

# 1. Regulación de tecnologías emergentes en el tratamiento de aguas residuales y su impacto en la competitividad empresarial mexicana<sup>1</sup>

JORGE ALEJANDRO SILVA RODRÍGUEZ DE SAN MIGUEL\*

DULCE MARÍA MONROY BECERRIL\*\*

MARÍA CONCEPCIÓN MARTÍNEZ RODRÍGUEZ\*\*\*

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.187.01>

## Resumen

Este trabajo de investigación examina la regulación de tecnologías emergentes en el tratamiento de aguas residuales y su impacto en la competitividad empresarial mexicana. La investigación tiene como objetivo analizar la compleja relación entre el marco regulatorio, los avances tecnológicos y su impacto en la competitividad empresarial en el sector del tratamiento de aguas residuales mexicano a través de una revisión sistemática de la literatura. Los hallazgos indican que un entorno regulatorio coherente y bien diseñado proporciona el marco necesario para que las empresas exploren e implementen tecnologías avanzadas de tratamiento de aguas residuales. Además, un marco regulatorio bien diseñado promueve la innovación y fomenta un entorno empresarial competitivo. Las regulaciones claras y consistentes brindan certeza a las empresas fomentando la inversión y la innovación. Los avances tecnológicos en el tratamiento de aguas residuales ofrecen

---

<sup>1</sup> Derivado del proyecto SIP 20230705: Consumo social responsable de agua embotellada en México ante una economía circular

\* Doctor en Ciencias Administrativas. Profesor de la ESCA-ST, Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-4696>

\*\* Maestra en Ciencias. Profesora e investigadora de la ESCA-ST, Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0787-5577>

\*\*\* Doctora en Política Pública. Profesora en el Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIEMAD), Instituto Politécnico Nacional. México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3094-54111>

oportunidades para que las empresas mexicanas mejoren su competitividad mejorando la eficiencia, reduciendo costos y cumpliendo con los estándares ambientales en evolución. Finalmente, la colaboración entre los responsables de formular políticas públicas, los organismos reguladores y las empresas son de vital importancia para desarrollar regulaciones que promuevan la innovación, el crecimiento empresarial y la sostenibilidad ecológica.

**Palabras clave:** *Tecnologías emergentes, aguas residuales, competitividad empresarial, políticas públicas, innovación.*

## Introducción

El rápido desarrollo y despliegue de tecnologías emergentes en el tratamiento de aguas residuales ha generado avances significativos para mejorar la calidad del agua y garantizar la sostenibilidad ambiental (Younas *et al.*, 2021). Estas tecnologías, que abarcan una amplia gama de enfoques innovadores como la filtración por membrana, los procesos de oxidación avanzados y los métodos de tratamiento electroquímico, pueden revolucionar potencialmente las prácticas de tratamiento de aguas residuales (Younas *et al.*, 2021). Sin embargo, la implementación y regulación exitosas de estas tecnologías emergentes plantean desafíos cruciales para los gobiernos y las empresas (Younas *et al.*, 2021). En la competitividad empresarial mexicana, la regulación efectiva de las tecnologías emergentes de tratamiento de aguas residuales es primordial (Younas *et al.*, 2021). A medida que México enfrenta una presión cada vez mayor para mejorar sus estrategias de gestión del agua, las empresas de diversas industrias se enfrentan a la necesidad de cumplir con las regulaciones ambientales en evolución y al mismo tiempo seguir siendo competitivos en el mercado global (Younas *et al.*, 2021). Por lo tanto, comprender el impacto de la regulación de tecnologías emergentes en el tratamiento de aguas residuales en la competitividad de las empresas mexicanas se vuelve fundamental (Ronderos-Lara *et al.*, 2020).

La hipótesis central de esta investigación es que regular las tecnologías emergentes en el tratamiento de aguas residuales en México tiene implica-

ciones tanto positivas como negativas para la competitividad empresarial. Esta investigación tiene como objetivo identificar y analizar los factores clave que influyen en la regulación de las tecnologías emergentes en el tratamiento de aguas residuales en México y su posterior impacto en la competitividad empresarial. El estudio explora los diversos enfoques empleados en la regulación de estas tecnologías y su eficacia para facilitar un entorno propicio para el crecimiento empresarial y la innovación.

Se llevó a cabo una revisión y crítica exhaustiva de la literatura para lograr estos objetivos, que abarcó artículos de investigación relevantes, informes gubernamentales y publicaciones de la industria. La metodología implicó la búsqueda sistemática, la selección y la síntesis de la literatura para extraer información valiosa e identificar las lagunas en la investigación. Los resultados de esta investigación brindan implicaciones prácticas para los encargados de formular políticas, los organismos reguladores y las empresas que operan en el sector de tratamiento de aguas residuales en México. Los hallazgos contribuyen a comprender la intrincada relación entre la regulación tecnológica y la competitividad empresarial, orientando políticas eficaces que equilibren la sostenibilidad ambiental y el crecimiento económico.

## Metodología

Implicó una revisión exhaustiva de la literatura sobre la regulación de tecnologías emergentes en el tratamiento de aguas residuales en México y su impacto en la competitividad empresarial. La literatura relevante se identificó a través de búsquedas sistemáticas en bases de datos como *Scopus* y *Social Science Citation Index*. Los criterios de inclusión abarcaron estudios publicados entre 2000 y 2023 que se centraron en el marco regulatorio, los avances tecnológicos y la competitividad empresarial en el contexto mexicano. La extracción y el análisis de datos se realizaron para recopilar información crítica, que se sintetizó y criticó para identificar patrones, tendencias y lagunas en la investigación. Las preocupaciones regionales específicas de México se integraron en el análisis, considerando las influencias gubernamentales, las preocupaciones ambientales y la dinámica de la industria. Los criterios de selección priorizaron fuentes acreditadas, incluidos artículos

revisados por pares e informes de organizaciones reconocidas. A través de esta metodología, la investigación tiene como objetivo analizar la literatura sobre el tema de manera integral.

### **Descripción de las tecnologías emergentes en el tratamiento de aguas residuales**

La definición y el alcance de las tecnologías emergentes en el tratamiento de aguas residuales juegan un papel fundamental en la comprensión de los avances y el impacto potencial de estas tecnologías (Krishnamoorthy *et al.*, 2019). Las tecnologías emergentes abarcan varios enfoques únicos e innovadores que se basan en principios científicos y de ingeniería avanzados para aumentar la eficiencia de los procesos de tratamiento de aguas residuales (Krishnamoorthy *et al.*, 2019). Estas tecnologías incluyen diferentes metodologías, como procesos de oxidación avanzada, procesos biológicos, activación de peróxido de hidrógeno con bicarbonato y varios métodos físicos, químicos y biológicos (Krishnamoorthy *et al.*, 2019). Las tecnologías emergentes abarcan enfoques novedosos e innovadores que pueden mejorar la eficiencia y la eficacia de los procesos de tratamiento de aguas residuales. Estas tecnologías a menudo implican la aplicación de principios científicos y de ingeniería avanzados, junto con la utilización de nuevos materiales, para aumentar el rendimiento del tratamiento (Krishnamoorthy *et al.*, 2019). Ampliando esta perspectiva, Paździor *et al.* (2019) profundizan en el alcance de las tecnologías emergentes dentro del tratamiento de aguas residuales industriales textiles. Destacan la fusión de procesos de oxidación avanzada y procesos biológicos como un enfoque emergente notable. Estos procesos implican el uso de especies altamente reactivas para degradar los contaminantes orgánicos en las aguas residuales, mientras que los procesos naturales aprovechan el poder de los microorganismos para descomponer la materia orgánica. La integración de estos enfoques es una tecnología emergente que promete mucho para mejorar la eficiencia del tratamiento de las aguas residuales textiles industriales (Martínez-Orgániz *et al.*, 2018).

