de 14 municipios desde hace por lo menos 6 años; si bien la capacidad de operación de estas instalaciones está diseñada para recibir residuos hasta el año 2030, se tiene evidencia de que ya se ha alcanzado su máxima capacidad.

La planta municipal de tratamiento de aguas residuales (PTAR) está diseñada para operar con dos trenes de tratamiento de 45 l/s cada uno, sin embargo, se han reportado problemas con el mantenimiento en diversos momentos, (García Zamora, 2019), el sistema de drenaje de la cabecera municipal actualmente tiene una cobertura del 98.48% del total de viviendas (INEGI, 2021) pero solamente se logra llevar a tratamiento aproximadamente un 80% del caudal colectado solo de la cabecera municipal, lo que representa un gran reto al sistema operador al buscar el punto de equilibrio entre los costos y mantener cuotas accesibles a los usuarios (Ruiz, 2021).

En el año 2020 el H. Ayuntamiento de Izúcar de Matamoros elabora el primer diagnóstico de RSU, como resultado, en el municipio se generan 71.5 ton/d, de los cuales el 61% corresponde a materiales biodegradables. Ante la necesidad de diseñar un programa de gestión integral de residuos sólidos urbanos, el presente trabajo plantea la posibilidad de dar tratamiento a la fracción de residuos sólidos biodegradables (RSB) en conjunto con el caudal colectado de aguas residuales de la cabecera municipal. Se planea evaluar diversas alternativas de acuerdo con los recursos y la infraestructura disponible. El compostaje representa una alternativa atractiva para la obtención de fertilizantes orgánicos. Sin embargo, al mezclarse con aguas residuales y/o biosólidos provenientes de las plantas tratadoras se pueden acelerar los procesos de composteo, además de obtener combustibles como *biogás e hidrogeno*. Sin bien la generación de energía a partir de esta mezcla es un campo que se encuentra en desarrollo, es necesario contribuir al estudio de diferentes alternativas de aprovechamiento de estos residuos. En este trabajo se concentran algunos avances de las actividades desarrolladas en la Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros (UTIM), además de los resultados de investigaciones enfocadas en el manejo integral y/o aprovechamiento de los residuos.

## AVANCES

En la UTIM se han desarrollados dos experimentos: en el primero se evaluó la influencia de dos factores operativos (frecuencia de aireación y % de estiércol) mediante un diseño experimental con dos factores y tres niveles por factor. Se utilizó como variable de respuesta el tiempo de composteo, para lo que se utilizó como indicador su fitotoxicidad, misma que se evaluó por determinación del índice de germinación. Se trabajó con residuos sólidos orgánicos del mercado municipal de Izúcar de Matamoros, los cuales fueron triturados y mezclados con residuos de jardinería y estiércol de una granja de ganado vacuno cercana a la institución. Los resultados de este estudio indicaron que con un periodo de veinte días es suficiente para obtener un índice de germinación mayor a 80% (establecido en la NMX-AA-180-SCFI-2018). Por otra parte, se observó que ninguno de los factores evaluados tiene efecto significativo sobre la variable de respuesta. Lo anterior se puede asociar a la altura inicial de las pilas, la cual fue de 35 cm y al final del experimento se redujo aproximadamente a 10 cm debido a la pérdida de lixiviados.

En el segundo experimento que se utilizaron contenedores plásticos como biorreactores para el compostaje de residuos. Para ello se utilizaron dos contenedores plásticos de 0.4 m<sup>3</sup>, en los cuales fue vertida una mezcla que consistió en lo siguiente, se depositaron 90 kg de residuos cuya composición fue: 17% de basura fresca, 20% de basura seca y 40% estiércol, el porcentaje restante fue agua. En uno de los sistemas se agregó también una mezcla de melaza, levadura y suero de leche como acelerador de proceso. Al final se obtuvieron dos compostas con las siguientes características:

**TABLA 1.** Parámetros fisicoquímicos de las compostas obtenidas

<b>Tipo de composta</b>	<b>pH</b>	<b>Conductividad eléctrica (dS/cm)</b>	<b>% de materia orgánica</b>	<b>Índice de germinación</b>
Composta normal	8.13	261.0	14.73	90%
Composta con mezcla de melaza, levadura y suero de leche.	7.98	190.7	16.71	90%

En la tabla 1 se observan diferencias entre las dos compostas. La adición de la mezcla favorece la regulación del pH, conductividad eléctrica y el porcentaje de materia orgánica. También es importante resaltar, que la elongación del hipocótilo fue superior en las semillas expuestas al extracto de la segunda composta en comparación con el testigo, por lo que se podría considerar que este extracto (composta con mezcla de melaza, levadura y suero de leche) posee propiedades estimulantes. En este segundo experimento se trataron 90 kg de residuos y se obtuvieron aproximadamente 55 kg de composta por sistema que representa un rendimiento del 60%.

Actualmente se ha incrementado la capacidad productiva de 110 a 165 kg de composta, con lo que se podrán tratar hasta 300 kg de residuos (mensualmente) para obtener de 150 a 160 kg de

composta. Lo anterior representa una capacidad productiva anual de 3.5 toneladas de residuos, para obtener poco mas de 2 toneladas de composta.

## ÁREAS DE OPORTUNIDAD

Se han reportado diversos estudios que mencionan el mezclado de aguas residuales o biosólidos con la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU) para optimizar los procesos de compostaje y/o generación de combustibles como metano e hidrogeno. Moniño et al (2016) señala que la composición de los residuos de alimentos es adecuada para la co-digestión con aguas residuales, con lo que se puede incrementar hasta en 2.9 veces la producción de metano. Por otra parte, Tawfic et al (2014) reportaron que el mezclado de aguas residuales con la fracción orgánica de los RS representa un sustrato prometedor para la generación de hidrogeno. Con tiempo de residencia de 4 días y en una relación agua residual/RSO (1:3). Mattioli et al., (2017) reportó que en un sistema de co-digestión de la fracción orgánica de los RSU con lodos mixtos, se incrementa la producción de biogás y se duplica la generación de energía. Pretel et al (2016) estudiaron un reactor de membrana anaeróbica sumergida para el tratamiento y generación de energía a partir del mezclado de aguas residuales y la fracción orgánica de los RSU, reportando que los mejores resultados se obtienen con tiempo de residencia de 70 días, y que si bien los costos de instalación son elevados con la generación de energía se compensa la inversión.

Una de las limitantes en el uso de los biosólidos como inóculos en la producción de compostas es la alta carga bacteriana. Sin embargo, en un estudio desarrollado por Lee et al (2017) evaluaron la presencia de genes de resistencia antibióticos, encontrando que en el estiércol existe una mayor cantidad de estos genes, seguido de los lodos residuales y aguas provenientes de la industria alimentaria. También existe la incertidumbre sobre la eficiencia de los biofertilizantes obtenidos a partir de residuos de tratadoras de agua debido a la presencia de microorganismos patógenos. No obstante, Rojas et al (2011) reportaron lo siguiente: con un método de desinfección con ozono se reduce el riesgo de infección al eliminar los microorganismos altamente patógenos y aumenta la tasa de crecimiento de las plantas como: rábanos (*Raphanus sativus* L.), tomates (*Lycopersicon esculentum*), menta verde (*Mentha piperita*), manzanilla (*Matricaria recutita*). , Lechuga romana (*Lactuca sativa*) y col china (*Brassica rapa*).

Es importante implementar todo tipo de alternativas para el manejo integral de los residuos, debido al incremento en las tasas de generación las cuales son más significativas en áreas urbanas. Aun cuando se han desarrollado diversas tecnologías para el manejo de residuos, no siempre están al alcance de los países subdesarrollados y pequeñas comunidades rurales. Por lo cual, es necesario convocar a los habitantes a sumarse en actividades que impulsen acciones como el reciclaje y tratamiento de la fracción orgánica de sus residuos con el objetivo de disminuir la cantidad de RS que llegan a los vertederos municipales.

## REFERENCIAS

Alshehrei, F., & Ameen, F. (2021). Vermicomposting: A Management Tool to Mitigate Solid Waste. *Saudi Journal of Biological Sciences*.

Álvarez, C., Giubergia, J. P., & Basanta, M. (2017). Labranzas y secuencias de cultivos en la Región Central de Córdoba: efecto sobre el rendimiento y propiedades físicas suelo. *Ensayos de Larga Duración en Argentina*, 95.

Believe Earth; Residuos orgánicos y de aguas residuales se transforman en energía en la primera gran central de biogás de Brasil. (2018) Consultado junio de 2021 <https://believe.earth/es/residuos-organicos-y-de-aguas-residuales-se-transforman-en-energia-en-la-primera-gran-central-de-biogas-de-brasil/>

CFE; Generación de electricidad mediante residuos sólidos urbanos. Instituto de Investigaciones Eléctricas CFE (2012) Consultado junio de 2021 <https://www.ineel.mx/docu/Guia-RSU.pdf>

Chávez, M. L., & Leonardo, C. N. P. (2018). Impacto Ambiental Generado por el Botadero de Residuos Sólidos en un caserío de la ciudad de Chota. *UCV-HACER: Revista de Investigación y Cultura*, 7(2), 25-34.

