

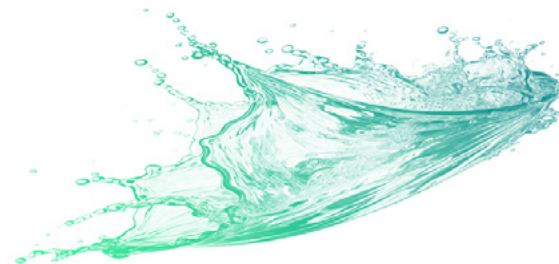
Impluvium

Publicación digital de la Red del Agua UNAM
Número 29, Octubre - Diciembre 2024



AGUA Y AGRICULTURA

PRESENTACIÓN



Con el título Agua y Agricultura, este número de la revista *Impluvium* reviste especial importancia por las crecientes incertidumbres y retos que enfrenta el mundo, incluido México, para aliviar la crisis del hambre y la necesidad de incrementar la oferta de alimentos, considerando los retos que esto representa.

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación “se espera que la población mundial crezca, para el año 2050, a un total de 10,000 millones de habitantes, impulsando la demanda de alimentos-en un escenario de crecimiento económico modesto- a cerca de un 50% más de lo obtenido en el año 2013. El incre-

mento del ingreso en países de bajos y medios niveles de ingreso, acelerarán transiciones de la dieta hacia mayores consumos de carne, frutas y vegetales, comparado con los cereales, lo que requerirá cambios significativos en la producción y añadiendo mayor presión hacia los recursos naturales.”

Los enormes retos para aumentar la productividad de la agricultura se agrandan por el deterioro creciente de los recursos naturales, por la pérdida de la biodiversidad, y por la presencia de plagas y enfermedades, que se han vuelto más resistentes y traspasan fronteras con una gran rapidez, dificultando su erradicación por métodos convencionales.

En nuestro país, en las décadas de los años 40's y 50's, se adoptaron las orientaciones de la Revolución Verde, ya que se requería un incremento sustancial de los rendimientos en trigo y maíz principalmente. Se promovió una tecnología muy intensiva, aún vigente, con nuevas variedades de semillas, riego, fertilización, y agroquímicos para control de hierbas y plagas, lográndose aumentos significativos de los rendimientos de cultivos básicos.

Sin embargo, hay conciencia ahora de que tenemos que transitar hacia una agricultura sustentable que cuide la salud humana, los ecosistemas y los recursos naturales. El paradigma ha cambiado. Los retos para avanzar hacia una agricultura sustentable son muy importantes y complicados de enfrentar. En primer lugar, es necesario incrementar la oferta de alimentos, incluyendo ahora carne y leche, y por tanto la productividad, para cubrir de mejor forma la demanda proveniente del crecimiento de la población y así poder alcanzar la seguridad alimentaria. Asimismo, será importante combatir efectivamente las deficiencias en alimentación para la población de menores recursos.

Sabemos, que existen límites a la expansión de la frontera agrícola y a que se están presentando cambios de uso de tierra agrícola a uso urbano, por lo que es vital el incremento de la productividad. Y en este sentido es importante recordar la importancia que tiene desde un punto de vista productivo la irrigación. Al respecto, recordemos que en México la superficie cosechada anualmente es de alrededor de 21 millones de hectáreas, de las cuales 5.9 millones son de riego, o sea el 28%, utiliza el 76% del volumen de agua disponible, y el valor de la producción es de alrededor del 60% del total nacional. Finalmente, y no menos importante es que nuestra producción agropecuaria genera efectos negativos al medio ambiente y los recursos naturales, y que tenemos el cambio climático con la presencia de sequías e inundaciones, que provocan fuertes pérdidas en la producción.

Para ilustrar lo anterior, en 2024 el 31.2% del territorio nacional presentó sequía moderada a excepcional, habiendo sido afectados 274 municipios que representan el 11% del total. Debido a esta intensa sequía, el Servicio de Información Agroali-

mentaria y Pesquera estima en su Panorama Agroalimentario que, para cubrir el consumo anual de maíz, que asciende a un total de 47 millones de ton, será necesario importar este año al menos el 50%, o sea 23.8 millones de toneladas. Este año pasado, la producción nacional de maíz tuvo una caída cercana a 4 millones de toneladas. Esta misma empresa, reporta que solo producimos el 35% de los granos básicos que consumimos en 2024. Por ejemplo, y como efecto de la sequía en el estado de Sonora, solo será posible sembrar de trigo el 50% de la superficie de riego para el ciclo OI-24-25, por lo que la caída de la producción será muy importante, afectando fuertemente a los productores y aumentando las necesidades de importación del cereal.

Existen diversas opciones para avanzar hacia una agricultura sustentable. Sin llegar a utilizar semillas genéticamente modificadas, existen nuevas técnicas de hibridación para contar con semillas de mayor rendimiento y resistencia a sequías y plagas. También existe la posibilidad de la integración de la agricultura con la ganadería. Utilizar agricultura de precisión y también prácticas agro-

ecológicas para un más eficiente uso de agua, suelo y luz, como son las técnicas de labranza mínima o cero. Varias de estas modalidades o prácticas se desarrollan en los artículos que presenta la revista.

Adicionalmente a la imperiosa necesidad de incrementar la eficiencia en la aplicación del agua de riego, es también indispensable iniciar, en paralelo, el mejoramiento de la eficiencia en el uso de los fertilizantes nitrogenados y fosfatos, buscando apoyar a los agricultores en la reducción de sus costos de producción, sin disminuir los rendimientos, y al mismo tiempo, reducir la contaminación difusa por nutrientes derivados de la agricultura en el agua de acuíferos, lagunas, ríos y mares,

Muy consistentes con esta reflexiones e inquietudes se presentan varios artículos orientados a proponer un uso eficiente del agua en varios distritos de riego, a través de la tecnificación de los sistemas de riego, con tecnologías apropiadas a los contextos locales y regionales, coincidente con los propuesto en el Plan Nacional Hídrico, publicado recientemente y mediante el cual se planea la tecnificación de 200,000 hectáreas en 13 distritos prio-

ritarios; otros artículos se orientan a la necesidad urgente del reúso de aguas residuales en la agricultura, lo que permitiría dobles cultivos o extender la superficie regada; otros plantean la necesidad de remover metales pesados mediante diferentes técnicas; aparece en un artículo una propuesta para integrar un Fondo del Agua para el manejo sustentable de áreas irrigadas con aguas subterráneas; y varios artículos que proponen el uso de prácticas agroecológicas, el uso de fertilizantes orgánicos en lugar de los químicos.

JAIME DE LA MORA GÓMEZ
ASESOR DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM



Impluvium es una publicación de la Red del Agua UNAM; puede ser reproducida con fines no lucrativos, siempre y cuando no se mutile, se cite la fuente completa y su dirección electrónica. Los artículos compartidos son responsabilidad exclusiva de los autores y no reflejan necesariamente la opinión de la Red del Agua UNAM o de sus miembros.

Comité editorial:

Dr. Fernando J. González Villarreal
Coordinador Técnico Red del Agua UNAM

M. en C. Jorge Alberto Arriaga Medina
Coordinador Ejecutivo de la Red del Agua UNAM

Mtra. Malinali Domínguez Mares
Titular de la Unidad de Vinculación y Asuntos Internacionales,
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Mtra. Ana Gabriela Piedra Miranda
Profesora de la Universidad Autónoma Metropolitana

Mtra. Johana Guadalupe Cruz López
Subcoordinadora de Comunicación y Participación,
Programa de Manejo, Uso y Reúso del Agua en la UNAM

Editor invitado:

Ing. Jaime de la Mora Gómez
Asesor del Instituto de Ingeniería UNAM

Diseño gráfico y formación:
Lic. Joel Santamaría García
Lic. Marie Claire Mendoza Muciño

Publicación digital de la Red del Agua UNAM.
Número 29, Agua y Agricultura.
Octubre - Diciembre 2024

www.agua.unam.mx/impluvium.html

Impluvium es la publicación digital de divulgación de la Red del Agua UNAM, Año 12, No.29, Octubre – Diciembre 2024. Es una publicación trimestral editada por la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, a través de la Red del Agua de la UNAM, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, Instituto de Ingeniería, edificio 5, Col. Copilco, Del. Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, Tel. (55) 56233600 ext.8745, <http://www.agua.unam.mx/impluvium.html>, jarragam@ingen.unam.mx. Editor responsable: M. en C. Jorge Alberto Arriaga Medina. Reserva de Derechos al uso Exclusivo: en trámite., ISSN: en trámite, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Red del Agua UNAM, M. en C. Jorge Alberto Arriaga Medina, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, Instituto de Ingeniería, edificio 5, Col. Copilco, Del. Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México fecha de la última modificación, Enero 2025.



CONTENIDO

Presentación2

Jaime de la Mora Gómez

ARTÍCULOS

Reutilización de aguas residuales como gestión del agua en la agricultura 10

Jonathan Hernández Pérez

Agua y agricultura: sistemas de producción sostenibles y resilientes 16

Jorge Alejandro Silva Rodríguez de San Miguel

Traslocación de metales pesados en el balance hídrico de los agrosistemas: Implicaciones para la sostenibilidad de los cultivos alimentarios 22

S. Alejandro Lozano Morales, Corazón G. Morales Amaya
y Raúl Herrera Mendoza

Uso de materiales avanzados para la remoción de metales pesados en agua de riego agrícola: Propuestas de soluciones para una agricultura sostenible 30

Corazón G. Morales Amaya, S. Alejandro Lozano Morales y Raúl Herrera Mendoza

Recuperación de estruvita a partir del agua residual: Una alternativa para la obtención de fertilizantes aplicables en la agricultura 37

Monica A. Diaz-Ascencio, Juan L. Obeso y Carolina Leyva

Monitoreo Participativo del Agua y Ciencia Comunitaria: Herramientas para la Soberanía Alimentaria 45

Laura Conde Báez, Cuauhtémoc F. Pineda Muñoz y Alfredo Pineda Gómez

Compostaje de residuos orgánicos como práctica sustentable 52

César González-Guerrero, Adriana Reyes-Serrano, Alejandra Guadalupe Villegas-Pañeda y Gabriela Nava Amezcua

Fondos de Agua para la gestión sostenible de los recursos hídricos en zonas agrícolas 59

Osiriss Cruz Ruvalcaba, Mariana Villada-Canela y Dalia Marcela Muñoz-Pizza

Experiencias de Puebla sobre Uso del Agua 66

Alberto Jiménez Merino

Ozono en el tratamiento de aguas: Una alternativa para el reúso de agua más segura en la agricultura 72

Laura Sol Pérez Flores y Eduardo Torres

**Reducción de la contaminación agrícola:
un camino hacia la seguridad alimentaria
sostenible con perspectiva de género 80**

Bianca Berenice Rodríguez Pérez, Verónica Gutiérrez Villalpando
y Ernesto Benito Salvatierra Izaba

**Disponibilidad y uso del agua
en la agricultura 86**

María Josefa Jiménez-Moreno

**Soluciones basadas en la Naturaleza
como aliadas para mejorar**

**la calidad del agua del río Tula
en el Estado de Hidalgo 92**

Georgina Martínez-Reséndiz

**La agroecología un camino
para el cuidado del agua y
la soberanía alimentaria 99**

William Alfredo Chay Canul

**La contaminación del agua por el uso
de plaguicidas y su purificación
empleando procesos de adsorción 106**

Ma. del Rosario Moreno-Virgen, Hilda Elizabeth Reynel-Ávila,
Felipe de Jesús Villalobos-Delgado, Lizbeth Liliana Díaz-Muñoz,
Didilia Ileana Mendoza-Castillo, Jaime Moreno-Pérez,
Herson Antonio González-Ponce y Adrián Bonilla-Petriciolet



REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES COMO GESTIÓN DEL AGUA EN LA AGRICULTURA

JONATHAN HERNÁNDEZ PÉREZ
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO



Resumen

El incremento de la población y de las actividades económicas en todos los sectores genera presión sobre el agua. Es decir, mayor demanda para todos los sectores y mayor contaminación del agua. El sector agrícola es el sector que demanda mayor volumen de agua y el que más contribuye a deteriorarla. Lo anterior, reduce la disponibilidad por lo que se deben buscar alternativas para la gestión del agua en la agricultura; una de ellas es la rutilizacion de aguas residuales. A nivel mundial, China y México destacan en superficie y volumen de aguas residuales utilizadas en la agricultura. En México, la región del Valle del Mezquital en el Estado de Hidalgo, des-

taca por utilizar las guas residuales de la Ciudad de México, con 92,953 ha de riego repartidas en tres distritos de riego: Tula, Alfajayucan y Ajacuba.

Introducción

Se espera que para 2050, la población humana se acerque a los 10,000 millones, de los cuales dos tercios probablemente experimenten estrés hídrico y el resto se enfrente a una escasez total de agua (Ting et al., 2024).

Los desafíos mundiales como el cambio climático, la gestión de los residuos, la gestión del agua, la contaminación, la deforestación y la degradación,

requieren enfoques multifacéticos y soluciones dinámicas. Es fundamental considerar diferentes tipos y fuentes de conocimiento para mitigar sus impactos y asegurar un futuro sostenible para la Tierra (Odeibat et al., 2024).

El deterioro de la calidad del agua en la actualidad ha llevado a que se debe adoptar una gestión moderna del agua. Los recursos hídricos alternativos incluyen la desalinización del agua de mar y la reutilización de aguas residuales (Bakopoulou et al., 2010). Sin embargo, la desalinización aún es muy costosa por lo que queda la reutilización de aguas residuales.

La gestión sostenible de las aguas residuales se ha convertido en imprescindible debido a la escasez de agua y a la creciente demanda de agua en la agricultura. (Agrahari & Kumar, 2024); es una fuente potencial en las regiones que enfrentan problemas de escasez de agua (Alcon et al., 2010); podría satisfacer la demanda de agua existente (Angelakis et al., 2003); y para complementar el suministro de agua de manera sostenible (Chen et al., 2013).

Reutilización de aguas residuales en la agricultura

La reutilización de aguas residuales para la agricultura es común en todo el mundo, sin embargo, el tratamiento de aguas residuales es raro en muchos países, sobre todo, en los países en desarrollo (Brisaud, 2009).

Los beneficios por la reutilización de aguas residuales en la agricultura son: la captura de nutrientes, el ahorro de fertilizantes, la mejora de las actividades de los microorganismos del suelo, la mejora de las condiciones de salud del suelo, mayores rendimientos de los cultivos, disminución de la salinidad (Lazaridou et al., 2019). También, contribuye a mitigar el cambio climático, debido que: reduce la huella hídrica y la huella de carbón; evita el bombeo de agua dulce; al ahorro de energía; al ahorro de fertilizantes; y la prevención de la extracción de fertilizantes minerales de las minas (Hanjra et al., 2012).

México ocupó el primer lugar en 2021 de los países que utilizan aguas residuales tratadas para el riego, con 1.380 km³ anuales. Le siguen China (1.260 km³), Arabia Saudita (0.535 km³), Emiratos

Árabes Unidos (0.547 km³) y Siria (0.365 km³). En cuanto a utilización directa de aguas residuales municipales no tratadas para fines de riego, México supera 3.5 veces a India con 4.330 km³ comparado con 1.230 km³, respectivamente. Les siguen Pakistán (1.022 km³), Iraq (1.030 km³) y Siria (0.416 km³) (AQUASTAT, 2022).

Los principales países con mayor superficie de riego con aguas residuales tratadas en 2021 fueron: en primer lugar, China con 3,618,000 ha, le siguen, Chile con 130,000 ha, México con 96,726 ha, Australia con 73,993 ha y Arabia Saudita con 51.920 ha. China representó 83.2% del total de superficie regada con aguas residuales a nivel mundial, mientras que México solo el 2.2%. Sin embargo, la superficie regada con aguas residuales no tratadas a nivel mundial en 2021 fueron 2,072,075 ha, en la que destaca nuevamente la participación de China, con 62.7% del total de superficie, México con 18.7% e Irán con 11.6%. estos tres países abarcan el 93% de la superficie de riego con aguas residuales no tratadas (AQUASTAT, 2022).

El Valle del Mezquital es el ejemplo más grande y antiguo del mundo con respecto al uso de aguas residuales sin tratar para el riego agrícola (Lesser et al., 2018). Más de 90,000 ha de tierras de cultivo se riegan con las aguas residuales no tratadas de la Ciudad de México, que se distribuyen en los distritos de riego agrícola de Tula, Ajacuba y Alfajayucan (Durán et al., 2021).

En 2022 se sembraron en el DR Tula 43,020 ha más 13,738 ha de segundos cultivos. En los primeros cultivos, el 27.3% fueron cultivos del ciclo otoño-inverno, 30.0% cultivos del ciclo primavera-verano y 42.6 a cultivos perennes. En el ciclo otoño-invierno destacan los cultivos de avena forrajera (68.6%) y cebada forrajera (11.0%). En el ciclo primavera-verano destaca el cultivo de maíz grano con 87.2% de la superficie sembrada en este ciclo y 26.2% de la superficie de este DR. En los cultivos perennes destaca la alfalfa con 98.1% de la superficie sembrada y 41.9% de la superficie del DR (CONAGUA, 2023).

En el DR Alfajayucan la superficie de riego en 2022 fue de 29,387 ha, de las cuales, 11.6% corres-

ponden al ciclo otoño-inverno, 45.7% al ciclo primavera-verano y 42.7% a los cultivos perennes. En el ciclo otoño-invierno los principales cultivos fueron avena forrajera y coliflor, con 56.9 y 31.2 % respectivamente. En el ciclo primavera-verano los cultivos más importantes fueron: el maíz grano (69.6%), coliflor (13.8%) y chile (7.1%). En los cultivos perennes, la alfalfa representa 96.1% de la superficie y 41.1% de la superficie total de este DR (CONAGUA, 2023).

La superficie de riego en el DR Ajacuba en 2022 fue de 5,566 ha y 1,242 ha de segundos cultivos. Los cultivos del ciclo otoño-invierno representaron 18.6% de la superficie total de los primeros cultivos, los de primavera-verano 47.3% y los cultivos perennes 34.0%. Los principales cultivos de otoño-invierno fueron: avena forrajera (86.3%), nabo (6.8%) y cebada forrajera (4.5%). El cultivo más importante del ciclo primavera-verano fue el maíz grano, con 2,543 ha representaron 96.5% de la superficie sembrada en este ciclo y 45.7% de la superficie total de este DR. En los perennes, se sembraron 1,869 ha de alfalfa, que representaron

98.7% de la superficie de estos cultivos y 33.6% de la superficie total de este DR (CONAGUA, 2023).

Conclusiones

El reúso de aguas residuales en la agricultura ya es una realidad en varias regiones del mundo, sin embargo, aún no se explota el potencial que tienen. Las aguas residuales requieren un tratamiento previo a ser utilizadas para regar cultivos, sobre todos aquellos cultivos que requieren agua de mayor calidad. Y debe hacerse de manera segura para las actividades agrícolas, tanto para los productores como para los consumidores.

La explotación de estas aguas ofrece el potencial hacia la transición de una economía circular y avanzar hacia muchos objetivos del desarrollo sostenible. Asimismo, es una importante estrategia para mitigar el cambio climático; para reducir la huella hídrica y la huella de carbón; disminuir el bombeo de agua dulce, el ahorro de energía y de fertilizantes por una menor extracción en las minas. 💧

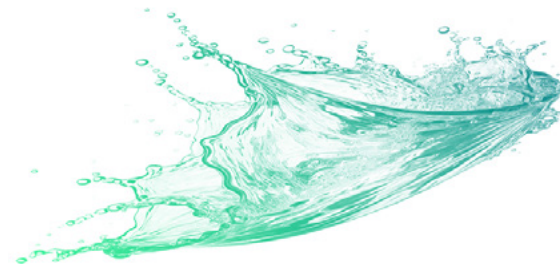
Bibliografía

- Agrahari, S., & Kumar, S. (2024). Emerging and futuristic phyto-technologies for sustainable wastewater treatment with resource recovery and economical aspects. *Journal of Water Process Engineering*, 65, 105753. <https://doi.org/10.1016/j.JWPE.2024.105753>
- Alcon, F., Pedrero, F., Martin, J., Arcas, N., Alarcon, J. J., & De Miguel, M. D. (2010). The non-market value of reclaimed wastewater for use in agriculture: A contingent valuation approach. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8(SUPPL. 2), 1-6. <https://doi.org/10.5424/sjar/201008s2-1361>
- Angelakis, A. N., Bontoux, L., & Lazarova, V. (2003). Challenges and perspectives for water recycling and reuse in EU countries. *Water Science and Technology: Water Supply*, 3(4), 59-68. <https://doi.org/10.2166/ws.2003.0046>
- AQUASTAT. (2022). *Sistema mundial de información de la FAO sobre el agua y la agricultura*. <https://www.fao.org/aquastat/en/databases/maindatabase/>
- Bakopoulou, S., Polyzos, S., & Kungolos, A. (2010). Investigation of farmers' willingness to pay for using recycled water for irrigation in Thessaly region, Greece. *Desalination*, 250(1), 329-334. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.09.051>
- Brissaud, F. (2009). Technologies for Water Regeneration and Integrated Management of Water Resources. In S. Sabater & D. Barceló (Eds.), *Water Scarcity in the Mediterranean: Perspectives Under Global Change* (Vol. 8, Issues 978-3-642-03971-3, pp. 95-105). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/698_2009_30
- Chen, Z., Ngo, H. H., & Guo, W. (2013). A critical review on the end uses of recycled water. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 43(14), 1446-1516. <https://doi.org/10.1080/10643389.2011.647788>
- CONAGUA. (2023). *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego*. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/estadisticas-agricolas-de-los-distritos-de-riego>

- Durán, J. C., Jiménez, B., Rodríguez, M., & Prado, B. (2021). The Mezquital Valley from the perspective of the new Dryland Development Paradigm (DDP): present and future challenges to achieve sustainable development. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 48, 139–150. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2021.01.005>
- Hanjra, M. A., Blackwell, J., Carr, G., Zhang, F., & Jackson, T. M. (2012). Wastewater irrigation and environmental health: Implications for water governance and public policy. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 215(3), 255–269. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2011.10.003>
- Lazaridou, D., Michailidis, A., & Mattas, K. (2019). Evaluating the willingness to pay for using recycled water for irrigation. *Sustainability (Switzerland)*, 11(19), 1–8. <https://doi.org/10.3390/su11195220>
- Lesser, L. E., Mora, A., Moreau, C., Mahlkecht, J., Hernández-Antonio, A., Ramírez, A. I., & Barrios-Piña, H. (2018). Survey of 218 organic contaminants in groundwater derived from the world's largest untreated wastewater irrigation system: Mezquital Valley, Mexico. *Chemosphere*, 198, 510–521. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.154>
- Odeibat, A. S., Mohammad, R., & Abu-Zreig, M. (2024). Integrated environmental management and GPS-X modelling for current and future sustainable wastewater treatment: A case study from the Middle East. *Heliyon*, 10(14), e34164. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.E34164>
- Ting, W. H. T., Tan, I. A. W., Salleh, S. F., Abdul Wahab, N., Atan, M. F., Abdul Raman, A. A., Kong, S. L., & Lam, L. S. (2024). Sustainable saline wastewater treatment using eutectic freeze crystallization: Recent advances, challenges and future prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3), 112919. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112919>

AGUA Y AGRICULTURA: SISTEMAS DE PRODUCCIÓN SOSTENIBLES Y RESILIENTES

JORGE ALEJANDRO SILVA RODRÍGUEZ DE SAN MIGUEL
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



Resumen

El agua es el principal factor limitante para la agricultura; la gran demanda de alimentos, así como el cambio climático y el uso de la tierra, están provocando la degradación y el agotamiento del agua, lo que da lugar a una agricultura insostenible. Además, la creciente competencia por los recursos hídricos: para las ciudades, la industria y la naturaleza, representa un desafío para los sistemas de producción agrícola que necesitan adaptarse a un contexto cambiante de disponibilidad y calidad del agua para evitar la inseguridad alimentaria. El aumento de la productividad del agua puede explicarse por cambios dependientes del tiempo en los sistemas de

producción a escala regional y mundial a través de presiones sobre los recursos hídricos. Se propone una explicación para este aumento en la agricultura utilizando la tecnología.