Nidheesh *et al.* (2022) brindan una descripción general completa de las tecnologías emergentes adaptadas explícitamente para el tratamiento de

aguas residuales industriales mixtas en países en desarrollo. Destacan que las tecnologías emergentes en este contexto abarcan un amplio espectro de enfoques, que incorporan métodos físicos, químicos y biológicos. Esta diversa gama de técnicas está diseñada estratégicamente para abordar los desafíos asociados con las aguas residuales industriales mixtas, caracterizadas por su composición compleja y variada de contaminantes (Nidheesh *et al.*, 2022). Las aguas residuales industriales mixtas presentan un conjunto único de complejidades y requieren estrategias de tratamiento personalizadas debido a su naturaleza heterogénea. Los contaminantes en tales corrientes de aguas residuales a menudo se originan en diversos procesos industriales, lo que da como resultado una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos, metales pesados y otros contaminantes (Nidheesh *et al.*, 2022). En consecuencia, los métodos tradicionales de tratamiento de aguas residuales pueden resultar inadecuados para eliminar estos contaminantes de manera efectiva, lo que requiere la adopción de tecnologías emergentes. Las tecnologías emergentes abarcan varios procesos físicos, químicos y biológicos que ofrecen enfoques innovadores para abordar los desafíos del tratamiento de aguas residuales industriales mixtas (Nidheesh *et al.*, 2022). Los métodos físicos pueden incluir técnicas de filtración avanzadas como la filtración por membrana o los procesos de adsorción, que pueden detectar contaminantes específicos y eliminarlos de la matriz de las aguas residuales (Rashid *et al.*, 2021). Los métodos químicos engloban procesos de oxidación avanzados como la ozonización o la fotocatalisis, que facilitan la degradación y eliminación de compuestos orgánicos recalcitrantes (Tijani *et al.*, 2014). Los métodos biológicos involucran comunidades microbianas especializadas o reactores de biopelícula para degradar o transformar contaminantes orgánicos a través de vías de degradación biológica (Edwards y Kjellerup, 2013).

De forma similar, Jawad *et al.* (2016) exploran la tecnología emergente de activación de bicarbonato de peróxido de hidrógeno en el tratamiento de aguas residuales. Este enfoque innovador presenta una estrategia novedosa y prometedora para mejorar la eficiencia de eliminación de contaminantes. El principio central detrás de esta tecnología radica en la introducción de iones de bicarbonato en el proceso de tratamiento para aumentar el rendimiento del peróxido de hidrógeno como agente oxidante

(Jawad *et al.*, 2016). La activación del peróxido de hidrógeno con iones de bicarbonato ofrece varias ventajas en el tratamiento de aguas residuales. En primer lugar, los iones de bicarbonato son catalizadores que promueven la descomposición del peróxido de hidrógeno en radicales hidroxilos altamente reactivos (Jawad *et al.*, 2016). Estos radicales hidroxilos exhiben fuertes capacidades oxidativas, lo que facilita la descomposición de los contaminantes orgánicos recalcitrantes presentes en las aguas residuales (Jawad *et al.*, 2016). Los iones también mantienen el rango de pH óptimo para el proceso de activación, asegurando la máxima efectividad del peróxido de hidrógeno en la oxidación de contaminantes (Jawad *et al.*, 2016).

El uso de la activación con bicarbonato del peróxido de hidrógeno en el tratamiento de aguas residuales brinda resultados prometedores en la eliminación de contaminantes. Varios estudios han informado mejoras significativas en la degradación de diversos contaminantes, incluidos compuestos orgánicos, productos farmacéuticos y productos químicos industriales (Kan *et al.*, 2020; Urbina-Suarez *et al.*, 2023; Dong *et al.*, 2021). El potencial de oxidación mejorado que ofrece esta tecnología emergente permite una eliminación más eficiente de los contaminantes que suelen ser difíciles de degradar mediante métodos de tratamiento convencionales (Jawad *et al.*, 2016). Además, la aplicación de la activación del peróxido de hidrógeno con bicarbonato presenta un inmenso potencial para futuros avances en el tratamiento de aguas residuales. Las partes interesadas relevantes reconocen su versatilidad y compatibilidad con diferentes procesos y configuraciones de tratamiento. Este enfoque se puede integrar en los sistemas de tratamiento existentes, como procesos de oxidación avanzados o unidades de tratamiento biológico, para mejorar el rendimiento y la eficiencia de eliminación de contaminantes (Jawad *et al.*, 2016). La tecnología emergente de activación de bicarbonato de peróxido de hidrógeno ofrece mejores capacidades de eliminación de contaminantes y presenta varias ventajas adicionales. A diferencia de los agentes oxidantes convencionales, como los compuestos a base de cloro, la activación del peróxido de hidrógeno con iones de bicarbonato no genera subproductos de desinfección nocivos. Este aspecto se alinea con la creciente demanda de enfoques de tratamiento sostenibles y amigables con el medio ambiente (Urbina-Suarez *et al.*, 2023; Jawad *et al.*, 2016).

El alcance de las tecnologías emergentes supera los sectores específicos dentro del tratamiento de aguas residuales, extendiendo su impacto a las aguas residuales textiles industriales, las aguas residuales industriales mixtas y potencialmente a otras categorías (Armah *et al.*, 2020). La integración de diferentes enfoques de tratamiento, junto con el uso de materiales y procesos novedosos, está en el corazón de estas tecnologías emergentes (Armah *et al.*, 2020). Una descripción general y el alcance de las tecnologías emergentes son primordiales, debido a que sirven como base para una mayor exploración y análisis de su impacto en el tratamiento de aguas residuales y la competitividad empresarial mexicana (Armah *et al.*, 2020). Con una comprensión integral de la amplitud y el potencial de esto, las partes interesadas y los formuladores de políticas pueden evaluar críticamente su aplicabilidad, limitaciones y beneficios potenciales para abordar los desafíos de la gestión del agua y fomentar la competitividad empresarial en el sector del tratamiento de aguas residuales.

