

EL AGUA,

SUS PROPIEDADES Y SUS MÉTODOS MÁS COMUNES PARA PURIFICACIÓN

ABRAHAM OCTAVIO RODRÍGUEZ DE LA FUENTE, JOSÉ ANTONIO HEREDIA ROJAS*, PEDRO ANTONIO NOGUERA DÍAZ, EDUARDO ALFONSO REBOLLAR TÉLLEZ Y JOSÉ ALBERTO VALADEZ LIRA.

RESUMEN

El agua es la molécula más abundante y esencial para la vida en la Tierra, desempeñando un papel central en los procesos biológicos, la regulación climática y el funcionamiento de los ecosistemas. Sus propiedades físicas y químicas únicas, como su alto calor específico, tensión superficial y capacidad disolvente, la hacen indispensable para la vida, pero también la vuelven susceptible a la contaminación. Los principales contaminantes se clasifican en físicos (partículas suspendidas, microplásticos), químicos (metales pesados, nutrientes, compuestos orgánicos) y biológicos (microorganismos patógenos). Para garantizar agua segura, se emplean diversos métodos de purificación que incluyen filtración, ósmosis inversa, desinfección química mediante cloración y ozonización, luz ultravioleta y tratamiento térmico. Cada técnica presenta ventajas y limitaciones específicas: la filtración remueve partículas y algunos microorganismos, la ósmosis inversa elimina sales y metales pesados con hasta 99% de eficacia, la cloración es económica, pero genera subproductos, la ozonización es eficaz sin residuos peligrosos, la luz UV inactiva patógenos sin alterar el agua, y el tratamiento térmico elimina microorganismos, aunque no contaminantes químicos. La desalinización del agua de mar surge como alternativa viable en regiones con escasez, destacando la ósmosis inversa como el método más utilizado. La crisis hídrica de Monterrey en 2022 ejemplifica los retos en la gestión urbana del agua, donde más de 5.3 millones de habitantes enfrentaron severas restricciones, subrayando la importancia de estrategias eficientes de purificación y uso responsable. No existe un método único capaz de eliminar todos los contaminantes; la combinación de técnicas adaptadas a las condiciones locales es la estrategia más efectiva para garantizar el acceso equitativo y seguro al agua.

ABSTRACT

Water is the most abundant and essential molecule for life on Earth, playing a central role in biological processes, climate regulation, and ecosystem functioning. Its unique physical and chemical properties—such as high specific heat, surface tension, and solvent capacity—make it indispensable for life, *yet also* susceptible to contamination. Major contaminants are classified as physical (suspended particles, microplastics), chemical (heavy metals, nutrients, organic compounds), and biological (pathogenic microorganisms). To ensure safe water, various purification methods are employed, including filtration, reverse osmosis, chemical disinfection through chlorination and ozonation, ultraviolet light, and thermal treatment. Each technique has specific advantages and limitations: filtration removes particles and some microorganisms; reverse osmosis eliminates salts and heavy metals with up to 99% efficiency; chlorination is economical but produces by-products; ozonation is effective without hazardous residues; UV light inactivates pathogens without altering water composition; and thermal treatment removes microorganisms but not chemical contaminants. Seawater desalination emerges as a viable alternative in water-scarce regions, with reverse osmosis as the most widely used method. The 2022 Monterrey water crisis, which affected over 5.3 million people, illustrates the challenges of urban water management and highlights the need for efficient purification strategies and responsible use. No single method can remove all contaminants; a combination of techniques adapted to local conditions is the most effective approach to ensuring equitable and safe access to water.

INTRODUCCIÓN

El agua es la molécula más abundante y esencial para la vida en la Tierra, desempeñando un papel central en los procesos biológicos, la regulación climática y el funcionamiento de los ecosistemas (Serra *et al.*, 2024). A pesar de cubrir cerca del 70% de la superficie terrestre, solo una pequeña fracción es accesible y apta para el consumo humano, ya que la mayoría se encuentra en océanos, glaciares y aguas subterráneas profundas (Salamanca, 2016). Su naturaleza como solvente universal le permite disolver una gran variedad de sustancias, facilitando el transporte de nutrientes y desechos tanto en organismos vivos como en sistemas ambientales (Mishra, 2023).

En las últimas décadas, la creciente demanda, la contaminación y el cambio climático han intensificado la presión sobre los recursos hídricos, haciendo cada vez más frecuente la escasez de agua en zonas urbanas e industriales (Du Plessis, 2019). La crisis hídrica que se vivió en Monterrey en el 2022 ejemplifica esta problemática global, donde más de 5.3 millones de habitantes enfrentaron severas restricciones en el suministro y profundas afectaciones sociales y económicas (Martínez-Canales, 2023).

Esta situación no solo evidenció la vulnerabilidad de los sistemas de abastecimiento, sino que también resaltó la urgencia de contar con métodos de purificación accesibles y efectivos, capaces de garantizar la calidad del agua disponible aún en escenarios de escasez extrema. En este contexto, la purificación del agua y la gestión eficiente de este recurso son temas prioritarios para la salud pública y la sostenibilidad urbana (Siddique, 2021).

