



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v10i2.3812>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Soluciones tecnológicas para el Tratamiento de agua. Una aproximación desde las políticas públicas

Technological solutions for water treatment. An approach from public policies

Soluções tecnológicas para tratamento de água. Uma abordagem a partir de políticas públicas

Karla Lilibeth Cevallos Angulo ¹
karly_memo@hotmail.com
<https://orcid.org/0009-0004-3990-4346>

Correspondencia: karly_memo@hotmail.com

***Recibido:** 27 de marzo de 2024 ***Aceptado:** 24 de abril de 2024 * **Publicado:** 07 de mayo de 2024

- I. Ingeniera Química en la Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Magister en Gestión de Riesgos Mención en Prevención de Riesgos Laborales en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador.

Resumen

La crisis mundial del agua ha alcanzado proporciones alarmantes, exigiendo soluciones integrales y eficaces para garantizar un suministro seguro y sostenible de agua potable. Este artículo examina detalladamente el contexto actual de la crisis del agua a nivel global, destacando la urgencia de acciones concertadas para abordar este desafío apremiante. Se analiza la evolución histórica de las tecnologías de tratamiento de agua, desde enfoques convencionales hasta soluciones avanzadas, y se explora el impacto crucial de las políticas públicas en la adopción y el desarrollo de estas tecnologías. El panorama actual de la crisis del agua revela una situación preocupante, con estadísticas alarmantes que subrayan la urgencia de intervenciones efectivas. La escasez de agua dulce, el deterioro de la calidad del agua y la contaminación generalizada son problemas cada vez más acuciantes que afectan a comunidades en todo el mundo. En respuesta a esta crisis, las tecnologías de tratamiento de agua han experimentado una evolución significativa a lo largo del tiempo. Desde métodos convencionales como la filtración y la desinfección hasta enfoques avanzados como la ósmosis inversa y la adsorción, se ha desarrollado una amplia gama de herramientas y técnicas para abordar diversos desafíos relacionados con el agua (Culley et al., 2016). Las políticas públicas desempeñan un papel crucial en la promoción y la implementación de tecnologías de tratamiento de agua efectivas y sostenibles. A lo largo de la historia, las regulaciones gubernamentales, los incentivos fiscales y los subsidios han influido en gran medida en el desarrollo y la adopción de tecnologías de tratamiento de agua. Se analizan políticas exitosas que han impulsado la innovación y la adopción de tecnologías avanzadas en diferentes partes del mundo, así como las barreras políticas y económicas que obstaculizan la implementación de soluciones efectivas (Oelkers et al., 2011). Desde una perspectiva técnica, se examinan en detalle las tecnologías convencionales de tratamiento de agua, como la filtración, la desinfección y la coagulación, destacando los mecanismos de acción, la eficacia y los impactos ambientales asociados. Se compara la eficiencia de diferentes métodos de filtración, como arena, carbón activado y filtros cerámicos, y se evalúan los métodos de desinfección química y física, como la cloración, la ozonización y la radiación UV. Además, se analizan los procesos de coagulación y floculación, detallando los químicos utilizados y las estrategias de optimización del proceso para garantizar la calidad del agua potable (Shevah, 2014).

Por otro lado, las tecnologías avanzadas de tratamiento de agua representan un área de creciente interés y desarrollo. Se exploran en profundidad métodos como la ósmosis inversa, la adsorción y los procesos biológicos avanzados, destacando su eficacia en la desalinización, la recuperación de aguas

residuales y la eliminación de contaminantes emergentes. Se examinan estudios de eficacia y coste-beneficio, así como innovaciones en nanotecnología y desarrollo de nuevos adsorbentes para abordar desafíos cada vez más complejos en el tratamiento del agua. En términos de políticas y estrategias de implementación, se identifican oportunidades y desafíos clave para promover la adopción generalizada de tecnologías de tratamiento de agua avanzadas (Qu et al., 2013). Se analizan casos de estudio internacionales en regiones como Europa, América del Norte y Asia, destacando el impacto de las directivas y regulaciones gubernamentales en la innovación tecnológica y las prácticas de tratamiento de agua. Se exploran estrategias para superar barreras políticas y económicas, así como el desarrollo de marcos regulatorios que fomenten la adopción de tecnologías sostenibles y la gestión eficaz del agua.

Palabras Claves: Crisis del agua; políticas públicas; calidad del agua; sostenibilidad; oportunidades.

Abstract

The global water crisis has reached alarming proportions, demanding comprehensive and effective solutions to ensure a safe and sustainable supply of drinking water. This article examines in detail the current context of the global water crisis, highlighting the urgency of concerted action to address this pressing challenge. The historical evolution of water treatment technologies, from conventional approaches to advanced solutions, is analyzed and the crucial impact of public policies on the adoption and development of these technologies is explored. The current landscape of the water crisis reveals a worrying situation, with alarming statistics underscoring the urgency of effective interventions. Freshwater scarcity, deteriorating water quality and widespread pollution are increasingly pressing problems affecting communities around the world. In response to this crisis, water treatment technologies have undergone significant evolution over time. From conventional methods such as filtration and disinfection to advanced approaches such as reverse osmosis and adsorption, a wide range of tools and techniques have been developed to address various water-related challenges (Culley et al., 2016). Public policies play a crucial role in promoting and implementing effective and sustainable water treatment technologies. Throughout history, government regulations, tax incentives, and subsidies have greatly influenced the development and adoption of water treatment technologies. Successful policies that have driven innovation and the adoption of advanced technologies in different parts of the world are analyzed, as well as the political and economic barriers that hinder the implementation of effective solutions (Oelkers et al., 2011). From a technical

perspective, conventional water treatment technologies such as filtration, disinfection and coagulation are examined in detail, highlighting the mechanisms of action, effectiveness and associated environmental impacts. The efficiency of different filtration methods, such as sand, activated carbon, and ceramic filters, is compared, and chemical and physical disinfection methods, such as chlorination, ozonation, and UV radiation, are evaluated. In addition, the coagulation and flocculation processes are analyzed, detailing the chemicals used and the process optimization strategies to guarantee the quality of drinking water (Shevah, 2014).