### **Avances e innovaciones clave en el tratamiento de aguas residuales**

Varios estudios discuten avances notables y tecnologías de punta y su potencial en el tratamiento de aguas residuales. Los procesos de oxidación avanzada han surgido como un avance destacado en el tratamiento de aguas residuales, ofreciendo soluciones eficientes para degradar elementos orgánicos recalcitrantes y mejorar la eficacia general del tratamiento. Deng y Zhao (2015) brindan una descripción general extensa de varios procesos de oxidación avanzada en el tratamiento de aguas residuales. Afirman que el principio detrás de los procesos de oxidación avanzada implica la generación de radicales hidroxilos altamente reactivos ( $\bullet\text{OH}$ ) u otras especies oxidantes fuertes para degradar los contaminantes orgánicos. La ozonización implica el uso de ozono ( $\text{O}_3$ ) para generar radicales  $\bullet\text{OH}$  a través de la descomposición directa del ozono o la reacción con moléculas de agua (Deng y Zhao, 2015). La ozonización permite un alto potencial de oxidación y un amplio espectro de degradación de contaminantes (Deng y Zhao, 2015). Los mecanismos, las vías de reacción y los factores que afectan la eficiencia de la fotocatalisis utilizan materiales semiconductores como el

dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) para generar radicales  $\bullet\text{OH}$  bajo irradiación de luz (Deng y Zhao, 2015). El estudio de Deng y Zhao (2015) destaca la eficacia de la fotocatalisis para degradar una amplia gama de contaminantes orgánicos en las aguas residuales. Describe el proceso Fenton, que se basa en la reacción entre el peróxido de hidrógeno y los iones ferrosos para generar radicales  $\bullet\text{OH}$ . Es fundamental controlar parámetros como el pH, la dosis de reactivos y el tiempo de reacción para optimizar la eficiencia del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales (Deng y Zhao, 2015; Armah *et al.*, 2020).

Vogelpohl y Kim (2004) también discutieron la aplicación de procesos de oxidación avanzada en el tratamiento de aguas residuales, destacando las ventajas, como su efectividad en el tratamiento de contaminantes recalcitrantes que son difíciles de eliminar a través de enfoques de tratamiento convencionales. Vogelpohl y Kim están de acuerdo con Deng y Zhao (2015) en que la ozonización implica el uso de ozono para generar radicales  $\bullet\text{OH}$ , lo que da como resultado la degradación de los contaminantes orgánicos. La versatilidad de la ozonización puede potencialmente tratar varias corrientes de aguas residuales. La oxidación fotoquímica, que utiliza la luz ultravioleta para generar especies reactivas para la degradación de los contaminantes, también puede tratar eficazmente las aguas residuales (Vogelpohl y Kim, 2004). La energía fotónica, la longitud de onda y el diseño del reactor optimizan el proceso de oxidación fotoquímica. Además, Vogelpohl y Kim (2004) describen el proceso de Fenton como un proceso de oxidación avanzada altamente efectivo que implica la reacción entre el peróxido de hidrógeno y los iones ferrosos para generar radicales  $\bullet\text{OH}$ . Los factores que influyen en el proceso de Fenton incluyen la proporción de peróxido de hidrógeno a iones ferrosos, el pH y el tiempo de reacción (Vogelpohl y Kim, 2004).

Paździor *et al.* (2019) se centran en combinar los procesos de oxidación avanzada con procesos biológicos en el tratamiento de aguas residuales de textiles industriales. Discuten el potencial de estos procesos, como la ozonización y la fotocatalisis, para degradar compuestos orgánicos recalcitrantes y mejorar la eficiencia del tratamiento. La combinación de procesos de oxidación avanzada con procesos biológicos puede mejorar el rendimiento del tratamiento (Paździor *et al.*, 2019). Los procesos de oxidación avanzada

se pueden usar como un paso de pretratamiento para descomponer compuestos orgánicos complejos, haciéndolos más aptos para el tratamiento biológico posterior (Andreottola y Foladori, 2006; Phoon *et al.*, 2020).

### **Celdas de electrólisis microbiana**

Las celdas de electrólisis microbiana han surgido como una tecnología prometedora para el tratamiento de aguas residuales y la recuperación de energía (Tak *et al.*, 2022). Tak *et al.* (2022) se centran en las tecnologías emergentes para la producción de hidrógeno a partir de aguas residuales, incluidas las celdas de electrólisis microbiana, las celdas de combustible microbianas y la fermentación oscura. Estas tecnologías utilizan microorganismos para descomponer la materia orgánica en las aguas residuales y producir gas hidrógeno como subproducto. Las celdas de electrólisis microbiana emplean un proceso electroquímico en el que los microorganismos en la cámara del ánodo oxidan compuestos orgánicos y liberan electrones, que luego se transfieren al cátodo, generando gas hidrógeno. Las celdas de combustible microbianas también dependen de la actividad microbiana, pero se enfocan principalmente en generar electricidad en lugar de hidrógeno. La fermentación oscura implica la descomposición anaeróbica de la materia orgánica por parte de microorganismos, produciendo hidrógeno como producto final primario (Tak *et al.*, 2022).

Anwer *et al.* (2020) enfatizan el potencial de las celdas de electrólisis microbiana en el tratamiento de aguas residuales. Las reacciones electroquímicas únicas dentro de las celdas de electrólisis microbiana permiten la degradación simultánea de contaminantes orgánicos y la generación de electricidad o subproductos valiosos. Este proceso electroquímico es impulsado por la interacción entre microorganismos y electrodos, formando una relación simbiótica que utiliza las actividades metabólicas de los microorganismos para el tratamiento de aguas residuales (Anwer *et al.*, 2020). Escapa *et al.* (2016) brindan una revisión en profundidad de las celdas de electrólisis microbiana, centrándose en la producción de hidrógeno y la recuperación de energía. La transición de la tecnología de las celdas de electrólisis microbiana del laboratorio a las plantas piloto y más allá es parte

de los avances en la ampliación del sistema para aplicaciones prácticas. Las comunidades microbianas y las interacciones electroquímicas con los electrodos de ánodo y cátodo son fundamentales en el tratamiento de aguas residuales.

Kadier *et al.* (2016) exploran a fondo los avances recientes y los desafíos emergentes en las celdas de electrólisis microbiana para la producción microbiana de hidrógeno y productos químicos de valor agregado. Analizan los factores clave que influyen en el rendimiento de las celdas de electrólisis microbiana como la selección del sustrato, el material del electrodo y el diseño del reactor. También abordan los desafíos asociados con la ampliación de estas celdas para aplicaciones comerciales y proponen estrategias para mejorar la eficiencia y la estabilidad del sistema. Un desafío importante son los altos costos operativos y de capital de los sistemas de estas celdas a gran escala. Existe la necesidad de optimizar el diseño y la construcción de reactores de celdas de electrólisis microbiana para reducir los costos y mantener el rendimiento. La gestión y el tratamiento de grandes volúmenes de aguas residuales plantea desafíos logísticos, lo que requiere estrategias eficientes para integrar las celdas en la infraestructura de tratamiento de aguas residuales existente (Kadier *et al.*, 2016). Otro desafío crítico es la selección y optimización de los materiales de los electrodos. Kadier *et al.* (2016) discutieron la importancia de los materiales de electrodos que exhiben alta actividad catalítica, estabilidad y rentabilidad. Exploran estrategias para mejorar el rendimiento de las celdas mediante la modificación de las superficies de los electrodos y el desarrollo de nuevos materiales para electrodos con propiedades mejoradas. Mantener una comunidad microbiana estable es crucial para el tratamiento sostenido y eficiente de aguas residuales en las celdas de electrólisis microbiana. El mantenimiento de la diversidad y actividad microbiana durante períodos prolongados está asociado con desafíos, particularmente en composiciones de aguas residuales complejas y fluctuantes. Varias estrategias, como las técnicas de inmovilización microbiana y el desarrollo de consorcios microbianos robustos, pueden mejorar la estabilidad y el rendimiento de la tecnología de tratamiento de aguas residuales (Kadier *et al.*, 2016; Armah *et al.*, 2020).