La relevancia del agua trasciende su función como recurso: es la base misma de la vida. Todas las formas de vida conocidas dependen del agua para llevar a cabo procesos esenciales como la fotosíntesis, la respiración, la digestión y la excreción de desechos. Sin agua, la organización celular, el transporte de nutrientes y la regulación de la temperatura corporal serían imposibles. Además, el agua actúa como soporte de la biodiversidad y como regulador de los ciclos geoquímicos que mantienen el equilibrio del planeta. Por ello, asegurar su calidad y disponibilidad no solo es una cuestión técnica o de gestión, sino un imperativo ético y biológico para la supervivencia y el bienestar de todas las especies, incluida la nuestra.

Este trabajo revisa las propiedades fundamentales del agua, los principales tipos de contaminación que la afectan y los métodos más eficaces para su purificación, con base en evidencia publicada en la literatura.

PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL AGUA

PROPIEDADES FÍSICAS

El agua en estado puro es incolora, inodora e insípida (Quinteros-Ortega, 2017). Su estructura molecular, basada en enlaces de hidrógeno, le confiere características únicas como un alto calor específico ($4.18 \text{ J/g}^\circ\text{C}$), elevada tensión superficial y la capacidad de existir en los tres estados físicos bajo condiciones ambientales terrestres. Estas propiedades permiten que el agua regule la temperatura corporal y ambiental, facilite el transporte de solutos y mantenga la homeostasis en los seres vivos (Riveros-Perez y Riveros, 2018).

Una característica notable es que el agua presenta una densidad máxima a 4°C (1 g/cm^3); cuando la temperatura disminuye aún más y el agua se congela, su densidad baja, lo que provoca que el hielo flote sobre el agua líquida (Salamanca, 2016). Esto ocurre porque a 4°C las moléculas de agua están tan compactas como es posible, ocupando el menor espacio. Si la temperatura desciende de este punto, las moléculas comienzan a separarse y a organizarse en una estructura más abierta, similar a cómo una caja de pelotas se “infla” y ocupa más espacio. Por eso, el hielo es menos denso y flota.

Esta propiedad anómala es crucial para la vida acuática, ya que permite que los cuerpos de agua se congelen desde la superficie hacia abajo, manteniendo el agua líquida debajo del hielo, donde los organismos pueden sobrevivir durante los meses fríos (Chakraborty y Chakraborty, 2021).

PROPIEDADES QUÍMICAS

La molécula de agua (H_2O) es polar porque el átomo de oxígeno atrae con mayor fuerza a los electrones compartidos que los átomos de hidrógeno, creando una distribución desigual de cargas en la molécula (Brenes-Esquivel y Rojas-Solano, 2005). Esta polaridad se puede imaginar como un pequeño imán: un extremo de la molécula (el oxígeno) tiene una ligera carga negativa, mientras que los extremos opuestos (los hidrógenos) tienen una ligera carga positiva.

Gracias a esta característica, el agua puede atraer y rodear fácilmente a otras moléculas con carga, como la sal común (cloruro de sodio), facilitando su disolución. Por eso, la sal se disuelve fácilmente en agua, pero no en aceite, ya que el aceite está formado por moléculas no polares que no interactúan con el “imán” del agua (García-Barradas, 2019). Además, los enlaces de hidrógeno que se forman entre las moléculas de agua permiten la creación de estructuras dinámicas, favoreciendo la disolución de sales, gases y compuestos orgánicos e inorgánicos (Serra *et al.*, 2024).

El agua posee una naturaleza anfótera, es decir, puede actuar tanto como un ácido (donador de protones)

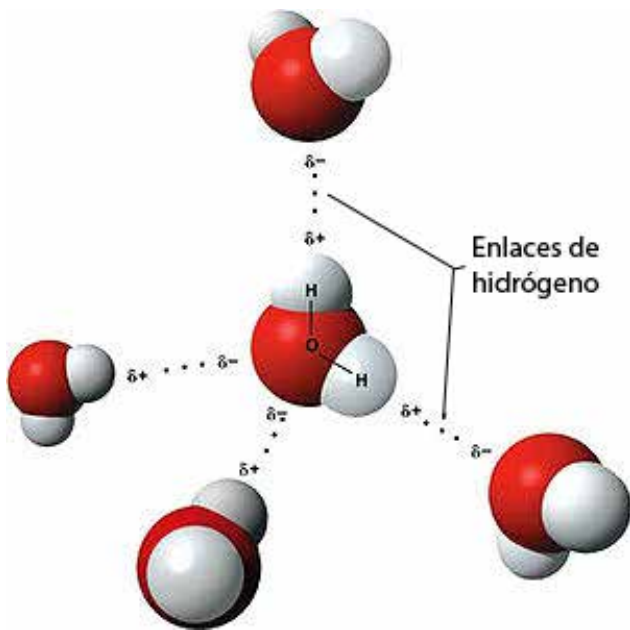


Figura 1. Estructura molecular del agua (H_2O) destacando la polaridad y los enlaces de hidrógeno que le confieren propiedades únicas como su capacidad disolvente y alta tensión superficial.