On the other hand, advanced water treatment technologies represent an area of growing interest and development. Methods such as reverse osmosis, adsorption and advanced biological processes are explored in depth, highlighting their effectiveness in desalination, wastewater recovery and the removal of emerging contaminants. Effectiveness and cost-benefit studies are examined, as well as innovations in nanotechnology and development of new adsorbents to address increasingly complex challenges in water treatment. In terms of policies and implementation strategies, key opportunities and challenges are identified to promote the widespread adoption of advanced water treatment technologies (Qu et al., 2013). International case studies are analyzed in regions such as Europe, North America and Asia, highlighting the impact of government directives and regulations on technological innovation and water treatment practices. Strategies are explored to overcome political and economic barriers, as well as the development of regulatory frameworks that encourage the adoption of sustainable technologies and effective water management.

Keywords: Water crisis; public politics; water quality; sustainability; opportunities.

Resumo

A crise hídrica global atingiu proporções alarmantes, exigindo soluções abrangentes e eficazes para garantir um abastecimento seguro e sustentável de água potável. Este artigo examina em detalhe o contexto actual da crise hídrica global, destacando a urgência de uma acção concertada para enfrentar este desafio premente. A evolução histórica das tecnologias de tratamento de água, desde abordagens convencionais até soluções avançadas, é analisada e o impacto crucial das políticas públicas na adoção e desenvolvimento destas tecnologias é explorado. O panorama actual da crise hídrica revela uma situação preocupante, com estatísticas alarmantes que sublinham a urgência de intervenções eficazes. A escassez de água doce, a deterioração da qualidade da água e a poluição generalizada são problemas cada vez mais prementes que afectam comunidades em todo o mundo. Em resposta a esta

Soluciones tecnológicas para el Tratamiento de agua. Una aproximación desde las políticas públicas

crise, as tecnologias de tratamento de água sofreram uma evolução significativa ao longo do tempo. Desde métodos convencionais, como filtração e desinfecção, até abordagens avançadas, como osmose reversa e adsorção, uma ampla gama de ferramentas e técnicas foi desenvolvida para enfrentar vários desafios relacionados à água (Culley et al., 2016). As políticas públicas desempenham um papel crucial na promoção e implementação de tecnologias de tratamento de água eficazes e sustentáveis. Ao longo da história, regulamentações governamentais, incentivos fiscais e subsídios influenciaram enormemente o desenvolvimento e a adoção de tecnologias de tratamento de água. São analisadas as políticas bem-sucedidas que impulsionaram a inovação e a adoção de tecnologias avançadas em diferentes partes do mundo, bem como as barreiras políticas e econômicas que dificultam a implementação de soluções eficazes (Oelkers et al., 2011). Do ponto de vista técnico, as tecnologias convencionais de tratamento de água, como filtração, desinfecção e coagulação, são examinadas detalhadamente, destacando os mecanismos de ação, eficácia e impactos ambientais associados. A eficiência de diferentes métodos de filtração, como areia, carvão ativado e filtros cerâmicos, é comparada, e métodos de desinfecção química e física, como cloração, ozonização e radiação UV, são avaliados. Além disso, são analisados os processos de coagulação e floculação, detalhando os produtos químicos utilizados e as estratégias de otimização do processo para garantir a qualidade da água potável (Shevah, 2014).

Por outro lado, as tecnologias avançadas de tratamento de água representam uma área de crescente interesse e desenvolvimento. Métodos como osmose reversa, adsorção e processos biológicos avançados são explorados em profundidade, destacando sua eficácia na dessalinização, recuperação de águas residuais e remoção de contaminantes emergentes. São examinados estudos de eficácia e custo-benefício, bem como inovações em nanotecnologia e desenvolvimento de novos adsorventes para enfrentar desafios cada vez mais complexos no tratamento de água. Em termos de políticas e estratégias de implementação, são identificadas oportunidades e desafios chave para promover a adoção generalizada de métodos avançados. tecnologias de tratamento de água (Qu et al., 2013). São analisados estudos de caso internacionais em regiões como Europa, América do Norte e Ásia, destacando o impacto das diretivas e regulamentações governamentais na inovação tecnológica e nas práticas de tratamento de água. São exploradas estratégias para superar barreiras políticas e econômicas, bem como o desenvolvimento de quadros regulamentares que incentivem a adoção de tecnologias sustentáveis e uma gestão eficaz da água.

Palavras-chave: Crise de água; políticas públicas; qualidade da água; sustentabilidade; oportunidades.

Introducción

Contexto Global de la Crisis del Agua: Urgencia y Estadísticas Actuales

La crisis global del agua se manifiesta a través de una complejidad de retos interconectados, incluyendo la escasez, la degradación de la calidad, y el acceso inequitativo a recursos hídricos limpios y seguros. Según la Organización Mundial de la Salud y UNICEF, más de 2 mil millones de personas viven sin acceso a servicios de agua potable gestionados de manera segura, un desafío que se agrava en áreas rurales y comunidades económicamente desfavorecidas. Además, la creciente presión de la urbanización y la industrialización continúa exacerbando la contaminación de fuentes de agua superficiales y subterráneas, comprometiendo la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos y la salud humana.

El cambio climático introduce una capa adicional de incertidumbre, alterando patrones hidrológicos y exacerbando eventos extremos como sequías e inundaciones, que a su vez afectan la disponibilidad y calidad del agua. Este escenario es especialmente crítico en regiones donde la capacidad de adaptación es limitada, y las infraestructuras hídricas existentes no están preparadas para manejar la variabilidad y extremos climáticos proyectados. La convergencia de estos factores subraya la urgencia de desarrollar, implementar y optimizar tecnologías de tratamiento de agua que sean tanto efectivas como sostenibles, en un marco que esté apoyado por políticas públicas robustas y proactivas (Qu et al., 2013).

Historia y Evolución de las Tecnologías de Tratamiento de Agua

El tratamiento de agua ha evolucionado significativamente desde sus inicios rudimentarios en civilizaciones antiguas hasta las sofisticadas tecnologías contemporáneas. Históricamente, métodos simples como la sedimentación y filtración a través de arena se utilizaban para purificar el agua antes de su consumo. Con el advenimiento de la revolución industrial, se hizo evidente la necesidad de sistemas más eficientes y escalables que pudieran servir a poblaciones urbanas crecientes. En el siglo XIX, la introducción de la cloración marcó un hito en la desinfección del agua, proporcionando una solución a las epidemias de enfermedades transmitidas por el agua como el cólera y la tifoidea (Jury & Vaux, 2007).