Introducción

La productividad de los cultivos, las especies animales o los sistemas de producción suele estar vinculada de forma explícita o implícita a la disponibilidad de un suministro fiable de agua de lluvia o de riego. La agricultura establecida en zonas áridas utiliza plantas forrajeras anuales autóctonas que germinan al comienzo de las estaciones lluviosas, ma-

durante rápidamente y luego permanecen inactivas hasta la siguiente lluvia. Sin embargo, cualquier fallo puede provocar sequías. Incluso los sistemas de riego que dependen de los caudales de los ríos están preparados para los fallos, porque los ríos no transportan el mismo volumen de agua todos los años ni durante años seguidos. Los pastizales tropicales son ecosistemas “perennes” que reciben más lluvia de la que pierden por evaporación, y los bosques tropicales son sistemas “siempre húmedos” que reciben lluvias más o menos a diario, pero también pueden sufrir sequías prolongadas. Sin embargo, ningún uso de la tierra, aparte de los humedales artificiales, puede garantizar la fiabilidad del suministro de agua (Jain y Singh, 2023).

Como los cultivos y el ganado son, por definición, sistemas de producción basados en la tierra, es necesaria la disponibilidad de esta para establecer prácticas agrícolas de cualquier tipo. Los humedales antropogénicos (creados por el hombre) para la compatibilidad del suministro de agua incluyen embalses construidos para almacenar agua de río y

sistemas de riego que alimentan la tierra con agua de río. La tierra, sin otro uso, debe ser establecida como tierra agrícola por científicos o productores y cultivada/gestionada utilizando el conocimiento y las herramientas disponibles para ellos. Debido a que la agricultura se basa en la fotosíntesis, los límites latitudinales y de disponibilidad de agua imponen límites estrictos al uso de la tierra. Para cualquier franja latitudinal, inicialmente se necesita cualquier tierra que sea lo suficientemente plana, rica en suelo y con arcenes para la retención de agua para que se establezca la agricultura (Viana et al., 2022).

La adaptación al cambio climático podría afectar negativamente a la disponibilidad de agua dulce, considerando el aumento medio anual de la temperatura mundial esperado de 2 °C. Por ejemplo, si se protegen las costas del aumento del nivel del mar mediante la construcción de diques de roca, los sistemas fluviales que ya tienen un perfil morfológico pronunciado tendrán menos agua en este sistema “cerrado” (Beltrán-Peña et al., 2020).

Desafíos y oportunidades para la gestión sostenible del agua en la agricultura

El desarrollo de sistemas de gestión del agua sostenibles y resilientes es fundamental en vista de la seguridad alimentaria y del agua en el futuro. Sin embargo, varios factores debidos a las variabilidades naturales, el cambio climático y los desarrollos socioeconómicos dificultan la gestión eficaz del agua en la agricultura (Srivastav et al., 2021).

La escasez de agua, la calidad, la contaminación, la escorrentía, las demandas competitivas, la privatización, la equidad, las políticas, la percepción pública, el cumplimiento y la aplicación, entre otros, son los principales desafíos que inhiben la gestión sostenible del agua en la agricultura. Además, la comunidad agrícola se enfrenta a múltiples incertidumbres debido a los crecientes desafíos a escala micro (granja), meso (cuenca) y macro (regional).

La estabilidad social y económica futura, los desastres naturales, el cambio climático, la biodiversidad global y la eficiencia en el uso del agua son solo algunos ejemplos de las incertidumbres que enfrenta la comunidad agrícola. Para satisfacer las deman-

das de la industria de productos sanos, de calidad y seguros, se buscan avances tecnológicos, inteligencia artificial y la participación de múltiples partes interesadas en diferentes niveles (Qureshi, 2020).

Por otra parte, al ofrecer una visión holística y orquestada de la gestión del agua en la agricultura a diferentes escalas, muchos desafíos pueden convertirse en oportunidades potenciales para la gestión sostenible del agua en la agricultura. En vista de la futura seguridad alimentaria y hídrica mundial y con una creciente escasez de agua, los sistemas de producción agrícola inteligentes en materia de agua y resilientes al clima son fundamentales. Esto requiere un cambio de paradigma desde una estrategia de un solo cultivo que aborda solo el rendimiento a una estrategia integrada y holística basada en el producto/valor para múltiples cultivos hortícolas que aborde el rendimiento, la calidad, la diversidad y los extras. Tal estrategia de control debe involucrar a múltiples partes interesadas a nivel de la finca, la cuenca, la ciudad/sector y la región (El Chami et al., 2020).

Tecnologías y prácticas innovadoras para una agricultura que utilice el agua de manera eficiente

A medida que la población mundial sigue creciendo, la producción agrícola debe aumentar para satisfacer la creciente demanda de alimentos, fibras y biocombustibles (Zhang et al., 2020).

Las tecnologías y prácticas agrícolas que promueven el uso eficiente del agua son muy variadas en todo el mundo, y se han desarrollado y adaptado con el tiempo como respuesta a los desafíos locales específicos de escasez de agua. Estas adaptaciones están influenciadas por los recursos naturales y las condiciones socioeconómicas únicas presentes en cada localidad. Ciertos métodos han mejorado significativamente el rendimiento de los cultivos teniendo un impacto positivo en las comunidades y ganándose la designación de innovaciones disruptivas por su capacidad para alterar fundamentalmente la gestión del agua agrícola y los métodos de producción. Las técnicas destinadas a mejorar la eficiencia del agua abarcan una amplia gama de prácticas, incluida la agricultura de riego cada vez

más frecuente, que es fundamental para maximizar la productividad en entornos con escasez de agua. Las estrategias de producción de cultivos basadas en la recolección de agua también han ganado terreno, lo que permite a los agricultores recolectar y usar el agua de lluvia de manera efectiva, reduciendo así la dependencia de fuentes de agua impredecibles. El riego deficitario, que aplica agua estratégicamente solo en etapas críticas de crecimiento de los cultivos, junto con sistemas de riego por goteo de bajo costo que minimizan el desperdicio, también son avances notables. Además, se han desarrollado prácticas de riego alternativas, tanto en seco como en húmedo, que permiten una gestión eficaz del agua en el cultivo del arroz, mientras que las rotaciones de cultivos que maximizan la eficiencia hídrica mediante diversos cultivos y variedades también han mostrado resultados prometedores. Además, el cultivo de cultivos tolerantes a la sal cobra cada vez más importancia a medida que surgen problemas de salinidad del suelo debido al cambio climático y a las malas prácticas de gestión. Las técnicas de riego de reserva, junto

con el uso innovador de aguas residuales tratadas para el riego, son elementos integrales de este enfoque multifacético (Reints et al., 2020). En conjunto, estas prácticas no solo refuerzan la sostenibilidad de la producción agrícola y promueven la gestión ambiental, sino que también son vitales para garantizar la seguridad alimentaria en diversas regiones donde el acceso al agua dulce es escaso y cada vez más valioso. Su implementación y adaptación generalizadas son esenciales para satisfacer la creciente demanda de alimentos frente a los crecientes desafíos ambientales (Reints et al., 2020).

Para que sean transformadoras, las tecnologías y prácticas agrícolas que hagan un uso eficiente del agua deben seleccionarse y adaptarse localmente de acuerdo con los contextos agroecológicos y socioeconómicos locales. Del mismo modo, se requieren políticas de apoyo adecuadas, así como inversiones en el desarrollo de capacidades, la investigación y la extensión públicas, la educación, la infraestructura, las organizaciones de agricultores y el desarrollo de mercados (Santos et al., 2023).

Conclusiones

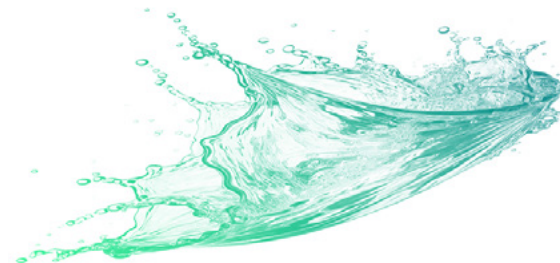
La gestión inadecuada del agua es un problema crítico que enfrentan los sistemas agrícolas y alimentarios. Este problema surge de la creciente competencia por el agua, la degradación de los ecosistemas y el cambio climático. Para mejorar la resiliencia de la gestión del agua en los sistemas agrícolas y alimentarios, es importante adoptar tecnologías transformadoras que hagan un uso eficiente del agua y que sean adaptables localmente de acuerdo con su contexto. 💧

Referencias

- Beltran-Peña, A., Rosa, L., & D'Odorico, P. (2020). Global food self-sufficiency in the 21st century under sustainable intensification of agriculture. *Environmental Research Letters*, 15(9), 095004.
- El Chami, D., Daccache, A., & El Moujabber, M. (2020). How can sustainable agriculture increase climate resilience? A systematic review. *Sustainability*, 12(8), 3119. <https://doi.org/10.3390/su12083119>
- Jain, S. K., & Singh, V. P. (2023). *Water resources systems planning and management*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
- Qureshi, A. S. (2020). Challenges and prospects of using treated wastewater to manage water scarcity crises in the Gulf Cooperation Council (GCC) countries. *Water*, 12(7), 1971. <https://doi.org/10.3390/w12071971>
- Reints, J., Dinar, A., & Crowley, D. (2020). Dealing with water scarcity and salinity: adoption of water efficient technologies and management practices by California avocado growers. *Sustainability*, 12(9), 3555. <https://doi.org/10.3390/su12093555>
- Santos, E., Carvalho, M., & Martins, S. (2023). Sustainable water management: Understanding the socioeconomic and cultural dimensions. *Sustainability*, 15(17), 13074. <https://doi.org/10.3390/su151713074>
- Srivastav, A. L., Dhyani, R., Ranjan, M., Madhav, S., & Sillanpää, M. (2021). Climate-resilient strategies for sustainable management of water resources and agriculture. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(31), 41576-41595. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14332-4>
- Viana, C. M., Freire, D., Abrantes, P., Rocha, J., & Pereira, P. (2022). Agricultural land systems importance for supporting food security and sustainable development goals: A systematic review. *Science of the total environment*, 806, 150718. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150718>
- Zhang, D., Sial, M. S., Ahmad, N., Filipe, A. J., Thu, P. A., Zia-Ud-Din, M., & Caleiro, A. B. (2020). Water scarcity and sustainability in an emerging economy: a management perspective for future. *Sustainability*, 13(1), 144. <https://doi.org/10.3390/su13010144>

TRASLOCACIÓN DE METALES PESADOS EN EL BALANCE HÍDRICO DE LOS AGROSISTEMAS: IMPLICACIONES PARA LA SOSTENIBILIDAD DE LOS CULTIVOS ALIMENTARIOS

S. ALEJANDRO LOZANO MORALES,
CORAZÓN G. MORALES AMAYA,
RAÚL HERRERA MENDOZA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA



Resumen

La presencia de metales pesados (MP) en el agua de riego altera su equilibrio natural en los agrosistemas. Esto implica que, MP pudieran potencialmente contaminar cuerpos de agua que son esenciales para su consumo. Aunque, algunos MP son esenciales para el desarrollo de cultivos, son tóxicos cuando superan las concentraciones permitidas. A su vez, el consumo sostenido de estos cultivos poner en riesgo a la población; puesto que, puede provocar enfermedades tales como crónico degenerativas. Además, en este trabajo se propone que, el monitoreo constante MP y la aplicación de normas ambientales son esenciales para garantizar la seguridad alimentaria,

la preservación de los ecosistemas y la salud de las comunidades. Finalmente, tecnologías como el uso de filtros, plantas fitorremediadoras y oxidación avanzada pueden mejorar la calidad agua de riego, mientras que un manejo adecuado del suelo puede limitar la absorción de MP.

Introducción

Entre los sistemas ambientales, el suelo es considerado uno de los medios más estáticos, donde los contaminantes pueden tener largos periodos de residencia y acumulación. La transferencia de metales pesados (MP) a otros sistemas representa una ame-

naza, tanto para la salud humana, como para los ecosistemas (Rai et al., 2019). Al respecto, las principales actividades que contribuyen al aumento de MP en suelos agrícolas incluyen el uso de aguas residuales, agroquímicos, y la actividad industrial.

Entre los MP más comunes en el ambiente se encuentran el arsénico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg), y plomo (Pb); los cuales pueden bioacumularse en suelos, provocando toxicidad en plantas, y representar un riesgo potencial dentro de los agrosistemas (Rashid et al., 2023).

En México, muchas zonas agrícolas se encuentran cerca de residuos mineros que contienen MP, los cuales contaminan los suelos circuncidantes (Armienta et al., 2020). Al respecto, la producción de alimentos en estas áreas plantea una disyuntiva ambiental; puesto que, las plantas pueden absorber MP a través de procesos como la *fitoextracción*, la cual consiste en la absorción y acumulación de MP por las raíces y su traslocación hacia toda su arquitectura (Wang et al., 2023). Aunque, algunos MP son esenciales para el desarrollo de las plantas, son tóxicos cuando superan las concentraciones per-

mitidas, inhibiendo su crecimiento y provocando alteraciones funcionales. Además, los MP pueden reducir las poblaciones microbianas del suelo, afectando su fertilidad y equilibrio ecológico (Rashid et al., 2023). A su vez, el consumo de estos cultivos desfavorece la salud pública y poner en riesgo a la seguridad alimentaria (Rai et al., 2019).

Proceso de traslocación en agrosistemas, caso del arsénico.

1. *Presencia de MP en el agua de riego o del suelo contaminado*, por ejemplo, el As, que luego coexiste en el ambiente que rodea las raíces de la planta.
2. *Absorción por el sistema radicular*, el As es absorbido por las raíces de la planta. Las raíces tienen la capacidad de tomar el As del suelo o del agua. El As se mueve hacia las células de la raíz a través de transportadores específicos que son responsables de la absorción de fosfatos.
3. *Transporte a través del tallo (xilema)*, después de ser absorbido por las raíces, el As es

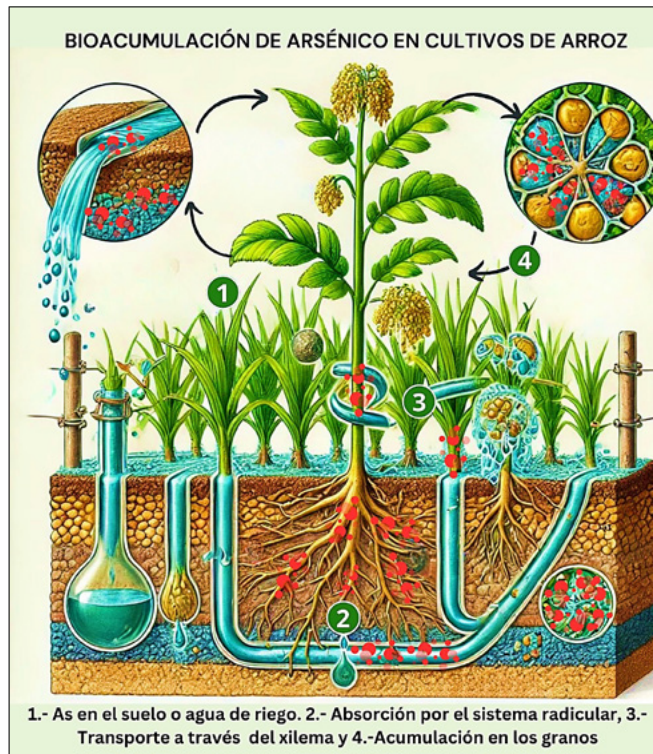
transportado a través del xilema, el tejido que mueve el agua y los nutrientes desde las raíces hacia el resto de la planta. Este proceso ocurre principalmente por el flujo del agua a través del tallo hacia las secciones de la planta.

4. *Acumulación en los granos (fruto)*, finalmente, aunque no todo el As absorbido llega a esta etapa, una cantidad puede encontrarse en los granos, representando un riesgo para la salud humana si son consumidos sostenidamente (véase Figura 1).

Factores que influyen en la traslocación y acumulación de MP en cultivos:

- *Propiedades del suelo.* El pH, la materia orgánica y la textura del suelo intervienen en la disponibilidad de MP. Por consiguiente, suelos ácidos y con baja materia orgánica facilitan su absorción.
- *Propiedades de los MP.* Tanto la solubilidad y la especie química del MP determinan la movilidad y absorción.

Figura 1. Procesos de traslocación de metales en plantas de arroz.



- *Especie vegetal.* Determina la capacidad de fitoextracción.
- *Condiciones ambientales.* La disponibilidad de agua y el clima pueden aumentar la movilidad de los MP en el suelo y su absorción.
- *Prácticas agrícolas.* El uso de agroquímicos y el agua de riego contaminada incrementa la acumulación de MP en cultivos.

A nivel global, se han reportado numerosos cultivos afectados por MP. La Tabla 1 proporciona un resumen de algunos cultivos clave que han mostrado niveles elevados de MP, junto con los países donde se han encontrado y los efectos sobre la salud humana asociados al consumo sostenido.

Cultivo	Contaminante	País	Efectos a la salud	Bibliografía
Arroz	Arsénico	China	Cáncer de piel y problemas cardiovasculares	Williams, P. N., et al. (2007).
Maíz	Plomo	México	Daños neurológicos	Morales, M., et al. (2012).
Espinaca	Cadmio	India	Problemas renales y óseos	Sridhar, M. K., & Adeyemo, O. K. (2009).
Trigo	Mercurio	Bangladesh	Daños neurológicos, y nervioso central	Saha, J. K., et al. (2011).
Tomate	Plomo	Argentina	Daños renales y neurológicos	Smith, A. T., et al. (2013)
Lechuga	Arsénico	EE. UU	Cáncer de piel	Finnegan, P. M., & Chen, W. (2012)
Frijol	Cadmio	Brasil	Problemas renales y respiratorios	Shimbo, S., et al. (2001).
Papa	Mercurio	Perú	Daños neurológicos y en el desarrollo cognitivo	García, S. M., & Bonilla, C. M. (2015).

Tabla 1. Cultivos contaminados con metales pesados y su relación enfermedades en la salud humana.

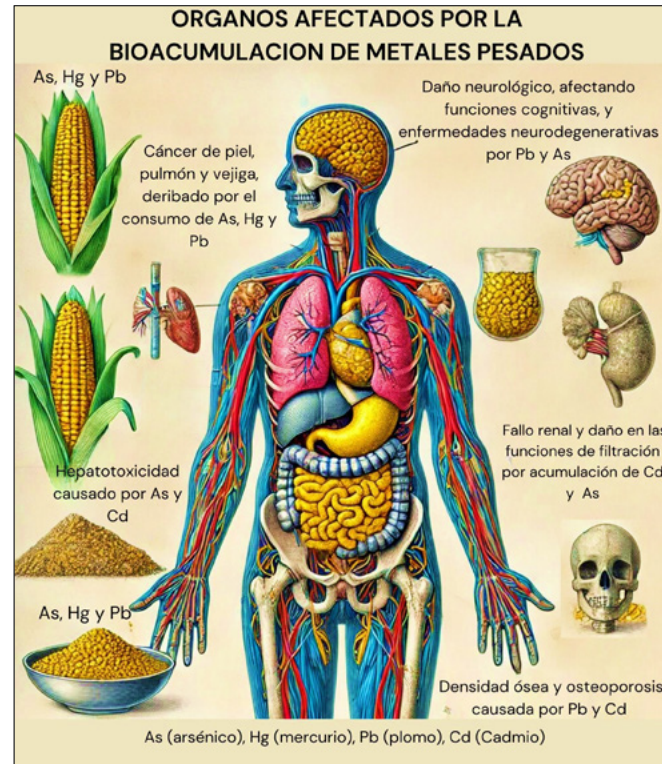
Efectos de la traslocación de metales pesados en la salud humana

Dado que, algunos de los MP que se bioacumulan en el cuerpo se encuentran comúnmente en el agua de riego y puede ser absorbido por

cultivos comestibles. Algunos órganos afectados, dada esta causa, se describen en la Figura 2 (véase Figura 2); en donde, las principales enfermedades asociadas son el cáncer de piel, pulmón y vejiga, insuficiencia renal, trastornos neurológicos y problemas óseos.

Cabe mencionar que, en China se ha reportado que el arroz es susceptible a la absorción de As del agua de riego, afectando la seguridad alimentaria en regiones productoras. Un estudio encontró que hasta un 50% del As absorbido se acumula en los granos (Turhun & Eziz, 2022). Otro claro ejemplo es India, país en el cual se ha observado que el consumo de arroz contaminado con As ha llevado a un aumento de casos de enfermedades relacionadas como el cáncer de piel y los problemas cardiovasculares (Singh et al., 2011). Para el caso particular de México, se ha estudiado el maíz como un cultivo básico, que puede acumular MP como Pb y Cd en zonas de riego afectadas por la contaminación industrial (Armienta et al., 2020). Aunado a que, el alto consumo de maíz contaminado con Pb ha generado preocupación en el desarrollo de enfermeda-

Figura 2. Efectos en la salud por la bioacumulación de metales pesados en cultivos para el consumo humano.



des neurológicas, especialmente en comunidades rurales (Mireles et al., 2004).

Impacto de los metales pesados en el balance hídrico

La presencia de MP en el agua de riego afecta la calidad del agua, estos metales pueden provenir de fuentes industriales, aguas residuales o la lixiviación de suelos contaminados, lo que altera el equilibrio natural del agua en los agrosistemas (Rashid et al., 2023). Esto implica que, estos MP se muevan a través de los cuerpos de agua; contaminando ríos, acuíferos y otras fuentes que son esenciales para los consumos consuntivos y no consuntivos; por consiguiente, su contaminación con MP reduce la disponibilidad de agua apta para el riego, ya que su acumulación en cuerpos de agua los convierte en recursos inadecuados para su uso.

Estrategias de mitigación

Para mejorar la calidad del agua de riego contaminada con MP, se han utilizado tecnologías como: filtros de arena/carbón activado, plantas fitorre-

diadoras, tratamientos químicos con sulfuro de hierro, y tecnologías de oxidación avanzada (TOA´s). Por otro lado, el manejo adecuado del suelo es crucial para reducir la absorción de MP por los cultivos. Algunas estrategias incluyen: control del pH del suelo, rotación de cultivos, uso de enmiendas orgánicas y fitorremediación. Estas estrategias de mitigación ayudan a restaurar y preservar la calidad del agua y el suelo.