Figura 2. Efectos de la contaminación hídrica en la biodiversidad acuática.

como una base (aceptor de protones) dependiendo de las circunstancias (Salamanca, 2016). Esta propiedad es crucial en varias reacciones químicas que ocurren en soluciones acuosas y en sistemas biológicos (Pérez-Vidal *et al.*, 2016). El agua es esencial en la fotosíntesis, ya que aporta los electrones necesarios para transformar la energía solar en compuestos orgánicos y libera oxígeno como subproducto, sosteniendo así la vida en el planeta (Medrano *et al.*, 2007). Por lo tanto, la disponibilidad y calidad del agua no solo determinan la productividad vegetal, sino que impactan directamente en la estabilidad de los ecosistemas y en la supervivencia de todos los seres vivos dependientes del oxígeno y de la materia orgánica generada por las plantas.

CONTAMINACIÓN DEL AGUA

La contaminación hídrica se define como la introducción, directa o indirecta, de sustancias y materiales externos al medio acuático, lo que provoca una degradación de su calidad (Cirelli, 2012). Los contaminantes se clasifican en tres categorías principales según estudios publicados en revistas especializadas (Kordbacheh y Heidari, 2023):

CONTAMINANTES FÍSICOS

Incluyen partículas y materiales suspendidos que no se disuelven fácilmente en el agua. Generando turbidez y dificultando la vida acuática al reducir la penetración de la luz solar (Salamanca, 2016). Los microplásticos han emergido como un contaminante físico particularmente

preocupante, ya que se encuentran en efluentes de agua dulce y terminan en mares y océanos (Kordbacheh y Heidari, 2023). Son problemáticos porque, debido a su pequeño tamaño y persistencia, pueden ser ingeridos por organismos acuáticos y entrar en la cadena alimentaria, afectando la salud de peces, aves y mamíferos. Además, los microplásticos pueden transportar sustancias químicas tóxicas y al acumularse en órganos humanos y animales, se asocian con inflamación, alteraciones en el sistema endocrino y posibles daños cardiovasculares y neurológicos (Perilla-Portilla *et al.*, 2023).

Más allá de los microplásticos, otros contaminantes físicos afectan la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos. Entre ellos, se encuentran partículas suspendidas como sedimentos provenientes de erosión o actividades humanas que deben ser menores a 5 NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez) según la Secretaría de Salud (2021), que generan turbidez y reducen la penetración de la luz solar, perjudicando la fotosíntesis acuática. También está la contaminación térmica causada por descargas industriales que elevan la temperatura del agua, disminuyendo el oxígeno disuelto y alterando los ciclos biológicos de peces y algas. Por último, residuos sólidos grandes, tales como plásticos, madera, y metales, pueden obstruir cauces y hábitats acuáticos, generando daños físicos a los organismos y modificando las dinámicas ecosistémicas. Estos diferentes contaminantes físicos complican la salud ambiental y requieren estrategias integrales para su monitoreo y control (Franco *et al.*, 2010).

CONTAMINANTES QUÍMICOS

Esta categoría abarca una variedad de sustancias que alteran la composición química del agua entre las cuales encontramos las siguientes categorías (Gil *et al.*, 2012):

METALES PESADOS

Como plomo (límite máximo permisible: 0.01 mg/L), mercurio (0.006 mg/L), aluminio (0.20 mg/L), níquel (0.07 mg/L) y arsénico (0.025 mg/L), según la NOM-127-SSA1-2021 para agua potable en México (Secretaría de Salud, 2021). Estos metales, en concentraciones elevadas, generan toxicidad aguda y crónica, afectando órganos como el sistema nervioso, hígado y riñones, e incluso provocando trastornos neurológicos, cáncer y fallos en el sistema inmunológico. El aluminio, por ejemplo, se relaciona con casos de demencia cuando supera los 0.20 mg/L en agua potable.

NUTRIENTES INORGÁNICOS

Principalmente nitratos (N-NO₂: 11 mg/L) y nitritos (N-NO₂: 0.90 mg/L) provenientes de fertilizantes agrícolas, según la NOM-127-SSA1-2021. Estos estimulan el crecimiento excesivo de algas (eutrofización) y, en agua potable, los nitratos >10 mg/L se asocian con metahemoglobinemia ("síndrome del bebé azul") en infantes, mientras que los nitritos causan hipoxia tisular.

COMPUESTOS ORGÁNICOS

Incluyen petróleo, gasolina, plásticos y plaguicidas persistentes (ej. clorpirifos: 30 µg/L; dimetoato: 6 µg/L; benzo(a)pireno: 0.70 µg/L), con límites estrictos en NOM-127-SSA1-2021 para agua potable. Su difícil degradación genera bioacumulación, toxicidad crónica (cáncer, disrupción endocrina) y riesgos mutagénicos por exposición prolongada.

CONTAMINANTES BIOLÓGICOS

Los microorganismos patógenos constituyen una importante categoría de contaminantes biológicos del agua (Gil *et al.*, 2012). Bacterias, virus, protozoos y otros parásitos pueden causar enfermedades graves como el cólera, tifus, hepatitis y diversas infecciones gastrointestinales. Estos microorganismos llegan al agua principalmente a través de descargas de aguas residuales, heces humanas o animales, y pueden transmitirse por el consumo directo, el uso doméstico o el contacto con agua contaminada. La presencia de estos patógenos representa un riesgo significativo para la salud pública, ya que basta una pequeña cantidad de microorganismos para desencadenar brotes de enfermedades, especialmente en comunidades sin acceso a métodos adecuados de purificación (Kordbacheh y Heidari, 2023).