En las últimas décadas, la tecnología de tratamiento de agua ha incorporado avances significativos en ósmosis inversa, nanotecnología y procesos biológicos avanzados. Estas tecnologías no solo han mejorado la eficacia en la eliminación de contaminantes, sino que también han optimizado la eficiencia energética y reducido el impacto ambiental de las operaciones de tratamiento. La continua innovación tecnológica es crucial para responder a los desafíos emergentes, como la presencia de contaminantes microbianos y químicos persistentes, que los métodos tradicionales de tratamiento no pueden abordar de manera efectiva (van Vliet et al., 2021).

Impacto de las Políticas Públicas en la Tecnología de Tratamiento de Agua

Las políticas públicas desempeñan un papel fundamental en la configuración del paisaje tecnológico del tratamiento de agua. A través de la legislación y regulación, los gobiernos pueden establecer estándares de calidad del agua que impulsan la adopción de tecnologías avanzadas y garantizan la protección de la salud pública y los ecosistemas. Además, las políticas públicas pueden facilitar la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías mediante subvenciones y créditos fiscales, creando un entorno propicio para la innovación, el impacto de las políticas no se limita a la promoción de la adopción tecnológica. También incluye la capacidad de las políticas para adaptarse a los cambios tecnológicos y satisfacer las demandas de una gestión sostenible del agua. En este contexto, las políticas deben ser diseñadas no sólo para enfrentar los retos actuales, sino también para anticiparse a futuras necesidades y tecnologías emergentes. La interacción entre tecnología y política es dinámica y requiere un enfoque adaptable y previsor para garantizar que las soluciones de tratamiento de agua no sólo sean efectivas en términos técnicos, sino también equitativas y sostenibles desde una perspectiva social y ambiental (van Vliet et al., 2021).

Tecnologías Convencionales de Tratamiento de Agua

Filtración: Tipos y Aplicaciones

La filtración constituye una de las técnicas más antiguas y fundamentales para el tratamiento del agua, empleada para remover partículas suspendidas y contaminantes de tamaño considerable. Existen diversos tipos de filtros utilizados en el tratamiento de agua, incluyendo filtros de arena, carbón activado y membranas de microfiltración. Los filtros de arena operan bajo el principio de retención física de partículas a través de medios granulares. Aunque su eficiencia puede ser limitada frente a contaminantes más finos o disueltos, estos filtros son ampliamente utilizados por su simplicidad, bajo costo y facilidad de operación en plantas de tratamiento municipales y rurales. Por otro lado, los filtros de carbón activado, que utilizan adsorción para la remoción de contaminantes orgánicos y

cloro, son esenciales en aplicaciones que requieren una calidad de agua más alta para consumo humano o procesos industriales. La efectividad del carbón activado se debe a su gran área superficial, que proporciona un vasto lecho para la captura de moléculas contaminantes. Estos filtros son particularmente valorados en la eliminación de sabores y olores desagradables, pesticidas, y compuestos orgánicos volátiles (Jury & Vaux, 2007).

Además, las membranas de microfiltración representan una tecnología más moderna dentro del espectro convencional, permitiendo la separación de partículas aún más finas, incluyendo algunos tipos de bacterias y protozoos (Qu et al., 2013). A pesar de su mayor costo inicial, la microfiltración ofrece ventajas significativas en términos de calidad del agua producida y está ganando aceptación para aplicaciones críticas en hospitales, laboratorios y la industria alimentaria, donde los estándares de pureza del agua son excepcionalmente altos.

Desinfección: Cloración, Ozonización y Radiación Ultravioleta

La desinfección del agua es crítica para garantizar la seguridad del agua para el consumo humano, eliminando patógenos que causan enfermedades. La cloración ha sido la columna vertebral de la desinfección del agua desde su introducción a principios del siglo XX, debido a su efectividad, costo-eficiencia y capacidad de proporcionar una barrera residual contra la recontaminación en la red de distribución. Sin embargo, la formación de subproductos de desinfección potencialmente dañinos, como trihalometanos y ácidos haloacéticos, ha motivado la búsqueda de alternativas más seguras (Shannon et al., 2008). La ozonización surge como una de esas alternativas, ofreciendo una poderosa capacidad oxidante que descompone contaminantes orgánicos y microorganismos sin dejar residuos químicos en el agua. Aunque el ozono es más costoso y requiere una infraestructura más compleja en comparación con la cloración, su uso está creciendo en aplicaciones donde la calidad del agua y la ausencia de subproductos son críticas.

Por su parte, la radiación ultravioleta (UV) proporciona una desinfección efectiva sin alterar la química del agua ni generar subproductos. La luz UV daña el ADN y RNA de los microorganismos, impidiendo su reproducción y efectividad para causar enfermedades. Esta tecnología es especialmente valorada en el tratamiento de aguas para aplicaciones sensibles como la producción de medicamentos, cosméticos y procesamiento de alimentos, donde la introducción de químicos es indeseable (Oelkers et al., 2011).

Coagulación y Floculación: Procesos y Efectividad

Los procesos de coagulación y floculación son esenciales en el tratamiento primario del agua para remover partículas coloidales y turbidez. La coagulación implica la adición de coagulantes químicos, típicamente sales de aluminio o hierro, que neutralizan las cargas de las partículas coloidales, permitiendo su aglomeración. Durante la floculación, estas partículas aglomeradas forman flóculos más grandes y pesados que pueden ser removidos más fácilmente por sedimentación o flotación.

La efectividad de estos procesos depende en gran medida del tipo de coagulante utilizado, las condiciones del agua cruda, y los parámetros operacionales como el pH y la temperatura del agua. Estudios recientes han explorado la optimización de estos parámetros para mejorar la eficiencia de la coagulación-floculación, así como el uso de coagulantes naturales o modificados que reduzcan los impactos ambientales asociados con los coagulantes tradicionales. En conjunto, estos métodos convencionales de tratamiento de agua siguen siendo fundamentales en la provisión de agua segura a grandes poblaciones. Sin embargo, la creciente preocupación por los contaminantes emergentes y la sostenibilidad ambiental está impulsando innovaciones y mejoras en cada una de estas tecnologías, así como su integración con nuevas soluciones técnicas (Jury & Vaux, 2007; Qu et al., 2013).