### ***Biorreactores de membrana***

Los biorreactores de membrana han ganado una atención significativa como tecnología innovadora que combina procesos de tratamiento biológico con filtración por membrana. Dohare y Trivedi (2014) revisan exhaustivamente las ventajas de los biorreactores de membrana, incluida la mejora de la calidad de los efluentes, la huella reducida y el potencial para la reutilización del agua (Dohare y Trivedi, 2014). En su revisión, Tetteh *et al.* (2019) analizan el tratamiento de aguas y aguas residuales para su reutilización y generación de energía, centrándose en las tecnologías emergentes. Las tecnologías de membrana son cruciales para el tratamiento sostenible del agua y la recuperación de recursos (Tetteh *et al.*, 2019). La integración de procesos de tratamiento avanzados garantiza efluentes de alta calidad al mismo tiempo que aprovecha la energía de las aguas residuales (Obotey *et al.*, 2020). Dereli *et al.* (2021) se centran en el tratamiento conjunto de lixiviados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, abordando problemas críticos y tecnologías emergentes. Afirman que los biorreactores de membrana permiten un tratamiento conjunto eficaz y sostenible de los lixiviados junto con las aguas residuales municipales. La integración de tecnologías emergentes para mejorar la eficiencia y el desempeño ambiental de las plantas de tratamiento de aguas residuales es crucial (Dereli *et al.*, 2021).

### ***Biorreactores de membrana osmótica***

Los biorreactores de membrana osmótica avanzan aún más en el tratamiento de aguas residuales basado en membranas (Wang *et al.*, 2016). Wang *et al.* (2016) afirman que los biorreactores de membrana osmótica pueden lograr efluentes de alta calidad y recuperación de energía a través de procesos osmóticos. Estos biorreactores combinan los principios de filtración por membrana y ósmosis para mejorar el rendimiento del tratamiento de aguas residuales. Una membrana semipermeable con propiedades específicas crea un gradiente de concentración en estos sistemas, lo que permite que el agua penetre en la membrana mientras retiene los solutos y los sólidos en suspensión. Los biorreactores de membrana osmótica pueden eliminar eficaz-

mente los contaminantes, incluida la materia orgánica disuelta, los nutrientes y los microcontaminantes, mejorando la calidad de los efluentes (Wang *et al.*, 2016). El proceso osmótico dentro de los biorreactores de membrana osmótica puede facilitar la recuperación de recursos valiosos, como energía o nutrientes, al aprovechar la diferencia de potencial osmótico entre las soluciones de alimentación y extracción (Wang *et al.*, 2016). Cornelissen *et al.* (2011) brindan más información sobre el concepto innovador de los biorreactores de membrana osmótica para la reutilización de aguas residuales. Discuten el diseño, la operación y los beneficios potenciales de estos, centrándose en la eliminación de materia orgánica, nutrientes y patógenos. Estos sistemas se pueden integrar con otros procesos de tratamiento, como la digestión anaeróbica, para mejorar la recuperación de recursos.

### **Marco regulatorio de tecnologías emergentes en el tratamiento de aguas residuales en México**

El marco legal de México con respecto a la gestión de aguas residuales está conformado por la Ley del Medio Ambiente de México, que incluye disposiciones que enfatizan la importancia de las prácticas sostenibles de tratamiento de aguas residuales (González, 2013). La ley reconoce la necesidad de proteger los recursos hídricos y promover tecnologías amigables con el medio ambiente en las instalaciones de tratamiento de aguas residuales (González, 2013). La ley fomenta el uso de tecnologías respetuosas con el medio ambiente y la adopción de las mejores técnicas en las instalaciones de tratamiento de aguas residuales. Los estudios de casos de diferentes regiones de México brindan información sobre la implementación y la efectividad del marco legal, destacando la importancia de las regulaciones integrales y la intervención del gobierno para impulsar la política de tratamiento de aguas residuales. Al integrar prácticas sustentables en su marco legal, México se esfuerza por proteger sus recursos hídricos y promover el manejo ambientalmente racional de las aguas residuales (González, 2013).

Un estudio de caso realizado en Baja California Sur por Valdivia Alvarado *et al.* (2021) proporciona información sobre el marco legal de México para la gestión de aguas residuales. El estudio examina el contexto norma-

tivo específico de la región y destaca la importancia de las disposiciones legales para garantizar un tratamiento eficaz de las aguas residuales. Enfatiza la necesidad de regulaciones integrales que aborden varios aspectos de la gestión de aguas residuales, incluidos los estándares de tratamiento, los requisitos de monitoreo y los procesos de obtención de permisos (Valdivia Alvarado *et al.*, 2021). Además, Casiano Flores *et al.* (2019) compararon tres casos subnacionales en el centro de México para analizar el papel del estado en el estímulo de la política de tratamiento de aguas residuales. El estudio destaca la importancia de la intervención del gobierno para impulsar la adopción de prácticas de tratamiento de aguas residuales. Las regulaciones e incentivos efectivos que proporciona el estado pueden fomentar la implementación de tecnologías sostenibles de tratamiento de aguas residuales (Casiano Flores *et al.*, 2019).

México ha logrado avances significativos en el desarrollo de un marco regulatorio integral para el tratamiento de aguas residuales para garantizar la protección ambiental y la gestión sostenible de los recursos hídricos (Wilder, 2010). Aplicadas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) y la Comisión Nacional del Agua (Conagua), estas normas cubren una amplia gama de aspectos del tratamiento y descarga de aguas residuales (Wilder, 2010). En esta discusión, se profundiza en los detalles del marco regulatorio de México para el tratamiento de aguas residuales, extrayendo información de estudios relevantes realizados en el país (Wilder, 2010). La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente sirve como marco legal principal de México para la gestión ambiental (Silva, 2019). Esta ley establece los principios y lineamientos para la protección ambiental en varios sectores, incluido el tratamiento de aguas residuales. Establece las bases para desarrollar y hacer cumplir regulaciones específicas relacionadas con los estándares de calidad del agua, las evaluaciones de impacto ambiental y los permisos para la descarga de aguas residuales (Tabla-Vázquez *et al.*, 2020). Además, el compromiso de México con los acuerdos y protocolos ambientales internacionales también da forma a su enfoque regulatorio para el tratamiento de aguas residuales. El compromiso de México con la protección del medio ambiente y la gestión sostenible del agua es evidente a través de la ratificación de acuerdos internacionales como la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

(CMNUCC) y la Convención Ramsar sobre los Humedales. Estos acuerdos influyen significativamente en las políticas y regulaciones ambientales de México, dando forma al enfoque del país para el tratamiento de aguas residuales y enfatizando la importancia de la conservación y las prácticas sostenibles (Tabla-Vázquez *et al.*, 2020).