Fain Binda, V., Butti, M., & Torti, M. J. (2018). Índice de germinación como indicador de madurez en compost de residuos de incubación

GIZ; Proyectos de Aprovechamiento Energético a partir de Residuos Urbanos en México. (2018) Consultado junio de 2021 <https://www.giz.de/de/downloads/giz2019-ES-EnRes-Proyectos-de-Aprovechamiento.pdf>

Lee, J., Shin, S. G., Jang, H. M., Kim, Y. B., Lee, J., & Kim, Y. M. (2017). Characterization of antibiotic resistance genes in representative organic solid wastes: Food waste-recycling wastewater, manure, and sewage sludge. *Science of the Total Environment*, 579, 1692-1698.

Martínez-Gamiño, M. Á., Osuna Ceja, E. S., & Espinosa Ramírez, M. (2019). Impacto acumulado de la agricultura de conservación en propiedades del suelo y rendimiento de maíz. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(4), 765-778.

Mattioli, A., Gatti, G. B., Mattuzzi, G. P., Cecchi, F., & Bolzonella, D. (2017). Co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste and sludge improves the energy balance of wastewater treatment plants: Rovereto case study. *Renewable Energy*, 113, 980-988.

Maynard, D. N., Barker, A. V., Minotti, P. L., & Peck, N. H. (1976). Nitrate accumulation in vegetables. *Advances in Agronomy*, 28, 71-118.

Moñino, P., Jiménez, E., Barat, R., Aguado, D., Seco, A., & Ferrer, J. (2016). Potential use of the organic fraction of municipal solid waste in anaerobic co-digestion with wastewater in submerged anaerobic membrane technology. *Waste Management*, 56, 158-165.



Pretel, R., Moñino, P., Robles, A., Ruano, M. V., Seco, A., & Ferrer, J. (2016). Economic and environmental sustainability of an AnMBR treating urban wastewater and organic fraction of municipal solid waste. *Journal of environmental management*, 179, 83-92.

Rojas-Valencia, M. N., de Velásquez, M. O., & Franco, V. (2011). Urban agriculture, using sustainable practices that involve the reuse of wastewater and solid waste. *Agricultural Water Management*, 98(9), 1388-1394.

Ruiz, T. J. Entrevista al Director del Sistema Operador de Saneamiento Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Izúcar de Matamoros. (2021)

Tawfik, A., & El-Qelish, M. (2014). Key factors affecting on bio-hydrogen production from co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and kitchen wastewater. *Bioresource Technology*, 168, 106-111.

Torres, J., Gutiérrez, J. A., & Beltrán, H. A. (2020). Compactación, una de las causas más comunes de la degradación del suelo. *Revista Ciencias Agropecuarias*, 3(3), 18-22.

## **PROPUESTA DE VALOR**

Ante la saturación del relleno sanitario intermunicipal, que de no atenderse representa la posibilidad de enfrentar una crisis regional en el corto plazo, la administración 2018-2021 del Ayuntamiento en coordinación con la Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros se ha planteado el reto de buscar alternativas para la gestión integral de los RSU, desde el año 2019 se buscó generar un programa bajo el enfoque *Cero Basura*, el cual busca involucrar a la ciudadanía en la separación de los residuos desde sus hogares, diseñar y establecer un sistema municipal de recolección diferenciada de RSU y así recuperar materiales inertes que puedan destinarse al reciclaje o reutilización para generar nuevos materiales aprovechables por la industria, así como dar tratamiento a la fracción de residuos biodegradables; por diversas razones no se concretó este programa, no obstante se generaron avances tales como la coordinación interinstitucional y la gestión en curso de una subvención ante el Banco Interamericano de Desarrollo en una propuesta conjunta entre instituciones de México, Costa Rica y Colombia así como el compromiso del Ayuntamiento electo (2021-2024) de dar seguimiento a estas propuestas; estas iniciativas, además de pretender dar respuesta al *problema de la basura* abren la posibilidad de convertir una crisis socio ambiental en una oportunidad de desarrollo al recuperar materiales, compost y, en el mediano plazo, la posibilidad de generar energía al mezclar agua residual con los residuos biodegradables produciendo biogás, biofertilizantes (fracción líquida) y composta (fracción sólida); abarcando no solo la dimensión socio ambiental, pues además representa la posibilidad de generar ingresos bajo el enfoque de la Economía Circular, al generar oportunidades de inversión público-privada así como dar viabilidad financiera tanto al ayuntamiento como al sistema operador de aguas quienes actualmente enfrentan enormes retos al erogar considerables cantidades de recursos para la gestión convencional de residuos y dar tratamiento parcial a las aguas residuales, además del importante pasivo ambiental que representa el relleno sanitario, el deterioro del suelo y la contaminación del agua tanto del acuífero como de la subcuenca del río Nexapa.

Este proyecto requiere el desarrollo de capacidades tecnológicas y organizacionales además del arreglo institucional necesario para la permanencia del Programa en el tiempo, lo que podría representar un nuevo paradigma en la gestión de los residuos municipales (líquidos y sólidos), lo que implica la necesidad de que se involucre la ciudadanía, la academia, las empresas, en especial las empresas sociales que están involucradas en el desarrollo local y las instituciones gubernamentales en sus tres niveles, en particular el H. Ayuntamiento de Izúcar de Matamoros 2021-2024, SOSAPAMIM, la Secretaría de Medio Ambiente Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial del Gobierno del Estado de Puebla, CONAGUA, SEMARNAT así como el H. Congreso del Estado de Puebla y el H. Congreso de la Unión en la evaluación y en su caso propuesta de reformas al marco legal y la generación de nuevas políticas públicas.

Contacto:

C. David Navarrete Rosas

[proteccionambientalizucar@gmail.com](mailto:proteccionambientalizucar@gmail.com)

Cel. 2431014158

# Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de un sustrato a base de biocarbón y su efecto en *Amaranthus hypochondriacus* L.

Isabel Jasso-Acosta<sup>1</sup>, Nahúm Andrés Medellín-Castillo<sup>2</sup>, Jaime Reyes-Hernández<sup>3</sup>, Gisela Aguilar-Benítez<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Programa Multidisciplinario en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Dr. Manuel Nava 221. Zona Universitaria, S.L.P., 78290, México. [isajasso@hotmail.com](mailto:isajasso@hotmail.com)

<sup>2</sup>Centro de Investigación y Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Av. Dr. Manuel Nava 8. Zona Universitaria. S.L.P., 78290. México

<sup>3</sup>Facultad de Enfermería y Nutrición. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Av. Niño Artillero 130, Zona Universitaria, S.L.P., 78240. México

<sup>4</sup> Instituto de Investigación de Zonas Desérticas/Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Calle Altair N° 200, Colonia del Llano, S.L.P., 78377. México.

## Introducción

Con el fin de combatir la inseguridad alimentaria y mejorar la salud de la población, se han investigado alimentos ricos en nutrientes y compuestos bioactivos. Un alimento cuyo aporte nutricional es ideal por su perfil nutrimental es el amaranto, el cual es un cultivo originario de Mesoamérica y cuyo uso se remonta al año 5,000 a.C. (National Research Council, 1984) pero que en épocas recientes ha vuelto a tomar relevancia pues ayuda a corregir problemas de carencias nutricionales cuando se suplementa en conjunto con una dieta adecuada. Es así que cada vez es más urgente proveer a la población de alimentos nutritivos producidos mediante sistemas agrícolas en los que no se comprometa la calidad nutritiva de los alimentos ni los recursos utilizados para su producción. Con los sistemas de producción actuales, se desperdicia más del 30% de los alimentos que se producen (FAO, 2011) y se gastan recursos como el agua lo que es un problema cada vez más preocupante pues en Estados Unidos, se utiliza el 83% del agua en tierras de cultivo, lo que afecta directamente a los acuíferos (Carroll et al., 1990).

Producir alimentos de calidad mediante sistemas agrícolas innovadores representa uno de los principales retos en la actualidad y es el cultivo sin suelo un tipo de sistema que conjunta las características deseables e implementa tecnología para producir alimentos sin utilizar suelo. Este sistema de cultivo es apto en sitios donde las características de los suelos no sean aptas para el cultivo o no estén disponibles (Wootton-Beard, 2019). Sin embargo, este tipo de sistemas de producción sin suelo utilizan sustratos que atraviesan procesos químicos nocivos para los ecosistemas o materiales orgánicos de reservas limitadas cuyo uso indiscriminado tiene también repercusiones medioambientales (Nieto Martín, 2015) lo que deja abierta la puerta a la utilización de nuevos sustratos como el biocarbón de madera que es un producto de desecho al que no se le da otro uso y cuyas propiedades fisicoquímicas lo sitúan como material con uso potencial para ser utilizado como sustrato para la producción de alimentos nutricionalmente densos como el amaranto.