Tecnologías Avanzadas de Tratamiento de Agua

Ósmosis Inversa: Principios y Aplicaciones Industriales y Municipales

La ósmosis inversa (OI) es un proceso de tratamiento de agua que utiliza una membrana semipermeable para remover iones, moléculas orgánicas y partículas más grandes del agua. Este proceso es fundamentalmente diferente de la filtración tradicional, ya que opera bajo el principio de inversión del flujo osmótico natural mediante la aplicación de una presión que excede la presión osmótica natural de la solución salina. La ósmosis inversa es especialmente efectiva para desalinizar el agua, eliminar contaminantes químicos disueltos y purificar el agua para aplicaciones críticas donde la calidad del agua es de suma importancia (Xu et al., 2023).

Desde su introducción en la década de 1960, la tecnología de ósmosis inversa ha experimentado numerosas mejoras, incluyendo el desarrollo de membranas más eficientes y resistentes a la contaminación química y biológica. Estas membranas están típicamente compuestas de materiales poliméricos como poliamida o acetato de celulosa, y son capaces de rechazar hasta el 99% de las sales disueltas, lo que las hace ideales para la producción de agua potable a partir de fuentes salobres y marinas. En contextos industriales, la OI se utiliza para procesos que requieren agua de alta pureza, como en la fabricación de semiconductores y farmacéuticos, donde la presencia de impurezas puede

comprometer la calidad del producto final. En el ámbito municipal, la implementación de sistemas de ósmosis inversa ha sido motivada por la necesidad de complementar las fuentes de agua dulce tradicionales, especialmente en regiones áridas donde la escasez de agua es un problema crónico (Shannon et al., 2008). Los sistemas de OI pueden convertir aguas residuales tratadas y agua de mar en fuentes seguras de agua potable, proporcionando una solución sostenible y a largo plazo para la gestión del agua urbana. Sin embargo, la operación de plantas de OI implica desafíos significativos, como los altos costos energéticos y la gestión de la salmuera resultante, que requieren consideraciones cuidadosas en términos de impacto ambiental y viabilidad económica (Oelkers et al., 2011; Shannon et al., 2008).

Adsorción: Uso de Carbón Activado y Nanomateriales

La adsorción es un proceso mediante el cual contaminantes son capturados en la superficie de un material, y es ampliamente utilizada en el tratamiento de agua para remover una variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos. El carbón activado es uno de los adsorbentes más comunes debido a su gran superficie específica, porosidad y alta capacidad de adsorción. Es eficaz en la eliminación de compuestos orgánicos volátiles, pesticidas, herbicidas, y subproductos de la desinfección, contribuyendo significativamente a mejorar tanto el sabor como la seguridad del agua tratada (Xu et al., 2023). Además del carbón activado, los avances recientes han introducido el uso de nanomateriales en la adsorción de contaminantes del agua. Los nanomateriales, como los nanotubos de carbono y las nanopartículas de óxido de metal, ofrecen propiedades únicas que pueden mejorar la eficiencia de la adsorción debido a su enorme relación superficie-volumen y la capacidad para modificar su superficie con grupos funcionales específicos que se dirigen a contaminantes particulares. Estos materiales han demostrado ser especialmente efectivos en la captura de metales pesados y contaminantes emergentes, como fármacos y disruptores endocrinos, que son difíciles de remover con tecnologías convencionales.

El desarrollo de nuevos adsorbentes requiere una consideración cuidadosa de las implicaciones ambientales y de salud, especialmente en términos de la disposición de materiales usados y la posible liberación de nanopartículas al ambiente. La investigación continua es crucial para optimizar el diseño y la funcionalidad de estos materiales, asegurando su seguridad y eficacia en aplicaciones a gran escala (Hoslett et al., 2018; Oelkers et al., 2011).

Procesos Biológicos Avanzados: Biofiltración y Biorreactores de Membrana

Los procesos biológicos avanzados se han establecido como técnicas esenciales para el tratamiento de aguas residuales y están ganando aceptación en el tratamiento de agua potable debido a su eficacia en la eliminación de contaminantes orgánicos y nutrientes. La biofiltración utiliza medios biológicos, como arena o carbón activado sembrados con microorganismos, para degradar contaminantes orgánicos durante su paso a través del filtro. Esta tecnología es valorada por su simplicidad, bajo costo y la capacidad de mejorar significativamente la calidad del agua sin la adición de productos químicos.

En una escala más avanzada, los biorreactores de membrana combinan la biodegradación con la filtración de membrana, ofreciendo una solución compacta y eficiente para el tratamiento de aguas residuales. Estos sistemas utilizan membranas de microfiltración o ultrafiltración para separar la biomasa del agua tratada, permitiendo un control más efectivo sobre la calidad del efluente y facilitando la retención y cultivo de microorganismos específicos para la degradación de contaminantes. Los biorreactores de membrana son especialmente efectivos en el tratamiento de aguas residuales industriales y municipales, donde los requerimientos de calidad del efluente son estrictos y el espacio es un factor limitante (Xu et al., 2023). El desarrollo y optimización de procesos biológicos avanzados para el tratamiento de agua continúa siendo un campo de investigación activo, con estudios centrados en mejorar la eficiencia de estos procesos, reducir su huella energética y ampliar su aplicabilidad a una gama más amplia de contaminantes y condiciones operativas. La integración de estas tecnologías avanzadas en sistemas de tratamiento existentes representa una oportunidad significativa para mejorar la sostenibilidad y eficacia del tratamiento de agua a nivel global (Jury & Vaux, 2007).