Conclusiones

La traslocación de MP en los agrosistemas presenta un riesgo tanto para la sostenibilidad de los cultivos como para la salud pública. El consumo sostenido de cultivos contaminados puede provocar enfermedades crónicas como cáncer, insuficiencia renal, trastornos neurológicos y problemas óseos. Por lo que, es crucial implementar estrategias de mitigación para reducir el impacto de los MP en los agrosistemas. El monitoreo constante de la contaminación por MP y la aplicación de normas agrícolas, así como ambientales son esenciales para garantizar la seguridad alimentaria, la preservación de los eco-

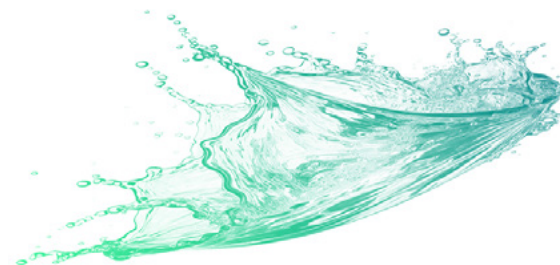
sistemas y la salud de las comunidades. Finalmente, tecnologías como el uso de filtros, plantas fitorremediadoras y TAO's pueden mejorar la calidad agua de riego, mientras que un manejo adecuado del suelo, como el control del pH y la rotación de cultivos, puede limitar la absorción de MP. 💧

Bibliografía

- Armienta, M. A., Beltrán, M., Martínez, S., & Labastida, I. (2020). Heavy metal assimilation in maize (*Zea mays* L.) plants growing near mine tailings. *Environmental Geochemistry and Health*, 42(8), 2361–2375. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00424-1>
- Mireles, A., Solís, C., Andrade, E., Lagunas-Solar, M., Piña, C., & Flocchini, R. G. (2004). Heavy metal accumulation in plants and soil irrigated with wastewater from Mexico city. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 219–220(1–4). <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2004.01.051>
- Rai, P. K., Lee, S. S., Zhang, M., Tsang, Y. F., & Kim, K. H. (2019). Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. In *Environment International* (Vol. 125). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.067>
- Rashid, A., Schutte, B. J., Ulery, A., Deyholos, M. K., Sanogo, S., Lehnhoff, E. A., & Beck, L. (2023). Heavy Metal Contamination in Agricultural Soil: Environmental Pollutants Affecting Crop Health. In *Agronomy* (Vol. 13, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/agronomy13061521>
- Singh, J., Upadhyay, S. K., Pathak, R. K., & Gupta, V. (2011). Accumulation of heavy metals in soil and paddy crop (*Oryza sativa*), irrigated with water of Ramgarh Lake, Gorakhpur, UP, India. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 93(3). <https://doi.org/10.1080/02772248.2010.546559>
- Turhun, M., & Eziz, M. (2022). Identification of the distribution, contamination levels, sources, and ecological risks of heavy metals in vineyard soils in the main grape production area of China. *Environmental Earth Sciences*, 81(2). <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10167-5>
- Wang, Y., Dong, A. J., Yang, J. F., Ma, Y. Bin, Wang, Z. J., & Yang, F. Y. (2023). Translocation, Accumulation, and Comprehensive Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop Systems in an Old Industrial City, Shizuishan, Ningxia, Northwest China. *Huanjing Kexue/Environmental Science*, 44(8). <https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202209003>

USO DE MATERIALES AVANZADOS PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUA DE RIEGO AGRÍCOLA: PROPUESTAS DE SOLUCIONES PARA UNA AGRICULTURA SOSTENIBLE

CORAZÓN G. MORALES AMAYA,
S. ALEJANDRO LOZANO MORALES, RAÚL HERRERA MENDOZA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA



Resumen

La presencia de metales pesados en el agua de riego agrícola representa un riesgo importante tanto para la salud pública como para el medio ambiente. Este artículo explora el desarrollo y aplicación de tecnologías avanzadas, como nanomateriales y filtros de carbón activado para la remoción de metales pesados en agua de riego. Estas tecnologías ofrecen soluciones innovadoras y sostenibles, capaces de remover contaminantes como el arsénico, plomo y cadmio de manera eficiente, mejorando así la calidad del agua que se usa en la agricultura y protegiendo los cultivos. También se analizarán los beneficios ambientales y para la salud humana de-

rivados de la implementación de estas tecnologías en sistemas de riego agrícola.

Palabras clave: metales pesados, nanomateriales, agua de riego, remediación, agricultura.

Introducción

Los metales pesados como el arsénico (As), plomo (Pb), cadmio (Cd) y mercurio (Hg) representan una amenaza significativa cuando se encuentran en el agua de riego agrícola. Estos contaminantes pueden llegar a las fuentes de agua, principalmente, por medio de actividades industriales, residuos mineros, el uso de fertilizantes y pesticidas que contengan tazas

de metales pesados (Saha et al., 2011). La exposición prolongada de estos elementos no solo afecta el crecimiento y productividad de los cultivos, sino que también pone en riesgo a la salud humana al bioacumularse en los alimentos (Smith et al., 2014).

Actualmente, se han desarrollado diversas tecnologías basadas en materiales avanzados para mitigar este problema. Materiales como los nanocompuestos, filtros de carbón activado y otros biofiltros han mostrado una gran efectividad en la remoción de metales pesados de riego (Lui et al., 2021). Estos materiales no solo proporcionan una solución prometedora, sino que también son sostenibles y muchos de estos pueden integrarse fácilmente en los sistemas agrícolas.

Desarrollo

Contaminación del agua de riego con metales pesados

La contaminación del agua de riego con metales pesados es un problema en muchas zonas agrícolas. Fuentes como los desechos industriales, la actividad minera y el uso inadecuado de químicos, pueden in-

troducir estos contaminantes en los sistemas hídricos (véase en la figura 1). Los metales pesados como el As y el Pb permanecen en el suelo durante largos periodos y pueden ser absorbidos por las plantas a través del agua de riego (Armienta et al., 2020). Esta situación compromete la seguridad alimentaria, lo que puede generar problemas de salud a largo plazo, como enfermedades crónicas, trastornos neurológicos, problemas renales y cáncer (Williams et al. 2007).

En México, varias regiones enfrentan altos niveles de contaminación en las fuentes de agua. Estados tales como Durango, Guanajuato y Coahuila presentan concentraciones elevadas de As y Pb, lo que afecta a la calidad del agua, por lo cual, la producción agrícola en estas zonas (Morales et al., 2012).

Tecnologías de remoción de metales pesados en agua de riego.

1. Nanomateriales para la remoción de metales pesados.

Los nanomateriales, como las nanopartículas (NPs) de óxidos metálicos, han demostrado ser altamente eficaces en los procesos de adsorción para la remoción de metales pesados del agua. Estas nanopar-

Figura 1. Ciclo de contaminación del agua de riego con metales pesados.



tículas presentan una gran área superficial y alta reactividad, lo que permite que se unan a los iones metálicos y los remuevan del agua antes de que lleguen a los cultivos (Zhao et al., 2020).

Por ejemplo, las NPs y de óxido de zinc son utilizadas para remover As y Cd del agua de riego, atrapando estos metales y reduciendo su biodisponibilidad. Estudios han demostrado que estas tecnologías pueden reducir hasta en un 90% los niveles de As en el agua de riego, mejorando la calidad del agua y asegurando una mayor protección para los cultivos (Liu et al., 2021).

2. Filtros de carbón activado y zeolitas.

Los filtros de carbón activado son otro método efectivo para remover metales pesados. El carbón activado (CA), al tener una estructura porosa, adsorbe eficientemente contaminantes como Pb y Hg. Este tipo de filtro es especialmente útil en sistemas de riego agrícola, ya que puede integrarse en los sistemas de filtración existentes sin requerir grandes modificaciones (García & Bonilla, 2015).

Las zeolitas, por su parte, son minerales naturales que poseen una estructura de microporos capaz de retener iones metálicos. Estas se utilizan en diversas regiones como una alternativa económica y sostenible para purificar el agua de riego y prevenir la acumulación de metales pesados en los cultivos (Sridhar & Adeyemo, 2009).

3. Biofiltros y fitotecnologías

Los biofiltros emplean microorganismos y plantas que tienen la capacidad de absorber y acumular metales pesados. Estas tecnologías han ganado popularidad por su bajo costo y sostenibilidad ambiental. Algunas plantas hiperacumuladoras, como el girasol y el sauce, se utilizan en sistemas de fitoremediación para absorber As y Cd del agua antes de que esta sea utilizada en los cultivos (Finnegan & Chen, 2012).

En regiones como Coahuila y Durango, la implementación de tecnologías de remediación del agua de riego ha mostrado resultados positivos. El uso de nanopartículas de hierro en sistemas de filtración ha permitido reducir significativamente los niveles

de As en el agua utilizada para el riego de cultivos como el maíz y el trigo (Morales et al., 2012).

En Guanajuato, el uso de zeolitas naturales ha ayudado a mejorar la calidad del agua de riego en zonas afectadas por la contaminación con Pb. Este método ha permitido a los agricultores reducir los niveles de metales pesados en sus cultivos, garantizando así una mayor seguridad alimentaria (Armienta et al., 2020).

A continuación, se presenta una tabla de los estados más afectados por la contaminación de agua para riego, los contaminantes principales y los materiales utilizados o recomendados para su remediación (véase tabla 1).

La remediación del agua de riego contaminada con metales pesados es un reto crucial para la agricultura sostenible en diversas regiones de México. Como se muestra en la tabla, los estados más afectados han comenzado a implementar soluciones tecnológicas avanzadas, que han demostrado ser efectivas para reducir la concentración de metales tóxicos en el agua y sus cultivos. La adopción de este tipo de tecnologías es imperante para garan-

Estado	Contaminantes principales	Materiales	Descripción	Referencia
Durango	Arsénico y Plomo	NPs de óxidos y filtros de CA	Eficientes para la adsorción de metales pesados, reducen la solubilidad de los contaminantes	Zhao, Y., et al. (2020) y, García, S. M., & Bonilla, C. M. (2015).
Guanajuato	Mercurio y Arsénico	Filtros de zeolita natural	La zeolita es capaz de atrapar metales pesados en sus poros	Sridhar, M. K., & Adeyemo, O. K. (2009) y, Morales, M., et al. (2012).
Coahuila	Arsénico y Cadmio	Biofiltros y NPs de Hierro	Los biofiltros emplean microorganismos capaces de remover metales pesados	Finnegan, P. M., & Chen, W. (2012) y, Wang, P., et al. (2022).
Hidalgo	Plomo y Mercurio	CA dopado con NPs	El CA mejora la adsorción y las NPs aumentan la eficiencia de remoción	Liu, X., et al. (2021) y, García, S. M., & Pérez, L. M. (2021)
San Luis Potosí	Plomo y Arsénico	Nano filtros de carbono en sistemas de fitorremediación	Los nano filtros permiten retener metales pesados y las plantas absorben contaminantes del agua.	ópez, A. & Martínez, C. (2020) y, Zhao, Y., et al. (2020).

Tabla 1. Estados con mayores niveles de contaminación en agua de riego y materiales recomendados para su remediación

tizar la seguridad alimentaria, mejorar la calidad del agua y proteger la salud de las poblaciones que se encuentran expuestas a este tipo de problemas ambientales.

Conclusiones

La contaminación del agua de riego con metales pesados es un desafío urgente para la agricultura sostenible. Los materiales avanzados, como los nanomateriales, los filtros de carbón activado y las fitotecnologías, ofrecen soluciones eficientes y sostenibles para mitigar este problema. Estas tecnologías permiten remover metales como el As, Pb y Cd del agua de riego, protegiendo los cultivos y reduciendo los riesgos para la salud humana (Williams et al., 2007).

La implementación de estas soluciones a gran escala puede contribuir significativamente a mejorar la calidad del agua en las regiones agrícolas más afectadas, al tiempo que se promueve una mayor sostenibili-

lidad ambiental. Por lo que, la adopción de estas tecnologías en los sistemas de riego agrícola es clave para garantizar la producción de alimentos seguros y saludables en el futuro (Saha et al., 2011). 💧

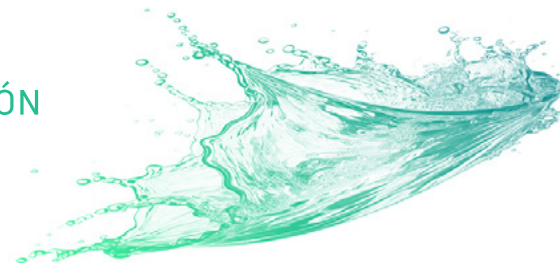
Bibliografía

- Williams, P. N., et al. (2007). Greatly enhanced arsenic shoot assimilation in rice leads to elevated grain levels compared to wheat and barley. *Environmental Science & Technology*, 41(19), 6854-6859.
- Morales, M., et al. (2012). Lead contamination in maize (*Zea mays* L.) and its effect on health in rural areas of Mexico. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 31(5), 100-110.
- Sridhar, M. K., & Adeyemo, O. K. (2009). Environmental implications of heavy metal pollution in plants. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 8(5), 416-424.
- Saha, J. K., et al. (2011). Heavy metal contamination in agricultural soils in Bangladesh and its impact on human health. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(1), 831-839.
- Smith, A. T., et al. (2013). Accumulation of lead in urban agriculture: Impacts on vegetable production and human health. *Journal of Environmental Management*, 124, 193-202.
- Finnegan, P. M., & Chen, W. (2012). Arsenic toxicity: The effects on plant metabolism. *Frontiers in Physiology*, 3, 182.
- Shimbo, S., et al. (2001). Contamination of vegetables in Brazil with cadmium and lead. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 67(4), 491-497.
- Garcia, S. M., & Bonilla, C. M. (2015). Mercury bioaccumulation in potatoes from regions adjacent to gold mining areas in Peru. *Journal of Environmental Protection*, 6, 1342-1349.

RECUPERACIÓN DE ESTRUVITA A PARTIR DEL AGUA RESIDUAL: UNA ALTERNATIVA PARA LA OBTENCIÓN DE FERTILIZANTES APLICABLES EN LA AGRICULTURA

MONICA A. DIAZ-ASCENCIO, JUAN L. OBESO, CAROLINA LEYVA

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL,
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA APLICADA Y TECNOLOGÍA AVANZADA
UNIDAD LEGARIA, LABORATORIO NACIONAL DE CIENCIA, TECNOLOGÍA
Y GESTIÓN INTEGRADA DEL AGUA (LNAGUA)



Resumen

El conflicto del agua y la reciente crisis del fósforo (P), evidencian la necesidad de proteger y preservar el planeta y sus recursos naturales. En particular, el P es un elemento fundamental para la vida, como nutriente es esencial en el desarrollo y crecimiento de los cultivos, sin embargo, es un recurso finito e irremplazable. Actualmente, las reservas naturales de P se encuentran en alerta debido a su escasez, con lo cual, el precio y disponibilidad de fertilizantes fosfatados se ha visto seriamente afectado, poniendo en riesgo el sector agrícola, y con él, la seguridad alimentaria mundial. Por otro lado, la presencia de P en el agua residual debido al exceso

de nutrientes orgánicos promueve la eutrofización, así como la formación de estruvita, la cual debido a sus propiedades y composición química, puede ser usada como fertilizante y contribuir en la remediación del agua residual.

Introducción

Recientemente, el sector agrícola se ha visto amenazado debido a la escasez de P a nivel global, incrementando los precios de los fertilizantes y por otro lado, la disminución de los cuerpos hídricos y su alto índice de contaminación dificultan la disponibilidad del agua para el riego, poniendo en riesgo al

sector agrícola, y por ende, la seguridad alimentaria mundial (Alewell et al., 2020).

Los fertilizantes a base de P surgieron a mediados del siglo XX con la denominada “revolución verde” convirtiéndose en una estrategia para asegurar la demanda alimentaria y combatir el hambre en el mundo, sin embargo, su uso desmedido en la agricultura ha sido un factor determinante en la crisis actual del P (más del 90% de la extracción mundial se usa en la producción de fertilizantes) y la eutrofización provocada por el alto contenido de nutrientes en el agua residual (Butusov & Jerneilöv, 2013). La eutrofización provoca contaminación hídrica, y se produce cuando una masa de agua recibe un exceso de nutrientes inorgánicos, principalmente P y nitrógeno (N), los cuales, favorecen los florecimientos de plantas invasoras como las algas, que crean zonas muertas y alteran la calidad del agua, el ecosistema acuático y estimulan la liberación de gases de efecto invernadero como el metano (Yang et al., 2008).

Con frecuencia, las aguas residuales carecen de valor y son asociadas a un impacto negativo social.

Sin embargo, recientemente se les considera un área de oportunidad, debido a que es posible recuperar sustancias presentes en ellas, tales como N y P, los cuales pueden ser reutilizados. En este sentido, la obtención de estruvita ha llamado la atención por ser una fuente potencial no solo de P, sino también de N y magnesio (Mg), y puede ser reutilizada como fertilizante (Hertzberger et al., 2020). En la Figura 1, se representa la posible economía circular de la estruvita.

Figura 1. Estruvita en la economía circular



La estruvita se puede considerar como fertilizante de liberación lenta que se obtiene a partir de aguas residuales. Es un fertilizante que aporta fósforo, nitrógeno y magnesio. Se disuelve lentamente, lo que la hace especialmente interesante para aquellos cultivos o zonas forestales que se abonan con poca frecuencia.

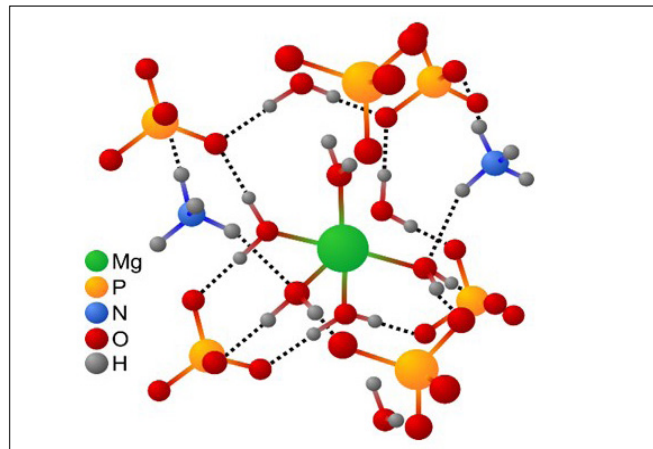
¿Qué es la estruvita?

La estruvita es un mineral fosfático, es el nombre por el cual se conoce al fosfato de magnesio y amonio hexahidratado. Es un compuesto cristalino, generalmente blanco, compuesto por Mg^{2+} , NH_4^+ y PO_4^{3-} en proporciones equimolares. La principal reacción a partir de la cual se genera estruvita es:



Dado que está compuesta por moléculas de capa cerrada (cargadas o polares), su estructura cristalina (Véase Figura 2) está determinada por interacciones electrostáticas y enlaces de hidrógeno (Le Corre et al., 2009).

Figura 2. Estructura de la estruvita mostrando las interacciones moleculares



Obtención de estruvita

La estruvita suele presentarse con frecuencia en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y en entornos agrícolas. Este compuesto se forma principalmente debido a procesos de precipitación, donde ocurre una reacción química entre especies o componentes solubles, lo cual da lugar a un producto poco soluble que directamente cristaliza y preci-

pita. Existen diferentes parámetros fisicoquímicos que influyen en la cinética y el mecanismo de crecimiento de la estruvita como el pH, la temperatura, la proporción molar entre los componentes, la presencia de iones competitivos entre otros, sin embargo, se ha reportado que los más influyentes son la sobresaturación y el pH (Ariyanto et al., 2014).

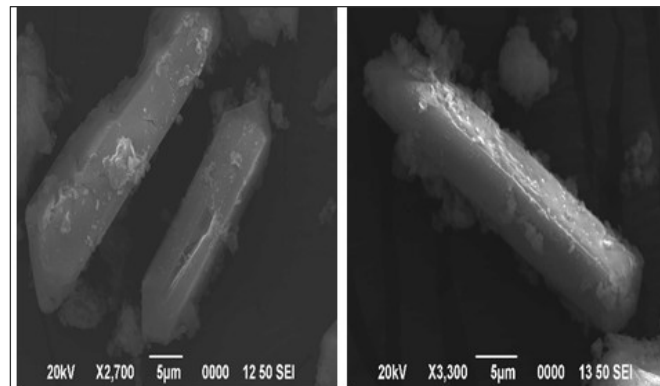
En cuanto al pH, diferentes estudios han evaluado la formación de estruvita en el intervalo de 8-11, sin embargo, se ha identificado valores de pH alrededor de 9 como los más favorables para la precipitación de estruvita. La sobresaturación es fundamental en los procesos de precipitación, el agua residual suele presentar altas cargas de P y N, pero escaso contenido de Mg, y por esto, es común añadir sales de Mg para favorecer la formación de estruvita, dentro de los compuestos más usados se encuentran el sulfato de magnesio ($MgSO_4$), cloruro de magnesio ($MgCl_2$), hidróxido de magnesio ($Mg(OH)_2$) y el óxido de magnesio (MgO). También, se ha identificado que tanto el $MgCl_2$ como el $MgSO_4$, tienen la ventaja de ser muy solubles, esto permite recuperar un precipitado con

un alto grado de pureza (Siciliano et al., 2020). En general, la reacción de precipitación se lleva cabo en un sistema batch, donde se utiliza agua residual (de alguna planta de tratamiento) y se agrega una solución de Mg en proporción Mg:P mayor o igual a 1:1. Después, se agita y se ajusta el valor de pH determinado a las condiciones experimentales para favorecer los precipitados de estruvita (Stolzenburg et al., 2015). En la Figura 3, se muestra una estruvita proveniente del agua residual. (Véase Figura 3)

La estruvita en la agricultura

Hoy en día, el sector agrícola además de ser uno de los mayores consumidores de agua en el mundo, también es uno de los principales contribuyentes de la contaminación de este recurso, debido a que gran parte del N y el P presentes en los fertilizantes y agroquímicos se infiltran en la tierra a través del agua usada para el riego y terminan en cuerpos hídricos. Por lo que es necesario empezar a utilizar fertilizantes amigables con el medio ambiente. Con base a esto, la estruvita posee dos características claves para la remediación del agua: en pri-

Figura 3. Micrografía de la morfología de la estruvita obtenida a partir del agua residual con diferentes pH



mer lugar, al ser un compuesto recuperado de las aguas residuales, su obtención disminuye la carga de nutrientes presentes en la misma y, en segundo lugar, es un fertilizante de liberación lenta, lo cual disminuye la infiltración de nutrientes en el terreno y en el agua. Otras de las ventajas asociadas con la estruvita como fertilizante, son el aporte de N y P, y el escaso, o inexistente contenido en metales pesados en comparación con las rocas fosfóricas que

son extraídas y suministradas a la industria de los fertilizantes (Kataki et al., 2016).

Adicionalmente, la estruvita ha demostrado ser un fertilizante eficaz y de fácil uso, puede ser aplicado en los cultivos directamente sin la necesidad de practicar un tratamiento previo y llegar a alcanzar un rendimiento cuatro veces superior en comparación con los fertilizantes minerales comerciales (Wang et al., 2023).