## Justificación

En México solo el 19.2% de la población rural vive en condiciones de seguridad alimentaria a pesar de que la principal fuente de empleo (80%) en esas regiones es en la agricultura según la Encuesta

Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT 2012), de la cual, por lo común provienen alimentos sanos. Esto deriva en la falta de sistemas agroalimentarios sostenibles que pudieran tener una base de agricultura familiar con explotaciones agrícolas de pequeño tamaño que produzcan complementos para lograr una dieta adecuada. Los agroecosistemas sostenibles se caracterizan por ser unidades de producción de alimentos, y bienes agrícolas que se basan en el manejo agroecológico y tienden al mejoramiento social, económico y ambiental para el beneficio de la sociedad, haciendo el mejor uso posible de los recursos naturales.

En años recientes, el cultivo del amaranto ha registrado un crecimiento en México y se han dado grandes avances en la industrialización y comercialización del mismo, en consecuencia, la investigación en torno al mismo avanza de manera acelerada. Aunque el principal interés para su cultivo está en sus semillas, puede ser aprovechado casi en su totalidad pues, sus hojas tienen características nutrimentales igualmente óptimas e incluso los tallos llegan a ser utilizados como alimento animal. Este alimento posee un perfil de nutrientes con los que se incrementa la calidad nutritiva de la dieta y que, requiere mínimas habilidades agrícolas para su producción, buscando tener un cultivo nutritivo que sea capaz de satisfacer los requerimientos nutricionales e incluso complementar la dieta de personas con carencias (Silva Sánchez, 2007).

El cultivo sin suelo, permite obtener una cosecha de mayor calidad en la que se incremente la productividad de la planta pues se tiene una utilización eficiente del agua y nutrientes. Al tener la planta limitada a las condiciones que se le proporcionen en el sistema, el éxito o fracaso del cultivo dependerá de la calidad de nutrientes ofrecidos. En los sistemas de cultivo sin suelo, se emplea una mínima cantidad de agua y espacio en comparación con el sistema tradicional de cultivo de alimentos. En este tipo de cultivo, los rendimientos del producto cultivado son mayores pues, se tiene una mayor densidad, mayor productividad y, además, mayor eficiencia en el uso de los recursos como el agua, energía lumínica y nutrientes (Escalante Rebolledo et al., 2016). Además, este tipo de sistema agrícola puede utilizar como sustrato materiales a los que no se les da otro uso como el biocarbón.

El biocarbón o biochar es un material novedoso cuya producción ha emergido pues cuenta con el potencial de mejorar la seguridad alimentaria y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero por su capacidad recalcitrante que retarda el retorno de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (Ippolito et al., 2012, Mašek et al., 2013). Este material ha llamado la atención por ser una de las pocas tecnologías sostenibles, económicas y con gran capacidad de adaptación y respuesta. Entre las principales ventajas estudiadas del uso de biocarbón se encuentra la mejora de la estructura de la tierra y el incremento en la productividad del cultivo, además existe la ventaja económica pues, el bajo costo de obtención del material es atractivo por los beneficios que presenta, así como las ventajas ambientales (Escalante Rebolledo et al., 2016).

Este material se produce mediante un proceso llamado gasificación que tiene una serie de ventajas ambientales entre las que destacan la reducción de emisiones a la atmósfera al ser un proceso semi cerrado que genera menor cantidad de gases contaminantes propios de otros procesos de combustión, puede alimentarse de residuos de otros procesos y además, sus subproductos pueden ser aprovechados. El biocarbón de madera, material de desecho con bajo valor comercial producido a partir del proceso de gasificación, tiene el potencial para ser utilizado como medio de crecimiento o sustrato en los sistemas de cultivo sin suelo proporcionando un valor agregado a este residuo.

## Hipótesis

El uso de un sustrato orgánico a base de biocarbón de madera en el sistema de cultivo sin suelo de *Amaranthus hypochondriacus* L. permitirá la mejora de las características del cultivo y de sus propiedades nutricionales.

## Objetivos

Determinar las propiedades nutricionales y características del cultivo de *A. hypochondriacus* L. utilizando biocarbón de madera como sustrato en un cultivo sin suelo.

1. Obtener un sustrato de biocarbón obtenido de residuos de un proceso de gasificación en horno artesanal y determinar sus propiedades fisicoquímicas.
2. Comparar la eficiencia de diferentes proporciones de sustrato de biocarbón de madera en el rendimiento y características nutricionales de amaranto.
3. Evaluar las características fisicoquímicas y nutricionales de los cultivos producidos a partir de las diferentes proporciones de sustrato de biocarbón utilizadas.

## Metodología

Se utilizará un gasificador artesanal de corriente ascendente del cual se obtendrá el residuo de madera utilizado como combustible (biocarbón) para el proceso de producción de carbonizado de hueso de pez pleco que se emplea en el tratamiento de agua. Este proceso se realiza en las instalaciones de Caminos de Agua A.C., asociación dedicada a innovar e implementar soluciones de agua que resulten en un acceso adecuado a fuentes de agua segura y saludable para beber. En el proceso de síntesis del carbonizado de madera, se registrarán las temperaturas de la cámara de combustión-pirolisis de la madera y carbonizado de hueso así como los pesos iniciales y finales para obtener el rendimiento del material.

Una vez obtenido el biocarbón de madera se determinarán las siguientes propiedades: pH y conductividad eléctrica (CE) por el método propuesto por Lee (2013) utilizando un equipo Thermo Scientific modelo Orion Star A329, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) utilizando el método de extracción con acetato de amonio, el punto de carga cero (PCC) mediante una curva de distribución de la carga superficial, la concentración de sitios activos (Csa) mediante un método potenciométrico, la porosidad total (PT) a partir de la densidad real ( $D_r$ ) y aparente ( $D_a$ ), la densidad utilizando el método APRO, espectroscopía infrarroja (IR) con espectrofotómetro FTIR marca Perkin-Elmer modelo FTIR 1600, las propiedades de textura mediante un análisis de área superficial específica BET y BJH, un análisis elemental de traza tomando las especificaciones de la NMX-FF-109\_SCFI-2007, el nitrógeno asimilable calculado a partir de la determinación de N total y un análisis de microorganismos mediante siembra en medios líquido y sólido. Estas características ayudan a determinar la idoneidad del biocarbón de madera como sustrato para el cultivo sin suelo de amaranto

La preparación de la solución nutritiva utilizando la dosis de nutrientes propuestas por Jia W *et al.*, 2019 basada en la solución nutritiva de Sonneveld mediante la herramienta de cálculo EUPHOROS utilizando los fertilizantes disponibles (nitrato de calcio, nitrato de potasio, ácido fosfórico, sulfato de magnesio y una preparación comercial de micronutrientes quelados).

Previo al cultivo, se realizará una prueba básica de germinación para verificar la viabilidad de uso de las semillas. Posteriormente, se sembrarán semillas de amaranto en semilleros para su germinación y posterior trasplante las bolsas de cultivo con sus respectivos tratamientos. Se realizará un diseño experimental completamente al azar con arreglo aleatorio con el software Design Expert versión 13 para aleatorizar las condiciones que pudieran influir en los resultados, se utilizarán 4 tratamientos de mezclas de sustrato (Tabla 1) y se utilizará la perlita como sustrato testigo con 6 repeticiones por tratamiento para un total de 24 unidades experimentales y se tendrá el cultivo en un invernadero de cristal dentro de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la UASLP con monitoreo de condiciones.

**Tabla 1.** Composición de los tratamientos preparados a partir de biocarbón de madera (BM) y perlita (P).

<b>Tratamiento</b>	<b>Componente</b>	<b>v/v</b>
<b>T1</b>	BM/P	100.0/0.0
<b>T2</b>	BM/P	75.0/25.0
<b>T3</b>	BM/P	50.0/50.0
<b>TC</b>	BM/P	0.0/100.0

Se evaluarán las siguientes variables a partir de plantas de amaranto: altura y diámetro de tallo, ancho y largo de la panoja, pH y conductividad eléctrica, temperatura y eficiencia fotosintética utilizando un fluorímetro O530p Opti-Sciences Inc y el índice de cosecha y rendimiento calculados a partir del peso. Además de las variables físicas evaluadas, se realizará una caracterización de las propiedades nutrimentales de la semilla de amaranto, a partir de la cual se pretende conocer el contenido de proteína utilizando el método Kjeldhal, grasa mediante extracto etéreo, hidratos de carbono mediante determinación, cenizas y fibra a partir de un análisis termogravimétrico y minerales por microscopía electrónica de barrido así como una determinación de minerales por espectrofotometría de absorción atómica, perfil de aminoácidos por cromatografía de líquidos-HPLC y una determinación de ácidos grasos y triglicéridos mediante cromatografía de gases (CG-FID). Los resultados obtenidos de la caracterización de semillas de amaranto serán sometidos a un análisis de varianza y prueba de media de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para su posterior discusión.