La CMNUCC tiene como objetivo abordar el cambio climático y sus impactos a través de la cooperación internacional. Al ratificar esta convención, México demuestra su compromiso con la mitigación del cambio climático y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Ford *et al.*, 2016). Los principios de desarrollo sostenible e integridad ambiental de la CMNUCC se alinean con los objetivos de México de proteger los recursos hídricos y adoptar tecnologías sostenibles de tratamiento de aguas residuales (Ford *et al.*, 2016). La Convención de Ramsar sobre los Humedales es un tratado internacional centrado en la conservación y el uso racional de los humedales. Los humedales son vitales para la purificación del agua y el funcionamiento de los ecosistemas, lo que los hace críticos para el tratamiento de aguas residuales y la gestión del agua. Al ratificar esta convención, México reconoce la importancia ecológica de los humedales y la necesidad de proteger estos hábitats para recursos hídricos sostenibles (Davidson, 2018).

La influencia de estos acuerdos internacionales en las políticas y regulaciones ambientales de México es destacada por Tabla-Vázquez *et al.* (2020). El estudio analiza el tratamiento de aguas residuales en México y enfatiza la importancia de los acuerdos internacionales en la configuración del enfoque del país para la gestión del agua. Los principios y lineamientos delineados en estos acuerdos, incluyendo el desarrollo sustentable, la conservación y el uso racional de los recursos naturales, sirven como base para las políticas ambientales de México relacionadas con el tratamiento de aguas residuales (Tabla-Vázquez *et al.*, 2020). La ratificación de acuerdos internacionales por parte de México demuestra su compromiso con los objetivos ecológicos globales y refuerza la importancia de la gestión sostenible del agua en el país (Tabla-Vázquez *et al.*, 2020). Estos acuerdos brindan un marco para abordar los desafíos ambientales y guiar el desarrollo de regulaciones y políticas efectivas para el tratamiento de aguas residuales. Al incorporar los principios de estos acuerdos internacionales en su marco re-

gulatorio, México asegura que sus prácticas de tratamiento de aguas residuales se alineen con los objetivos de sustentabilidad global (Tabla-Vázquez *et al.*, 2020).

En México, las regulaciones específicas para las tecnologías de tratamiento de aguas residuales son cruciales para garantizar una gestión eficaz y sostenible de las aguas residuales. Estas regulaciones se enfocan en establecer estándares y umbrales para las descargas de aguas residuales, promover tecnologías ambientalmente amigables y fomentar la adopción de las mejores técnicas disponibles. Varios estudios brindan información sobre estas regulaciones y sus implicaciones para las tecnologías de tratamiento de aguas residuales en México. La encuesta de Gutiérrez (2008) investiga los estándares y umbrales para las descargas de aguas residuales en México. El autor destaca la importancia de cumplir con la Norma Oficial Mexicana (NOM) NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales (Gutiérrez, 2008). Parámetros como la demanda bioquímica de oxígeno, la demanda química de oxígeno y los sólidos suspendidos totales están regulados para proteger los recursos hídricos y mantener la calidad ambiental (Gutiérrez, 2008). El cumplimiento de estas normas asegura que las tecnologías de tratamiento de aguas residuales cumplan con los criterios de calidad exigidos para su vertido (Gutiérrez, 2008).

Las instalaciones de tratamiento de aguas residuales en México deben adoptar tecnologías y prácticas apropiadas para cumplir con estas regulaciones (Valladares Linares *et al.*, 2019). Valladares Linares *et al.* (2019) destacan la ampliación de un sistema de pila de celdas de combustible microbianas para el tratamiento de aguas residuales residenciales. Este estudio demuestra la aplicación de una tecnología innovadora que combina procesos biológicos y generación de electricidad en un modo de operación continuo. Valladares Linares *et al.* (2019) muestran el potencial de la tecnología de celdas de combustible microbianas para el tratamiento descentralizado de aguas residuales mientras se cumplen los requisitos reglamentarios para la calidad de los efluentes. También se exploran otras tecnologías de tratamiento en el cumplimiento normativo además de las celdas de combustible microbianas. Ramírez-Sosa *et al.* (2013) investigan la determinación de compuestos orgánicos en lixiviados de vertederos tratados por adsorción

Fenton. El estudio se centra en la eliminación de contaminantes orgánicos mediante una combinación de procesos de oxidación avanzados y técnicas de adsorción. Al evaluar la eficiencia del proceso de tratamiento, Ramírez-Sosa *et al.* (2013) abordan la importancia de cumplir con los estándares regulatorios para contaminantes orgánicos en el tratamiento de aguas residuales.

La ley ambiental y las reglamentaciones relacionadas son cruciales para orientar las prácticas de gestión de aguas residuales en el país. Estas leyes promueven el desarrollo sostenible y abogan por la adopción de las mejores técnicas disponibles en las instalaciones de tratamiento de aguas residuales (Valdivia Alvarado *et al.*, 2021; Tabla-Vázquez *et al.*, 2020; Silva, 2019; González, 2013; Wilder, 2010; Gutiérrez, 2008).

Al fomentar el uso de tecnologías amigables con el medio ambiente, México busca minimizar el impacto ambiental de las descargas de aguas residuales y garantizar la protección de los recursos hídricos. El examen de las regulaciones específicas para las tecnologías de tratamiento de aguas residuales destaca el compromiso de México con la protección del medio ambiente y el desarrollo sustentable. México tiene como objetivo controlar la contaminación y salvaguardar los recursos hídricos mediante la aplicación de estándares y umbrales para las descargas de aguas residuales (Valdivia Alvarado *et al.*, 2021; Tabla-Vázquez *et al.*, 2020; Silva, 2019; González, 2013; Wilder, 2010; Gutiérrez, 2008).

La adopción de tecnologías innovadoras, como las celdas de combustible microbianas y los procesos de oxidación avanzada, destaca los esfuerzos de México para explorar e implementar alternativas sostenibles de tratamiento de aguas residuales que cumplan con los requisitos reglamentarios (Valladares Linares *et al.*, 2019).