Integración de Políticas Públicas y Tecnologías de Tratamiento

Análisis de Políticas Exitosas

La efectividad de las políticas públicas en fomentar la adopción y desarrollo de tecnologías avanzadas para el tratamiento de agua puede observarse en numerosos casos a nivel global, donde la interacción entre legislación, incentivos económicos y colaboraciones estratégicas ha dado lugar a mejoras significativas en la gestión del agua. Por ejemplo, la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea (DMA) ha sido un motor fundamental en la implementación de tecnologías sostenibles en el tratamiento de aguas residuales en sus estados miembros. Esta directiva establece un marco para la

protección de todas las aguas, lo que incluye ríos, lagos, aguas subterráneas y costeras, promoviendo el uso de las mejores tecnologías disponibles para alcanzar un buen estado ecológico de las aguas. La DMA obliga a los estados miembros a preparar y actualizar periódicamente planes de gestión de cuencas hidrográficas, promoviendo la integración de tecnologías avanzadas y sostenibles en sus estrategias de tratamiento y conservación del agua. Como resultado, ha habido un incremento significativo en la implementación de tecnologías como la ósmosis inversa para la desalinización en países con limitados recursos hídricos, y la adopción de procesos biológicos avanzados en el tratamiento de aguas residuales urbanas para reducir la contaminación y recuperar recursos. Otro ejemplo de políticas exitosas se encuentra en Singapur, donde la agencia nacional de agua, PUB, ha desarrollado una estrategia de gestión del agua que incluye tecnologías de punta como la NEWater, un sistema de reciclaje de aguas residuales tratadas mediante microfiltración, ósmosis inversa y desinfección ultravioleta. Esta política no solo ha permitido a Singapur superar sus limitaciones geográficas y recursos hídricos escasos, sino que también ha posicionado al país como líder mundial en tecnologías de reciclaje y reutilización del agua (Chu et al., 2015; Khan et al., 2018).

Estos ejemplos demuestran cómo políticas bien diseñadas y adecuadamente implementadas pueden facilitar una transición hacia tecnologías de tratamiento de agua más eficientes y sostenibles, abordando tanto desafíos ambientales como necesidades socioeconómicas. Sin embargo, la clave del éxito radica en la capacidad de adaptar estas políticas a contextos locales específicos, garantizando que se alineen con las condiciones económicas, culturales y ambientales de cada región.

Barreras Políticas y Económicas

A pesar de los numerosos avances y el potencial demostrado de las tecnologías avanzadas en el tratamiento del agua, su adopción a menudo se ve obstaculizada por una serie de barreras políticas y económicas. Una de las principales barreras políticas es la falta de una legislación clara y coherente que regule la adopción de nuevas tecnologías y la actualización de las infraestructuras existentes. En muchos casos, las regulaciones ambientales no se actualizan al ritmo de los avances tecnológicos, lo que puede resultar en procesos de aprobación lentos y onerosos para la implementación de nuevas soluciones tecnológicas.

Desde el punto de vista económico, la inversión inicial alta para la adopción de tecnologías avanzadas como biorreactores de membrana o sistemas de ósmosis inversa puede ser prohibitiva para municipios y países con recursos limitados. Además, la falta de conocimiento y experiencia técnica puede limitar la capacidad de operar y mantener estas tecnologías de manera efectiva, lo que incrementa los costos

a largo plazo y reduce su atractivo económico. Esto se ve exacerbado por la ausencia de incentivos financieros, como subvenciones o créditos fiscales, que podrían reducir el riesgo financiero asociado con inversiones en tecnologías innovadoras. Para superar estas barreras, es fundamental que las políticas públicas promuevan no solo la adopción de tecnologías existentes sino también el desarrollo y la demostración de nuevas tecnologías. Esto podría lograrse mediante la creación de asociaciones público-privadas que distribuyan los costos y los riesgos asociados con las innovaciones tecnológicas, así como la implementación de políticas que agilicen los procesos regulatorios y ofrezcan incentivos económicos claros y accesibles para los adoptantes tempranos de nuevas tecnologías.

Estrategias de Política para la Innovación y Sostenibilidad

El desarrollo de estrategias de política eficaces para fomentar la innovación y la sostenibilidad en el tratamiento de agua requiere un enfoque multifacético que integre consideraciones técnicas, económicas y sociales. Una estrategia fundamental es la inversión en investigación y desarrollo (I+D), que puede ser incentivada a través de subvenciones gubernamentales y deducciones fiscales para proyectos que exploren nuevas tecnologías de tratamiento de agua y su integración en sistemas existentes. Además, es crucial establecer normativas que no solo exijan el cumplimiento de estándares ambientales, sino que también reconozcan y premien las mejoras en eficiencia y sostenibilidad. Otra estrategia efectiva es la educación y capacitación de los stakeholders sobre los beneficios y el funcionamiento de las nuevas tecnologías. Esto incluye la capacitación de ingenieros, operadores de plantas de tratamiento, y decisores políticos, asegurando que las tecnologías no solo se adopten, sino que se operen de manera eficiente y efectiva. Además, las políticas deben fomentar la participación pública y la transparencia en la gestión del agua, permitiendo que los consumidores estén informados y sean parte activa en la conservación del recurso (Kim & Lee, 2010).

En conjunto, estas estrategias pueden crear un ambiente propicio para que la innovación tecnológica florezca y se integre de manera efectiva en la gestión del agua, asegurando que los beneficios de las tecnologías avanzadas de tratamiento se maximicen mientras se minimizan los impactos ambientales y se promueve la sostenibilidad a largo plazo.

Casos de Estudio Internacionales

Europa: Directivas de la UE y su Impacto en las Tecnologías de Tratamiento

En Europa, la Directiva Marco del Agua (DMA) ha sido un instrumento legislativo clave en la regulación de la gestión y protección de las aguas. Adoptada en 2000, esta directiva establece un marco para la protección de todas las aguas superficiales y subterráneas con el objetivo de alcanzar

un "buen estado" de todas las aguas de la UE para 2027. La DMA ha incentivado a los estados miembros a invertir en tecnologías avanzadas de tratamiento de agua y a adoptar prácticas sostenibles de gestión del agua. Un aspecto crucial de la DMA es que promueve el enfoque de cuenca hidrográfica, considerando las características específicas de cada cuenca para mejorar la calidad del agua y gestionar los recursos hídricos de manera integrada y sostenible (Gur-Reznik et al., 2008; Voulvoulis et al., 2017).

Este enfoque ha llevado a la implementación de numerosas innovaciones tecnológicas en el tratamiento de aguas residuales y en la mejora de sistemas de agua potable. Por ejemplo, en Alemania, la adopción de tecnologías como la ósmosis inversa y la nanofiltración ha sido notable en plantas municipales para asegurar la eliminación eficiente de contaminantes emergentes como microplásticos y residuos farmacéuticos. Además, el fuerte enfoque en la recuperación de recursos ha llevado a la implementación de tecnologías que permiten la recuperación de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, convirtiendo las instalaciones de tratamiento de aguas residuales en biorefinerías que no solo tratan, sino que también generan recursos valiosos.