### Referencias bibliográficas

1. Carroll, CR; JH Vandermeer; P. Rosset. 1990. Agroecology. McGraw-Hill. New York. 641.
2. Escalante Rebolledo, A., G. Pérez López, C. Hidalgo Moreno, J. López Collado, J. Campo Alves, E. Valtierra Pacheco y J. D. Etchevers Barra. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. Terra Latinoamericana. 34: 367-382.
3. Food and Agriculture Organization. (2011). Global Food Losses and Food Waste. United Nations. Consultado 20 de abril de 2021, desde: <http://www.fao.org/3/mb060e/mb060e00.htm>
4. Ippolito JA, Larid DA, Busscher WJ. (2012). Environmental benefits of biochar. Journal of Environmental Quality. 41: 967-72.
5. National Research Council. (1984). Amaranth: Modern Prospects for an Ancient Crop. Washington, DC: The National Academies Press.



6. Nieto Martín A. (2015). Fabricación, caracterización y utilización de biochar como sustituto de la turba en la preparación de sustratos de cultivo. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
7. Silva Sánchez, C. (2007). Caracterización fisicoquímica y nutracéutica de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*) cultivado en San Luis Potosí.
8. Wootton-Beard P. (2019). Growing without soil: an overview of hydroponics. Farming Connect.

## Propuesta de valor

La propuesta descrita utiliza biocarbón obtenido de residuos de la industria maderera y producido mediante gasificación en un horno artesanal de la asociación Caminos de Agua A.C. para la producción de carbonizado hueso, el cual se emplea para la remoción de fluoruros de comunidades de Atotonilco, Guanajuato. Este biocarbón se utiliza como sustrato en un sistema de cultivo sin suelo; en el que se tiene un manejo eficiente del agua mediante el riego por cintilla, para la producción de amaranto; el cual es un alimento completo que puede ser utilizado como complemento en la dieta de personas con problemas de malnutrición.

Una vez desarrollado el proyecto y cuando se haya comprobado empíricamente la factibilidad de la producción de un alimento de calidad, se propone la incorporación de este sistema en la agricultura de traspatio o huertos rurales a nivel familiar para el autoconsumo con la finalidad de mejorar la autosuficiencia y alcanzar la seguridad alimentaria específicamente en su dimensión del acceso físico ya que mediante este sistema se garantiza el acceso a un alimento de calidad. Este tipo de proyectos han demostrado en nuestro país, que son capaces de proporcionar beneficios nutricionales, de educación y concientización medioambiental. Su implementación se ha dado a partir de iniciativas internacionales como la llamada “The Growing Connection” apoyada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), también en el año 2017 la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SAGARPA) a través del Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) otorgó apoyos de este tipo en el estado de Chiapas a través del Componente de Desarrollo Productivo del Sur Sureste y encontraron a la agricultura de traspatio como una alternativa en beneficio de comunidades marginadas.

La agricultura de traspatio o huertos urbanos tienen beneficios adicionales para los hogares en los que se implementa además de los previamente mencionados que derivan en un fomento de la cultura de protección ambiental. Es así que se dirige a personas que no poseen condiciones aptas para la producción de alimentos nutritivos y se hace la propuesta con el fin de mejorar la calidad de su dieta con el complemento del amaranto, entendiéndose como condiciones no aptas la escasa disponibilidad de suelo, espacio y agua para el cultivo. Mediante este proyecto se plantea el empoderamiento social y económico para la seguridad alimentaria y nutrición de las familias a quienes se dirige, esta es una de las principales áreas de acción de la FAO para el desarrollo de Objetivos y Metas de Desarrollo Sostenible (ODS) números 2 (hambre cero) y 12 (producción y consumo responsables) principalmente.

Es así que este proyecto se dirige al Comité Técnico Especializado de los ODS en México el cual está a cargo del Gobierno de México y de la Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo, del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, siendo los objetivos planteados específicamente de competencia de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano y de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales en sus dependencias federales.

# Adaptación de procesos de oxidación avanzada con biofiltros para el tratamiento de agua de lluvia

Refugio Rodríguez Vázquez,<sup>1,2</sup> Netzahualcoyotl de los Santos Rívoli,<sup>2</sup> y Daniel Bahena Uribe.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Biotecnología y Bioingeniería, <sup>2</sup>Programa de Nanociencias y Nanotecnología, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México.

## RESUMEN

El agua de lluvia es una alternativa para aportar en la solución al problema de escasez del agua para consumo humano, debido a ello es importante establecer diversas estrategias, entre ellas proponer tratamientos sustentables para mejorar la calidad del agua. Por lo que la propuesta de valor es el tratamiento del agua de lluvia con biofiltros adaptados a Procesos de Oxidación Avanzada (POA). El agua de lluvia se trató con biofiltros (humedales artificiales) acoplados a POA. Los resultados mostraron la eliminación en un 100% de los Coliformes fecales y de *Escherichia coli* ( $1 \times 10^{-3}$  -  $1 \times 10^{-5}$  NMP), el aumento en el Oxígeno Disuelto (OD) y en el Potencial de Óxido Reducción (RedOx), y la disminución de los sólidos totales disueltos (STD) del agua tratada. Se mostró, que el agua de lluvia cumple con los estándares de calidad para consumo humano. Así mismo, se realizó la previa integración y evaluación de los POA a dos PTAR, que cumplieron con los estándares de calidad del agua para su uso en servicios.

Se sugiere como propuesta de valor adicional, la implementación de tecnologías sustentables desarrolladas por el grupo de trabajo, para el tratamiento del suelo, residuos sólidos y el agua, con el fin de mitigar la emisión de contaminantes a la atmósfera y con ello poder proveer de agua de calidad para consumo humano.

## INTRODUCCIÓN

El aumento en la población y las actividades económicas en la Ciudad de México han causado problemas de contaminación ambiental y escasez de agua en los años recientes, por la generación de un sobre suministro de las fuentes de agua, las cuales han sido intensificadas debido a que la Ciudad de México, geográficamente esté localizada en un área con dificultad de acceso a dicha fuente [1]. Actualmente la población enfrenta una reducción significativa en la fuente de agua fresca principal, la cual primordialmente es usada para el suministro a las demás ciudades. El problema de suministro incluye una solución integral, puesto que no es factible que las autoridades resuelvan el problema unilateralmente [2].

Las contribuciones del ciclo hidrológico no suplen la demanda de agua, siendo que dos terceras partes de la población mundial vive en áreas que reciben anualmente un cuarto del agua de lluvia [3]. El problema de la escasez del agua es posible resolverlo si se encuentra una fuente alternativa de suministro del agua, que pueda cubrir la demanda actual. La cosecha y purificación de agua de lluvia representa una alternativa viable, para proveer el agua, en cantidad, calidad y de manera continua a las poblaciones que no tienen acceso al agua potable. El agua de lluvia tiene un gran potencial para consumo humano, puesto que no requiere de tratamientos complejos, ni costosos, debido a que se evitan los procesos de extracción y distribución [1]. Es importante mencionar, que en el año 2006 en el territorio Mexicano, el promedio anual de lluvia fue de 1500 kilómetros

cúbicos de agua, la cual no se ha usado completamente [4]. Particularmente en la Ciudad de México, la lluvia anual en el año 2017 fue de 488 mm, este valor incrementó en el año 2018, alcanzando una precipitación de 781.4 mm hasta el mes de Noviembre [5].

Sin embargo, aunque la captación de agua de lluvia es una alternativa ante la escasez que se presenta a nivel mundial, se debe de considerar que uno de los problemas más fuertes relacionados con el uso de agua de lluvia, es la contaminación por microorganismos patógenos. Entre las causas principales de su presencia, se tienen las condiciones de almacenamiento de las cisternas, debido a la acumulación de sólidos, y desechos fecales de animales y aves [6], o en el agua colectada, en donde se han detectado cepas de *E. coli* [7]. Otra fuente de contaminación de patógenos se debe a la emisión de bioaerosoles producidos por la evaporación de las aguas residuales vertidas a los canales y ríos, y los generados durante la aireación del agua en las PTAR. La contaminación microbiana del aire es evidente en ciudades, como; Korea, Nigeria, Australia, Nueva Zelandia, entre otras [8]. Al llover estos patógenos y los diversos contaminantes son lavados, y requiere de una desinfección, siendo el método de aplicación la cloración, sin embargo el agente químico usado puede reaccionar con la materia orgánica natural, generando subproductos de la desinfección, los cuales son potencialmente dañinos a la salud humana [9].

El objetivo de esta propuesta es establecer tratamientos combinados para la desinfección del agua de lluvia. Adicionalmente se sugiere como propuesta de valor una estrategia para mitigar la emisión de contaminantes a la atmósfera por medio de diversas tecnologías para el tratamiento del suelo, agua y de los residuos sólidos. Dichas tecnologías han sido desarrolladas por el grupo de trabajo, y aplicadas en la zona chinampera [10], para rehabilitación del suelo mediante la aplicación de residuos orgánicos (residuos de café, naranja); el tratamiento de abonos crudos a través del proceso de compostaje acelerado/energía eólica; el tratamiento de aguas residuales por POA, y la oxigenación del agua de canales y ríos con sistemas de Micro-Nano-Burbujas (MNB).