Conclusiones

La obtención de estruvita contribuye significativamente a la economía circular, además, su incorporación en las prácticas agrícolas ofrece beneficios múltiples, ofreciendo ventajas tanto económicas como ecológicas y ambientales, alineándose con los objetivos de desarrollo sostenible y gestión responsable de recursos. Dentro de los principales beneficios del uso estruvita como fertilizante, se destaca el aporte simultáneo de nutrientes, la reducción de la contaminación del agua, la disminución de la pérdida de nutrientes en el suelo y el reciclaje de residuos, entre otros. Su uso a largo plazo puede ser

más económico en comparación a los fertilizantes comerciales convencionales debido a que puede aumentar la eficiencia significativamente de los cultivos y puede reducir la frecuencia del uso de los fertilizantes. 💧

Bibliografía

- Alewell, C., Ringeval, B., Ballabio, C., Robinson, D. A., Panagos, P., & Borrelli, P. (2020). Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion. *Nature Communications*, 11(1), 4546. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18326-7>
- Ariyanto, E., Sen, T. K., & Ang, H. M. (2014). The influence of various physico-chemical process parameters on kinetics and growth mechanism of struvite crystallisation. *Advanced Powder Technology*, 25(2), 682-694. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2013.10.014>
- Butusov, M., & Jernelöv, A. (2013). Fertilizers: 100 Years of Supremacy. En M. Butusov & A. Jernelöv, *Phosphorus* (Vol. 9, pp. 37-52). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6803-5_5
- Hertzberger, A. J., Cusick, R. D., & Margenot, A. J. (2020). A review and meta-analysis of the agricultural potential of struvite as a phosphorus fertilizer. *Soil Science Society of America Journal*, 84(3), 653-671. <https://doi.org/10.1002/saj2.20065>
- Kataki, S., West, H., Clarke, M., & Baruah, D. C. (2016). Phosphorus recovery as struvite: Recent concerns for use of seed, alternative Mg source, nitrogen conservation and fertilizer potential. *Resources, Conservation and Recycling*, 107, 142-156. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.12.009>
- Le Corre, K. S., Valsami-Jones, E., Hobbs, P., & Parsons, S. A. (2009). Phosphorus Recovery from Wastewater by Struvite Crystallization: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39(6), 433-477. <https://doi.org/10.1080/10643380701640573>
- Siciliano, A., Limonti, C., Curcio, G. M., & Molinari, R. (2020). Advances in Struvite Precipitation Technologies for Nutrients Removal and Recovery from Aqueous Waste and Wastewater. *Sustainability*, 12(18), 7538. <https://doi.org/10.3390/su12187538>
- Stolzenburg, P., Capdevielle, A., Teychené, S., & Biscans, B. (2015). Struvite precipitation with MgO as a precursor: Application to wastewater treatment. *Chemical Engineering Science*, 133, 9-15. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.03.008>

Wang, L., Ye, C., Gao, B., Wang, X., Li, Y., Ding, K., Li, H., Ren, K., Chen, S., Wang, W., & Ye, X. (2023). Applying struvite as a N-fertilizer to mitigate N₂O emissions in agriculture: Feasibility and mechanism. *Journal of Environmental Management*, 330, 117143. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117143>

Yang, X., Wu, X., Hao, H., & He, Z. (2008). Mechanisms and assessment of water eutrophication. *Journal of Zhejiang University SCIENCE B*, 9(3), 197-209. <https://doi.org/10.1631/jzus.B0710626>

MONITOREO PARTICIPATIVO DEL AGUA Y CIENCIA COMUNITARIA: HERRAMIENTAS PARA LA SOBERANÍA ALIMENTARIA

Laura Conde Báez

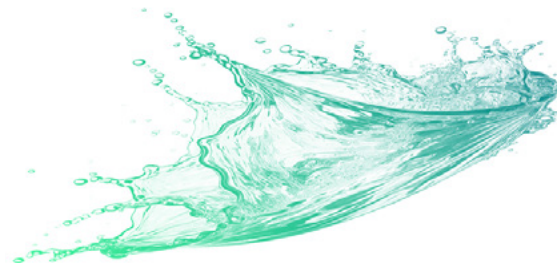
FACULTAD DE ECONOMÍA, MAESTRÍA EN ECONOMÍA SOCIAL,
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE GUERRERO

Cuahtémoc F. Pineda Muñoz

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICO BIOLÓGICAS,
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE GUERRERO

Alfredo Pineda Gómez

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN, MAESTRÍA EN ECONOMÍA SOCIAL,
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE GUERRERO



Resumen

La contaminación natural y antropogénica, ha impactado en la calidad y disponibilidad del agua, representando un riesgo global, especialmente para las comunidades rurales que dependen de estos recursos para su seguridad alimentaria. Las autoridades, administradores y científicos se han visto sobrepasados en la gestión y monitoreo sostenible del agua, lo que ha impulsado la creación de iniciativas comunitarias para monitorear su calidad. Es-

tas iniciativas buscan mejorar la gestión del recurso mediante la recopilación de datos precisos que permiten identificar tempranamente la contaminación y sus impactos. Este documento analiza el objetivo de la generación de ciencia en comunidad a través de una selección de variables, la actividad participativa en comunidad y los desafíos en la generación de conocimiento local utilizable.

Introducción

Las actividades humanas, como el crecimiento demográfico, la degradación ambiental, el agotamiento de recursos naturales y el cambio climático, han impactado gravemente los ecosistemas (Wong *et al.*, 2023). Estas problemáticas requieren una respuesta integral y participativa de todos los actores involucrados. Sin embargo, los sectores encargados del monitoreo de la calidad del agua (dependencias, administradores y la academia) han quedado sobrepasados por la complejidad de la gestión hídrica, debido a los diferentes intereses que no siempre coinciden con las necesidades de las comunidades. Además la creciente complejidad ambiental y los recortes en el financiamiento de programas gubernamentales de monitoreo (Mohammad *et al.*, 2019) han impulsado el desarrollo de convenios internacionales y políticas como la Convención de Aarhus, el Marco de Acción de Hyogo y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que destacan la importancia de involucrar a los ciudadanos en las ciencias y en políticas ambientales. La ciencia ciudadana, un campo emergente en la investigación participativa,

contribuye al fortalecimiento del conocimiento sobre la calidad del agua y suelo, clave para la soberanía alimentaria (Mohammad *et al.*, 2019). Según Amy *et al.*, (2016), el monitoreo basado en la comunidad (MBC) proporciona información crucial sobre la calidad del agua en cuencas, involucrando a las comunidades en el desarrollo científico, a través de estrategias de monitoreo que permitan garantizar el suministro seguro de agua potable fundamental para la producción de alimentos locales y la seguridad alimentaria (Peeters *et al.*, 2022).

El MBC permite la evaluación rápida y remota de la calidad del agua y la salud de los suelos, con una frecuencia mucho mayor que los métodos tradicionales. Esto facilita la detección temprana de problemas y una respuesta más ágil, casi en “tiempo real” (Calderwood *et al.*, 2020). Al involucrar a las comunidades en la gestión y monitoreo ambiental, el MBC no solo mejora la conservación de los recursos naturales, sino que también fortalece la soberanía alimentaria, al permitir que los propios habitantes protejan sus tierras y fuentes de agua a través de la ciencia ciudadana.

El MBC ofrece una mejor coordinación entre las partes interesadas; una habilidad aumentada en detectar y responder a las tendencias e impactos ambientales, un uso efectivo del conocimiento comunitario y un seguimiento de los recursos naturales a través del aprendizaje, generando una protección ambiental basada en la comunidad. El MBC es “un proceso en donde colaboran los ciudadanos, organizaciones gubernamentales, industria, academia, grupos comunitarios e instituciones locales en el monitoreo, rastreo y respuesta sobre asuntos de interés común” (Tomas *et al.*, 2022). Esto mejora la educación sobre la gestión del agua y la calidad del suelo, permitiendo la cuantificación de datos fiables y el establecimiento de sistemas de alerta temprana. Adoptar un MBC requiere un enfoque estructurado en diversas dimensiones, sobretodo porque aún existen brechas respecto a la generación de información, precisa, especialmente en la comparación de metodologías y técnicas establecidas para validar los datos.

Iniciativas Internacionales y Desafíos en la Replicabilidad del Monitoreo Comunitario del Agua

A nivel internacional, existen varios programas enfocados en el monitoreo voluntario de la calidad del agua, pero solo cinco proporcionan información sobre las variables y técnicas utilizadas. Entre ellos se encuentran: el programa “Adopta tu cuenca” de la EPA de EE.UU., el programa Alabama Water Watch, parte de la red Global Water Watch de la Universidad de Auburn, el monitoreo comunitario en Canadá, el programa en Australia, y el Community-Based Environmental Monitoring Network. De estos, el programa Pacific Streamkeepers es el único que ofrece un manual de monitoreo accesible, útil para definir variables en otras localidades.

Estos programas fomentan el monitoreo comunitario participativo para abordar problemáticas relacionadas con el manejo de recursos hídricos, utilizando un modelo de cuidado coparticipativo de cuencas (Duij *et al.*, 2024). Sin embargo, la falta de acceso a información detallada sobre las técnicas y variables del monitoreo dificulta su uso y repli-

cación en comunidades con diversas necesidades para evaluar la calidad del agua y la salud de los suelos. En este sentido, la obtención de datos consistentes sigue siendo un reto. Las organizaciones que acreditan a los monitores comunitarios suelen hacerlo a través de costosos procesos, y el acceso periódico a laboratorios para el análisis de muestras ambientales es limitado, lo que restringe la efectividad del monitoreo.

Participación Comunitaria en el Monitoreo Ambiental: Retos y Oportunidades

A pesar del creciente interés en el monitoreo comunitario, solo una pequeña parte de los estudios considera la participación estructurada de la comunidad, conocida como MBC. Según Gharesifard *et al.*, 2019, aunque se han identificado más de 8,000 documentos relacionado con el MBC, solo 67 son relevantes y abordan aspectos técnicos y científicos, mientras que solo 16 incluyen la participación activa de la comunidad.

Aunque la participación ciudadana en la investigación no es nueva, con antecedentes desde 1880,

el concepto de ciencia ciudadana ha evolucionado en las últimas dos décadas, integrando protocolos específicos y medibles para recopilar datos. Los programas de MBC permiten a los gobiernos aumentar los monitoreos de manera rentable, llenando vacíos con la ayuda de monitores voluntarios. Sin embargo, enfrentan desafíos como la falta de financiamiento, la pérdida de interés de los voluntarios, y la fragmentación de datos, lo que dificulta su impacto en la toma de decisiones (Duijn *et al.*, 2024).

Craig *et al.*, (2004) describe el enfoque multipartidario como el más adecuado para vincular el MBC, ya que involucra a todas las partes interesadas, adaptando las decisiones a las necesidades de cada uno de los actores.

Ciencia ciudadana

En 2018, los indicadores de agua dentro de los ODS mostraron que en los países desarrollados, el 30% de los cuerpos de agua tenían buena calidad, mientras que en los países en vías de desarrollo, la falta de recursos humanos y financieros limitaba la

recopilación y análisis de datos sobre la calidad del agua (Tomas et al., 2022). Esto subraya la carencia de datos globales confiables sobre este recurso. Por ello, es crucial impulsar proyectos de ciencia ciudadana que generen datos más fiables, integrando estos resultados en investigaciones y políticas de calidad del agua, mientras se desarrollan capacidades a través de la interacción social.

La ciencia ciudadana, definida por leyes como la de Crowdsourcing y Ciencia Participativa, implica la colaboración voluntaria de individuos y organizaciones en todas las fases del proceso científico, desde la formulación de preguntas hasta el análisis de resultados. Este enfoque busca combinar

Figura 1. Principios para el desarrollo de proyectos con enfoque de ciencia ciudadana



la divulgación pública con la recopilación de datos científicos a nivel local, regional y global (Duijn et al., 2024), y fomenta la alfabetización científica mediante experiencias de aprendizaje informal que integran ciencia, educación y gestión. Para su desarrollo, los proyectos de ciencia ciudadana deben considerar principios clave como los atributos

ciudadanos, las instituciones involucradas, y los procesos y mecanismos para su implementación (Wong et al., 2023).

Conclusiones

La ciencia ciudadana en el monitoreo comunitario del agua y el suelo es una herramienta clave para avanzar en los ODS relacionados con la gestión sostenible de los recursos naturales. El análisis adecuado de los datos recolectados puede influir directamente en la toma de decisiones para una gestión integral y sostenible de estos recursos esenciales. La ciencia ciudadana permite el uso de técnicas establecidas y la participación social, facilitando la recolección de datos en tiempo real y abordando problemas ambientales de forma ágil y rentable. Estandarizar las técnicas de recopilación mejora la confiabilidad de los datos, promoviendo el aprendizaje científico, la concientización ambiental, y el fortalecimiento de las interacciones sociales fundamentales para la sostenibilidad y la soberanía alimentaria. 💧

Bibliografía

- Amy, B.N., Castleden, H., Conrad, C (2016). Aligning community-based water monitoring program designs with goals for enhanced environmental management. *Journal of Science Communication*. 15(03):1-23.
- Calderwood, A.J., Pauloo, R.A., Yoder, A.M., Fogg, G.E (2020). Low-cost, open source wireless sensor network for real-time, scalable groundwater monitoring. *Water* 12, 1066.
- Craig, B, Whitelaw G, Robinson J, Jongerden P (2004) Community-based ecosystem monitoring: a tool for developing and promoting ecosystem-based management and decision-making in the Long Point World Biosphere Reserve. Available at: <http://www.sampaa.org/PDF/ch4/4.4.pdf>. Accessed: September 22, 2005.
- Duijn, M., Verkerk, P.J., Sambell, K., Puts, H. (2024). Value-sensitive design under ground? Exploring the community-based monitoring of a geothermal project in the Netherlands. *Energy Research & Social Science*. 118, 103768.

Gharesifard, M., Wehn, U., van der Zaag, P (2019). What influences the establishment and functioning of community-based monitoring initiatives of water and environment? A conceptual framework. *Journal of Hydrology*. 579, 124033.

Mohammad, G., Uta, W., Zaag, P.V (2019). What influences the establishment and functioning of community-based monitoring initiatives of water and environment? A conceptual framework. *Journal of Hydrology*. 579:124033.

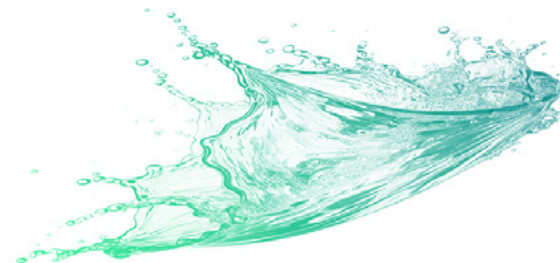
Peeters, E.T.H.M., Gerritsen, A.A.M., Seelen, L.M.S., Begheyn, M., Rienks, F., Teurlincx, S (2022). Monitoring biological water quality by volunteers complements professional assessments. *PLoS ONE* 17(2): e0263899.

Tomas, V. S., Hermann, A., Lingen, L.V.D., Hayes, T (2022). Community-based water markets and collective payment for ecosystem services: toward a theory of community-based environmental markets. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 59: 101221.

Wong, A.A.R, Morúa, R.A., Bojórquez, A., Yrizar, M.A., Yépez, A.E., Yépez, A.J.C. (2023). Climate-induced changes to provisioning ecosystem services in rural socioecosystems in Mexico. *Weather and Climate Extremes* 41,100583.

COMPOSTAJE DE RESIDUOS ORGÁNICOS COMO PRÁCTICA SUSTENTABLE

CÉSAR GONZÁLEZ-GUERRERO, ADRIANA REYES-SERRANO,
ALEJANDRA GUADALUPE VILLEGAS-PAÑEDA,
GABRIELA NAVA AMEZCUA
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ACATLÁN, UNAM



Resumen

El 50% de residuos generados corresponde a residuos orgánicos de los cuales no se tienen programas de reuso o reciclaje adecuados. La Facultad de Estudios Superiores Acatlán es un espacio en donde se cuenta con una gran superficie de áreas verdes y la consecuente generación de un gran volumen de este tipo de residuos que no se aprovechan dentro de ésta como ocurre con otras instituciones educativas.

El presente escrito, tiene como finalidad exponer el trabajo que se ha realizado en la gestión de residuos de cafeterías, poda y jardinería, y heces caninas mediante su recolección y producción de composta, así como su análisis como producto que

puede ser utilizado en los jardines que requieran recuperación del suelo, para prevenir su erosión y degradación, además en la producción de hortalizas y frutales, promoviendo un suelo sano y fértil.

Introducción

En la Ciudad de México se producen 9,552 ton/día de residuos, en donde el 46.42 % corresponde a residuos orgánicos (SEMARNAT 2020). En términos generales, éstos finalizan en terrenos baldíos, barrancos, vertederos, incluso alojados en ríos sin que exista un aprovechamiento racional o un reciclaje sistemático de estos (Lizano Cruz, y otros 2019).

Una alternativa de aprovechamiento de dichos residuos es a través del compostaje, el cual es un proceso de conversión biológica bajo condiciones controladas de material orgánico de desecho en un producto higiénico, rico en humus y estable que acondiciona el suelo y nutre las plantas. Este tratamiento puede ser llevado a cabo de manera tradicional o asistido por lombrices. El producto obtenido se denomina compost que se caracteriza por ser una mezcla estable, homogénea y que guarda una relación entre sus componentes que le confieren un valor agronómico al contener nutrientes como: nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, calcio y hierro, además de oligoelementos necesarios para la vida de las plantas, cuenta también de una considerable densidad y variedad de microorganismos que pueden ser utilizados para mejorar la fertilidad y retención hídrica de los suelos agrícolas, así como prevenir su erosión y degradación (Blanco, Cardona y Hernández Ríos 2008).

Con base a lo mencionado anteriormente, y con el fin de gestionar de forma adecuada este tipo de residuos y de sumarnos a esta muy sustentable

causa, el objetivo de este trabajo es reciclar los residuos de alimentos, poda y jardinería e incluso heces caninas en la elaboración de composta, comenzando con lotes piloto que sean manejables, se puedan analizar y aplicar en la regeneración los suelos de los jardines, macetas y producción hortícola.

Desarrollo

Existen diferentes tipos de compostaje que principalmente está definido por la naturaleza de los residuos involucrados. Dentro de estos, se encuentra la fuente de carbono que generalmente son residuos secos de hojas y madera provenientes de la poda de árboles y arbustos y la fuente de nitrógeno que se caracteriza por ser residuos verdes o frescos, como pueden ser residuos de poda (*Véase figura 1*), residuos domésticos, lodos activados y heces de animales, ya sea de granja o de caninos domésticos.

En la FES Acatlán se han realizado diversos estudios en donde se han incluido con anterioridad varios sustratos en la producción de composta de forma tradicional y la asistida por lombrices rojas californianas (*Eisenia foetida*). El resultado de este

Figura 1. Residuos de poda y jardinería.**Residuos de cafeterías.**

trabajo ha tenido como finalidad la obtención de productos que pueden utilizarse como enmienda de suelos o fertilizantes orgánicos en suelos de huertos y en mantenimiento de macetas en casa.

La composta tradicional está caracterizada por incluir residuos con aporte de carbono y nitrógeno en una proporción de 30:1 respectivamente, estos son humectados y oxigenados mediante volteos periódicos en un lapso aproximado de nueve meses. (Véase Figura 2)

A diferencia de la tradicional, la lombricomposta se lleva a cabo en un tercio del tiempo que su contraparte, ya que la incorporación de lombrices

Figura 2. Volteo de composta tradicional

acelera el proceso y da como resultado un mejor producto, además que prescinde del volteo mecánico para oxigenar que comúnmente es realizado por personas. (Véase figura 3)

Dentro de los trabajos de compostaje que se han llevado a cabo en la FES Acatlán podemos destacar los siguientes.

Figura 3. Lombricomposta



S1: Lodos residuales de una planta de tratamiento de agua residual y hojarasca de jardinería.

S2: Residuos sólidos orgánicos (cafeterías de fes Acatlán), hojarasca de jardinería y lombrices

S3: Residuos sólidos orgánicos (domésticos), hojarasca de jardinería y lombrices

S4: Residuos sólidos orgánicos y hojarasca de jardinería (tradicional)

S5: Heces caninas, hojarasca de jardinería y lombrices

A cada uno de los productos obtenidos se les realizaron los análisis que se muestran en la Tabla 1 con base a la norma NMX-FF-109-SCFI-2007.

Como se puede observar en el análisis de los productos, cada uno de ellos conserva características particulares dependientes de los sustratos e insumos que se han empleado para cada caso. Es en este sentido que se debe analizar en la medida de lo posible el producto de compostaje, con el fin de tener una idea más precisa de su aporte nutricional y pueda ser utilizado de la mejor manera en las diferentes aplicaciones antes mencionadas. (Véase figura 4)

Sin embargo, el alcance de este producto fabricado con residuos orgánicos puede tener un objetivo mayor. Por otra parte, se conoce que el gran uso de fertilizantes y plaguicidas aminoran la calidad del suelo productor de alimentos, siendo una práctica ya muy establecida en la agricultura a mediana y gran escala. El uso de la composta orgánica ha cobrado importancia sobretodo en la producción de alimentos, en huertos pequeños, familiares o en espacios de colectivos productores.

Análisis	S1	S2	S3	S4	S5	Norma (NMX-FF-109-SCFI-2007)
pH	5.2	5.7	9.63	9.8	7.43	5.5 a 8.5
CE	5.4	5.7	5.22	7.82	6.00	≤4 dS m ⁻¹
Humedad %	53.9	58.1			52.96	20 a 40%
Cenizas %	42.3	44.4	15.44	16.33	29.77	
MO %	57.7	56	84.56	83.66	70.59	20 a 50%
CO %	33.4	32.5	49.04	48.52	40.94	
Densidad	0.5	0.45	0.51	0.40	0.51	0.40 a 0.90 g/mL
Coliformes	0	10.32				No específica
Escherichia coli	0	0				≤ 1000 NMP por g en base seca.
NT %	3					De 1 a 4%
Relación C/N %	16					≤20
Fosforo soluble	415 mg/Kg					

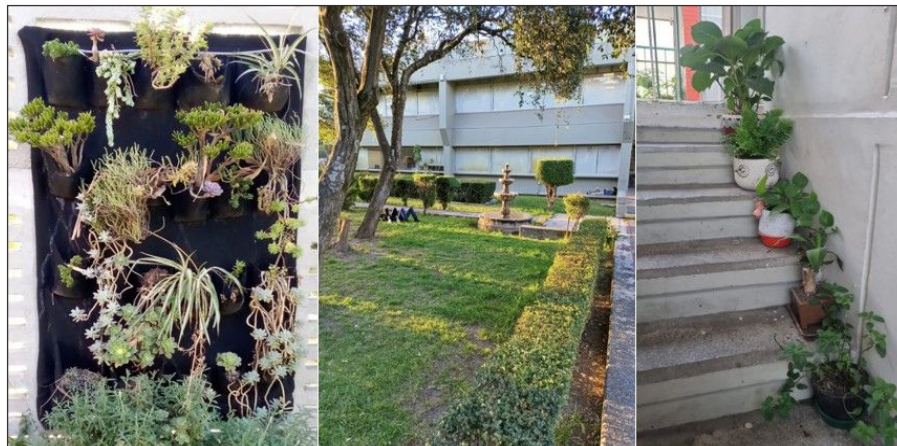
Tabla 1. Sustratos utilizados para la producción de compost tradicional y con lombrices rojas californianas

En este sentido, y a razón del establecimiento de plantas de compostaje en ciudades como la CDMX, resulta interesante que el uso de fertilizantes provenientes del compostaje se convirtiera en una práctica generalizada en la mediana y gran agricultura disminuyendo el impacto por uso de productos químicos y el consecuente desgaste del suelo.

Conclusiones

A través de la gestión de residuos que se ha realizado en la FES Acatlán para la obtención de composta y su aplicación, nos damos cuenta de la gran importancia que tiene esta práctica y la concientización de las personas, dando con ello una visión en donde volvamos paulatina-

Figura 4. Aplicaciones del producto



mente al uso de productos orgánicos y de naturaleza inocua para el ambiente.

Cabe destacar que en estos tiempos en donde se busca ser sostenibles atendiendo a los objetivos de la ONU, es importante pensar en colocar una pausa a los procesos de producción actuales y considerar en regresar a las formas artesanales y ancestrales para la producción de alimentos, y así evitar el impacto al medio ambiente y a la salud pública. 💧

Referencias

Blanco, Castel , Susana Cardona , y Leidy Johanna Hernández Ríos . *Aprovechamiento de podas mediante compostaje en la escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suárez"*. Santiago de Cali : Universidad Autónoma de Occidente, 2008.

Lizano Cruz, Eric , María Elena Martínez Rodríguez , José Carlos Méndez Castellanos , Daniela Miranda Marín, Edison Moisés Moctezuma Cuervo, y Edgar Jesús Valdés Zamora . *Reporte: Planta de Composta IPN* . Informativo , Ciudad de México : ESI-QIE-IPN , 2019.

SEMARNAT. *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos* . Informativo , Ciudad de México , 2020.

FONDOS DE AGUA PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN ZONAS AGRÍCOLAS

OSIRISS CRUZ RUVALCABA,
MARIANA VILLADA-CANELA,
DALIA MARCELA MUÑOZ-PIZZA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA.