MÉTODOS DE PURIFICACIÓN DEL AGUA

La purificación del agua busca eliminar o reducir contaminantes para obtener agua segura para el consumo humano (Kordbacheh y Heidari, 2023). Los principales métodos, documentados en literatura científica indexada, incluyen:

FILTRACIÓN

La filtración elimina partículas suspendidas y algunos microorganismos mediante el paso del agua a través de materiales porosos (Kordbacheh y Heidari, 2023).

Los filtros de carbón activado son especialmente eficaces para remover compuestos orgánicos y mejorar el sabor y olor del agua, ya que poseen millones de microporos que capturan y adsorben moléculas contaminantes, sobre todo químicos como cloro, pesticidas y compuestos orgánicos volátiles (Siong *et al.*, 2013). En contraste, los filtros cerámicos actúan principalmente como una barrera física que retiene partículas, sedimentos y microorganismos, siendo ideales para eliminar bacterias y turbidez, aunque menos eficaces para remover contaminantes químicos o mejorar el sabor.

Estudios publicados en la literatura han demostrado que los filtros cerámicos pueden separar sólidos de líquidos, aunque presentan la desventaja de que pueden convertirse en sustratos para el crecimiento de colonias microbianas si no se mantienen adecuadamente (Preston, 2018). Este método presenta un costo bajo a moderado y se debe reemplazar el filtro cada seis meses.

ÓSMOSIS INVERSA

La ósmosis inversa utiliza una membrana semipermeable para separar sales, metales pesados, virus y bacterias, logrando una reducción de hasta el 99 % de los iones y el 99.99 % de virus y bacterias presentes en el agua (Portillo *et al.*, 2006). Este proceso consiste en aplicar una presión mayor que la presión osmótica natural, lo que obliga al agua a pasar en sentido contrario al flujo normal a través de la membrana.

La membrana actúa como un "colador" extremadamente fino: solo permite el paso de las moléculas de agua, reteniendo las impurezas y contaminantes (Malaeb y Ayoub, 2011). Investigaciones científicas han documentado que las membranas de ósmosis inversa pueden separar del agua cualquier partícula contaminante de más de 0.0001 micras, eliminando contaminantes microbianos, metales pesados, pesticidas, herbicidas y todo tipo de sales (Chian *et al.*, 1975). Este método requiere presión y mantenimiento periódico y el costo por litro es bajo una vez instalado.

DESINFECCIÓN QUÍMICA

CLORACIÓN

La cloración es el método más utilizado a nivel mundial para la desinfección del agua (Salamanca, 2016). Cuando el cloro gaseoso (Cl_2) se disuelve en agua, forma ácido hipocloroso (HOCl) y el ion hipoclorito (OCl_2), siendo el ácido hipocloroso aproximadamente 80 veces más eficiente como bactericida que el ion hipoclorito. Una de las principales ventajas de la cloración es su bajo costo: el tratamiento doméstico puede realizarse con tabletas o gotas de cloro, con un valor aproximado de \$0.10 a \$0.50 MXN por cada 20 litros de agua tratada, lo que la hace accesible incluso en comunidades con recursos limitados.

Sin embargo, en estudios previos se ha documentado que el tratamiento con cloro presenta algunas desventajas, como la formación de subproductos potencialmente cancerígenos (trihalometanos) (Galal-Gorchev, 1996).

OZONIZACIÓN

El ozono (O_3) es un poderoso oxidante utilizado en la purificación del agua, aproximadamente el doble de fuerte que el cloro (Glaze, 1987). Actúa como desinfectante contra bacterias, virus y parásitos, y también ayuda en la micro-floculación y reducción de sólidos suspendidos (Wei *et al.*, 2017).

Una ventaja importante del tratamiento con ozono es que no produce trihalometanos y es capaz de inactivar microorganismos patógenos resistentes a otros desinfectantes, como quistes de *Giardia* y *Cryptosporidium* (Salamanca, 2016). Aunque tiene la desventaja que el costo de inversión inicial es alto el costo de operación se vuelve muy bajo.



Figura 3. Desinfección física del agua mediante luz ultravioleta, que inactiva microorganismos sin alterar las propiedades químicas del agua.



Figura 4. Tratamiento térmico: ebullición del agua durante al menos 3 minutos para eliminar microorganismos patógenos.

DESINFECCIÓN FÍSICA

LUZ ULTRAVIOLETA (UV)

La desinfección mediante luz ultravioleta es un método físico que no altera la composición química, el sabor ni el olor del agua. Funciona inactivando microorganismos al dañar su ADN, impidiendo que se reproduzcan cuando son expuestos a radiación UV de 254 nanómetros. Estudios científicos han demostrado que la desinfección UV ofrece ventajas importantes: no requiere productos químicos, mantiene las propiedades originales del agua, actúa de forma instantánea y es eficaz contra patógenos resistentes al cloro (Campos y Castillo, 2022). Sin embargo, su eficacia depende de que el agua esté suficientemente clara, ya que la radiación solo actúa sobre los microorganismos presentes en la zona iluminada y no penetra bien en aguas turbias o con sólidos en suspensión.