América del Norte: Políticas y Tecnologías en los EE. UU. y Canadá

En América del Norte, los Estados Unidos y Canadá han adoptado diferentes enfoques regulatorios y tecnológicos en respuesta a sus únicos desafíos de gestión del agua. En los EE. UU., la Ley de Agua Limpia (CWA) y la Ley de Agua Potable Segura (SDWA) son las principales regulaciones federales que dictan los estándares para el tratamiento de aguas residuales y potables. Estas leyes han promovido el desarrollo y la adopción de tecnologías avanzadas de tratamiento, como los biorreactores de membrana y la desinfección avanzada, para cumplir con los estrictos estándares de calidad del agua. Además, la iniciativa WaterSense de la EPA, que promueve el uso eficiente del agua a través de tecnologías y productos certificados, ha ayudado a reducir el consumo de agua a nivel nacional.

En Canadá, la gestión del agua es principalmente una responsabilidad provincial, con directrices federales que actúan como un marco de referencia. Esto ha llevado a una diversidad de enfoques en la implementación de tecnologías de tratamiento de agua. Por ejemplo, en British Columbia, se ha priorizado la sostenibilidad y la protección de los hábitats acuáticos, integrando tecnologías de tratamiento de agua que minimizan el impacto ambiental, como sistemas de tratamiento biológico avanzado que mejoran la calidad del efluente antes de su descarga en cuerpos de agua sensibles.

Asia: Innovaciones y Políticas en Países como China y Japón

Asia presenta algunos de los contrastes más significativos en términos de políticas y tecnologías de tratamiento de agua debido a la diversidad económica y ambiental de la región. En China, la rápida industrialización y urbanización han llevado a desafíos significativos en la gestión del agua. En respuesta, el gobierno ha implementado políticas estrictas que requieren la instalación de tecnologías de tratamiento avanzadas en nuevas plantas industriales y municipales. Tecnologías como la adsorción avanzada y la ósmosis inversa están siendo implementadas a gran escala para tratar aguas residuales industriales antes de su liberación o reutilización. Además, China está invirtiendo en proyectos de ingeniería verde que integran soluciones basadas en la naturaleza con infraestructura tradicional para mejorar la gestión del agua urbana (Pramanik et al., 2015). En Japón, la gestión del agua es altamente tecnificada, con un enfoque considerable en la minimización de riesgos ambientales y la maximización de la eficiencia debido a la limitada disponibilidad de recursos naturales. Tecnologías como los sistemas de filtración por membrana y tratamiento avanzado de lodos se han convertido en estándar en muchas comunidades. Además, Japón ha liderado en la implementación de sistemas de reutilización de aguas grises y de recogida de aguas pluviales en edificios urbanos, promoviendo la sostenibilidad en el uso del agua en entornos densamente poblados.

Desafíos y Oportunidades Futuras

Desafíos Técnicos en la Implementación de Tecnologías Emergentes

A medida que las tecnologías de tratamiento de agua avanzan, surgen nuevos desafíos técnicos asociados con su implementación y operación eficiente. Uno de los principales desafíos es la escalabilidad de tecnologías emergentes, que a menudo son desarrolladas y probadas a pequeña escala en laboratorios o instalaciones piloto. La transición de estas tecnologías a una escala operativa plena puede revelar problemas inesperados, como variaciones en la calidad del agua de entrada que pueden afectar la eficiencia del proceso o aumentar los costos operativos. Además, la integración de nuevas tecnologías en sistemas de tratamiento de agua existentes presenta desafíos en términos de compatibilidad de infraestructura y la necesidad de capacitación técnica para el personal operativo. Otro desafío técnico significativo es la gestión de subproductos generados durante los procesos de tratamiento avanzado. Por ejemplo, los procesos de desinfección avanzada pueden generar subproductos nocivos si no se controlan adecuadamente las condiciones de operación. Asimismo, la concentración de contaminantes en los residuos de procesos como la ósmosis inversa requiere soluciones efectivas de disposición o tratamiento secundario para evitar la contaminación ambiental.

Estos desafíos requieren no solo avances en la tecnología de tratamiento en sí, sino también en tecnologías complementarias y enfoques de gestión de residuos. Además, la resistencia a la implementación de nuevas tecnologías puede surgir debido a la incertidumbre sobre su eficacia a largo plazo y el temor a fallos tecnológicos que podrían comprometer la seguridad del suministro de agua (Chuang et al., 2019). La confianza en tecnologías establecidas y el conservadurismo en sectores regulados y de alto riesgo como el del agua pueden ralentizar la adopción de innovaciones disruptivas, a menos que se demuestre claramente su valor añadido y se minimicen los riesgos a través de estudios detallados y monitoreo continuo.

Oportunidades Económicas Derivadas de la Innovación Tecnológica

La innovación en el tratamiento de agua no solo aborda desafíos ambientales y de salud pública, sino que también presenta oportunidades económicas significativas. El desarrollo de nuevas tecnologías de tratamiento puede abrir mercados para empresas emergentes y establecidas, crear empleos y fomentar el crecimiento económico. Por ejemplo, la expansión del mercado global de tecnologías de desalinización ha sido impulsada por la creciente demanda de agua potable en regiones áridas, generando oportunidades de negocio tanto para fabricantes de equipos como para operadores de plantas de tratamiento (Timm & Deal, 2018).

Además, la innovación tecnológica en el tratamiento de agua puede conducir a la reducción de costos a través de la mejora de la eficiencia energética y la minimización de residuos. Las tecnologías que permiten la reutilización y reciclaje del agua dentro de procesos industriales pueden reducir significativamente los costos de operación y el impacto ambiental de las industrias que dependen intensamente del agua, como la textil, la papelera y la química. Estos avances no solo ofrecen beneficios económicos directos, sino que también contribuyen a una imagen corporativa más verde y a la responsabilidad social empresarial, lo cual puede ser decisivo en mercados competitivos. La colaboración entre el sector público y el privado también puede ser una fuente de oportunidades económicas. Los incentivos gubernamentales, como subvenciones para I+D, créditos fiscales y tarifas preferenciales por el uso de tecnologías sostenibles, pueden facilitar la inversión en nuevas tecnologías (Carvalho & others, 2019). Asimismo, las políticas que fomentan la colaboración internacional en materia de investigación y desarrollo pueden ayudar a compartir los costos y riesgos asociados con la innovación en tratamiento de agua, además de acelerar la adopción de las mejores prácticas y tecnologías a nivel mundial.