Resumen

En el valle de Maneadero, Baja California, la agricultura experimenta una crisis hídrica marcada por sobreexplotación del acuífero costero, intrusión marina y deterioro de la calidad del agua. Mediante análisis documental, entrevistas y análisis FODA, este estudio propone un Fondo de Agua (FA) como solución innovadora, basada en la colaboración y Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN). Se encontró que los agricultores han implementado costosas tecnologías de desalinización, comprometiendo la sostenibilidad del valle, y que existe un impacto a la salud pública por la descarga de aguas residuales sin tratamiento en los arroyos. El

FA busca abordar estos retos con un enfoque integral que incluye monitoreo del acuífero, mejora de infraestructura de tratamiento de aguas residuales y participación de todos los sectores. La propuesta pretende garantizar el recurso hídrico, así como preservar la viabilidad económica de la agricultura local, constituyéndose como un referente de la gestión sostenible en regiones áridas.

Introducción

En el árido paisaje de Baja California, el valle de Maneadero simboliza la compleja realidad hídrica que enfrentan las regiones agrícolas mexicanas (*Véase*

Figura 1). Con un déficit anual de 6.5 millones de m³ del acuífero principal (CONAGUA, 2024, p. 37), esta zona agrícola ve amenazada su producción y sostenibilidad económica. La sobreexplotación del acuífero, la intrusión marina y la contaminación de cuerpos de agua por descargas de aguas residuales sin tratamiento configuran un escenario que pone en riesgo no solo la producción agrícola, sino también el bienestar de las comunidades locales.

Los Fondos de Agua (FA) emergen como una estrategia innovadora para abordar estos desafíos, presentándose como un mecanismo integral que busca equilibrar las necesidades hídricas de diferentes sectores. Esta herramienta propone integrar recursos de diversos actores para conservar las cuencas, garantizar el acceso al recurso hídrico y promover prácticas sostenibles alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU, especialmente los ODS 6 “Agua Limpia y Saneamiento” y ODS 2 “Hambre Cero”. La gestión sostenible del agua se convierte así en un imperativo para preservar la seguridad hídrica y alimentaria, especialmente en zonas agrícolas y ecosistemas áridos y costeros.

Figura 1.



Crisis hídrica en el valle de Maneadero

El valle agrícola de Maneadero es importante por su producción de hortalizas, forrajes y flores, pero está experimentando una presión crítica sobre sus recursos hídricos. El acuífero de Maneadero (*Véase Figura 2*), principal fuente de agua de la zona, presenta signos de sobreexplotación. Cuenta con 396 pozos registrados y un volumen concesionado de

Figura 2.



Figura 3.



38,304,755 m³, pero actualmente tiene un déficit de 6,528,785 m³ anuales (CONAGUA, 2024, p. 25 y 31). Desde 1965, el acuífero está vedado, permitiéndose solo extracciones limitadas para usos domésticos, industriales y de riego.

La calidad del agua se ha deteriorado constantemente. Los niveles de sólidos disueltos totales (SDT) han aumentado de 9.46 gL⁻¹ en 2000 a 25.6 gL⁻¹ en

2011 (Mendoza-Espinosa y Daesslé, 2018). La contaminación proviene del uso excesivo de agroquímicos, descargas de aguas residuales sin tratar (Véase Figura 3), intrusión marina y presencia de contaminantes como nitratos y esteroides fecales (González-Acevedo et al., 2019).

El clima mediterráneo semiárido agrava la situación, con precipitaciones anuales de aproxima-

damente 200 mm concentradas en invierno (CONAGUA, 2024, p. 9). Las lluvias son insuficientes para recargar el acuífero de Maneadero y el uso principal del agua subterránea es agrícola, por lo que la sostenibilidad de la agricultura está en riesgo por la escasez hídrica.

El Plan Estatal Hídrico 2022-2027 (POEBC, 2023), propone el reúso de aguas residuales tratadas como estrategia para la sostenibilidad hídrica, incluyendo su uso en riego e infiltración de acuíferos. Aunque el gobierno estatal planificó la restauración de plantas de tratamiento (El Gallo, Maneadero, Noroeste y El Naranjo) y proyectos de recarga con agua residual tratada (Elizondo y Mendoza-Espinosa, 2020), la realidad muestra un deterioro de la situación. Los medios locales han documentado una crisis de salud pública, con incremento de enfermedades gastrointestinales, respiratorias y cutáneas, particularmente en poblaciones vulnerables, debido a descargas de aguas residuales sin tratar en los arroyos Las Ánimas y San Carlos.

Las instituciones como CONAGUA, SEMARNAT, Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ense-

nada (CESPE), y especialmente el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) de Maneadero, trabajan para gestionar la crisis, pero los desafíos persisten. La participación pública en la gestión del agua está limitada por los desequilibrios de poder y la falta de mecanismos efectivos (Villada-Canela, et al., 2021), por lo que grupos de ciudadanos como “Todos somos Maneadero” han alzado la voz para advertir sobre la problemática del valle. Sin intervenciones urgentes y estratégicas, el valle de Maneadero se enfrenta a una crisis de disponibilidad y calidad del agua que podría comprometer su desarrollo agrícola, económico y social.

Propuesta de Solución: Fondo de Agua

Los Fondos de Agua (FA) son mecanismos financieros y de gobernanza que protegen cuencas hidrográficas mediante la colaboración entre sector privado, autoridades, academia y sociedad civil. Desde el establecimiento del primer fondo (FONAG) en Quito en 2000, aproximadamente 40 iniciativas en Latinoamérica han demostrado su efectividad en la gestión hídrica sostenible (Duarte-Abadía, 2023; Kauffman, 2014).

En el contexto del valle de Maneadero, la gestión hídrica requiere una toma de decisiones descentralizada e integradora, por lo que esta investigación identificó nueve soluciones principales: mejora de la infraestructura existente, implementación de tecnología para tratamiento de aguas residuales, creación del reglamento del acuífero, monitoreo de calidad del agua, protección de zonas de captación, fomento de colaboración intersectorial, desarrollo de investigaciones integrales, ajuste en tarifas de agua e incremento de apoyos gubernamentales.

El FA propuesto actuaría como mecanismo para fortalecer estas estrategias mediante el financiamiento para infraestructura de aguas residuales tratadas en agricultura, apoyo a Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN), conservación de zonas de captación y promoción de colaboración multisectorial. Las líneas de acción específicas incluyen la protección de áreas de recarga del acuífero, implementación de prácticas de restauración ecológica, mejora de la calidad del agua y educación ambiental. Para su funcionamiento, se propone un modelo mixto de financiamiento que incluye aportaciones

de usuarios del agua, gobierno, sector privado y fondos internacionales.

El análisis FODA de la propuesta revela importantes fortalezas como la conciencia colectiva sobre la crisis hídrica, la implementación de prácticas sostenibles como sistemas de riego e hidroponía en algunos agricultores y la buena relación entre usuarios del agua (principalmente agricultores), además de oportunidades en términos de apoyo internacional y respaldo empresarial. Sin embargo, también se identifican debilidades como la posible escasez de recursos y la desconfianza en el manejo de fondos, así como amenazas relacionadas con cambios en el marco político y la competencia por recursos hídricos entre sectores.

Los beneficios esperados de la implementación del FA son diversos e incluyen la recuperación del acuífero, mayor seguridad hídrica, sostenibilidad agrícola, mejora en la calidad del agua, fortalecimiento de la cohesión social y desarrollo de capacidades locales. La implementación exitosa dependerá fundamentalmente de la participación efectiva de las comunidades locales y la construc-

ción de confianza institucional. Un factor positivo para el desarrollo del proyecto es la experiencia previa de algunas personas entrevistadas con FA en otras regiones, así como el interés existente entre los usuarios del agua, lo que proporciona una base sólida para su implementación y desarrollo futuro.

Conclusiones

El Valle de Maneadero exhibe una crisis hídrica que amenaza la seguridad alimentaria local y la sostenibilidad de sus prácticas agrícolas, donde la calidad del agua emerge como preocupación principal. La intrusión marina, las descargas de aguas residuales sin tratar y la contaminación por agroquímicos han deteriorado el recurso, obligando a los agricultores a implementar costosos sistemas de desalación o a abandonar sus actividades.

En contraste, los agricultores también han adoptado prácticas más sostenibles, sin embargo, la falta de infraestructura adecuada para el tratamiento de aguas residuales y la ausencia de políticas e instituciones efectivas para la gestión del agua limitan el potencial de estas iniciativas.

Las soluciones propuestas abarcan desde la implementación de tecnologías avanzadas para el tratamiento de aguas hasta la adopción de SBN. En este estudio se contempla la creación de un Fondo de Agua (FA) como mecanismo para financiar infraestructura sostenible y promover prácticas agrícolas que optimicen el uso del recurso hídrico, alineándose con los ODS de la Agenda 2030.

La situación de Maneadero refleja el desafío global de aumentar la producción agrícola mientras se preservan los recursos hídricos, requiriendo un enfoque integral que combine innovación tecnológica, gestión sostenible y participación comunitaria para garantizar la seguridad alimentaria futura. ♦

Bibliografía

- CONAGUA (2024). Actualización de la Disponibilidad Media Anual de agua en el acuífero Maneadero (0212), Estado de Baja California, México. Disponible en: https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/BajaCalifornia/DR_0212.pdf
- Duarte-Abadía, B., Galarza Suarez, L., e Hidalgo-Bastidas, J. P. (2023). Urban-rural water security in water funds? An analysis from power relations, participation and co-creation of knowledge. *Journal of Political Ecology*, 30 (1), 391-400. Disponible en: <https://doi.org/10.2458/jpe.5295>
- Elizondo, L. S., y Mendoza-Espinosa, L. G. (2020). An analysis of water scarcity in a drought prone city: The case of Ensenada, Baja California, Mexico. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 11(2), 1-55. Disponible en: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-02-01>
- González-Acevedo, Z. I., García-Zarate, M. A., y Flores-Lugo, I. P. (2019). Emerging contaminants and nutrients in a saline aquifer of a complex environment. *Environmental Pollution*, 244, 885-897. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.104>
- Kauffman, C. M. (2014). Financing watershed conservation: Lessons from Ecuador's evolving water trust funds. *Agricultural Water Management*, 145, 39-49. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.09.013>
- Mendoza-Espinosa, L. G. y Daesslé, L. W. (2018). Consolidating the use of reclaimed water for irrigation and infiltration in a semi-arid agricultural valley in Mexico: water management experiences and results. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 8 (4): 679–687. Disponible en: <https://doi.org/10.2166/washdev.2018.021>
- Periódico Oficial del Estado de Baja California (POEBC) (2023). Programa Estatal Hídrico (PEH) 2022-2027 del estado de Baja California (24 de noviembre de 2023), México. Disponible en: <https://www.bajacalifornia.gob.mx/Documentos/coplade/planeacion/programas-estatales/Programa%20Estatal%20Hidrico.pdf>
- Villada-Canela, M., Muñoz-Pizza, D. M., García-Searcy, V., Camacho-López, R., Daesslé, L. W., y Mendoza-Espinosa, L. (2021). Public participation for integrated groundwater management: The case of Maneadero valley, Baja California, Mexico. *Water (Switzerland)*, 13(17). Disponible en: <https://doi.org/10.3390/W13172326>

EXPERIENCIAS DE PUEBLA SOBRE USO DEL AGUA

ALBERTO JIMÉNEZ MERINO

CENTRO DE INNOVACIONES AGROALIMENTARIAS Y TECNOLÓGICAS, PUEBLA



Resumen

Se mencionan los principales problemas del agua en México y se describen 10 experiencias de solución aplicadas en el estado de Puebla. Destacan la **Reforestación, Siembra de Praderas y Agricultura de Conservación** como vías de recarga natural de acuíferos. Se incluyen **Captación de Lluvia en Techados, Manejo de Cuencas y Construcción de Represa y Jagüeyes** como las vías más rápidas de disponer de agua y/o recargar acuíferos. Se describe la **Tecnificación del Riego** y el **Entubamiento de Presas** para mejorar la productividad agrícola y ahorrar agua para otros usos. Se menciona la adop-

ción de **Paneles Solares para el Bombeo de Agua Potable y Riego** a fin de reducir costos. Se destaca el enfoque de **Tratamiento y Reúso de Aguas Residuales para riego** y la adopción de **Humedales** como método biológico. Finalmente, se resalta la importancia del **Rescate de la Pesca Ribereña** y la necesidad de desarrollar una inexistente **Cultura del Agua**. Se concluye que el problema del agua no puede resolverse sin la participación de los usuarios, el sector educativo y de investigación y, los tres órdenes de gobierno.

Introducción

Este 2024, por primera vez en la historia, el Río Mixteco se secó en el tramo correspondiente a Puebla. Y aunque ya se recuperó, es una gran llamada de atención a la forma como manejamos las cuencas, con actividades productivas altamente extractivas de los recursos naturales, donde sobreviven familias en pobreza.

El agua es la base de la vida y de todas las actividades del ser humano. Es el factor fundamental del desarrollo económico y social de las comunidades. Su abastecimiento ya es una de las más grandes preocupaciones de los ciudadanos y gobiernos, especialmente en aquellos lugares donde el crecimiento poblacional, la deforestación, la erosión y la contaminación han aumentado (**Jiménez, 2004 pag. 13**).

Informes Nacionales presentados por la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación UNCCD (citado por **SIAP/SADER, 2022**), se estima que el número y la duración de las sequías se han incrementado un 29% desde el año 2000, en comparación con las dos décadas anteriores. De seguir esta tendencia, uno de cada cuatro

niños del mundo en 2040 vivirá en áreas con escasez extrema de agua.

El agotamiento de pozos y manantiales, la baja captación de las presas, las dificultades para atender a la población, las sequías recurrentes, el incremento de los desastres naturales ligados al agua, la baja tecnificación de los sectores productivos, el reducido tratamiento de aguas residuales, la contaminación de ríos con aguas negras y residuos sólidos, la reducción de la pesca ribereña junto a la ausencia de una **cultura de manejo, cuidado y aprovechamiento racional del agua**, son parte importante de una problemática creciente y una gran crisis hídrica en México.

Por lo anterior, a continuación se comparten algunas **experiencias desarrolladas en el Estado de Puebla** que pueden ayudar en la construcción de modelos de solución y abonar a la identificación de propuestas de políticas públicas hídricas nacionales.

Desarrollo

La **Captación de Lluvia en Techados** de casas y edificios públicos, es algo que se ha venido haciendo

desde que los franciscanos lo aplicaron en el siglo XVI. La comunidad **Achichinalco, Ajalpan**, es un ejemplo donde 98 familias, el 100% de la población, acarreaban el agua de un manantial a 6 km de distancia y hoy se abastecen con la lluvia. Fueron apoyadas por la Comisión Nacional del Agua CONAGUA con un sistema de captación, potabilización, almacenamiento y tratamiento de las aguas residuales. La **Reforestación tradicional o por Semilla**, es la vía más efectiva para la **Recarga Natural de Acuíferos** porque los árboles aminoran el impacto de la lluvia y aumentan las posibilidades de infiltración al subsuelo. La sola exclusión del pastoreo ha dado buenos resultados. Los ejidatarios de **San Pedro Yeloixtlahuaca** en la Mixteca Poblana y **Tlahuapan** en la Sierra Nevada, han demostrado que, el cuidado de predios permite la reforestación natural.

El **Establecimiento de Praderas** en la Mixteca Poblana, mejoró la alimentación del ganado. La siembra del pasto llanero en más de 50 municipios como **Chiautla de Tapia, Axutla, Chila de la Sal o Jolalpan** representó una notable disminución de la erosión del suelo, se incrementaron los

volúmenes de forraje, el número de partos de las vacas, aumentó la producción de leche, se alargó la época de ordeña, se multiplicó la fauna silvestre y **se recargaron los acuíferos regionales**.

El **Manejo de Cuencas** es la aplicación de diferentes tratamientos a una área para retener el agua y el suelo, aumentando el volumen de agua de los manantiales y pozos que abastecen a las comunidades.

Ayoxuxtla de Zapata, Huehuetlán Chico, es una comunidad de 800 habitantes que había realizado en 20 años, 5 intentos fallidos de perforación de pozo. En 2014 con el apoyo de SEMARNAT y CONAGUA se aplicó el tratamiento de barreras de piedra acomodada transversales cada 50 m a 600 has de la parte alta del pueblo. Esto permitió captar 1.5 litros por segundo en sus tres manantiales, asegurando la demanda total del pueblo.

La construcción de **Represas y Jagüeyes** ha sido una práctica para retener agua para consumo directo o actividades productivas. Se han construido más de 3000 obras de captación en el Estado. Al retener el agua en la parte alta de las cuencas, se atienden necesidades básicas, productivas, la fauna

y se apoya la Recarga Artificial de manantiales y pozos. El pozo comunitario de **El Mirador Grande, Zacapala** se secaba cada año. Con la construcción de un jagüey a 200 m arriba, se llenó en las primeras lluvias y desbordó excedentes.

La **Agricultura de Conservación** es reducir el movimiento de tierras y la incorporación de prácticas agroecológicas para aumentar la retención de la lluvia, detener la pérdida de suelo, recuperar la materia orgánica, la microbiología y elevar la productividad de los cultivos. Productores de sorgo de **Tepexco** han demostrado su efectividad al duplicar el rendimiento, pasando de 4 ton/ha a 9.5, entre el año 2000 y 2010. Esta es la mejor estrategia para las 18 millones de has de agricultura de temporal en México.

Tecnificación del Riego Agrícola. El 76% del agua extraída del subsuelo se utiliza para riego de cultivos con métodos tradicionales con altos niveles de desperdicio. Tecnificando el riego tendríamos la posibilidad de ahorrar al menos la mitad de agua utilizada actualmente. Por ello, esta es una de las más urgentes necesidades en el campo, para mejo-

rar la productividad, evitar pérdidas de agua y con el ahorro logrado se pueden resolver rápidamente los requerimientos de agua para uso público en los centros de población. **Palmar de Bravo, Los Reyes de Juárez, Coyotepec, Ixcaquixtla e Izúcar de Matamoros**, son ejemplos de municipios donde se han aplicado proyectos de tecnificación de riego.

El **Entubamiento de Presas**, es poner un sifón en la cortina de la presa o conectar un tubo directo a la obra de toma para llevar el agua entubada a las parcelas, reducir las pérdidas, ganar presión y tecnificar el riego. En 2017 se instaló en la presa **Boqueroncitos Tehuizingo** una red de 7.5 km de tubería para incorporar 150 has al riego por goteo.

El Tratamiento y Reúso de Aguas Residuales es el enfoque más efectivo para incentivar la atención de este problema. Se rehabilitó la planta de tratamiento de **San Martín Texmelucan** y se realizó un convenio con los ejidatarios de **Nativitas, Tlaxcala** para utilizar las aguas tratadas en el riego agrícola. El **Tratamiento Biológico** es otra posibilidad, aunque demanda una mayor superficie de terreno para su adopción. **La Concepción Cautla, Tecali**

de Herrera, construyó un Humedal, un estanque donde se pone una capa de grava, arena y tierra y se planta Tule y Carrizo para tratar sus aguas residuales, cuyo volumen ronda 0.5 litros por segundo.

El alto costo de la energía eléctrica para el bombeo de agua está ahorcando las finanzas municipales y a las sociedades de riego. El **Bombeo de Agua Potable con paneles solares** ya lo realizan comunidades de los municipios de **Tepanco de López, Tepexi de Rodríguez, Tecamatlán, Juan N Méndez y Huehuetlán Grande**. Y el **bombeo solar de agua para riego agrícola** se ha adoptado en **Tehuacán, Chiautla y Tlacotepec de Benito Juárez**. En algunos casos ya no pagan electricidad convencional.

La **Pesca Ribereña** es una actividad inherente a las comunidades que se asentaron en márgenes de mares, ríos, lagos, presas y lagunas. Debido a la falta de capacitación y asesoría, a la contaminación y la sobrepesca con artes inadecuadas se ha perdido el 90% de la pesca obtenida anteriormente, afectando la **Seguridad Alimentaria** y la economía de las comunidades. Se estableció un plan de Rescate de la Pesca con acciones de organización y

capacitación de pescadores, limpieza de cuerpos de agua, definiendo tamaño mínimo de organismos a atrapar y artes de pesca sustentables, respetando épocas de reproducción entre otras prácticas establecidas, a fin de recuperar **Acamaya, Ajolote, Bagre, Acocil, Mojarra** y más de 7 especies en los **Ríos San Marcos, Metzionate, Mixteco y Laguna de Ajolotla, Chignahuapan**.

Finalmente, para atender la necesidad de fortalecer una cultura del agua se integró un **Manual Básico sobre Cultura de Manejo y Aprovechamiento del Agua** en el que se incluyen 100 fichas de temas elementales del agua, con el propósito de orientar a estudiantes y público en general sobre su importancia y cuidado.

Conclusiones

La problemática del agua es muy grande y compleja, su solución requiere de la participación de los usuarios, del sector educativo y de investigación para la solución de muchos problemas actuales y para formar líderes en el corto plazo.

El agua es uno de los grandes problemas nacionales y por ello requiere ser tratado como uno de los de más alta prioridad.

El agua en México requiere de una sólida política pública, estrategias regionales y sectoriales, mayor voluntad política de los tres órdenes de gobierno y presupuesto crecientes en un horizonte no menor a 20 años. 💧

Bibliografía Consultada

Jiménez Merino, A. 2004 **Agua para el Desarrollo**. Cámara de Diputados H. Congreso de la Unión. México. 362 pag

SIAP/SADER 2022. **Algunos datos que debemos conocer sobre desertificación y sequía**. Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. 5 pag.

OZONO EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS: UNA ALTERNATIVA PARA EL REÚSO DE AGUA MÁS SEGURA EN LA AGRICULTURA

LAURA SOL PÉREZ FLORES
EDUARDO TORRES

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA



ARTÍCULO

Resumen

El uso de aguas tratadas para riego es una solución frente a la escasez hídrica, pero conlleva riesgos sanitarios y químicos debido a contaminantes persistentes. La ozonización emerge como una alternativa eficaz para eliminar microorganismos y compuestos tóxicos de distintos tipos de efluentes, gracias a su capacidad oxidante. Este tratamiento, aunque eficiente, requiere investigación acerca de la complementación con otros procesos para cumplir estándares de calidad en agua de riego. Además de reducir la toxicidad en suelos y cultivos, mejora la disponibilidad de nutrientes y prolonga la vida de anaquel de productos agrícolas. Sin embargo, su

implementación enfrenta desafíos como el alto consumo energético, mitigable mediante energía renovable. La ozonización se posiciona como una tecnología prometedora para la agricultura sostenible, aunque se requieren más investigaciones para optimizar su aplicación en diferentes tipos de efluentes.

Introducción

La escasez de agua y el cambio climático han provocado un aumento en el uso de aguas tratadas para el riego agrícola. Lo anterior permite acceder al agua en regiones con recursos hídricos limitados, proteger fuentes naturales y aprovechar los nutrientes

presentes en los efluentes tratados. Por ejemplo, estas aguas contienen compuestos como nitrógeno, fósforo y potasio, que benefician los cultivos al reducir la necesidad de fertilizantes químicos, lo cual disminuye los costos y los impactos negativos sobre el suelo (Mendoza-Retana, et al., 2021).

Sin embargo, existen preocupaciones respecto a los riesgos biológicos y químicos asociados a su uso; puesto que los efluentes pueden contener contaminantes como *E. Coli*, *Shigella*, *Salmonella Enteritidis* y *Vibrio spp.* (Nagial K.S., et al., 2024) y contribuir a brotes de enfermedades transmitidas por el agua hacia los cultivos.