En cuanto al costo, la inversión inicial es elevada y requiere el reemplazo anual de la lámpara, aunque el costo de operación es bajo.

TRATAMIENTO TÉRMICO

El tratamiento térmico consiste en calentar el agua hasta su punto de ebullición ($100\text{ }^\circ\text{C}$), manteniéndola en hervor para eliminar microorganismos infecciosos. Es uno de los métodos más antiguos y accesibles para purificar agua. Para garantizar la eliminación efectiva de la mayoría de los microorganismos infecciosos, se recomienda mantener el agua a temperatura de ebullición durante al menos tres minutos (Salamanca, 2016). Este método es muy accesible, aunque requiere

energía y tiempo para elevar la temperatura y no es capaz de eliminar contaminantes químicos.

DESALINIZACIÓN DE AGUA DE MAR

Actualmente, la escasez de agua para consumo humano se debe al incremento de la población, los cambios ambientales, la creciente demanda de agua para riego y producción de alimentos, el uso de agua para enfriar maquinaria o centros de datos, así como a las alteraciones provocadas por la actividad humana en la Tierra. Estas condiciones han provocado que las fuentes convencionales como ríos, lagos y mantos freáticos, empleados habitualmente para potabilizar el agua, estén reduciendo sus niveles, lo que obliga a implementar estrategias para incrementar la disponibilidad de agua y satisfacer las necesidades humanas. La desalinización consiste en eliminar la sal y otros minerales del agua de mar para hacerla apta para consumo y uso agrícola o industrial.

Los mares y océanos, que constituyen aproximadamente el 70% de la superficie terrestre, representan una fuente de agua abundante que podría mitigar el déficit hídrico global. Sin embargo, el agua de mar no es apta para consumo humano debido a su alta concentración de sales, estimada en alrededor de 35,000 ppm, es decir, 35 veces mayor que en el agua dulce de ríos (Voutchkov, 2022).

A pesar del gran potencial del agua de mar, el número de plantas desalinizadoras en el mundo es limitado, y aquellas que existen potabilizan volúmenes inferiores a las que utilizan agua dulce. Esta situación se debe principalmente a los elevados costos energéticos requeridos para remover la sal. Sin embargo, la creciente necesidad de agua ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías para reducir dichos costos energéticos. La Agencia Internacional de Desalinización (IDA, por sus siglas en inglés) estima que cerca de 300 millones de personas obtienen agua de plantas desalinizadoras, concentradas principalmente en Medio Oriente, que representa el 70% del agua desalinizada, además del norte de África, California (EE. UU.) y Australia (Voutchkov, 2022).

Para que el agua de mar sea apta para consumo humano, es necesario remover la sal disuelta a través de un proceso denominado desalinización, que consta de cuatro etapas: 1) toma de agua, 2) proceso de desalinización, 3) almacenamiento y distribución del agua purificada, y 4) tratamiento de los desechos salinos (Leijon & Boström, 2018). En la segunda etapa se emplean varios métodos, entre ellos: ósmosis inversa, destilación, nanofiltración, electrodiálisis, formación de hidratos y congelación, polarización por concentración de iones, y uso de marcos de metal-orgánicos (MOF) (Dévora-Isiordia *et al.*, 2013).

Los métodos más usados para potabilizar agua de mar a gran escala son la ósmosis inversa, la electrodiálisis y la destilación. La destilación es el proceso más antiguo y puede aplicarse de forma sencilla con poca infraestructura: consiste en evaporar el agua usando una fuente de calor y condensar el vapor. Para potabilizar grandes volúmenes se requiere mayor infraestructura, siendo la compresión mecánica de vapor una técnica derivada ampliamente empleada (Leijon & Boström, 2018).

Actualmente, el método predominante es la ósmosis inversa, que ha logrado reducir los costos energéticos para procesar 1,000 litros de agua a niveles equivalentes a los necesarios para una garrafa de 5 litros y una hora de aire acondicionado (Dashtpour & Al-Zubaidy, 2012). El proceso de desalinización por ósmosis inversa se compone generalmente de cinco fases: 1) toma de agua de mar mediante tuberías instaladas en el fondo marino, 2) pretratamiento y filtrado inicial para eliminar partículas grandes como algas y residuos sólidos, 3) ósmosis inversa propiamente dicha, donde se aplica presión para forzar el paso del agua salada a través de una membrana semipermeable, 4) almacenamiento, postratamiento y distribución del agua potable obtenida, y 5) devolución al mar de la salmuera resultante, que es el concentrado salino residual (Curto *et al.*, 2021).

La fase de ósmosis inversa requiere un alto consumo energético debido a la presión necesaria para filtrar el agua. Inicialmente, esta energía provenía de fuentes térmicas basadas en combustibles fósiles; sin embargo, para reducir costos y alinearse con la agenda de desarrollo sostenible de la ONU, se ha comenzado a emplear energías renovables como la solar, eólica y la energía generada por el movimiento de olas. Aunque estas fuentes no garantizan un suministro constante, tecnologías recientes aprovechan la energía del oleaje, que genera aproximadamente 80,000 TWh/año, haciendo que la desalinización sea una opción viable para muchos países con problemas de escasez hídrica (Leijon & Boström, 2018). México es uno de esos países y, mediante un comunicado oficial, afirmó que “la desalinización de agua de mar es una alternativa viable para incrementar la disponibilidad del agua a la población” (Comisión Nacional del Agua, 2022).