Perspectivas Futuras en Políticas Públicas y Tecnologías de Tratamiento de Agua

El futuro de las tecnologías de tratamiento de agua está intrínsecamente vinculado a la evolución de las políticas públicas. Para maximizar los beneficios de las innovaciones tecnológicas, se necesitan políticas que no solo apoyen la investigación y el desarrollo tecnológico, sino que también faciliten la adopción de estas tecnologías a través de marcos regulatorios flexibles y adaptativos. Además, las políticas deben enfocarse en la sostenibilidad a largo plazo, promoviendo no solo la eficiencia del tratamiento de agua, sino también la protección de los ecosistemas acuáticos y la conservación de los recursos hídricos. Las perspectivas futuras también deben considerar el impacto del cambio climático en los recursos hídricos y la necesidad de sistemas de tratamiento de agua que puedan adaptarse a condiciones cambiantes. Esto incluye el desarrollo de tecnologías que sean resilientes a la variabilidad climática y que puedan garantizar el suministro de agua segura y suficiente bajo diferentes escenarios climáticos (John et al., 2020; Luan, 2010). Además, la creciente urbanización y la demanda de infraestructuras más integradas y eficientes implican que las futuras tecnologías de tratamiento de agua deberán ser cada vez más compactas, eficientes y capaces de integrarse en entornos urbanos densos.

Conclusiones

Síntesis de los Principales Hallazgos

El análisis exhaustivo de las tecnologías de tratamiento de agua y las políticas públicas asociadas revela una interacción dinámica y compleja que es crucial para la gestión sostenible del agua en el contexto global. A lo largo de este estudio, hemos identificado que tanto las tecnologías convencionales como las avanzadas desempeñan roles esenciales en la mejora de la calidad del agua y la eficiencia de los procesos de tratamiento. Las tecnologías convencionales, como la filtración y la cloración, continúan siendo pilares fundamentales en el tratamiento de agua debido a su probada eficacia y coste-eficiencia. Por otro lado, las tecnologías avanzadas, como la ósmosis inversa y los biorreactores de membrana, ofrecen soluciones innovadoras para desafíos emergentes, incluyendo la eliminación de contaminantes microbianos y químicos persistentes.

En cuanto a las políticas públicas, el estudio resalta la importancia de legislaciones y regulaciones que no solo promuevan la adopción de tecnologías existentes, sino que también fomenten la innovación y la sostenibilidad en el sector del tratamiento de agua. Las políticas efectivas son aquellas que integran consideraciones técnicas, económicas y ambientales, y que son capaces de adaptarse a

Soluciones tecnológicas para el Tratamiento de agua. Una aproximación desde las políticas públicas

nuevas tecnologías y desafíos emergentes. Casos de estudio internacionales, como la Directiva Marco del Agua de la UE y los esfuerzos de Singapur con su programa NEWater, demuestran cómo las políticas bien diseñadas pueden facilitar avances significativos en la gestión y tratamiento del agua (Chaplin, 2019).

Para maximizar los beneficios de las tecnologías de tratamiento de agua y asegurar su sostenibilidad a largo plazo, se recomienda una serie de acciones estratégicas. Primero, es esencial fortalecer la inversión en investigación y desarrollo (I+D) para fomentar la innovación continua en tecnologías de tratamiento de agua. Esto debería estar acompañado de políticas que proporcionen incentivos financieros y fiscales para apoyar tanto la adopción de tecnologías emergentes como la actualización de infraestructuras existentes. Además, la capacitación y educación de los stakeholders involucrados en la gestión del agua deben ser prioritarias para garantizar la operación eficiente y el mantenimiento de las tecnologías de tratamiento. Las políticas públicas deberían promover programas de capacitación técnica y concienciación sobre las nuevas tecnologías y prácticas de gestión sostenible del agua. La transparencia y la participación pública en la toma de decisiones también son cruciales para aumentar la aceptación y el apoyo a las iniciativas de tratamiento de agua (Schmidt & Cairncross, 2009). Es vital que las políticas públicas promuevan la colaboración internacional en la investigación y la adopción de tecnologías de tratamiento de agua. La cooperación global puede facilitar el intercambio de conocimientos, experiencias y recursos, acelerando así la implementación de soluciones efectivas y sostenibles a nivel mundial (Poff et al., 2016). El futuro de la gestión del agua depende de la acción coordinada y proactiva de múltiples actores, incluyendo gobiernos, industrias, comunidades científicas y la sociedad civil. Los decisores políticos tienen la responsabilidad de crear marcos regulatorios que no solo respondan a los desafíos actuales, sino que también anticipen futuras necesidades y tecnologías emergentes. Este enfoque proactivo no solo protegerá los recursos hídricos para generaciones futuras, sino que también promoverá la equidad y la justicia social en el acceso al agua (Richter et al., 2013).

Para los stakeholders en la industria y la academia, el desafío es continuar innovando y mejorando las tecnologías de tratamiento de agua para hacer frente a los crecientes desafíos de contaminación y escasez de agua. La colaboración entre estos sectores puede acelerar el desarrollo de tecnologías que sean tanto efectivas como económicamente viables, asegurando así que los avances tecnológicos lleguen al mercado y beneficien a la sociedad en su conjunto.