En cuanto a los riesgos químicos, Khan U.A., et al., (2024) destacan que los tratamientos convencionales no eliminan contaminantes emergentes como los fármacos. En su análisis pronosticaron concentraciones de carbamazepina, gemifibrozil, triclosán, fluoxetina y naproxeno, de 1160, 111, 344, 0.04 y 181 ng/kg, respectivamente. Además, estos fármacos se encontraron en suelos irrigados, con concentraciones de 59, 11, 14, 0.15 y 51 ng/kg de cada uno de los contaminantes antes mencionados. Estas prediccio-

nes las compararon con algunos estudios destacando la presencia de carbamazepina en tallos de pepinos y de frutas, confirmando la transferencia de estos contaminantes hacia los cultivos y los ecosistemas.

Otros peligros incluyen residuos de metales pesados (cadmio, cobre) y micro contaminantes orgánicos como plaguicidas y productos de higiene personal.

Estos contaminantes, además de afectar la calidad de los cultivos, pueden contaminar aguas superficiales y subterráneas, incrementando el deterioro ambiental. Por tanto, es necesario implementar tratamientos avanzados para remover contaminantes y microorganismos antes del uso agrícola.

Por tal motivo, es importante que las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) cuenten con un tratamiento terciario eficiente para remover micro contaminantes y microorganismos antes de la descarga o reúso de cultivos. Una tecnología prometedora es la ozonización, conocida por su eficacia como agente oxidante y desinfectante. Este proceso, ya utilizado en desinfección industrial y doméstica, ha demostrado ser viable para tratar aguas residuales y prolongar la vida útil de los cultivos.

¿Qué es el ozono y cómo se usa en el tratamiento de aguas?

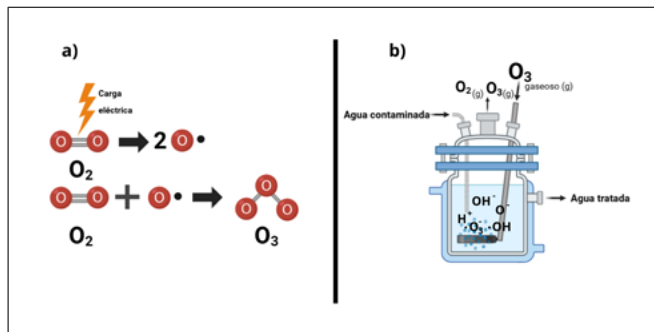
El ozono es una molécula compuesta por tres átomos de oxígeno que se forma al aplicar una descarga eléctrica que rompe los enlaces de los átomos de oxígeno. Su potente capacidad oxidante (potencial redox de 2.07 V) varía según el pH del agua: en condiciones de pH menor a 8 forma iones ozonuro (O_3^-), y a pH mayor de 8 genera radicales hidroxilos (HO^\bullet), ambos con alta reactividad. (Véase Figura 1)

El proceso de ozonización implica generar *in situ* el ozono e inyectarlo en agua contaminada durante un tiempo de contacto controlado para garantizar la eliminación de contaminantes. Algunos parámetros críticos incluyen el flujo y la concentración de ozono gaseoso y disuelto, así como el decaimiento de los contaminantes, cuantificados como demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO) o carbono orgánico total (COT).

La degradación de materia orgánica ocurre de manera directa por el ion ozonuro (O_3^-) o indirecta, mediante radicales hidroxilos (HO^\bullet). Además, de

Figura 1. Formación del ozono gaseoso (a) y formación de especies dependiendo el valor de pH (b).

En la ozonización se inyecta ozono gaseoso y en medio ácido se llevan a cabo una serie de reacciones químicas para formar el ion ozonuro (O_3^-). En cambio, en medios básicos o alcalinos, el ozono gaseoso que se inyecta se disuelve en el agua y reacciona con la especie oxidante de oxígeno (O^\bullet) para formar tanto los iones como los radicales hidroxilos (HO^\bullet).



forma indirecta, se forman los iones de hidropéroxido (HO_2^-) y el oxígeno atómico (O^\bullet), los cuales también son especies con poder oxidativo que ayudan en la eliminación de compuestos orgánicos y microorganismos. Respecto a los últimos, el ozono

oxida los componentes de la pared celular, destruyéndola y liberando las macromoléculas internas, y con ello, el material genético. (Véase Figura 2)

Efectos del ozono en la reducción de toxinas en el agua de riego

Diversos estudios han demostrado la eficacia del ozono para eliminar microorganismos y contaminantes en aguas residuales. Hashemi H., et al. (2023) lograron disminuir al 100% coliformes totales y digestivos con una dosis de ozono óptima de 25mg/L y un tiempo de contacto de 60 minutos, cumpliendo estándares establecidos por la organización de protección ambiental.

Voltolini L.C., et al. (2022) encontraron que la ozonización de efluentes domésticos, con una dosis de ozono de 60mg/L, redujo *E. coli* en un 21.25 % y coliformes totales en un 31.43 %. Sin embargo, los niveles no cumplieron con las normas debido a una turbidez mínima de 120 NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez) y a concentraciones de carbono orgánico total y demanda biológica de oxígeno de 82.13 y 197.7 mg/L, respectivamente. Esto subraya

Figura 2. Ventajas y desventajas de la ozonización
(Fuente: Metcalf & Eddy -2003-)

VENTAJAS		
Reduce trazas de compuestos	No genera lodos derivados del tratamiento	El ozono no genera residuos dañinos pues regresa a oxígeno, el cual es una molécula más estable.
Aumenta la biodegradabilidad de aguas tratadas	No requiere de aditivos químicos porque el agente oxidante se genera in situ	Genera especies con mayor poder oxidativo que los producidos en el proceso de cloración
DESVENTAJAS		
No logra una completa mineralización de compuestos	Puede generar productos más tóxicos que el compuesto original.	Requiere un consumo alto de energía para la generación de ozono gaseoso.

la necesidad de combinar ozono con otros procesos, como filtración o luz ultravioleta.

Nahim-Granados S., et al. (2021). compararon la ozonización con métodos fotocatalíticos para eliminar patógenos de *E. coli* y *Salmonella enteritidis*; así como de microcontaminantes como atrazina y procymidona. La ozonización fue la más efectiva, logrando una reducción del 90 % de los fármacos. Además, Lemic D. et al. (2024) demostraron que el riego con agua ozonizada prolonga la vida de anaquel de frutas como mandarinas, al reducir infecciones por *Penicillium italicum* entre el 95% y el 97%.

En otro estudio, Beltrán-Flores E. et al. (2024) combinaron ozonización con biorremedia-

ción para degradar pesticidas como thiacloprid, chlortoluron, y pyrimethanil; presentes en canales de riego. Ellos lograron una eliminación del 100 % de contaminantes persistentes, frente al 50 % obtenido con procesos biológicos.

En la tabla I se ejemplifican otros compuestos oxidados por la ozonización.

Tabla I. Algunos compuestos oxidados por ozonización o procesos acoplados con éste.

Tipo de agua contaminada	Compuesto	% de eliminación	Tratamiento	Fuente
Efluente de PTAR	Alcalinidad total	25.46	Ozono	Kulwant Singh Nagial, et al. (2024)
	<i>E. Coli</i>	100		
	Coliformes totales	100		
Efluente de PTAR municipal	Diclofenaco	2.3	Ozono + micronanoburbujas (MNBs)	Benelhadj, L.; et al. (2024)
	Naproxeno	8.39		
	Carbamazepina	46.15		
Agua residual municipal	DQO	95.22	Ozono	Jbilou, M.; et al. (2022)
	DBO	96.12		
	Nitratos	4.35		
	Fosfatos	40		
	Coliformes totales	100		
	Coliformes fecales	100		
Agua de canal de riego	DQO	85	Ozonización catalítica + filtración	Rizvi O.S., et al. (2024)
	DBO	9		
	Coliformes fecales	100		

Beneficios para el suelo, los cultivos y el medio ambiente

El uso de agua ozonizada no solo mejora la calidad del agua, sino también la del suelo y los cultivos. Díaz-López M. et al. (2022) analizaron su impacto en suelos mediterráneos, encontrando mejoras en la actividad enzimática de la fosfomonoesterasa alcalina, la biomasa microbiana y la disponibilidad de nutrientes. Aunque el riego continuo con agua ozonizada acidifica el suelo, no afecta negativamente el rendimiento de los cultivos, que en este caso fueron plantas de tomate.

Por su parte, Amori P.N., Mierzwa J.C., et al. (2022), combinaron un reactor aerobio biológico de 3.5L seguido de la ozonización para tratar efluentes domésticos, logrando una reducción del 96 % en carga orgánica y un aumento del 50 % en el crecimiento de plantas. Esto demuestra que la ozonización, sobre todo cuando se integra con otros procesos, puede convertir aguas residuales en recursos valiosos para la agricultura.

Además, investigaciones recientes buscan optimizar el costo energético del ozono mediante ener-

gías renovables. Jbilou M. et al. (2022) utilizaron energía fotovoltaica para producir ozono y tratar efluentes, logrando una reducción significativa en parámetros fisicoquímicos como turbidez, DQO y patógenos, haciendo el proceso más sostenible.

Conclusiones

La ozonización se destaca como una alternativa eficaz y sostenible frente a otros tratamientos de aguas residuales. Su capacidad para eliminar microorganismos, contaminantes emergentes y compuestos persistentes beneficia la seguridad alimentaria, la calidad del suelo y el rendimiento de los cultivos. Además, su aplicación prolonga la vida de anaquel, mejorando la sostenibilidad del sector agrícola.

No obstante, se requieren más estudios para optimizar su implementación en distintos tipos de efluentes y combinarla con otros tratamientos que garanticen el cumplimiento de estándares de protección ambiental. A medida que se reduzcan los costos energéticos, la ozonización tiene el potencial de convertirse en un método competitivo y clave

para enfrentar los retos del uso sostenible del agua en la agricultura. 💧

Bibliografía

Amori P.N., Mierzwa J.C., Bartelt-Hunt S., Guo B., Saroj D.P. (2022). Germination and growth of horticultural crops irrigated with reclaimed water after biological treatment and ozonation. *Journal of Cleaner Production*, 336.

Beltrán-Flores E., Blánquez P., Gorito A.M., Sarrà M., Silva A.M.T. (2024). Combining fungal bioremediation and ozonation for rinse wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 912.

Benelhadj L., Nortes-Tortosa P.A., Alarcón J.J., Ponce-Robles L. (2024). Impact of the use of different types of quaternary treated wastewater effluents in carrot crops growing: Uptake and accumulation of contaminants of emerging concern in soil-plant system and human health implications. *Chemosphere*, 368.

Díaz-López M., Galera L., Bastida F., Nicolás E. (2024). Tomato growth and physiology as well as soil physicochemical and biological properties affected by ozonated water in a saline agroecosystem. *Science of the Total Environment*, 906.

- Hashemi H., Rajabi S., Nikooee S., Asrari E. (2023). Ozonation of secondary industrial effluent for beneficial reuse. *Desalination and Water Treatment*, 287, pp. 96 – 102.
- Jbilou M., Nemmich S., Nassour K., Brahami M.N., Bouhmama M., Bahami M., Tilmatine A. (2022). Ozonation of wastewater for irrigation in a plant powered by photovoltaic energy. *International Journal of Plasma Environmental Science and Technology*, 16 (1).
- Khan U.A., Löffler P., Spilsbury F., Wiberg K., Stålsby Lundborg C., Lai F.Y. (2024). Towards sustainable water reuse: A critical review and meta-analysis of emerging chemical contaminants with risk-based evaluation, health hazard prediction and prioritization for assessment of effluent water quality. *Journal of Hazardous Materials*, 480.
- Lemic D., Galešić M.A., Bjeliš M., Viric Gasparic H. (2024). Ozone Treatment as a Sustainable Alternative for Suppressing Blue Mold in Mandarins and Extending Shelf Life. *Agriculture (Switzerland)*, 14 (7).
- Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and reuse*. Boston: McGraw-Hill.
- Nagial K.S., Kumar N., Poddar A. (2024). A comprehensive analysis of institutional wastewater for irrigating ornamental plants. *Water Supply*, 24 (8), pp. 2830 – 2843.
- Nahim-Granados S., Martínez-Piernas A.B., Rivas-Ibáñez G., Plaza-Bolaños P., Oller I., Malato S., Pérez J.A.S., Agüera A., Polo-López M.I. (2021). Solar processes and ozonation for fresh-cut wastewater reclamation and reuse: Assessment of chemical, microbiological and chlorosis risks of raw-eaten crops. *Water Research*, 203.
- Rizvi O.S., Ashfaq F., Ikhlaq A., Akram A., Masood Z., Ashar U.U., Naeem A., Qi F. (2024). Novel hybrid treatment for canal water recycling by integrating coagulation, catalytic ozonation, and filtration for agricultural sustainability. *Journal of Water Process Engineering*, 67.
- Voltolini L.C., Bastos R.G., Souza C.F. (2022). A simple system for ozone application in domestic sewage for agricultural reuse [Sistema simples de aplicação de ozônio em esgoto doméstico visando reúso agrícola]. *Revista Ambiente e Agua*, 17 (6).

REDUCCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN AGRÍCOLA: UN CAMINO HACIA LA SEGURIDAD ALIMENTARIA SOSTENIBLE CON PERSPECTIVA DE GÉNERO

BIANCA BERENICE RODRÍGUEZ PÉREZ,
VERÓNICA GUTIÉRREZ VILLALPANDO,
ERNESTO BENITO SALVATIERRA IZABA
EL COLEGIO DE LA FRONTERA SUR, ECOSUR



Resumen

La agricultura es fundamental para la seguridad alimentaria a nivel mundial, sin embargo, constituye una de las principales fuentes de contaminación en los ecosistemas acuíferos ya que consume el 77% de los recursos hídricos globales. El crecimiento de la población conlleva a una alta demanda de alimentos, lo cual compromete los recursos de agua dulce afectando la disponibilidad de este recurso vital. El Objetivo 2 de la Agenda 2030, “Hambre Cero”, promueve prácticas agrícolas sostenibles que minimiza el impacto ambiental, incluyendo el uso eficiente del agua. Además, se debe asegurar la participación

activa de las mujeres en la gestión del agua para lograr un sistema alimentario justo y sostenible.

Introducción

La agricultura es primordial para que el mundo entero se pueda proveer de alimentos, sin embargo, es también una de las principales fuentes de contaminación ambiental. Gran parte de los recursos hídricos es implementado en la agricultura, el “77% está concesionada a la agricultura” (García, 2018, p. 2) y el otro 23% restante es para el abastecimiento de uso doméstico, negocios, generar energía y la industria.

Los Objetivos Globales por las Naciones Unidas busca garantizar que todas las personas para el 2030 sean prosperas equilibrando la sostenibilidad social, económica y ambiental (PNUD, 2015, p. 2) para radicar el hambre y la discriminación contra mujeres y niñas. Bajo este marco presentado por la ONU la reducción de la contaminación agrícola se ha convertido en un desafío clave para alcanzar la seguridad alimentaria y mejorar el bienestar social y ambiental.

El siguiente artículo se basará en el Objetivo 2 de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible denominado “Hambre Cero” lograr la seguridad alimentaria y nutrición mejorada implementando prácticas agrícolas sostenibles que minimicen los impactos negativos en los ecosistemas acuíferos y la salud humana, contemplando los principios de igualdad de género.

Relación entre el agua y la agricultura

La humanidad esta próxima a un escenario desafiante, a medida que la población mundial crece, la demanda alimentaria es proporcional a ello. Según

la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) deberá “adoptar métodos de producción más eficaces y sostenibles y adaptarse al cambio climático” (FAO, 2009, p. 1) para incrementar en un 60% la producción de alimentos para el 2050 con el objetivo de satisfacer las necesidades alimentarias globales. Esta demanda implica uso de tierras y hacer uso de los recursos hídricos, la disponibilidad de los recursos de agua dulce esta distribuida de forma desigual, es decir, “cada vez hay más países o regiones dentro estos cuya escasez de agua alcanza niveles alarmantes” (FAO, 2009, p. 3).

Dado que “el sector agrícola se posiciona como el mayor consumidor de agua del planeta dada su función productiva” (ONU, 2014, p. 1). La agricultura es la responsable de realizar un mayor consumo de agua dulce utilizando el 77% (García, 2018) del agua dulce a nivel mundial, sin embargo, es indispensable que se continúe con las prácticas agrícolas para asegurar la disponibilidad de los alimentos por ello es necesario asegurar practicas sostenibles para garantizar la producción de alimentos en el futuro.

Un reto en el aumento de alimentos y su huella en los recursos hídricos

La práctica más antigua realizada por el ser humano y que dio paso para volverse sedentario fue la agricultura, ya que esta le proporciona estabilidad alimentaria. Hoy en día la agricultura y crianza de ganado son actividades que siguen proporcionando estabilidad alimentaria para el mundo entero pero que a su vez su demanda por el acceso al agua es constante y cuantiosa; cabe mencionar que la agricultura no se limita únicamente a la producción de alimentos sino también en otros cultivos que son necesarios para la actividad humana tal es el caso de “cultivos no comestibles como el algodón, el caucho o los aceites industriales cuya producción no deja de crecer” (ONU, 2014, p. 1).

La escasez del recurso hídrico ha comenzado a afectar a zonas agrícolas “en varios países del Cercano Oriente, África del Norte y el Asia meridional” (FAO, 2009, p. 2) donde la disponibilidad de agua para el riego seguirá siendo elevada y podría ir en aumento. La producción agrícola, no depende únicamente del uso de agua de lluvia, también se hace

uso de lluvia, aguas subterráneas, ríos, captación de lluvia, pozos, mantos que cada vez se ven más sobreexplotados. Continuar con estas prácticas podría generar conflictos y empeorar la crisis a nivel mundial por la disponibilidad de agua.

Vínculo crucial entre agua y agricultura sostenible

Es de gran importancia encontrar un equilibrio entre la producción agrícola y la conservación del agua. Dentro del Objetivo 2 de la Agenda 2030 para el desarrollo Sostenible “Hambre Cero” declara que para llegar a alcanzar la seguridad alimentaria se debe implementar prácticas agrícolas sostenibles donde el impacto negativo al ecosistema acuífero y salud humana se minimice.

Estas prácticas sostenibles contribuyen a mejorar la eficacia en el uso del agua asegurando la disponibilidad del recurso hídrico para las generaciones futuras “la agricultura sostenible se convierte en una aliada clave para preservar este recurso vital” (Fan del Agua, 2024, p. 2).

El uso responsable y eficiente de los recursos naturales como el agua promueve a que se minimice el impacto ambiental favoreciendo la salud de los ecosistemas.

Una de los sistemas implementados por mucho tiempo atrás ha sido el riego tradicional que consiste en inundación o surcos en el cual se “puede desperdiciar hasta el 50% del agua utilizada debido a la evaporación, filtraciones y escorrentías” (Fan del Agua, 2024, p. 2) este tipo de practica contribuye al agotamiento de fuentes hídricas.

Es importante ir adoptando iniciativas tecnológicas modernas para la agricultura, como el riego por goteo, que minimiza el desperdicio; riego automatizado, optimiza su uso ya que es aplicado únicamente cuando es necesario, de esta forma se reducen el consumo del agua y aumenta la eficiencia de los cultivos.

Así pues, proteger los recursos hídricos ayuda a mejorar la salud del suelo y por consiguiente maximizando el potencial en los sistemas agrícolas para que sean más resilientes.

La igualdad de género en la gestión del agua y la agricultura sostenible

El enfoque de igualdad de género es un papel fundamental dentro de la gestión del agua en la agricultura. La Conferencia Internacional de Agua y Medio Ambiente de Dublín en enero de 1992, reconoció “explícitamente la labor fundamental de la mujer en la provisión, gestión y protección del agua” (ONU, 2014, p. 1). Las mujeres, con frecuencia son las encargadas de los huertos del hogar y la agricultura, sin embargo, también enfrentan barreras en el acceso al derecho de la tierra, créditos y tecnología. En tema de agua, las mujeres en las zonas rurales principalmente son responsables en la gestión del agua para el uso dentro del hogar y para el riego.

Es importante garantizar su participación en la toma de decisiones sobre la gestión del agua y la implementación de tecnologías agrícolas sostenibles para mejorar la seguridad hídrica para la seguridad alimentaria. Promover la eficiencia en el uso del agua contribuirá a un sistema alimentaria más justo y sostenible

Conclusión

El vínculo que hay entre el agua y la agricultura exige un enfoque integral para garantizar la seguridad alimentaria en el presente y las generaciones futuras y así también garantizar la conservación del agua dulce disponible.

Las prácticas agrícolas como la agricultura son el principal consumidor de agua dulce y por ello enfrenta un reto que debe ir trabajando desde este momento para evitar el sobreconsumo de este capital natural; implementando estrategias sostenibles para la conservación del recurso hídrico ante el crecimiento demográfico. Implementar de tecnologías modernas de riego, como el riego por goteo y sistemas automatizados, que permiten una mayor eficiencia en el uso del agua. Además, promover el uso de cultivos resistentes a la sequía y prácticas agroecológicas puede contribuir a mejorar la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a la escasez de agua.

El Objetivo 2 de la Agenda 2030, “Hambre Cero”, resalta la necesidad de adoptar prácticas agrícolas sostenibles que optimicen el uso del agua y minimicen su impacto ambiental, promoviendo la eficiencia

en su consumo y protegiendo los ecosistemas acuíferos. Sumando la igualdad de género en la gestión de los recursos hídricos permitiendo que las mujeres desempeñen un papel clave dentro de la agricultura sostenible y una gestión de agua idónea trabajando desde la sostenibilidad y enfrentar la crisis hídrica y alimentar de forma equitativa y resiliente. 💧

Bibliografía

Fan del Agua. (2024, noviembre 29). La relación entre la agricultura sostenible y la conservación del agua. *Fan del Agua*. <https://fandelagua.com/la-relacion-entre-la-agricultura-sostenible-y-la-conservacion-del-agua/>

FAO, secretaría del foro de alto nivel de expertos. (2009). *La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050* (p. 4) [Foro de Expertos de Alto Nivel]. https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_SP/La_agricultura_mundial.pdf

García, L. (2018, agosto 31). *Problemáticas económicas del agua en México*. Ciencia UNAM. <https://ciencia.unam.mx/leer/775/problematicas-economicas-del-agua-en-mexico>

ONU, O. de las N. U. (2014, octubre 22). *Decenio Internacional para la Acción "El agua, fuente de vida" 2005-2015. Áreas temáticas: Agua y seguridad alimentaria*. https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/food_security.shtml

PNUD, P. D. L. N. U. P. E. D. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. UNDP. <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>

DISPONIBILIDAD Y USO DEL AGUA EN LA AGRICULTURA

MARÍA JOSEFA JIMÉNEZ-MORENO
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES, CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



Resumen

En este artículo se plantea la centralidad que tiene el uso del agua en la agricultura respecto a sus otros usos. Se enuncian los diferentes factores que condicionan la disponibilidad del agua para este sector, entre éstos destaca el cambio climático y la gestión. Además, se plantea un panorama general de la demanda de agua para la agricultura en México respecto al tipo de riego y superficie agrícola.

Se enuncian las principales directrices de los estudios sobre escasez de agua y se establece la distinción entre las categorías de agua ‘azul’, ‘verde’ y ‘gris’. A partir de esta clasificación, se plantea cuál será el abasto de agua verde de acuerdo con pro-

yección y cuáles pueden ser las implicaciones de esto para la región latinoamericana y para México. Finalmente, se sugiere la tecnificación del sector agrícola como una medida de mitigación de la escasez de agua para los cultivos.

Introducción

El agua es el componente más importante del ecosistema (Ahmed, y otros, 2022), desempeña un papel fundamental en la producción agrícola (Comisión Europea, 2024), se considera ampliamente como el recurso más importante para el desarrollo agrícola a largo plazo (Ahmed, y otros, 2022).