### **Implicaciones del cumplimiento normativo en la competitividad empresarial mexicana**

El impacto de la regulación de tecnologías avanzadas de tratamiento de aguas residuales, tales como procesos de oxidación avanzada, celdas de electrolisis microbiana, biorreactores de membrana y biorreactores de mem-

brana osmótica, en la competitividad empresarial mexicana es un aspecto importante para considerar (Wilder, 2010; Silva, 2019). Estas tecnologías pueden revolucionar potencialmente las prácticas de tratamiento de aguas residuales al mejorar la eficiencia del tratamiento, lograr efluentes de mayor calidad y promover la gestión sostenible del agua (Wilder, 2010; Silva, 2019). Sin embargo, el marco regulatorio que rodea a estas tecnologías puede influir en su adopción y, en consecuencia, en la competitividad de las empresas (Wilder, 2010; Silva, 2019). La regulación de tecnologías avanzadas de tratamiento de aguas residuales puede tener implicaciones positivas y negativas para las empresas mexicanas. Por un lado, las regulaciones estrictas pueden aumentar los costos de cumplimiento para las empresas, ya que necesitan invertir en implementar y operar estas tecnologías (Wilder, 2010; Silva, 2019). El cumplimiento de los requisitos reglamentarios puede implicar importantes inversiones de capital, como la instalación de equipos especializados, actualizaciones tecnológicas y ajustes operativos. Estas cargas y costos financieros pueden afectar significativamente a las pequeñas y medianas empresas (PyMES), que pueden tener recursos y capacidad limitados para adoptar estas tecnologías (Wilder, 2010; Silva, 2019). Sin embargo, estas tecnologías pueden ofrecer beneficios significativos, como una mejor eficiencia del tratamiento, costos operativos reducidos y un desempeño ambiental mejorado (Wilder, 2010; Silva, 2019). Cumpliendo con las regulaciones e implementando estas tecnologías, las empresas pueden fortalecer sus procesos de tratamiento de aguas residuales, lo que conduce a efluentes de mayor calidad, menor contaminación y mejor utilización de los recursos (Wilder, 2010; Silva, 2019).

El desarrollo e implementación de estas tecnologías de tratamiento de aguas residuales puede estimular la innovación y fomentar el crecimiento de un sector especializado en la industria del tratamiento de aguas residuales (Wilder, 2010; Silva, 2019). Esto puede crear nuevas oportunidades comerciales, impulsar el crecimiento económico y generar empleo en campos relacionados, como la fabricación, instalación y mantenimiento de tecnología (Wilder, 2010; Silva, 2019). Las empresas que adoptan y ofrecen rápidamente estas tecnologías avanzadas pueden obtener una ventaja competitiva al diferenciarse de sus competidores y posicionarse como líderes en la industria (Garrone *et al.*, 2018). El impacto económico de la regulación

tecnológica en las empresas mexicanas en el contexto del tratamiento de aguas residuales es una consideración esencial. El cumplimiento normativo a menudo implica costos comerciales, incluidas inversiones en nuevas tecnologías, actualizaciones de equipos y ajustes operativos. Estas cargas financieras pueden afectar la competitividad de las empresas, especialmente las PyMES que pueden tener recursos limitados. Varios estudios destacan las implicaciones económicas de la regulación tecnológica en las empresas del sector de tratamiento de aguas residuales en México (Valdivia Alvarado *et al.*, 2021; Casiano Flores *et al.*, 2019; Gutiérrez, 2008). Por ejemplo, Valdivia Alvarado *et al.* (2021) analizaron el marco legal en materia de gestión de aguas residuales. El cumplimiento de las regulaciones de aguas residuales requiere inversiones comerciales sustanciales, lo que puede plantear desafíos, especialmente para las PyMES con capacidades financieras limitadas (Valdivia Alvarado *et al.*, 2021).

Casiano Flores *et al.* (2019) también evaluaron tres casos subnacionales en el centro de México para examinar el papel del estado en el estímulo de la política de tratamiento de aguas residuales. El estudio encontró que el cumplimiento normativo a menudo implica cargas financieras para las empresas, particularmente en lo que respecta a la adopción de tecnología y los ajustes operativos, lo que puede afectar su competitividad (Casiano Flores *et al.*, 2019). Sin embargo, es imperativo tener en cuenta que el cumplimiento normativo también puede crear oportunidades económicas para las empresas en el sector del tratamiento de aguas residuales. Al promover prácticas sostenibles de tratamiento de aguas residuales, las regulaciones impulsan el desarrollo y la adopción de tecnologías innovadoras. Esto, a su vez, abre nuevos mercados y perspectivas comerciales para las empresas especializadas en soluciones de tratamiento de aguas residuales. El cumplimiento de las normas ambientales puede mejorar la reputación de una entidad y fortalecer su competitividad en el mercado (Casiano Flores *et al.*, 2019). Los acuerdos y protocolos internacionales ratificados por México, como la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y la Convención Ramsar sobre Humedales, influyen en las políticas y normas ambientales del país (Tabla-Vázquez *et al.*, 2020). El cumplimiento de estos acuerdos enfatiza la importancia de la gestión y conservación sostenible del agua, promoviendo la reputación de las empresas que observan prácticas

de tratamiento de aguas residuales respetuosas con el medio ambiente (Tabla-Vázquez *et al.*, 2020).

Además, Gutiérrez (2008) discutió los estándares y umbrales para las descargas de aguas residuales en México, mostrando el papel de las regulaciones en la protección de los recursos hídricos. El cumplimiento normativo es fundamental para mantener el equilibrio ecológico y la protección del medio ambiente, contribuyendo al desarrollo sostenible y la competitividad de las empresas en el tratamiento de aguas residuales (Gutiérrez, 2008). Por lo tanto, si bien el cumplimiento normativo en el tratamiento de aguas residuales puede imponer cargas financieras a las empresas, estudios y marcos legales destacan la oportunidades económicas y beneficios de adoptar prácticas sostenibles de tratamiento de aguas residuales. El cumplimiento de las normas ambientales mejora la reputación de una empresa y abre nuevos mercados y perspectivas comerciales, mejorando en última instancia la competitividad en el panorama empresarial mexicano.

Las medidas regulatorias son fundamentales para promover la innovación y la competitividad en el tratamiento de aguas residuales. Cuando las regulaciones equilibran la protección ambiental y las consideraciones económicas, crean un entorno propicio para que las empresas innoven (Ouyang, Li y Du, 2020). Las reglas transparentes y predecibles brindan a las empresas la confianza para invertir en investigación y desarrollo, lo que conduce a avances tecnológicos en el tratamiento de aguas residuales (Ouyang, Li y Du, 2020). Por ejemplo, las regulaciones pueden establecer objetivos o estándares específicos para la eliminación de contaminantes o la calidad de los efluentes, lo que impulsa a las empresas a desarrollar soluciones innovadoras para cumplir con estos requisitos (Silva, 2019). Al establecer objetivos y pautas claros, las regulaciones brindan un marco para que las empresas centren sus esfuerzo de investigación y desarrollo (I+D) en las tecnologías de tratamiento de aguas residuales para que sean más eficientes, rentables y sostenibles (Silva, 2019). Los marcos regulatorios que fomentan la colaboración de las partes interesadas y el intercambio de conocimientos pueden estimular significativamente la innovación y la competitividad (Silva, 2019). Cuando las asociaciones de la industria, las instituciones de investigación y las agencias gubernamentales trabajan juntas pueden aunar recursos, compartir experiencia y fomentar ecosistemas de innovación (Silva, 2019). Esta colaboración

permite el intercambio de información sobre tecnologías emergentes, mejores prácticas y hallazgos de investigación, lo que acelera el desarrollo y la adopción de soluciones de vanguardia en el tratamiento de aguas residuales (Silva, 2019). El Consejo Nacional de Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) promueve la innovación y la competitividad financiando y apoyando proyectos de I+D en diversos sectores, incluido el tratamiento de aguas residuales. Conahcyt fomenta la colaboración entre la academia, la industria y el gobierno a través de programas y subvenciones, lo que facilita el intercambio de conocimientos y la transferencia de tecnología (Silva Payró *et al.*, 2016). Las medidas regulatorias pueden incentivar a las empresas a adoptar tecnologías emergentes proporcionando apoyo financiero o incentivos fiscales.