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Tratamiento del agua de lluvia.**

El agua de lluvia utilizada para su tratamiento fue adquirida de tres instalaciones ubicadas en la zona norte y sur de la CdMx; En la zona norte el agua fue tomada de una de las 5 cisternas del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav-IPN), Alcaldía Gustavo A. Madero, CdMx. Así mismo en la zona norte el agua de lluvia se cosechó en canaletas en el Centro de Educación Chinampera, Caltongo y en la “Granja-Chinampa Aurora”, Paraje de Texhuilo, Alcaldía de Xochimilco de la CdMx. Posteriormente se procedió a la caracterización físico-química y microbiológica del agua de lluvia, de acuerdo a la Normatividad NOM-127-SSA1-1994 [11].

### **Tratamiento del agua en el biofiltro acoplado al proceso de oxidación avanzada.**

Las condiciones del tratamiento del agua de lluvia en cada sitio se presentan en la Tabla 1. En la zona norte se seleccionó el agua de lluvia contenida en la cisterna 3, localizada a un lado del Departamento de Física del Cinvestav, por presentar los valores más altos de la cuenta de Coliformes fecales ( $1 \times 10^{-3}$  NMP/ml). El agua se trató por 5 horas en el biofiltro de 1500 L de capacidad, conteniendo material inorgánico (grava, gravilla y arena) y vegetal (carrizo, *Phragmites australis*). Posteriormente, se bombearon 250 L del agua filtrada hacia el Reactor de Foto-Nano-Catálisis, (RFNC), con capacidad de 68 000 L/día y constituido por un soporte de vidrio recubierto con una película de TiO<sub>2</sub>, tres lámparas de radiación Ultravioleta (UV), y un compresor.

El agua de lluvia colectadas en el Centro de Educación Chinampera y en la “Chinampa- Granja Aurora” se cosechó en canaletas, posteriormente el agua se trató en el sistema de biofiltro/RFNC,

y se oxigenó con el sistema de generación de MNB, accionado con energía solar y con adición de peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), respectivamente.

**Tabla 1.** Características del sistema de tratamiento de agua de lluvia con biofiltros/POAs.

Zona	Volumen del Biofiltro (L)	Tipo de energía para el bombeo	Soporte/Vegetal (Carrizos)	Captación del agua de lluvia	Volumen de los tanques (L)	RFNC	Suministro de O <sub>2</sub>	Costo (\$ M.N.)
Zona Norte	1 200	Eléctrica	Grava, gravilla y arena/ <i>Phragmites austriales</i>	Almacenada en cisterna	250	Acero inoxidable Con TiO <sub>2</sub>	Aire suministrado con un compresor de 2 HP	150,000.00
Zona Sur Caltongo	750	Solar	Gravilla y tezontle/ <i>Arundo donax</i>	Captada en canaletas	250	PVC Con TiO <sub>2</sub>	MNB/energía solar	40, 000,00
Paraje Texhuilo	200	Solar	Gravilla/sin vegetal	Captada en canaletas	200	PVC Sin TiO <sub>2</sub>	Energía solar/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	25, 000.00

Condiciones de la fotocatalisis: Lámparas de UV de 90 cm de largo; películas de TiO<sub>2</sub> preparadas en tubos de vidrio de 60 x 20 cm (longitud, diámetro).

### Análisis fisicoquímico y microbiológico del agua

Se tomaron 500 mL de agua de lluvia sin tratar y tratada en frascos estériles, para los análisis de la cuenta de Coliformes fecales, *E. coli* y huevos Helminto, de acuerdo al procedimiento establecido en la normatividad [11]; Los análisis de los parámetros fisicoquímicos; pH, OD, RedOx, STD, fueron analizados con la sonda multiparamétrica (Hanna HI 9829).

## RESULTADOS

La concentración de los metales (Cr, Zn, Pb, Cd, As) en el agua de las 5 cisternas estuvieron por debajo de los límites establecidos en la Normatividad para el agua de consumo humano [11]. Sin embargo, el pH del agua de la cisterna 3, la dureza total (determinada como CaCO<sub>3</sub>) del agua de las cisternas 1, 2 y 5, y la concentración de Fe en el agua de las cisternas 1, 2, 4 y 5, sobrepasaron los límites establecidos en la normatividad. La concentración de sólidos totales fue baja, lo que favoreció la eficiencia del tratamiento del agua en el RFNC. La cuenta de coliformes y de *E. coli*, en el agua de la cisterna 3 fue la más alta ( $1 \times 10^{-3}$  NMP/ml), por ello se seleccionó para realizar el tratamiento. La presencia de patógenos en el agua de lluvia de las cisternas podría ser causada por la contaminación del aire, y como se mencionó previamente por los residuos de aves y animales [6].

### Inactivación de coliformes totales y de *E. coli*

El tratamiento del agua con TiO<sub>2</sub>/UV/MNB y con UV/MNB inactivaron los coliformes totales y *E. coli*, en 15 minutos, y 30 minutos, respectivamente, teniéndose la alternativa de omitir la película de TiO<sub>2</sub>. El tiempo empleado para inactivación de *E. coli* es cercano al obtenido con UV-C y TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> [12], la alta eficiencia del tratamiento es posible que se deba a la estructura química del catalizador (TiO<sub>2</sub>). Principalmente de la fase anatasa, la cual es más reactiva que la fase rutilo [13] y esta fase se presenta durante la intemperización de la película de TiO<sub>2</sub>, [14] y por el efecto de los radicales libres de oxígeno generados, particularmente del radical hidroxilo (<sup>•</sup>OH), [14;15]. Este radical presenta un elevado potencial de oxidación [15], que daña la membrana citoplásmica de los microorganismos, causando lisis celular [15]. En las muestras control, (sin radiación UV)

no se observó la inactivación de los Coliformes fecales ni de *E. coli*, debido a que no se producen radicales libres.

### **Tratamiento del agua de lluvia en la zona sur de la CdMx**

Los valores de los parámetros fisicoquímicos del agua tratada en el biofiltro a 0,1,4 y 8 días, mostraron que a mayor tiempo el pH subía ligeramente, lo cual podría ser ocasionado por el efecto de los componentes del soporte y los STD aumentaron casi al doble, debido a los posibles exudados de los carrizos y componentes del soporte. A partir de los 15 minutos de tratamiento en el RFNC se observó la inactivación de los Coliformes fecales en el agua pretratada por 8 días en el biofiltro y oxigenada con las MNB. El mismo efecto se presentó en el agua tratada y oxigenada con la adición de 1mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> /L de agua de lluvia.

### **REFERENCIAS**

- [1]. L. Torres, The state as administrator of water in the management of drinking water in Mexico City. The water challenges of the CDMX: Governance and sustainability. 1st edition. México City, Cd.Mx., D.F: Cuajimalpa, 2017, 15-16.
- [2]. *Manual for collecting rainwater for urban centers*. United Nations Environment Program, USA, 2008, 3.
- [3]. J.C. Salinas, R.A. Cavazos, and J.A. Vera, Evaluation of a rainwater collection system in the metropolitan area of Monterrey, for its use as an alternative means, *Engineering*, 2016, 20, 1, 1-13.
- [4] S. Garrido, M. Avilés, A. Ramírez, L. Barrera, A. González, L. Montellano, R. Ramírez, and O. Cervantes, “Water purification of rolled rain by means of modified multi-stage filtration, México,” *Official Journal of the Federation*, pp. 41-46, 2005.
- [5] CONAGUA, 2018.
- [6] M. T. Amin, and M. Han, Probable sources of microbial contamination of stored rainwater and its remediation, *Australian J. of Basic and Applied Sciences*, 2011, 5(12), 1054-1064.
- [7] A.M. Ryan, C.L. Spash, and T. G. Measham, Socio-economic and phycological predictors of domestic greywater and rainwater collection: Evidence from Australia, *J. of Hydrology*, 2009, 379, 164–171.
- [8] M.N. Rojas-Valencia, and J.R. Gallardo-Bolaños, Implementation and characterization of a system for collecting and using rainwater, *Specialized J. in Chemical-Biological Sciences*, 2012,15(1), 16-23.
- [9] J. J. Rook, Haloforms in drinking water, *Journal AWWA*, 1976, 68(3), 168-172.
- [10] Proyecto Altepétl, CORENA-SEDENA de la CdMx, 2018-2021.
- [11] Environmental health, water for human use and consumption. Permissible quality limits and treatments to which water must be subjected for its purification Health Secretary. Official Mexican Standard NOM-127-SSA1-1994. Ministry of Health, 1994.
- [12] C. Despins, K. Farahbakhsh, and C. Leidl, Assessment of rainwater quality from rainwater harvesting systems in Ontario, Canadá, *J. of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 2009, 50 (2), 117-134.
- [13] J. C. Pantoja-Espinoza, J. B. Proal-Nájera, M. García-Roig, I. Cháirez-Hernández, and G. I. Osorio-Revilla, Comparative efficiencies of inactivation of coliform bacteria in municipal effluents by photolysis (UV) and by photocatalysis (UV / TiO<sub>2</sub> / SiO<sub>2</sub>). Case: water treatment plant of Salamanca, Spain, *Mexican J. of Chemical Engineering*, 2015, 14(1), 119-135.