El agua es esencial para todos los objetivos sociales, ambientales y económicos (Comisión Europea, 2024). El hombre es consciente de los problemas ambientales y que no puede seguir utilizando los recursos naturales como el agua de una manera de usar y tirar (Ahmed, y otros, 2022) por lo que se busca que, la gestión y seguridad hídrica determinen su uso racional y sustentable.

Numerosos factores incluido el crecimiento demográfico, el auge de la agricultura de regadío, la industrialización y el cambio climático, están presionando sobre la cantidad y calidad de los ecosistemas ecológicos (Ahmed, y otros, 2022). Siendo la agricultura el usuario de agua más importante en todo el mundo (Pedrozo, 2022).

Por lo que, una de las claves para el desarrollo adecuado de la sociedad en este siglo, consiste en entender mejor la problemática del agua (Pedrozo, 2022) en el sector agrícola. Así como mejorar la gestión hídrica a partir de la comprensión y uso sustentable de los diferentes tipos de agua (azul, verde y gris).

Desarrollo

Problemática de la disponibilidad de agua para los cultivos

La agricultura esta expuestas a efectos del cambio climático, al desarrollo socioeconómico y al crecimiento poblacional (Pedrozo, 2022). Cuando el agua es escasa, la producción es menor y los precios de los alimentos, aumenta, lo que compromete la seguridad alimentaria y la asequibilidad. En situaciones de sequía extrema, los cultivos corren el riesgo de perderse provocando graves pérdidas económicas (Comisión Europea, 2024)

Según el (INEGI , 2024), en México se han identificado 13 usos del agua, de los cuales 12 se clasifican como consuntivos (volumen de agua de una calidad determinada que se consume al realizar una actividad específica). Entre estos, el uso agrícola destaca como el de mayor consumo en 2020 y representó le 67.52% del volumen total de agua.

De las principales problemáticas de las aguas superficiales y subterráneas es el incremento de los usuarios agrícolas que genera la demanda de agua y provoca sobreexplotación de ríos y acuíferos

(Pedrozo, 2022). Así como, el exceso de riego y uso de pesticidas provoca pérdida de nutrientes (Comisión Europea, 2024). Otro factor importante a considerar es el cambio climático, que ha originado que la problemática del uso y disponibilidad del agua se incremente por el impacto negativo en el ambiente. Por lo que, la gestión ineficiente del agua en la agricultura agrava el problema provocando una menor disponibilidad y calidad del agua (Comisión Europea, 2024)

Análisis

Los recursos hídricos para la agricultura son limitados debido a las demandas socioeconómicas y al cambio climático (Ahmed, y otros, 2022). Situación que orilla a los tomadores de decisiones a generar estrategias para afrontar la escasez hídrica en la agricultura (Melo-Sabogal & Contreras-Medina, 2022). Por ejemplo, la obtención de plantas genéticamente modificadas para producir plantas resistentes a la sequía, contar con un sistema de riego acorde a las necesidades de la zona y el productor.

En la agricultura, los sistemas de riego se utilizan para un rendimiento óptimo del agua (INEGI ,

2024), ya que la tecnificación del campo disminuye la cantidad de agua a utilizarse en una parcela, lo que genera un ahorro del 26% al 80% lo que permite la eficiencia en el uso del agua y evita el desperdicio en el área agrícola (Melo-Sabogal & Contreras-Medina, 2022), dependiendo del tipo de cultivo.

En México el 70 % del agua disponible para consumo se utiliza en la agricultura para la producción de alimentos (Melo-Sabogal & Contreras-Medina, 2022). Según el Censo Agropecuario del 2022, la superficie agrícola de nuestro país fue de aproximadamente 257030.81 km². De esta superficie el 74.0% fue producción de temporal, y el 26.9% de riego (INEGI , 2024).

A lo largo del tiempo, se han realizado políticas destinadas a mejorar la eficiencia del agua en respuesta a la escasez de agua y al cambio climático partiendo del supuesto de que una mejor gestión puede lograr más con menos agua (Ahmed, y otros, 2022). Con base en esta teoría se pretende disminuir la problemática del uso del agua en el sector agrícola mediante la comprensión y uso de los tres tipos de agua, conocidos como agua azul, agua verde y agua gris.

Esto es principalmente por que la mayor parte de los estudios sobre escasez de agua, se han enfocado exclusivamente en las extracciones o la disponibilidad de agua (Pedrozo, 2022), la cual es la principal fuente de agua para los cultivos de riego, que se encuentra en los cuerpos de agua superficial (ríos, acuíferos, lagos, embalses, esteros, etc.) y subterráneas, es decir la extracción de agua superficial y subterránea. (CONAGUA, 2024), este tipo de agua es llamada agua azul y es la principal fuente para los cultivos de riego.

Mientras que el agua almacenada en el suelo y en los cultivos es conocida como el agua verde. Esta es el agua de lluvia almacenada en el suelo como humedad, particularmente el uso de agua de lluvia ocupada durante el flujo de la evotranspiración del suelo que se utiliza en agricultura y la producción forestal (Pedrozo, 2022; CONAGUA, 2024), es la única fuente de agua para los cultivos de temporal.

Según (Pedrozo, 2022), algunas proyecciones señalan que el agua verde se verá reducida drásticamente en la región de América Central, con lo que se anticipa que las condiciones de escasez que hoy

sufrimos se agravarán en un futuro próximo. En el caso América Central y específicamente en México la cuantificación del uso del agua azul y verde para la producción de alimentos en la agricultura es de vital importancia (Pedrozo, 2022; INEGI, 2024). Por lo que se pretende que el agua conocida como gris, la cual es el agua contaminada durante un proceso y procede de la regadera y lavamanos, las cuales una vez recicladas pueden usarse en el riego por su bajo contenido de contaminantes (AQUA España, 2024; CONAGUA, 2024).

Con base en la problemática del agua en el sector agrícola se pretende con la gestión hídrica mediante tratamientos específicos puedan ser empleada las aguas grises para la agricultura y así como, aportar soluciones basadas en el mejoramiento y reutilización del agua grises tratadas, que contribuyan a mejorar la eficiencia del agua, mitigación y adaptación al cambio climático en la agricultura (Comisión Europea, 2024; CONAGUA, 2024; INEGI, 2024). Así como, mejorar el aprovechamiento del agua disponible superficial y/o subterránea en el ambiente mediante un uso sustentable en el sector agrícola

Conclusiones

En conclusión, se pretende mejorar la gestión y uso eficiente del agua a través de la tecnificación del sector agrícola, así como el empleo de aguas grises con la participación de los agricultores en la gestión del agua y el desarrollo de capacidades son todos los enfoques de la gestión sostenible del agua en la agricultura 💧

Bibliografía consultada

Ahmed, W., Safdar, U., Ali, A., Haider, K., Tahir, N., Sajid, S., . . . Sattar, M. T. (2022). Sustainable Water Use in Agriculture: A Review of Worldwide Research. *International Journal of Agriculture and Biosciences*, 11(4), 247-251. doi:<https://doi.org/10.47278/journal.ijab/2022.033>

AQUA España. (25 de noviembre de 2024). *Asociación Española de Empresas del Sector del agua. 35 años*. Obtenido de Aguas grises: origen, composición y tecnologías para reciclaje.: https://aquaespana.org/sites/default/files/documents/files/Pildora_08-Grises_origen.pdf

Comisión Europea. (20 de octubre de 2024). [European Commission] *Water management in agriculture*. Obtenido de https://agriculture.ec.europa.eu/system/files/2023-05/factsheet-agriresearch-water-manament_en_0.pdf

CONAGUA. (20 de noviembre de 2024). *Comisión Nacional del Agua*. Obtenido de El agua virtual y la huella hídrica: <https://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/infograf%C3%ADa%20huella%20h%C3%ADrica.pdf>

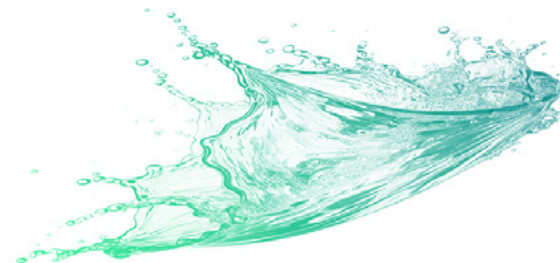
INEGI. (2024). *Estadística a propósito del día mundial del agua: Desafíos y oportunidades en el uso del agua en México*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Melo-Sabogal, V., & Contreras-Medina, L. M. (2022). ¿Cómo afecta escasez de agua a la producción de tus alimentos y que estrategias agrícolas se han implementados para reducir su impacto? *Digital Ciencia UAQro*(1), 20-28.

Pedrozo, A. A. (2022). Escases de agua, disponibilidad y agricultura. *Perspectivas IMTA*(22), 1-5. doi:[doi:doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2022-22](https://doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2022-22)

SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA COMO ALIADAS PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO TULA EN EL ESTADO DE HIDALGO

GEORGINA MARTÍNEZ-RESÉNDIZ
ESTANCIA POSDOCTORAL POR CONAHCYT EN
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO CAMPUS MISANTLA



Resumen

El río Tula, ubicado en Hidalgo, enfrenta altos niveles de contaminación debido a las aguas residuales, tratadas y no tratadas, provenientes de la Ciudad de México y zonas cercanas. Este fenómeno de reutilización hídrica, promovido por la escasez de agua, ha transformado zonas no agrícolas en tierras productivas, principalmente para cultivos como alfalfa y maíz en distritos de riego. Aunque estas aguas contienen nutrientes que mejoran la fertilidad del suelo, también conllevan riesgos significativos, como la acumulación de metales pesados y patógenos, afectando la seguridad alimentaria y la sostenibilidad del suelo.

Para enfrentar estos desafíos, las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) surgen como alternativas sostenibles. Los humedales construidos, barreras vegetativas y la restauración de ecosistemas ribereños pueden mejorar la calidad del agua, preservar suelos y fortalecer la resiliencia climática, beneficiando tanto a agricultores como a las comunidades locales.

Introducción

El río Tula, ubicado en el estado de Hidalgo, es uno de los principales cuerpos de agua en México en el cual son depositadas aguas residuales tratadas y

no tratadas generadas en la Ciudad de México y zonas aledañas. Se conoce que atraviesa uno de sus momentos más críticos debido a la grave contaminación que sufre, principalmente por el arrastre de aguas negras (Donaciano-Montiel & Sosa-Alva, 2024). El fenómeno, conocido como “reutilización de aguas residuales”, debido a la escasez hídrica es una acción que se promueve constantemente, sin embargo, se alerta sobre riesgos de su uso en la agricultura sin tratamiento previo ha sido clave en el desarrollo.

El recurso hídrico “reutilizado” transforma los espacios no apto para el desarrollo de la agricultura, en un espacio con un crecimiento importante en esta actividad representativa del estado de Hidalgo. En la actualidad, parte de estas aguas llegan a los principales distritos de riego del estado, entre ellos el 003 de Tula con las cuales se riegan aproximadamente 80,000 hectáreas, principalmente de alfalfa y maíz (García-Salazar, 2019). Sin embargo, el reuso de estas aguas plantea importantes retos. Las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) surgen como una alternativa sostenible para

mejorar la calidad del agua y, al mismo tiempo, optimizar la productividad agrícola. Estas soluciones, que imitan procesos naturales, pueden ayudar a resolver problemas relacionados con la contaminación del agua, la fertilidad del suelo y la sostenibilidad de los ecosistemas locales.

La importancia del río Tula en el contexto agrícola

En México, la región del Valle del Mezquital, Hidalgo tiene más de un siglo dedicado a la agricultura con un sistema de riego de aguas residuales (Rosas Baños & García Salazar, 2023). El Distrito de Riego 003, alimentado principalmente por aguas residuales provenientes del río Tula, es un ejemplo de cómo las aguas residuales se han convertido en un recurso hídrico clave para el riego agrícola (Figura 1). Las aguas residuales contienen altos niveles de nutrientes como nitrógeno y fósforo, que pueden actuar como fertilizantes para los cultivos, además, puede aportar nutrientes que mejoran la fertilidad del suelo debido a el alto contenido de materia orgánica (Zamora et al., 2009). Esto ha permitido a los

agricultores de la región incrementar sus rendimientos y reducir costos en insumos agrícolas. Sin embargo, el uso prolongado de aguas residuales sin tratamiento adecuado también conlleva riesgos. Entre ellos, la acumulación de contaminantes tóxicos, como metales pesados (García-Carrillo et al., 2020) y compuestos orgánicos persistentes, en los suelos y cultivos, así como la proliferación de patógenos. Estos desafíos subrayan la necesidad de implementar medidas que aseguren un uso más seguro y sostenible de las aguas residuales.

A través de una compleja red de grandes canales (Figura 2), el agua se distribuye a las parcelas, aprovechando la topografía del Valle del Mezquital y la infraestructura hidráulica existente. Este es un sistema planeado desde principios del siglo XX se consideran un modelo de ingeniería agrícola en México, ya que transportan el agua hacia los campos, utilizando sistemas de riego por gravedad que son eficientes en términos de costos y manejan grandes volúmenes de agua. Están diseñados para abastecer una amplia región agrícola que incluye

Figura 1. Zona de cultivos y riego con agua residual



miles de hectáreas dedicadas a cultivos clave como maíz, trigo, alfalfa y cebada.

Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN): Una alternativa sostenible

Las SbN se han convertido en herramientas clave para abordar problemas complejos como la contaminación del agua y la degradación ambiental. Estas soluciones no solo son eficientes desde el punto

Figura 2. Distribución de agua residual a través de canales



de vista ecológico, sino que también suelen ser más económicas y sostenibles a largo plazo en comparación con las tecnologías convencionales de tratamiento de agua.

Algunas de las principales SbN que podrían aplicarse en el río Tula incluyen:

1. **Humedales construidos.** Los humedales construidos son sistemas que imitan los pro-

cesos de retención de nutrientes (Nava-Rojas et al., 2023) que suceden en los humedales naturales. En ellos, el agua residual pasa a través de un lecho de plantas acuáticas y sustratos que filtran los contaminantes y reducen las concentraciones de nutrientes, patógenos y metales pesados. Estos sistemas son particularmente efectivos en zonas rurales y agrícolas, ya que no requieren una gran inversión de energía ni tecnología avanzada. En el caso del río Tula, los humedales construidos podrían instalarse estratégicamente en los canales de riego para mejorar la calidad del agua antes de que llegue a los campos agrícolas. Además de su función de depuración, estos sistemas pueden generar beneficios colaterales como la conservación de la biodiversidad y la captura de carbono.

2. **Barreras vegetativas y biofiltros.** Las barreras vegetativas consisten en la plantación de vegetación nativa a lo largo de los márgenes del río o los canales de riego. Estas plantas ayudan a filtrar los sedimentos y nutrientes

del agua, reduciendo su impacto en el medio ambiente. Asimismo, los biofiltros, que combinan microorganismos y materiales como arena, grava y carbón activado, pueden ser una opción para eliminar contaminantes específicos, como pesticidas y metales pesados (Arango Ruiz, 2004).

3. **Restauración de ecosistemas ribereños.**

La restauración de los ecosistemas ribereños del río Tula podría desempeñar un papel crucial en la mejora de la calidad del agua. Esto incluye la reforestación de áreas degradadas y la recuperación de humedales naturales que actúan como filtros naturales de los contaminantes. Además, estos ecosistemas pueden ofrecer servicios ambientales importantes, como la regulación del clima y la protección contra inundaciones (Ceccon, 2003).

Beneficios para la agricultura y la comunidad

Implementar SbN en el manejo del agua del río Tula podría generar múltiples beneficios tanto para los agricultores como para la comunidad en general:

- **Mayor calidad del agua:** Reducir los contaminantes en el agua de riego mejoraría la seguridad alimentaria y protegería la salud de los consumidores.
- **Suelos más saludables:** Al evitar la acumulación de metales pesados y otros contaminantes, se preservaría la fertilidad del suelo a largo plazo.
- **Reducción de costos:** Al optimizar el uso de nutrientes presentes en el agua, los agricultores podrían depender menos de fertilizantes químicos costosos.
- **Resiliencia climática:** La restauración de ecosistemas naturales fortalecería la capacidad de la región para enfrentar eventos extremos, como sequías e inundaciones.
- **Generación de empleo:** Las actividades relacionadas con la implementación y mantenimiento de SbN pueden crear oportunidades de trabajo en la región.

Conclusión

El río Tula y el Distrito de Riego 003 son ejemplos claros de la estrecha relación entre el agua, la agricultura y la sostenibilidad ambiental. Si bien el uso de aguas residuales ha sido clave para el desarrollo agrícola de la región, también plantea desafíos significativos que requieren soluciones innovadoras y sostenibles.

Las Soluciones Basadas en la Naturaleza ofrecen un enfoque prometedor para abordar estos problemas, mejorando la calidad del agua, protegiendo el medio ambiente y fortaleciendo la economía agrícola. Sin embargo, su implementación requiere un esfuerzo conjunto entre la comunidad, los agricultores, las instituciones académicas y el gobierno.

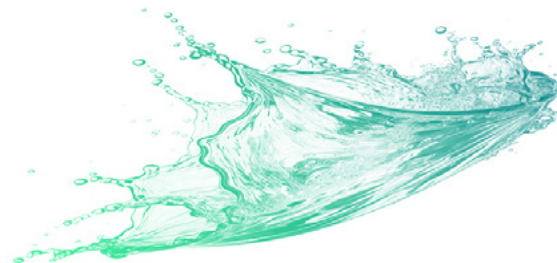
Bibliografía

- Arango Ruiz, Á. (2004). La biofiltración, una alternativa para la potabilización del agua. *Lasallista de Investigación*, 1(2), 61–66.
- Ceccon, E. (2003). Los bosques ribereños y la restauración y conservación de las cuencas hidrográficas. *Ciencias*, 45–53.
- Donaciano-Montiel, C., & Sosa-Alva, M. S. (2024). ¿El agua residual en el Río Tula predomina como factor en enfermedades microbianas o ventaja productiva en el sector? *TEPEXI Boletín Científico de La Escuela Superior Tepeji Del Río*, 11(22), 79–82. <https://doi.org/10.29057/estr.v11i22.12504>
- García-Carrillo, M., Luna-Ortega, J. G., Gallegos-Robles, M. Á., Preciado-Rangel, P., Cervantes-Vázquez, M. G., & González-Salas, U. (2020). Impacto de aguas residuales sobre algunas propiedades y acumulación de metales pesados en el suelo. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 38(4), 907–916. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.556>
- 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). <https://doi.org/10.24836/es.v29i54.741>
- Nava-Rojas, J., Lango-Reynoso, F., Castañeda-Chávez, M. del R., & Reyes-Velázquez, C. (2023). Remoción de Contaminantes en los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial: Una Revisión. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 41. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1715>
- Rosas Baños, M., & García Salazar, E. M. (2023). Percepción ambiental del uso de agua residual de productores agrícolas del Valle del Mezquital, Hidalgo. *Observatorio Medioambiental*, 26, 181–205. <https://doi.org/10.5209/obmd.93025>
- Zamora, F. R., Rodríguez Guevara, N. J., Torres Rodríguez, D. G., & Yendis Colina, H. J. (2009). Uso de agua residual y contenido de materia orgánica y biomasa microbiana en suelos de la llanura de Coro, Venezuela. *Agríc. Téc. Méx*, 35(2), 1–5.

LA AGROECOLOGÍA UN CAMINO PARA EL CUIDADO DEL AGUA Y LA SOBERANÍA ALIMENTARIA

WILLIAM ALFREDO CHAY CANUL

COORDINADOR DE SEGURIDAD ALIMENTARIA EN OPERACIÓN BENDICIÓN MEXICO A.C.



Resumen

El presente escrito expone de manera breve las aportaciones que las prácticas agroecológicas brindan en los espacios comunitarios para la eficiencia hídrica y el cuidado del agua. Se menciona que la prevalencia de subalimentación se mantiene en 9.6%, lo cual denota que ha tenido un aumento de 2.6%, esto refleja la vulnerabilidad del sistema alimentario actual ante crisis como la pandemia por COVID19. El modelo de producción agrícola propio de la revolución verde es poco eficiente en comparación con los nutrientes que genera en relación con los recursos que degrada. Por ello en la actualidad se buscan formas alternativas, como lo es la

agroecología, la cual es promotora de esperanza en este contexto de crisis. Ya que promueve las soberanías, alimentaria e hídrica, para el buen vivir en las comunidades, así mismo, es ejemplo para zonas urbanas que buscan reencampesinarse y tener autonomía en la producción de sus alimentos.

Introducción.

El informe sobre “el estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo”, menciona que la prevalencia de subalimentación se mantiene en 9.6%, lo cual denota que ha tenido un aumento desde 2019 a 2023 de 2.6%, esto refleja la vulnerabilidad del sis-

tema alimentario actual ante crisis como la pandemia por COVID19 (FAO, FIDA, OMS, PMA, & UNICEF, 2024, p.13) o el impacto por la guerra en Rusia (Altieri, 2023, p. 127). Así mismo, este sistema alimentario hegemónico regido por intereses del capital no provee alimentos de calidad y presenta múltiples desafíos, tales como la dependencia de insumos derivados del petróleo (Reyes, 2020, p. 10), los efectos del cambio climático, como sequías prolongadas, la contaminación del suelo y del agua, que bajo el modelo propio de la revolución verde, es poco eficiente en comparación con los nutrientes que genera en relación con los recursos que degrada. Cabe mencionar que la agricultura tecnificada inyecta más de 2.500 millones de kilos de pesticidas en la biosfera, igualmente se espera que para el 2030, la demanda del recurso hídrico por la agricultura superará el suministro de agua dulce en un 40% (Altieri, 2024, p. 20), lo cual denota su deficiencia, ya que solo provee el 30% de los alimentos, que en contraste con la agricultura familiar y campesina producen el 70% de los alimentos, en menor superficie y con menos recursos que la agricultura industrial (Gazzano, 2024, p. 8).

Por ello en la actualidad se buscan formas alternativas de producción agrícola, como lo es la agroecología, reconocida por sus dimensiones inseparables: técnico-productiva, político-organizativa y ontológico-epistémico-vivencial (Giraldo 2022, p. 73), lo cual le permite trascender más allá de las buenas prácticas y crear entornos resilientes de intercambio de aprendizajes y experiencias, algo altamente necesario en el contexto de la crisis civilizatoria actual (González, 2020, p. 18). También presenta una serie de principios entre los cuales se mencionan, minimizar la pérdida de suelo, agua y biodiversidad, así como, conservar recursos naturales para el futuro (Barrientos y Zúñiga, 2023, p.1136) y recopila propuestas alrededor del mundo para crear sistemas alimentarios más justos y sostenibles (Trevilla & Peña, 2022, p. 13).

Por ello el presente escrito expone de manera breve las aportaciones que las prácticas agroecológicas brindan en los espacios comunitarios para la eficiencia hídrica y el cuidado del agua, ante el cambio climático para poder caminar a la soberanía alimentaria. Tomando las experiencias de procesos de

acompañamiento comunitario y la participación en proyectos de investigación relacionados a la identificación de las medidas de adaptación al cambio climático.

Desarrollo

En el 2021 se inició un proceso de acompañamiento para la construcción de agroecologías en el municipio de Tizimín, Yucatán (Chay, 2022, p. 24), en los viveros de las Comunidades de Aprendizaje Campesino (CAC) (Toledo, 2024, p. 24), se trabajó en conjunto para fortalecer la soberanía alimentaria a través de la producción de hortalizas, en dicho territorio se consideraron dos puntos importantes para el desarrollo de los espacios de producción agroecológica: llevar un proceso participativo y local, así como la implementación de medidas de adaptación al cambio climático, ello se consideró ya que un año antes se desarrolló en la localidad de Timucuy, el proyecto: Local Indicator of the Climate Change Impacts (LICCI, 2024), en el cual se observó que el número de campesinos ha disminuido por los cambios en el clima, como las sequías prolonga-

das y el sol más intenso, lo cual limita sus jornadas en las parcelas, así mismo la sequía en la selva y la cantidad reducido de campesinos que practican la milpa, hacen a los cultivos más vulnerables a especies silvestres que buscan alimentos, como el coatí o tejón (*Nasua narica*). Por dicha razón se consideró la aplicación de medidas de adaptación.