## Conclusiones

Esta investigación destaca la importancia de los marcos regulatorios en la configuración de la competitividad de las empresas mexicanas en el sector de tratamiento de aguas residuales. El estudio enfatiza la necesidad de un entorno regulatorio coherente y bien diseñado que equilibre la sostenibilidad ambiental y el crecimiento económico. Las regulaciones claras y predecibles juegan un papel vital en el fomento de la innovación, la atracción de inversiones y la posibilidad de que las empresas sigan siendo competitivas en el mercado en evolución. Los hallazgos demuestran que las tecnologías emergentes en el tratamiento de aguas residuales ofrecen oportunidades considerables para que las empresas mexicanas mejoren su eficiencia, reduzcan costos y cumplan con estándares ambientales cada vez más estrictos. Sin embargo, es crucial equilibrar los requisitos reglamentarios y la flexibilidad necesaria para que las empresas innoven y se adapten a las condiciones cambiantes del mercado. La colaboración y el diálogo entre los formuladores de políticas, los organismos reguladores y las empresas son esenciales para desarrollar regulaciones efectivas que promuevan la innovación, faciliten el crecimiento de la industria y aseguren la sostenibilidad ambiental. Los encargados de la formulación de políticas y los organismos reguladores deben apuntar a optimizar y simplificar el proceso regulatorio, asegurando que las regulaciones sean transparentes, consistentes y respalden los avances tecnológicos.

## Bibliografía

- Andreottola, G., y Foladori, P. (2006). A review and assessment of emerging technologies for the minimization of excess sludge production in wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 41(9), 1853-1872. <https://doi.org/10.1080/10934520600779026>
- Anwer, A.H., Khan, M.D., Khan, M.Z., y Joshi, R. (2020). Microbial Electrochemical Cell: An Emerging Technology for Waste Water Treatment and Carbon Sequestration. En M. Oves, M. Ansari, M. Zain Khan, M. Shahadat, I. M.I. Ismail (Eds), *Modern Age Waste Water Problems: Solutions Using Applied Nanotechnology* (pp. 339–360). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-08283-3\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-08283-3_17)
- Armah, E. K., Chetty, M., Adedeji, J. A., Kukwa, D. T., Mutsvene, B., Shabangu, K. P., y Bakare, B. F. (2020). Emerging trends in wastewater treatment technologies: the current perspective. *Promising Techniques for Wastewater Treatment and Water Quality Assessment*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93898>
- Casiano Flores, C., Özerol, G., Bressers, H., Kuks, S., Edelenbos, J., y Gleason, A. (2019). The state as a stimulator of wastewater treatment policy: A comparative assessment of three subnational cases in central Mexico. *Journal of Environmental Policy y Planning*, 21(2), 134-152. <https://doi.org/10.1080/1523908X.2019.1566060>
- Cornelissen, E. R., Harmsen, D., Beerendonk, E. F., Qin, J. J., Oo, H., De Korte, K. F., y Kappelhof, J. W. M. N. (2011). The innovative osmotic membrane bioreactor (OMBR) for reuse of wastewater. *Water Science and Technology*, 63(8), 1557-1565. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.206>
- Davidson, N. C. (2018). Ramsar convention on wetlands: scope and implementation. En C. M. Finlayson, M. Everard, K. Irvine, R. J. McInnes, B. A. Middleton, A. A. Van Dam y N. C. Davidson (Eds.), *The Wetland Book: I: Structure and Function, Management, and Methods* (pp. 451-458). Springer.
- Deng, Y., y Zhao, R. (2015). Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment. *Current Pollution Reports*, 1, 167-176. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0015-z>
- Dereli, R. K., Clifford, E., y Casey, E. (2021). Co-treatment of leachate in municipal wastewater treatment plants: Critical issues and emerging technologies. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(11), 1079-1128. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1745014>
- Dohare, D., y Trivedi, R. (2014). A review on membrane bioreactors: an emerging technology for industrial wastewater treatment. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(12), 226-236. <https://shorturl.at/fCNW0>
- Dong, H., Feng, X., Guo, Y., Jia, Z., Zhang, X., Xu, A., y Li, X. (2021). Bicarbonate activated hydrogen peroxide with cobalt nanoparticles embedded in nitrogen-doped carbon nanotubes for highly efficient organic dye degradation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 630, 127645. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127645>
- Edwards, S. J., y Kjellerup, B. V. (2013). Applications of biofilms in bioremediation and biotransformation of persistent organic pollutants, pharmaceuticals/personal care

- products, and heavy metals. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97, 9909-9921. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5216-z>
- Escapa, A., Mateos, R., Martínez, E. J., y Blanes, J. (2016). Microbial electrolysis cells: An emerging technology for wastewater treatment and energy recovery. From laboratory to pilot plant and beyond. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 942-956. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.029>
- Ford, J., Maillet, M., Pouliot, V., Meredith, T., Cavanaugh, A., y IHACC Research Team. (2016). Adaptation and Indigenous peoples in the United Nations Framework Convention on Climate Change. *Climatic Change*, 139, 429-443. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1820-0>
- Garrone, P., Grilli, L., Groppi, A., y Marzano, R. (2018). Barriers and drivers in the adoption of advanced wastewater treatment technologies: a comparative analysis of Italian utilities. *Journal of Cleaner Production*, 171, S69-S78. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.018>
- González, R. C. (2013). Punitive damages and their alternatives in Mexican environmental law. *Mexican law review*, 6(1), 45-74. [https://doi.org/10.1016/S1870-0578\(16\)30019-1](https://doi.org/10.1016/S1870-0578(16)30019-1)
- Gutiérrez, C. (2008). Standards and Thresholds for Waste Water Discharges in Mexico. En M. Schmidt, J. Glasson, L. Emmelin y H. Helbron (Eds.), *Standards and Thresholds for Impact Assessment. Environmental Protection in the European Union* (113-124). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-31141-6\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-31141-6_9)
- Jawad, A., Chen, Z., y Yin, G. (2016). Bicarbonate activation of hydrogen peroxide: A new emerging technology for wastewater treatment. *Chinese Journal of Catalysis*, 37(6), 810-825. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(15\)61100-7](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(15)61100-7)
- Kadier, A., Kalil, M. S., Abdeshahian, P., Chandrasekhar, K., Mohamed, A., Azman, N. F., Logroño, W., Simayi, Y., y Hamid, A. A. (2016). Recent advances and emerging challenges in microbial electrolysis cells (MECs) for microbial production of hydrogen and value-added chemicals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 501-525. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.017>
- Kan, H., Soklun, H., Yang, Z., Wu, R., Shen, J., Qu, G., y Wang, T. (2020). Purification of dye wastewater using bicarbonate activated hydrogen peroxide: Reaction process and mechanisms. *Separation and Purification Technology*, 232, 115974. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115974>
- Krishnamoorthy, S., Selvasembian, R., Rajendran, G., Raja, S., y Wintgens, T. (2019). Emerging technologies for wastewater treatment and reuse. *Water Science and Technology*, 80(11), 3-4. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.088>
- Martínez-Orgániz, Á., Herrera-Navarrete, R., Pineda-Mora, D., Del Carmen-Niño, V., y Balbuena-Hernández, R. I. (2018). Reuse of Treated Water from Municipal Treatment Plants in Mexico. <https://doi.org/10.5772/intechopen.107204>
- Nidheesh, P. V., Ravindran, V., Gopinath, A., y Kumar, M. S. (2022). Emerging technologies for mixed industrial wastewater treatment in developing countries: An overview. *Environmental Quality Management*, 31(3), 121-141. <https://doi.org/10.1002/tqem.21762>