TRATAMIENTO Y PURIFICACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas representan un desafío ambiental, pero también una oportunidad para incrementar la disponibilidad de agua mediante su tratamiento y reutilización. Según la UNESCO (2024), más del 50% de las aguas residuales en América Latina no reciben tratamiento adecuado, contaminando fuentes de agua potable. El tratamiento se realiza en Estaciones Depuradoras mediante procesos físicos, químicos y biológicos secuenciales.

El proceso convencional consta de cuatro etapas principales. El pretratamiento elimina sólidos grandes mediante rejillas y desarenadores, reduciendo entre el 20 y 30% de los sólidos presentes. El tratamiento primario utiliza sedimentación para remover sólidos suspendidos y grasas, eliminando hasta el 30% de la carga contaminante (Ramon, 2005). El tratamiento secundario emplea procesos biológicos donde microorganismos degradan la materia orgánica disuelta, siendo los más comunes los lodos activados, lagunas de estabilización y humedales artificiales. Estudios han demostrado que estos sistemas alcanzan remociones del 80% de materia orgánica, y cuando se combinan, las eficiencias superan el 90% (Vargas *et al.*, 2020). Finalmente, el tratamiento terciario utiliza filtración avanzada, desinfección mediante los métodos ya descritos (cloración, ozonización o UV), y procesos de oxidación avanzada para eliminar contaminantes específicos como nutrientes y patógenos resistentes.

La reutilización de aguas residuales tratadas es una estrategia clave para enfrentar la escasez hídrica. Las aguas tratadas pueden emplearse en riego agrícola, usos industriales, recarga de acuíferos y, tras tratamientos avanzados, incluso para consumo humano indirecto (Sarria *et al.*, 2005). Tecnologías innovadoras como los biorreactores de membrana (MBR) han demostrado capacidad para reducir el consumo energético en 35% y eliminar el 95% de compuestos orgánicos persistentes, permitiendo reutilizar hasta el 40% del agua tratada (Gabarron *et al.*, 2014). Esta práctica es especialmente relevante en contextos de crisis hídrica, donde la diversificación de fuentes de abastecimiento es fundamental para garantizar la seguridad hídrica urbana.

CASO DE ESTUDIO:

CRISIS HÍDRICA EN MONTERREY, N.L. MÉXICO

La crisis hídrica de Monterrey en 2022 representa uno de los casos más paradigmáticos de escasez de agua en contextos urbanos de América Latina. Esta situación fue el resultado de una compleja interacción de factores climáticos, demográficos y de gestión. Por un lado, el noreste de México experimentó una sequía prolongada, con precipitaciones muy por debajo del promedio y temperaturas elevadas que incrementaron la evaporación y redujeron la recarga de presas y acuíferos. Este fenómeno se vio agravado por el cambio climático, que ha intensificado la frecuencia y severidad de las sequías en la región. Al mismo tiempo, el acelerado crecimiento poblacional y la expansión urbana en Monterrey y su área metropolitana incrementaron la demanda de agua potable, superando la capacidad de las fuentes tradicionales y presionando aún más el sistema de abastecimiento (Zuñiga y Avila, 2023).

Para dimensionar la magnitud de esta anomalía hídrica, es crucial analizar los registros meteorológicos en contraste con las medias históricas. Según datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en 2022 Nuevo León registró una precipitación acumulada de 502.6 mm, lo que representa apenas el 80% de la media histórica de 627.6 mm observada en el periodo 1960-2020 (CONAGUA, 2023). Este déficit pluvial no fue un evento aislado en el norte de México; estados vecinos como Coahuila reportaron precipitaciones aún menores (aprox. 246.5 mm en el ciclo anual previo). Sin embargo, la crisis en Monterrey se distinguió por su alta vulnerabilidad demográfica: mientras que la población estatal creció de 3.5 millones en 1995 a 5.7 millones en 2020 (INEGI, 2021), la infraestructura de



Figura 5. Presa Cerro Prieto en 2015 y 2022. Nota. Imagen tomada por el satélite Landsat 8. Fuente: NASA Earth Observatory, 2015 y 2022.

almacenamiento no se expandió al mismo ritmo. A nivel nacional, la crisis de Monterrey se insertó en un contexto de estrés hídrico generalizado, donde 1,546 municipios de México reportaron algún grado de sequía durante el mismo periodo, evidenciando que, aunque el fenómeno meteorológico fue regional, el colapso del sistema urbano fue exacerbado por la dependencia excesiva de fuentes superficiales que alcanzaron niveles críticos (<5% de capacidad), a diferencia de otras regiones del país que mitigaron la sequía con una mayor extracción de aguas subterráneas.