A través de un proceso participativo se dibujó el huerto comunitario, considerando las necesidades climáticas. Se utilizó malla sombra para disminuir la intensidad del sol un 50% y poder sembrar hortalizas todo el año, ello basado en una práctica local que se usa para la siembra de chayote en asociación con cilantro, lo cual permite que la lluvia acida no caiga directamente en el cultivo y se proteja del sol, así mismo se colocó un sistema de riego con micro aspersores con energía solar y se añadió 50% de composta a cada cama biointensiva de cultivo para mejorar la estructura del suelo y retener humedad para reducir el riego, también para el control de plagas se realizó una asociación de cultivos, registrando cerca de 40 especies, igualmente se realizaron aplicaciones periódicas de repelentes

orgánicos, como té de neém (*Azadirachta indica* A. Juss), macerados de cebolla, ajo y chile, entre otros, evitando el uso de agroquímicos para tener alimentos libres de contaminantes así como cuidar el acuífero, ya que esta región se distingue por su suelo kárstico altamente permeable.

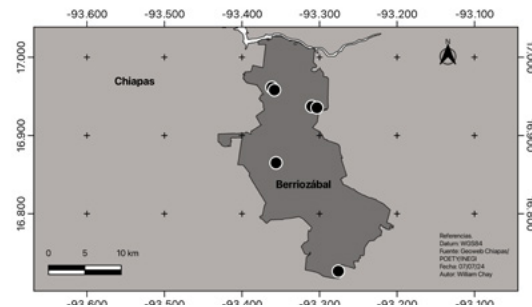
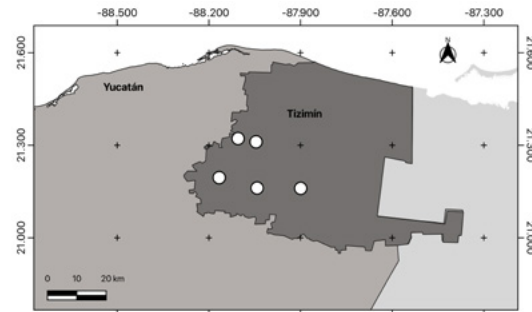
De 2022 a 2024 este proceso fue replicado en el estado de Chiapas buscando consolidar las agroecologías para fomentar la soberanía alimentaria, cabe mencionar que en este territorio los ecosistemas son variados, por ello cada uno tuvo un elemento particular ya sea por la geografía o la cultura, así mismo, la disponibilidad de agua es variada, por ello se implementaron estrategias para su aprovechamiento, como sistemas de riego por goteo con tanques de almacenamiento que suministran el agua por gravedad. Al igual que la aplicación de acolchado (una capa de 3 a 5 cm de espesor de materia orgánica) la cual permitió que muchas comunidades redujeran el riego de 2 veces por día a una vez cada 3 días. Así mismo se consideró el intercambio de saberes a través de las agroecologías históricas (Rivera, 2020, p. 5), con el tzolkiin el

cual considera la observación de animales y plantas el primer mes del año, ello para recuperar el conocimiento tradicional maya sobre la observación del clima. También se crearon comités del huerto y se creó una red de huertos comunitarios (véase figura 1), lo cual ha permitido el intercambio de estas prácticas entre las localidades.

Conclusión

La conclusión es que la construcción de agroecologías más que desarrollar prácticas es un proceso complejo socioambiental y biocultural-comunitario, que permite la adopción de estas, en un contexto como el que se presenta ante la crisis hídrica y crisis climática, que a su vez afecta el sistema alimentario. Por ello es necesario apostar a un nuevo proyecto civilizatorio en el cual la producción agroecológica de alimentos forma parte (Ferrari y Masera, 2020, p 36). La cual es fundamental ya que es promotora de esperanza en este contexto de crisis, así mismo, en cualquiera de los escenarios posibles la agroecología será el acompañante de la transición civilizatoria (Giraldo, 2018, p. 18). Promoviendo la sobera-

nía alimentaria e hídrica para el buen vivir en las comunidades, así mismo, estas serán el ejemplo para zonas urbanas que buscan reencampesinarse y tener autonomía en la producción de sus alimentos y hacer uso eficiente del agua en el proceso.



Bibliografía

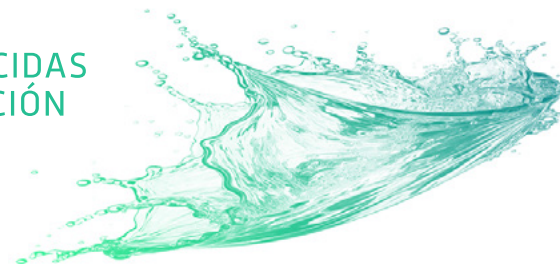
- Altieri, M., & Nicholls, C. (2023). Agroecología, policrisis global y transformación de sistemas alimentarios. *Magna Scientia UCEVA*, 125-131.
- Altieri, M. (2024). Buscando Soluciones a la Crisis Planetaria Ambiental
- Un Llamado a la Transformación Individual y Colectiva. Foro. VOL. 8, Núm. 2, 18-26
- Chay , W., & Lugo, A. (2021). Huertos comunitarios agroecológicos para la seguridad alimentaria en el estado de Yucatán. *11ª FISANUT Y 5ª cátedra de nutrición* (pág. 25). Guanajuato : REDICINAYSA.
- FAO, FIDA, OMS, PMA, & UNICEF. (2024). *Versión resumida del estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2022*. Roma: FAO.
- Ferrari, L., & Masera, O. (2020). ¿Qué implica una transición energética sustentable? *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*, 31-36.
- Gazzano, I. (2024). La agroecología como construcción de sentidos frente a la crisis civilizatoria. *FORO*, 7-16.
- Giraldo, O. (2022). *Multitudes Agroecológicas* . Yucatán, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- González , I. (2020). Crisis civilizatoria: Hacia una transformación profunda . *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*, 17-22.
- LICCI. (2024). The contribution of local knowledge to climate change research. LICCI. recuperado de: <https://www.licci.eu/>
- Reyes, P. (2020). Crisis civilizatoria: antesala al colapso. *América Latina en Movimiento*, 8-11.
- Rivera, T. (2020). Agroecología historiaca maya en las tierras bajas de México. *ETHNOSCIENTIA*, 1-26.
- Barrientos, G. & Zúñiga, M. (2023). Congreso Latinoamericano de Agroecología. Universidad de Costa Rica. San Jose Costa Rica.

Toledo, V. (2024). El "Gran Salto" de la Agroecología en México (2019-2024) Un Caso Especial de Escalamiento. *Foro*, 40-48.

Trevilla, D., & Peña, I. (2022). *Bordando saberes y alternativas para la agroecología* (Vol. Primera edición). México, México: Bajo Tierra.

LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA POR EL USO DE PLAGUICIDAS Y SU PURIFICACIÓN EMPLEANDO PROCESOS DE ADSORCIÓN

MA. DEL ROSARIO MORENO-VIRGEN,
HILDA ELIZABETH REYNEL-ÁVILA,
FELIPE DE JESÚS VILLALOBOS-DELGADO,
LIZBETH LILIANA DÍAZ-MUÑOZ,
DIDILIA ILEANA MENDOZA-CASTILLO,
JAIME MORENO-PÉREZ,
HERSON ANTONIO GONZÁLEZ-PONCE,
ADRIÁN BONILLA-PETRICIOLET
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO,
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AGUASCALIENTES



Resumen

En este artículo se aborda la problemática de la contaminación del agua por el uso de plaguicidas, sus efectos toxicológicos, y la utilización del proceso de adsorción como una alternativa para su remoción. Se describen algunos adsorbentes que pueden ser aplicados para la descontaminación de diferentes plaguicidas en México.

Introducción.

A nivel global, el sector agrícola es uno de los principales consumidores de agua. En México, dicha acti-

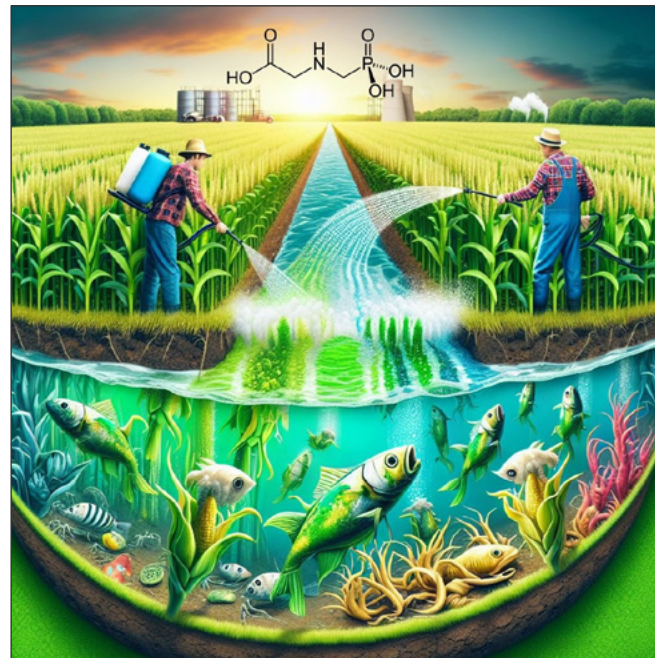
vidad económica consume más del 70% del recurso hídrico nacional (García-Huante et al., 2024). Las estadísticas disponibles indican que 48% de las aguas residuales tratadas se utiliza para irrigar cultivos (INEGI, 2023). No obstante, se debe indicar que no existe un registro preciso sobre los niveles de tratamiento, reutilización o reciclaje de las aguas residuales generadas en el sector agrícola mexicano.

El consumo intensivo de recursos hídricos es una consecuencia directa de la cadena de suministro de alimentos que genera desafíos en el área de

contaminación del agua por el uso de plaguicidas y otros agroquímicos, véase Figura 1. La utilización de los plaguicidas está relacionada con la operación de los sistemas de cultivo para la producción de alimentos ya que ayudan a su preservación y mejoran el rendimiento de las cosechas. De acuerdo con el informe “Estudios sobre el Uso de Plaguicidas en México: Compilación 1980-2018” (INECC, 2021), se tenían identificados al menos 38 cultivos donde se aplican estos productos químicos, destacando el maíz, chile, caña de azúcar, sorgo y jitomate. Sin embargo, no existen datos nacionales para determinar con certeza cuáles son los cultivos en los que se emplean la mayor cantidad de agroquímicos.

Los plaguicidas son considerados micro-contaminantes emergentes que pueden transportarse fácilmente a través del ambiente siendo un factor de riesgo para el deterioro de la calidad de los recursos hídricos. La gestión inadecuada de estos productos químicos no solamente afecta la calidad del agua, también impacta a los ecosistemas y genera riesgos para la salud pública a través de rutas de exposición directa e indirecta (Ochoa-Noriega et al., 2020).

Figura 1. Ilustración de la contaminación del agua por el uso de plaguicidas.



La implementación de estrategias de purificación y manejo sostenible del agua resulta esencial para garantizar un equilibrio entre la producción

agrícola y la conservación ambiental. En este artículo se introduce la aplicación de los procesos de adsorción como una herramienta para contribuir a la resolución de la problemática de la contaminación del agua derivada del uso de plaguicidas en México.

Clasificación de los plaguicidas y su toxicología.

Los plaguicidas son cualquier sustancia o mezcla de compuestos de naturaleza química o biológica empleados para repeler, destruir o controlar plagas, así como para controlar el crecimiento de plantas (FAO, 2014). Los plaguicidas se pueden clasificar en insecticidas, herbicidas y fungicidas. De acuerdo con su naturaleza química, éstos se pueden subdividir en: organoclorados, organofosforados, carbamatos, piretroides, glisinas, bupiridilos, y triazinas (Jaramillo Juárez, Rodríguez Vázquez, et al., 2022). Algunos de estos químicos destacan debido a su toxicidad y persistencia donde los compuestos más relevantes incluyen:

- Insecticidas: *chlorpyrifos*, *DDT*, *imidacropid* y *neonicotinoides*

- Herbicidas: *glifosato*, *atrazina* y *ácido 2,4-diclorofenoxiacético*
- Fungicidas: *clorotalonil*

Estas sustancias químicas son estables y requieren un periodo prolongado para que ocurra su descomposición natural en el ambiente. La masa molecular, solubilidad, coeficiente de partición, vida media y presión de vapor de los plaguicidas favorecen su distribución ambiental y, por tanto, tienen un potencial significativo para contaminar el agua (Lushchak et al., 2018). La distribución y transportación ambiental de este tipo de contaminantes ocurre a través de diferentes mecanismos como son la lixiviación, degradación, advección, dispersión, y difusión. La descomposición de los plaguicidas por factores ambientales también es una fuente de contaminación de cuerpos de agua. La presencia de 4-clorofenol, 2,4-diclorofenol y 2,4,6-triclorofenol en fuentes superficiales de agua se ha asociado al uso intensivo y degradación de plaguicidas durante las últimas décadas (Molnar Jazić et al., 2024). Estos compuestos son también tóxicos para los seres humanos.

La interacción de los plaguicidas con organismos vivos puede causar toxicidad aguda o crónica. La exposición directa con estos compuestos se presenta desde su fabricación hasta su aplicación (fumigación), mientras que la exposición indirecta se da a través de la contaminación ambiental donde la presencia de dichas sustancias en el agua juega un rol importante. El principal mecanismo de daño asociado con la exposición a plaguicidas es el estrés oxidativo celular (oxidación de lípidos, proteínas y ADN) que es el resultado de la alteración del proceso metabólico (biotransformación). Una exposición crónica a los plaguicidas a través del agua puede generar alteraciones fisiológicas celulares a nivel neurológico, cardiovascular, hepático, renal, pulmonar, gastrointestinal y dermatológico. Estos compuestos también tienen efectos mutagénicos, teratogénicos y oncogénicos (Jaramillo Juárez, Terrones Saldívar, et al., 2022).

Procesos de adsorción para el tratamiento de agua contaminada por plaguicidas.

Los métodos disponibles para la remoción de plaguicidas del agua implican diferentes tecnologías e in-

cluyen a la filtración por membrana, extracción con solventes, tratamiento electroquímico, intercambio iónico, procesos de oxidación avanzados, adsorción, ósmosis inversa, oxidación biológica, ozonización y fotocátalisis (Dehghani et al., 2024). El principal reto que se enfrenta durante la remoción de estos contaminantes es que sus moléculas presentan propiedades fisicoquímicas muy diversas. Algunos métodos de remoción no son efectivos para reducir la concentración de plaguicidas en el agua y su desempeño puede variar sustancialmente dependiendo de la naturaleza química del compuesto objetivo.

Los métodos para la descontaminación del agua con plaguicidas presentan limitaciones tecnológicas, económicas y ambientales. Los procesos de purificación basados en adsorción son opciones efectivas, de bajo costo y pueden implementarse en diferentes escenarios y condiciones de operación. La adsorción implica la utilización de un material sólido (adsorbente) que sirve como medio filtrante para reducir la concentración de la sustancia de interés en el fluido. Varios adsorbentes han demostrado su efectividad en la remoción de diferentes agroquímicos en agua

incluyendo plaguicidas (da Silva Júnior et al., 2024). Los materiales más estudiados para la separación de plaguicidas son el carbón activado, arcillas y sílicas funcionalizadas (da Silva Júnior et al., 2024). Estos materiales presentan una alta eficacia para la separación de contaminantes gracias a su estructura porosa y superficie funcionalizable. El carbón activado ha sido utilizado con éxito para la adsorción de compuestos como el glifosato, acetamiprid, tiame-toxam, imidacloprid y triadimefon, mientras que el ácido 2,4-diclorofenoxiacético puede ser removido del agua mediante óxido ferroso, alginato, grafeno y nanotubos de carbono (da Silva Júnior et al., 2024). Algunos estudios han demostrado que los materiales compuestos de hidróxidos de doble capa modificados con montmorillonita son adsorbentes prometedores para la remoción de atrazina y ácido 4-cloro-2-metilfenoxiacético (da Silva Júnior et al., 2024). Los adsorbentes obtenidos mediante carbonización hidrotermal pueden remover clotianidina, acetamiprid, ácido 2,4-diclorofenoxiacético, metalaxil y atrazina. Otros materiales porosos de última generación, tales como las estructuras orgánico-metálicas

(MOFs) y los puntos cuánticos, son alternativas para la remoción de plaguicidas del agua. Por ejemplo, un adsorbente híbrido magnético compuesto por MOFs, quitosano y carbón activado es un material efectivo para la remoción de imidacloprid. Este mismo contaminante puede removerse con un adsorbente compuesto por puntos cuánticos de grafeno y nanopartículas de óxido de hierro. No obstante, es conveniente indicar que los procesos de producción a gran escala de varios adsorbentes de nueva generación deben consolidarse para reducir su costo y lograr su incorporación al mercado nacional.

Una alternativa más sostenible para la remoción de plaguicidas del agua implica la aplicación de los residuos agrícolas, urbanos y marinos como materia prima para la preparación de adsorbentes. Por ejemplo, la modificación fisicoquímica de la cascarilla de arroz es útil para adsorber pesticidas como el carbofurano, mientras que los caparzones de gasterópodos marinos han sido empleados para remover bifentrina. La aplicación de raíces de especies invasoras, granos de café y té verde se ha estudiado para la separación de pesticidas tales

como clordecona, lindano, diurón y ametrina, Las cáscaras de plátano tiene propiedades de adsorción para reducir la concentración de etoprofos, terbufos y diazinón. Estos residuos ofrecen una solución ambientalmente responsable ya que no solo ayudan a descontaminar el agua, sino que ofrecen la alternativa de reutilizar desechos bajo un enfoque de economía circular, minimizando el impacto ambiental asociado a la generación de éstos.

Conclusiones.

La contaminación del agua por plaguicidas es un problema relevante a nivel nacional debido al efecto toxicológico de este tipo de micro-contaminantes. La toxicidad causada por pesticidas es un tema de interés de salud pública, científico y social pues, si bien, las cantidades detectadas de estos compuestos en agua son a nivel traza, la exposición crónica a ellos puede ser la causa de un incremento en la incidencia de enfermedades en México. Los procesos de adsorción ofrecen ventajas para la purificación del agua contaminada por plaguicidas. Este proceso de purificación es versátil, de bajo costo y fácilmente

adaptable a diferentes escenarios operativos, siendo una alternativa para contribuir al desarrollo sustentable del sector agrícola mexicano.

Bibliografía

- da Silva Júnior, A. H., Müller, J. D., Oliveira, C. R., de Noni Junior, A., Tewo, R. K., Mhike, W., da Silva, A., Mapossa, A. B., & Sundararaj, U. (2024). New Insights into Materials for Pesticide and Other Agricultural Pollutant Remediation. *Materials*, 17(14). <https://doi.org/10.3390/ma17143478>
- Dehghani, M. H., Ahmadi, S., Ghosh, S., Khan, M. S., Othmani, A., Khanday, W. A., Gökkuş, Ö., Osagie, C., Ahmaruzzaman, Md., Mishra, S. R., Lima, E. C., Mubarak, N. M., Karri, R. R., & Ansari, K. (2024). Sustainable remediation technologies for removal of pesticides as organic micro-pollutants from water environments: A review. *Applied Surface Science Advances*, 19, 100558. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100558>
- FAO. (2014). *The International Code of Conduct on Pesticide Management*. World Health Organization. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/66ed039d-7317-41e0-986d-c51e311dab00/content>
- García-Huante, A., Gómez-Merino, F. C., Trejo-Téllez, L. I., & López-Herrera, A. (2024). Potential of Cold-Water Agriculture (ColdAg) in Mexico: Challenges and Opportunities for Sustainable Food Production. *Sustainability*, 16(10). <https://doi.org/10.3390/su16104298>
- INECC. (2021). *Estudios sobre el uso de plaguicidas en México: Compilación 1980-2018*. Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/728079/141_2022_Estudios_plaguicidas_Mexico_1980-2018.pdf
- INEGI. (2023). *Estadísticas a propósito del Día Mundial del Agua: Comunicado de Prensa Núm. 161/23*. INEGI. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2023/EAP_Agua23.pdf
- Jaramillo Juárez, F., Rodríguez Vázquez, Ma. L., Aldana Madrid, M. L., & Meléndez Camargo, M. E. (2022). Aspectos básicos de los plaguicidas. En *Plaguicidas: Contaminantes ambientales tóxicos* (Primera edición). Textos Universitarios. Ciencias Básicas.

Jaramillo Juárez, F., Terrones Saldívar, Ma. del C., & González Ponce, H. A. (2022). Toxicidad crónica de los plaguicidas. En *Plaguicidas: Contaminantes ambientales tóxicos* (Primera edición). Textos Universitarios. Ciencias Básicas.

Lushchak, V. I., Matviishyn, T. M., Husak, V. V., Storey, J. M., & Storey, K. B. (2018). Pesticide toxicity: A mechanistic approach. *EXCLI Journal*, 17, 1101-1136. <https://doi.org/10.17179/excli2018-1710>

Molnar Jazić, J., Gross, A., Glaser, B., Agbaba, J., Simetić, T., Nikić, J., & Maletić, S. (2024). Boosting advanced oxidation processes by biochar-based catalysts to mitigate pesticides and their metabolites in water treatment: A meta-analysis. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(6), 114260. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114260>

Ochoa-Noriega, C. A., Aznar-Sánchez, J. A., Velasco-Muñoz, J. F., & Álvarez-Bejar, A. (2020). The Use of Water in Agriculture in Mexico and Its Sustainable Management: A Bibliometric Review. *Agronomy*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/agronomy10121957>

Lineamientos para presentar artículos al *Impluvium*

1. La contribución debe ser un texto de **corte académico**, por lo que no debe personalizarse.
2. Los trabajos deben contener: título, nombre del autor o autores y su institución de adscripción, resúmen (de hasta 150 palabras), introducción, desarrollo, conclusiones y bibliografía consultada.
3. Las contribuciones deberán entregarse en formato de procesador de textos Microsoft Word, con letra Arial de 12 puntos e interlineado doble.
4. Los textos no deberán exceder **1,700 palabras**, incluyendo la bibliografía.
5. Las imágenes que deseen utilizarse en el texto se entregarán en archivo independiente en formato jpg a 150 dpi. En el documento de Word se referirán de la siguiente manera: Véase Figura 1.
6. Se utilizará el sistema de citas y referencias bibliográficas Harvard-APA. Este estilo presenta las citas dentro del texto del trabajo, utilizando el apellido del autor, la fecha de publicación y la página, por lo que no se requieren notas al pie de página. Ejemplo: (González Villarreal, 2013, p. 25).
7. Al final del trabajo la bibliografía se agrupará en el apartado "Bibliografía" y se colocará de la siguiente manera: autor, año de publicación (entre paréntesis), título, editorial y lugar de publicación. Ejemplo: González Villarreal, F. y Arriaga Medina, J. (2015). Expresiones de la inseguridad hídrica. Revista Ciudades, No. 105, Puebla, México.
8. Los editores realizarán una corrección de estilo y consultarán con los autores cualquier modificación sobre el contenido de la contribución.
9. El artículo debe enviarse al correo electrónico contacto@agua.unam.mx con el asunto **Artículo Impluvium: (tema)**.



Impluvium

Publicación digital de la Red del Agua UNAM

Número 29, Octubre - Diciembre 2024

www.agua.unam.mx