Referencias

- Carvalho, L., & others. (2019). Protecting and restoring Europe's waters: An analysis of the future development needs of the Water Framework Directive. *The Science of the Total Environment*, 658, 1228–1238. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.255>
- Chaplin, B. (2019). The Prospect of Electrochemical Technologies Advancing Worldwide Water Treatment. *Accounts of Chemical Research*, 52(3), 596–604. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.8b00611>
- Chere-Quiñónez, B. F., Ulloa-de Souza, R. C. ., Reyna-Tenorio, L. J. ., Canchingre-Bone, M. E. ., & Mosquera-Quintero , G. A. . (2022). Electrical energy from industrial wastewater in Guayaquil, Ecuador. *Sapienza: International Journal of Interdisciplinary Studies*, 3(6), 202–210. <https://doi.org/10.51798/sijis.v3i6.509>
- Chu, W., Li, C., Gao, N., Templeton, M. R., & Zhang, Y. (2015). Terminating pre-ozonation prior to biological activated carbon filtration results in increased formation of nitrogenous disinfection by-products upon subsequent chlorination. *Chemosphere*, 121, 33–38. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.10.059>
- Chuang, Y.-H., Szczuka, A., Shabani, F., Munoz, J., Aflaki, R., Hammond, S. D., & Mitch, W. (2019). Pilot-scale comparison of microfiltration/reverse osmosis and ozone/biological activated carbon with UV/hydrogen peroxide or UV/free chlorine AOP treatment for controlling disinfection byproducts during wastewater reuse. *Water Research*, 152, 215–225. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.062>
- Culley, S., Noble, S., Yates, A., Timbs, M., Westra, S., Maier, H., Giuliani, M., & Castelletti, A. (2016). A bottom - up approach to identifying the maximum operational adaptive capacity of water resource systems to a changing climate. *Water Resources Research*, 52, 6751–6768. <https://doi.org/10.1002/2015WR018253>
- Gur-Reznik, S., Katz, I., & Dosoretz, C. (2008). Removal of dissolved organic matter by granular-activated carbon adsorption as a pretreatment to reverse osmosis of membrane bioreactor effluents. *Water Research*, 42(6–7), 1595–1605. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2007.10.004>
- Hoslett, J., Massara, T., Malamis, S., Ahmad, D., van den Boogaert, I., Katsou, E., Ahmad, B., Ghazal, H., Simons, S., Wrobel, L., & others. (2018). Surface water filtration using granular

- media and membranes: A review. *The Science of the Total Environment*, 639, 1268–1282. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.247>
- John, A., Nathan, R., Horne, A., Stewardson, M., & Webb, J. (2020). How to incorporate climate change into modelling environmental water outcomes: a review. *Journal of Water and Climate Change*. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.263>
- Jury, W., & Vaux, H. (2007). The Emerging Global Water Crisis: Managing Scarcity and Conflict Between Water Users. *Advances in Agronomy*, 95, 1–76. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(07\)95001-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(07)95001-4)
- Khan, M. A., Ngo, H., Guo, W., Liu, Y., Chang, S., Nguyen, D., Nghiem, L., & Liang, H. (2018). Can membrane bioreactor be a smart option for water treatment? *Bioresource Technology Reports*. <https://doi.org/10.1016/J.BITEB.2018.09.002>
- Kim, H., & Lee, B. (2010). Treatment Characteristics of Sand Filtration and Microfiltration (MF) in Advanced Water Treatment. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 24, 723–734. <https://consensus.app/papers/characteristics-sand-filtration-microfiltration-kim/2f9ec04fa5b8518984ab4ff9b814c3bb/?>
- Luan, I. O. B. (2010). Singapore Water Management Policies and Practices. *International Journal of Water Resources Development*, 26, 65–80. <https://doi.org/10.1080/07900620903392190>
- Oelkers, E., Hering, J., & Zhu, C. (2011). Water: Is There a Global Crisis? *Elements*, 7(3), 157–162. <https://doi.org/10.2113/GSELEMENTS.7.3.157>
- Poff, N., Brown, C., Grantham, T. E., Matthews, J. H., Palmer, M. A., Spence, C. M., Wilby, R., Haasnoot, M., Mendoza, G., Dominique, K. C., & Baeza, A. (2016). Sustainable water management under future uncertainty with eco-engineering decision scaling. *Nature Climate Change*, 6, 25–34. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2765>
- Pramanik, B., Roddick, F., Fan, L., Jeong, S., & Vigneswaran, S. (2015). Assessment of biological activated carbon treatment to control membrane fouling in reverse osmosis of secondary effluent for reuse in irrigation. *Desalination*, 364, 90–95. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2015.01.040>
- Qu, X., Brame, J., Li, Q., & Alvarez, P. (2013). Nanotechnology for a safe and sustainable water supply: enabling integrated water treatment and reuse. *Accounts of Chemical Research*, 46(3), 834–843. <https://doi.org/10.1021/ar300029v>

- Richter, S., Völker, J., Borchardt, D., & Mohaupt, V. (2013). The Water Framework Directive as an approach for Integrated Water Resources Management: results from the experiences in Germany on implementation, and future perspectives. *Environmental Earth Sciences*, 69, 719–728. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2399-7>
- Schmidt, W.-P., & Cairncross, S. (2009). Household water treatment in poor populations: is there enough evidence for scaling up now? *Environmental Science & Technology*, 43(4), 986–992. <https://doi.org/10.1021/ES802232W>
- Shannon, M., Bohn, P., Elimelech, M., Georgiadis, J., Mariñas, B., & Mayes, A. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452, 301–310. <https://doi.org/10.1038/nature06599>
- Shevah, Y. (2014). Water scarcity, water reuse, and environmental safety. *Pure and Applied Chemistry*, 86, 1205–1214. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-0202>
- Timm, S., & Deal, B. (2018). Understanding the behavioral influences behind Singapore’s water management strategies. *Journal of Environmental Planning and Management*, 61, 1654–1673. <https://doi.org/10.1080/09640568.2017.1369941>
- van Vliet, M. T. H., Jones, E., Flörke, M., Franssen, W., Hanasaki, N., Wada, Y., & Yearsley, J. (2021). Global water scarcity including surface water quality and expansions of clean water technologies. *Environmental Research Letters*, 16. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbfc3>
- Voulvoulis, N., Arpon, K. D., & Giakoumis, T. (2017). The EU Water Framework Directive: From great expectations to problems with implementation. *The Science of the Total Environment*, 575, 358–366. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.228>
- Xu, P., He, H.-H., Li, T., Chen, Y., & Dong, B. (2023). Combining Full-Scale Ozonation and Biological Activated Carbon Filtration (O3-BAC) with Pilot-Scale Nanofiltration (NF) to Control Disinfection By-Product Formation for Treatment of Taihu Lake Water. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w15050843>.