[14] N. Tapia Orozco and R. Rodríguez-Vázquez, 2013. Photoactive TiO<sub>2</sub> films formation by drain coating for endosulfan degradation. International Journal of Photoenergy. Hindawi Publishing Corporation. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/560840>.

[15] D. M.A. Alrousan, P.S.M. Dunlop, T.A. McMurray, and J.A. Byrne, Photocatalytic inactivation of *E. coli* in surface water using immobilized nanoparticle TiO<sub>2</sub> films, *Water Research*, 2009, 43, 47-54.

## Propuesta de valor

- Se propone el tratamiento del agua de lluvia como alternativa a la solución de la escasez de agua, mediante la adaptación de biofiltros a POA (TiO<sub>2</sub>/UV/MNB; UV/MNB; UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). El tratamiento de agua de lluvia con biofiltros/POAs mostró un aumento en la oxigenación del agua de lluvia, una reducción en los sólidos suspendidos totales, y la inactivación de los Coliformes fecales y *E. coli*.

-Se propone la creación de un Programa General para el Tratamiento de Suelo, Residuos Sólidos y Agua, con el fin de mitigar la emisión de contaminantes a la atmósfera y con ello mejorar la calidad del agua de lluvia. El Programa incluye Tecnologías desarrolladas por el Cinvestav-IPN que han sido aplicadas a través de varios convenios y contratos con la Industria y con el Gobierno de la CdMx:

- a) Tratamiento de aguas residuales con POAs, este tipo de agua está contaminadas con microorganismos patógenos (Coliformes fecales, *E. coli*, Salmonella, Huevos de Helminto, etc.), causantes de diversas enfermedades gastrointestinales. Estos microorganismos se pueden emitir a la atmósfera a través de bioaerosoles. Además se tienen otros contaminantes orgánicos, denominados disruptores endócrinos (hormonas, plaguicidas, plastificantes). Ambos tipos de contaminantes no se eliminan completamente con los procesos de tratamiento del agua convencional. Actualmente se han instalado 2 PTAR con POAs, (en etapa de comercialización), 2 sistemas de biofiltro/POA en la zona chinampera (demostrativas) y una PTAR piloto en el Cinvestav-IPN (demostrativa).
- b) Tratamiento con biofiltros para el agua de los canales usada para el riego de hortalizas. Se han instalado 60 biofiltros en la zona chinampera [10] (En evaluación).
- c) Oxigenación de las aguas de canales y ríos de la CdMx por medio de MNB generadas con energía solar, proveen de oxígeno al agua y contribuyen a la reducción de las condiciones anóxicas causantes de la generación de metano, anhídrido sulfhídrico (denominado “gas de las coladeras”), entre otros contaminantes. Se cuenta con 2 prototipos instalados en las trajineras de Xochimilco.
- d) Restauración de suelos contaminados con hidrocarburos y de suelos salinos agrícolas. El tratamiento biológico (biorremediación) con la adición de residuos agroindustriales (pajas, café, cítricos) (Patente Mexicana No. 291975), se ha aplicado a 35, 000 toneladas de suelo excavado de la ex refinería “18 de Marzo”, actualmente “Parque Bicentenario”. Otra aplicación se tiene en la zona chinampera en donde se ha tratado el suelo salino agrícola de 150 chinampas, con una reducción de la salinidad del 51% [10], (Continúa el tratamiento del suelo).
- e) Tratamiento de residuos sólidos con compostaje acelerado, (energía eólica y aceleradores de composta), los residuos sólidos son el estiércol de caballo, vaca, cerdo, gallina, excretas,



etc.), que son usados como abono para fertilizar el suelo, sin embargo, contaminan el ambiente con microorganismos patógenos y generan diversos gases de efecto invernadero. Se han instalado 9 módulos de 1.2 toneladas, empleando el lirio acuático, maleza seca y el estiércol de caballo crudo del sitio [10] (En evaluación).

# EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE Cd EN MEZCLA Y TOLERANCIA A AGUAS RESIDUALES POR VITROPLANTAS DE *TYPHA* SP. CON ADICIÓN DE ÁCIDO CÍTRICO

Amauri Ponce Hernández; Ramón Fernando García de la Cruz; Ángel Josabad Alonso Castro; Candy Carranza Álvarez.

**Palabras clave:** *Typha* sp., ácido cítrico, aguas residuales.

**Introducción:** El agua dulce es un recurso de vital importancia, que es clave para la salud humana, seguridad alimentaria y muchos aspectos más para el desarrollo sostenible (ONU, 2018). Sin embargo, al igual que otros recursos naturales, el agua se ha visto amenazada, debido a la extracción excesiva y descargas de aguas residuales a los cuerpos lóticos. De acuerdo con el Banco Mundial (2020), del agua residual del mundo, el 80% se vierte al ambiente sin haber recibido un tratamiento adecuado. En América Latina y el Caribe, solo un 30 a 40 % de las aguas residuales de la región que se captan son tratadas. Lo que ha provocado un aumento en concentración de elementos tóxicos en agua (Rodríguez, 2015).

Como una estrategia para llevar a cabo el cumplimiento de los ODS en el sector de agua se han aplicado operaciones como la reutilización y saneamiento adecuado de agua, que contribuyen significativamente a la reducción de contaminación (Koop y van Leeuwen, 2017). Sin embargo, el tratamiento convencional de las aguas residuales generalmente termina con un tratamiento secundario que no puede eliminar eficientemente todos los contaminantes que se encuentran en las aguas como metales pesados. Existen diversas opciones eficientes para el tratamiento de aguas contaminadas, como lo son los métodos fisicoquímicos, no obstante, estos resultan ser muy costosos y consumen mucha energía (Chandra y Kumar, 2017). Por lo cual, una tecnología emergente en la restauración ambientes acuáticos es la fitorremediación, la cual ha ganado popularidad por ser una tecnología no invasiva, relativamente barata y considerada como una tecnología “verde” (Peer *et al.*, 2006).

Dentro de las plantas conocidas por su capacidad de fitoextraer y acumular altas concentraciones de metales pesados se encuentran las plantas del género *Typha*. Dichos organismos vegetales crecen en cuerpos acuáticos y en sitios impactados por metales pesados.

Sin embargo, la capacidad de fitoextraer y acumular metales produce que las plantas expuestas a concentraciones altas de metales o a aguas residuales presenten signos de toxicidad como clorosis, marchitamiento y deshidratación.

Una estrategia adecuada para reducir los signos de toxicidad en plantas expuestas a metales pesados o a aguas residuales es el empleo de ácido cítrico, ya que se conoce que el ácido cítrico (AC) se ha utilizado como una estrategia ambiental para aumentar la fitoextracción de metales pesados y mejorar la fisiología de las plantas cuando están expuestas a condiciones estresantes.

El **objetivo** del trabajo es evaluar el efecto del AC en la tolerancia a aguas residuales y capacidad de fitoextracción de Cd por *Typha* sp.

**Justificación:** Se conoce que el ácido cítrico se ha utilizado como una estrategia ambiental para aumentar la fitoextracción de metales pesados y mejorar la fisiología de las plantas cuando están expuestas a condiciones estresantes. Por lo cual es importante evaluar el efecto del AC en la tolerancia a aguas residuales y capacidad de fitoextracción de Cd por *Typha* sp.

**Hipótesis:** El ácido cítrico (AC) puede aumentar la capacidad de fitoextracción de metales (Cd y Pb) y la tolerancia a aguas residuales en vitroplantas de *Typha* sp.

## Metodología:

**Análisis fisicoquímico de muestras de agua residual.** Las muestras se tomaron de las cuatro etapas del proceso de tratamiento de la Planta de tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), las cuales fueron: 1) entrada, 2) posterior al pretratamiento, 3) reactores de lodos y 4) salida. ello se midieron parámetros como temperatura, pH, Sólidos totales disueltos (STD) y conductividad utilizando un medidor de campo (*Marca HANNA instruments, HI991301*). Para la determinación de dureza total se siguió el protocolo establecido por la NMX-AA-072-SCFI-2001.

**Cuantificación de metales en aguas residuales por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA).** se procedió a realizar el proceso de digestión ácida de agua residual, con HNO<sub>3</sub> concentrado al 50%, en dilución (1:4). Posteriormente, se realizó digestión ácida en autoclave a condiciones de 121 °C por 30 min. En seguida se cuantificó la concentración de metales Cd y Pb a través de EAA por horno de grafito.

**Establecimiento del cultivo in vitro de Typha sp.** se colectaron semillas de *Typha sp.*, provenientes de la inflorescencia de la especie vegetal de plantas adultas ubicadas en humedal natural. Enseguida se llevaron a un proceso de asepsia descrito por Moctezuma-Granados (2017). Posteriormente se preparó medio de cultivo semisólido MS (4.43 gr de medio, 15 g/L de sacarosa, 4.4 g/L de agar plant) a un pH de 5.7 a 6.8. El medio se vertió en frascos de polipropileno de 1 L y se llevaron a esterilización en autoclave a 121°C durante 15 min. Finalmente, en campana de flujo laminar se sembraron las semillas sobre el medio MS y posteriormente, se etiquetaron y se colocarán en el cuarto de cultivo bajo condiciones controladas de temperatura y fotoperiodo (24 °C y 16 / 8 hrs de luz / oscuridad).