La gestión hídrica también jugó un papel central en la crisis. Diversos estudios han señalado que la planeación a corto plazo, la infraestructura insuficiente y la falta de mantenimiento adecuado contribuyeron a la vulnerabilidad del sistema. En 2022, las principales presas de la región (Cerro Prieto, La Boca y El Cuchillo) estuvieron por debajo del 5% de su capacidad (Hernández Lozano y Pavón, 2024), lo que obligó a implementar cortes programados y racionamientos drásticos del suministro, con acceso al agua limitado a solo seis horas diarias en muchas zonas. Además, la sobreexplotación de acuíferos apenas logró compensar parcialmente la escasez, ya que estos presentaron una recuperación marginal, insuficiente frente a la demanda creciente. Las consecuencias sociales y económicas de la crisis fueron profundas. Se evidenciaron desigualdades marcadas en el acceso al recurso, ya que mientras algunos sectores recibían agua de manera intermitente, otros, especialmente en municipios periféricos como García, Escobedo, Guadalupe, San Nicolás de los Garza, Zuazua, Juárez y Pesquería, pasaron meses sin suministro regular. Esto obligó a miles de familias a depender de pipas y a recurrir al almacenamiento en condiciones que, en ocasiones, pusieron en riesgo la salud pública por la proliferación de enfermedades hídricas (The New York Times, 2022). Por esto es importante tomar en cuenta diferentes alternativas de purificación de agua que estén accesibles a la población.

Frente a esta situación, las respuestas institucionales incluyeron la implementación de medidas de emergencia, como la distribución de agua en pipas, la regulación de la presión en la red y la promoción de campañas de ahorro. Se aceleraron proyectos de infraestructura, como la perforación de nuevos pozos y la construcción de la presa Libertad, aunque estos esfuerzos enfrentaron limitaciones técnicas, financieras y de aceptación social (Román, 2024). La literatura científica subraya la importancia de adoptar tecnologías avanzadas de purificación, como la ósmosis inversa y la desinfección ultravioleta, así como de promover la reutilización de aguas residuales tratadas para diversificar las fuentes y aumentar la resiliencia del sistema urbano.

La crisis de Monterrey deja lecciones clave para la gestión hídrica urbana: la necesidad de una planeación basada en datos y escenarios climáticos, la diversificación de fuentes de abastecimiento, la integración de tecnologías de purificación adaptadas a los contaminantes locales y, fundamentalmente, la promoción de una cultura de uso racional y equitativo del agua. La literatura coincide en que la solución no es únicamente tecnológica, sino que debe incluir políticas públicas integrales, participación comunitaria y educación ambiental para transformar los hábitos sociales y garantizar la sostenibilidad a largo plazo.

En este contexto, la experiencia de Monterrey evidencia que ningún método de purificación resulta suficiente por sí solo para garantizar la seguridad y calidad del agua en situaciones de crisis. La complejidad de los contaminantes presentes —que incluyen partículas, microorganismos, metales pesados y compuestos orgánicos— exige la implementación de sistemas integrados que combinen diferentes tecnologías de purificación (Eshkoraev, 2024). Por ejemplo, la filtración puede eliminar sólidos y microorganismos grandes, pero no remueve contaminantes químicos; la ósmosis inversa es eficaz para sales y metales, pero requiere prefiltrado y mantenimiento; la desinfección ultravioleta inactiva patógenos, pero no elimina partículas ni sustancias químicas.

La combinación estratégica de estos métodos permite abordar las limitaciones de cada uno y adaptarse a la calidad variable del agua disponible durante emergencias. Además, facilita que tanto hogares como comunidades puedan elegir soluciones según sus recursos y necesidades específicas, incrementando la resiliencia frente a futuras crisis. Este enfoque integral, respaldado por la literatura científica, es clave para reducir riesgos sanitarios y asegurar el acceso a agua potable en escenarios de escasez y alta vulnerabilidad.

CONCLUSIONES

El agua es un recurso vital, insustituible y limitado, cuya gestión adecuada es fundamental para la salud, el desarrollo y la sostenibilidad de las sociedades. Sus propiedades únicas la convierten en el medio ideal para la vida, pero también la hacen vulnerable a la contaminación y la sobreexplotación.

La revisión de los métodos de purificación, basada en literatura científica, demuestra que no existe una solución única ni universal: la combinación de técnicas físicas, químicas y biológicas, cuidadosamente adaptadas a las condiciones y contaminantes locales, es la estrategia más efectiva para garantizar agua segura.