- Obotey Ezugbe, E., y Rathilal, S. (2020). Membrane technologies in wastewater treatment: a review. *Membranes*, 10(5), 89. [https://doi.org/ https://doi.org/10.3390%2Fmembranes10050089](https://doi.org/10.3390%2Fmembranes10050089)
- Ouyang, X., Li, Q., y Du, K. (2020). How does environmental regulation promote technological innovations in the industrial sector? Evidence from Chinese provincial panel data. *Energy Policy*, 139, 111310. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111310>
- Paździor, K., Bilińska, L., y Ledakowicz, S. (2019). A review of the existing and emerging technologies in the combination of AOPs and biological processes in industrial textile wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 376, 120597. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.12.057>
- Phoon, B. L., Ong, C. C., Saheed, M. S. M., Show, P. L., Chang, J. S., Ling, T. C., Lam, S. S., y Juan, J. C. (2020). Conventional and emerging technologies for removal of antibiotics from wastewater. *Journal of hazardous materials*, 400, 122961. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122961>
- Ramírez-Sosa, D. R., Castillo-Borges, E. R., Méndez-Novelo, R. I., Sauri-Riancho, M. R., Barceló-Quintal, M., y Marrufo-Gómez, J. M. (2013). Determination of organic compounds in landfill leachates treated by Fenton-Adsorption. *Waste Management*, 33(2), 390-395. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.07.019>
- Rashid, R., Shafiq, I., Akhter, P., Iqbal, M. J., y Hussain, M. (2021). A state-of-the-art review on wastewater treatment techniques: the effectiveness of adsorption method. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 9050-9066. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12395-x>
- Ronderos-Lara, J. G., Saldarriaga-Noreña, H., Reyes-Romero, P. G., Chávez-Almazán, L. A., Vergara-Sánchez, J., Murillo-Tovar, M. A., y Torres-Segundo, C. (2020). Emerging Compounds in Mexico: Challenges for Their Identification and Elimination in Wastewater. En A. Nuro (Ed.), *Emerging Contaminants*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93909>
- Silva Payró, M. P., García Martínez, V., y Aquino Zúñiga, S. P. (2016). Growth challenges of the national system of researchers (SNI) of the national council of science and technology (conacyt) in Mexico. *Actualidades Investigativas en Educación*, 16(2), 370-394. <http://dx.doi.org/10.15517/aie.v16i2.23931>
- Silva, J. A. (2019). Environmental Responsibility in Mexico. *Revista espacios*, 40(30). <https://www.revistaespacios.com/a19v40n30/19403018.html>
- Tabla-Vázquez, C. G., Chávez-Mejía, A. C., Orta Ledesma, M. T., y Ramírez-Zamora, R. M. (2020). Wastewater Treatment in Mexico. En J. de Anda Sánchez (Ed.), *Water Resources of Mexico* (pp. 133-155). Springer International Publishing
- Tak, S. S., Shetye, O., Muley, O., Jaiswal, H., y Malik, S. N. (2022). Emerging technologies for hydrogen production from wastewater. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(88), 37282-37301. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.225>
- Tetteh, E. K., Rathilal, S., Chetty, M., Armah, E. K., y Asante-Sackey, D. (2019). Treatment of water and wastewater for reuse and energy generation-emerging technologies. En M. Eyvaz (Ed.), *Water and wastewater treatment* (53-80). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.84474>

- Tijani, J. O., Fatoba, O. O., Madzivire, G., y Petrik, L. F. (2014). A review of combined advanced oxidation technologies for the removal of organic pollutants from water. *Water, Air, y Soil Pollution*, 225, 1-30. <https://doi.org/10.1007/s11270-014-2102-y>
- Urbina-Suarez, N. A., Rivera-Cacedo, C., González-Delgado, Á. D., Barajas-Solano, A. F., y Machuca-Martínez, F. (2023). Bicarbonate-Hydrogen Peroxide System for Treating Dyeing Wastewater: Degradation of Organic Pollutants and Color Removal. *Toxics*, 11(4), 366. <https://doi.org/10.3390/toxics11040366>
- Valdivia Alvarado, A. T., Gámez, A. E., Beltrán Morales, L. F., y Ortega-Rubio, A. (2021). Mexico's Legal Framework Regarding Wastewater Management: A Case Study of Baja California Sur. *Mexican law review*, 13(2), 115-150. <https://doi.org/10.22201/ij.24485306e.2021.2.15337>
- Valladares Linares, R., Domínguez-Maldonado, J., Rodríguez-Leal, E., Patrón, G., Castillo-Hernández, A., Miranda, A., Díaz Romero, D., Moreno-Cervera, R., Camara-chale, G., Borroto, C. G. y Alzate-Gaviria, L. (2019). Scale up of microbial fuel cell stack system for residential wastewater treatment in continuous mode operation. *Water*, 11(2), 217. <https://doi.org/10.3390/w11020217>
- Vogelpohl, A., y Kim, S. M. (2004). Advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 10(1), 33-40. <https://www.cheric.org/PDF/JIEC/IE10/IE10-1-0033.pdf>
- Wang, X., Chang, V. W., y Tang, C. Y. (2016). Osmotic membrane bioreactor (OMBR) technology for wastewater treatment and reclamation: Advances, challenges, and prospects for the future. *Journal of Membrane Science*, 504, 113-132. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.01.010>
- Wilder, M. (2010). Water governance in Mexico: political and economic apertures and a shifting state-citizen relationship. *Ecology and Society*, 15(2). <http://www.jstor.org/stable/26268136>
- Younas, F., Mustafa, A., Farooqi, Z. U. R., Wang, X., Younas, S., Mohy-Ud-Din, W., Ashir Hameed, M., Mohsin Abrar, M., Maitlo, A. A., Noreen, S., y Hussain, M. M. (2021). Current and Emerging Adsorbent Technologies for Wastewater Treatment: Trends, Limitations, and Environmental Implications. *Water*, 13(2), 215. <https://doi.org/10.3390/w13020215>