**Exposición de Typha a aguas residuales y solución de metales.** se colocaron por separado 20 mL de agua residual esterilizada (ARE) y agua residual cruda (ARC) de cada etapa de la planta de tratamiento (entrada, pretratamiento, reactor de lodos y salida) en tubos de vidrio de 20 cm. En cada tubo se expusieron 2-3 plántulas de *Typha sp.* de 10-

15 cm de altura provenientes del cultivo *in vitro*.

Por otro lado, en tubos de vidrio de 20 cms se adicionaron 20 mL de medio Hoagland's con distintas concentraciones de mezcla de metales Cd<sup>2+</sup> (0, 0.5, 0.75, 1, 2.5 y 5 ppm) más de Pb<sup>2+</sup> (0, 1, 1.5, 2, 5 y 10 ppm) respectivamente. Se ajustó el pH a 5.7 y la fuerza iónica con NaNO<sub>3</sub> 0.05 M. En cada tubo se colocaron 2-3 plántulas de *Typha sp.* de 10 – 15 cm de altura, provenientes del cultivo *in vitro*. Las plántulas en estas condiciones de cultivo se mantuvieron durante 15 días en el cuarto de cultivo, y se tomaron muestras de las soluciones a partir del día 0, 3, 6, 9, 12 y 15 de experimentación para evaluar la remoción de metales. Este experimento se realizó nuevamente, pero en esta ocasión adicionando ácido cítrico 5 mM.

**Evaluación de parámetros de fitotoxicidad.** El índice de crecimiento (IC) se realizó considerando la talla inicial y final de la planta al término de la exposición, utilizando la ecuación 1.

$$\text{Índice de Crecimiento (IC)} = \frac{\text{talla final}}{\text{talla inicial}} \quad \text{Ecuación 1}$$

La determinación de clorofila a, b y total se realizó de acuerdo con el método de Arnon (1949).

**Cuantificación de metales en tejido vegetal y medio de cultivo por EAA.** Primeramente, las plántulas se seccionaron en raíz y tejido aéreo, y se sometieron a un proceso de secado durante 24 horas a 70° C en estufa de convección y enseguida se pulverizó empleando un mortero. Posteriormente, el tejido vegetal seco y pulverizado se sometió al proceso de digestión ácida asistida por microondas, se emplearon 3 mg de tejido vegetal y se adicionaron 7 mL de HNO<sub>3</sub> concentrado y 1 mL de HCl concentrado. enseguida las muestras se aforaron a un volumen de 15 mL con agua destilada. Finalmente se cuantificó el contenido de metales (Cd y Pb) por espectrofotometría de Absorción atómica.

Para la digestión del medio Hoagland se tomaron muestras de 0.5 mL del medio, en tubos cónicos de 15 mL los días 3, 6, 9, 12 y 15. Posteriormente se adicionaron 2 mL de HNO<sub>3</sub> al 50 %, dilución (1:4) en tubos cónico

de 15 mL. Por último, se realizó digestión en autoclave a 121 °C, durante 30 min.

**Análisis estadístico.** Se realizaron las pruebas de Shapiro-Wilk y Lilliefors para determinar la normalidad de los datos analizados. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA), seguido de un análisis post-hoc empleando la prueba Tukey para tratar datos paramétricos, donde un valor de  $p < 0.05$  indicaba diferencias significativas. Por otro lado, para tratar los datos no paramétricos se llevó a cabo la prueba de Kruskal Wallis. Los valores obtenidos para cada ensayo realizado fueron analizados con el programa estadístico STATISTICA 8.0 y para la construcción de gráficos se empleó el software SIGMAPLOT.

### Resultados y discusión:

**Aspecto.** Los resultados obtenidos en el presente trabajo indican que el agua residual de la etapa “entrada” y “pretratamiento” presentaron un aspecto turbio. Para la muestra de la etapa de “reactor de lodos” tenía un aspecto muy turbio y la etapa de “salida” exhibió un aspecto transparente (Tabla 1).

**Color.** En la figura 1 se observa la coloración de cada muestra de agua residual. En la Tabla 1 se indican las coloraciones que las muestras de agua presentaron. De acuerdo con los resultados, las muestras de agua de entrada, pretratamiento y salida presentaron una coloración ligeramente grisácea. Generalmente el agua residual fresca presenta una coloración ligeramente gris claro o café claro, debido a que las aguas pudieron haber sufrido algún grado de descomposición de compuestos orgánicos.

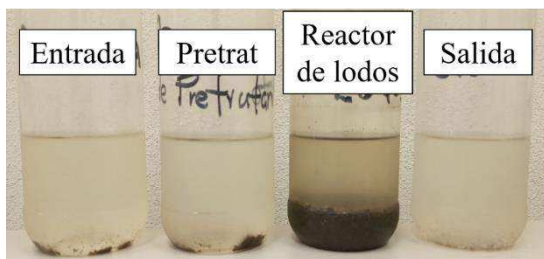


Fig. 1. Muestras de agua residual de las etapas de la PTAR.

**Olor.** Para el caso del agua residual de las etapas de entrada y pretratamiento, se indica que la calidad del olor es de materia fecal. Este olor es producido principalmente por la presencia de un compuesto denominado

escatol ( $C_9H_9N$ ), mismo que se encuentra naturalmente en las heces fecales. Para la muestra de reactor de lodos, la calidad de olor es similar a huevos podridos. Este olor es el más característico del agua residual séptica, se debe a la presencia de sulfuro de hidrogeno  $H_2S$ .

**Dureza total.** En la Tabla 1, se observa que los valores de dureza total para cada muestra analizada sobrepasaron los límites establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 ( $500 \text{ mg L}^{-1}$ ). Lo anterior cataloga a las muestras de agua residual como aguas muy duras, es decir con un alto contenido en iones Ca y Mg.

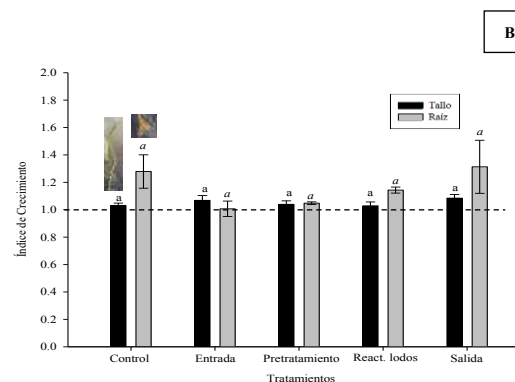
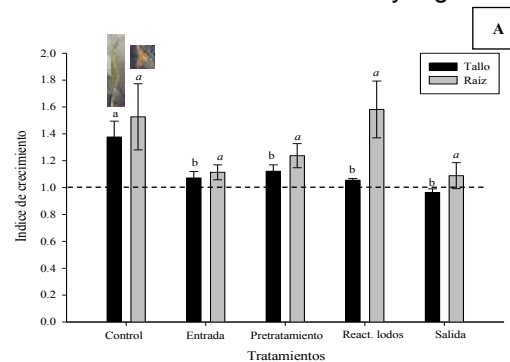


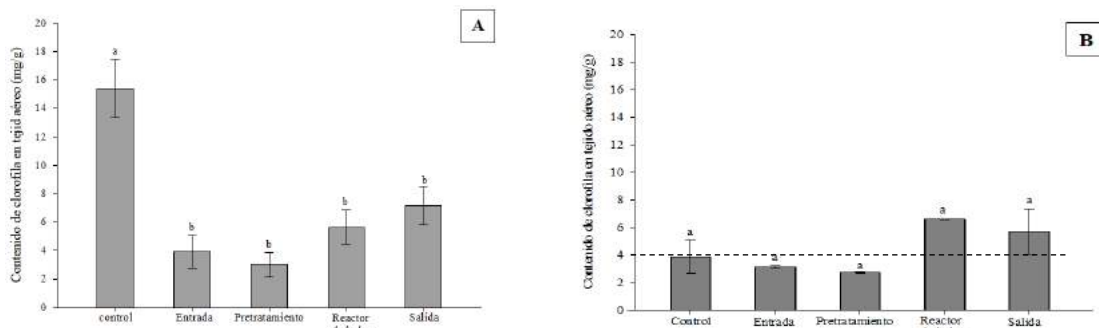
Fig. 2. Determinación de índice de crecimiento (IC) en plántulas de *Typha* sp. expuestas a: (A) aguas residuales estériles (ARE) y (B) aguas residuales crudas (ARC).

En la figura 2 se observa que las ARE promovieron más el crecimiento del tallo y raíz de plántulas de *Typha* sp. en comparación con las ARC. Lo anterior puede ser debido a que en las ARE los microorganismos que murieron por el efecto de la esterilización sirvieron como fuente de carbono para nutrir las plántulas de *Typha*.

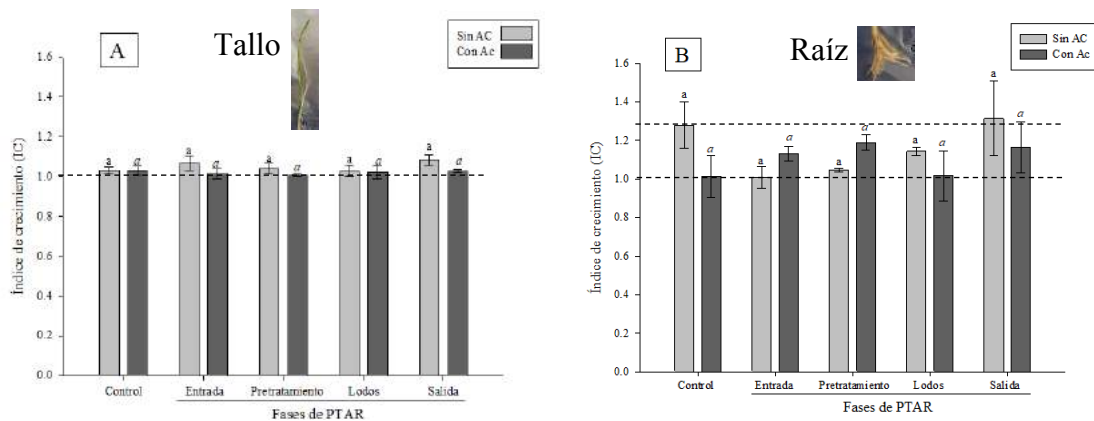
En la figura 3 se observa una reducción significativa en el contenido de clorofila cuando las plantas se expusieron a ARE en comparación con el control.

**Tabla 1.** Mediciones fisicoquímicas de aguas residuales de las 4 etapas de tratamiento.

parámetros	Etapas de muestreo				Límites permisibles (NOM-003- SEMARNAT-1997)
	Entrada	Pretratamiento	Reactor de Lodos	Salida	
Aspecto	Turbio	Turbio	Muy turbio	Transparente	Transparente
Color	Ligeramente grisáceo	Ligeramente grisáceo	Grisáceo oscuro	Ligeramente grisáceo	Incoloro
Olor	Materia fecal	Materia fecal	Huevo podrido	Agradable	Agradable
Temperatura °C	25.9	26.1	26	26.1	35
pH (0 - 14)	7.22	7.10	6.55	7.33	6.5 – 8.5
Conductividad (mS cm <sup>-1</sup> )	0.71	0.73	0.74	0.67	0.5 – 1.0
STD (mg L <sup>-1</sup> )	360	370	370	330	1000
Dureza Total (mg L <sup>-1</sup> )	568	564	596	512	500



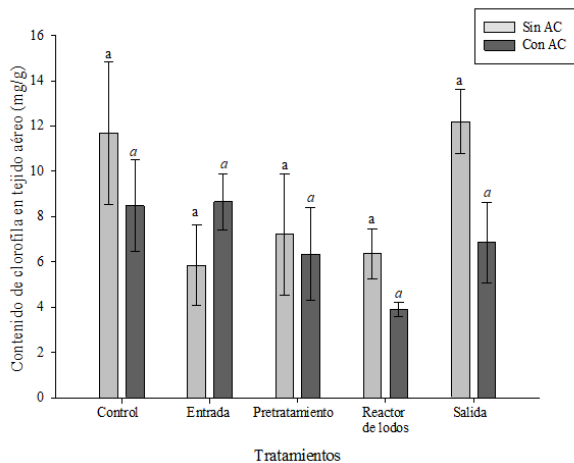
**Fig. 3.** Determinación del contenido de clorofila total de plántulas de *Typha* sp. expuestas a: (A) aguas residuales estériles y (B) aguas residuales crudas.



**Fig. 4.** Determinación del Índice de Crecimiento de tallo (A) y raíz (B) en plántulas de *Typha* sp. expuestas a diferentes etapas de aguas residuales y AC (5 mM).

Para las plántulas expuestas a ARC el contenido de clorofila fue mayor para las fases de Lodos y salida. Sin embargo, no hay diferencias significativas respecto a plantas control.

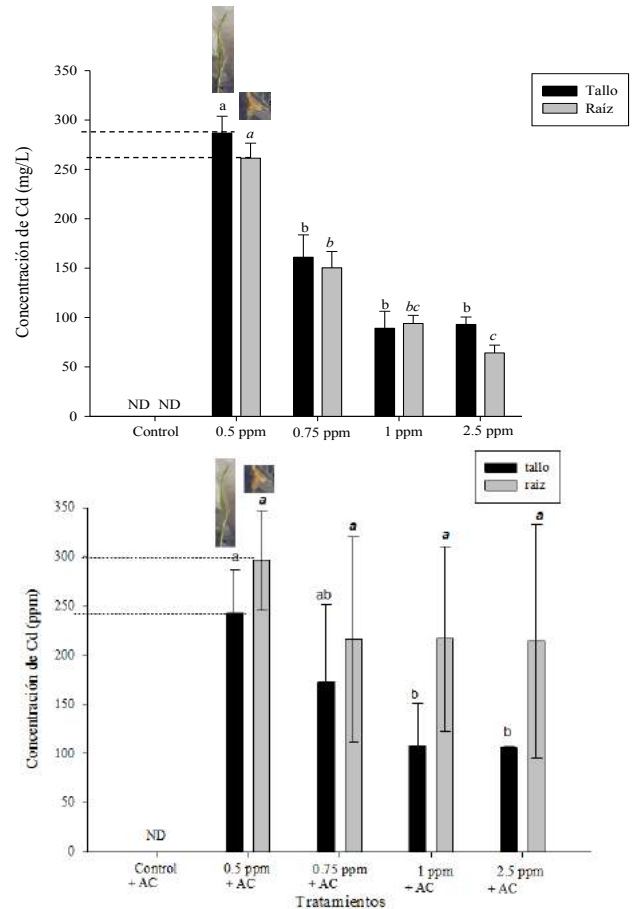
En la figura 4 se observa de manera general que para tallo y raíz hay un mayor índice de crecimiento en ausencia de AC. A excepción de las fases de entrada y pretratamiento donde la raíz presentó un mayor IC con presencia de AC.



**Fig. 5.** Determinación del contenido de clorofila total en plántulas de *Typha* sp. expuestas a aguas residuales sin ácido cítrico (AC) y aguas residuales con AC.

En la figura 5 se observa mayor contenido de clorofila en aguas residuales con ausencia de AC. A excepción de la fase de entrada donde hay más contenido de clorofila en presencia de AC. Sin embargo, no hay diferencia significativa. Por lo cual, se puede considerar que al adicionar AC hay mayor captación de contaminantes y lo cual causa un daño al contenido de clorofila.

En la figura 6 se observa que hay mayor fitoextracción de Cd por *Typha* mientras menor sea la concentración de Cd a la que se expone. Independientemente si tiene o no AC. Por último, se puede observar el AC aumentó la fitoextracción de Cd principalmente en Raíz.



**Fig. 6.** Fitoextracción de Cd contenido en el tejido vegetal de plántulas de *Typha* expuestas a diferentes concentraciones de Cd con ausencia de ácido cítrico (A) y con presencia de AC (B) 5mM.

**Conclusiones:** Las ARE y ARC promovieron el crecimiento del tallo y raíz plántulas de *Typha* sp.

El ácido cítrico no promovió crecimiento de tallo en plantas de *Typha* expuestas a ARC. Sin embargo, promovió crecimiento de raíz en aguas residuales de la etapa de entrada y pretratamiento.

El ácido cítrico no tuvo influencia en el contenido de clorofila total en plantas de *Typha* expuestas a aguas residuales.

Las raíces de *Typha* presentaron un incremento en el tamaño al ser expuestas a bajas concentraciones de metales. Sin embargo, al ser expuestas a altas concentraciones se observó un daño a nivel de raíz.

El AC aumentó la fitoextracción de Cd principalmente en Raíz

**Propuesta de valor:** Se propone mejorar la calidad de agua residual tratada emitida de los efluentes de las PTAR's, aplicando fitorremediación a través de humedales artificiales con plantas de *Typha* sp adicionando Ácido cítrico como estrategia potencialmente económica y amigable con el medio ambiente.

#### **Bibliografía:**

Carranza-Álvarez, C., Alonso-Castro, A. J., Alfaro-De La Torre, M. C., & García-De La Cruz, R. F. (2008). Accumulation and distribution of heavy metals in *Scirpus americanus* and *Typha latifolia* from an artificial lagoon in San Luis Potosí, México. *Water, Air, and Soil Pollution*, 188(1–4), 297–309. <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9545-3>

NOM-127-SSA1-1994. (1994). Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Recuperado de, <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html>.

NOM-002-ECOL-1996. (1996). Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Recuperado de, <http://www.economia-noms.gob.mx/normas/noms/1998/002-ecol.pdf>.