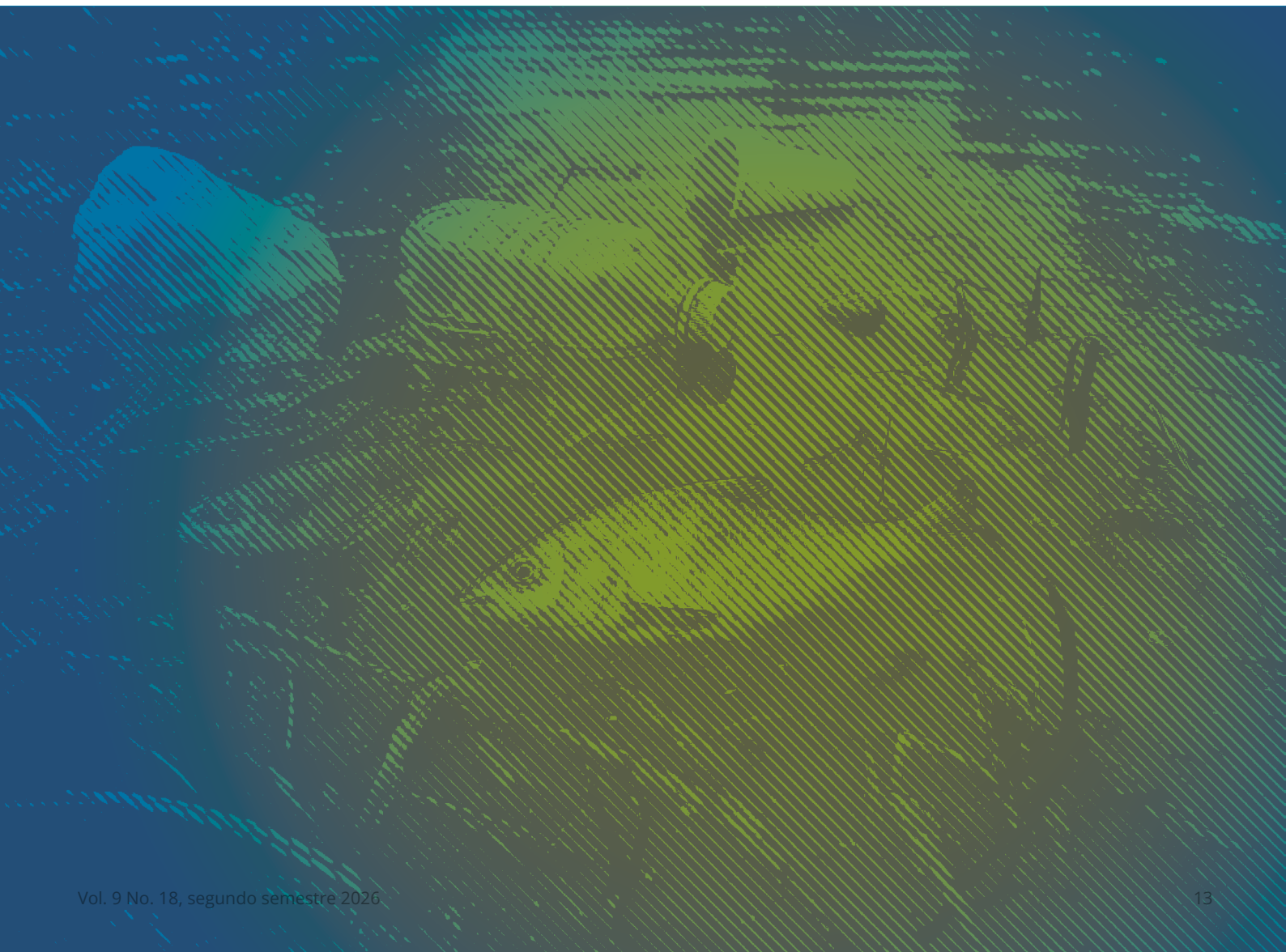
Esta integración de métodos permite abordar la amplia variedad de contaminantes presentes y compensar las limitaciones individuales de cada tecnología.

Además, el coste económico es un factor crucial en la selección y aplicación de estos métodos. La viabilidad de cualquier solución depende de encontrar un equilibrio entre la eficacia en la remoción de contaminantes y la accesibilidad económica, especialmente en comunidades vulnerables o en situaciones de crisis como la vivida en Monterrey. Por ello, es fundamental considerar tanto los costos de inversión inicial como los de operación y mantenimiento, priorizando tecnologías sostenibles y adaptables a diferentes contextos.

En escenarios de escasez, la purificación del agua debe ir acompañada de políticas de ahorro, educación ambiental y planeación urbana sustentable. El caso de Monterrey es una advertencia para otras ciudades: la disponibilidad de agua potable no está garantizada y depende de la acción coordinada de autoridades,

empresas y ciudadanía. Cuidar el agua y optimizar sus métodos de purificación no solo es una necesidad técnica, sino también un compromiso ético, social y económico para las generaciones presentes y futuras.

Además de los retos actuales en la disponibilidad y calidad del agua, persisten importantes vacíos de conocimiento sobre cómo integrar, a diferentes escalas, los métodos de purificación existentes en sistemas más eficientes desde el punto de vista energético y ambiental. En particular, se requiere avanzar en el desarrollo de tecnologías de desalinización que reduzcan de manera significativa el consumo energético y los costos operativos, así como en nuevas aproximaciones biotecnológicas capaces de remover contaminantes emergentes y mejorar la reutilización segura de aguas residuales. Estos campos de investigación son clave para transitar hacia esquemas de gestión hídrica más resilientes, equitativos y sostenibles, especialmente en regiones vulnerables a crisis como la experimentada recientemente en Monterrey.



Literatura citada



- Brenes-Esquivel, R., L.F. Rojas-Solano. 2005. El agua: sus propiedades y su importancia biológica. *Acta Académica*, 37(Noviembre), 167-196. <http://revista.uaca.ac.cr/index.php/actas/article/view/407>
- Campos, E.D.E., P.J.M. Castillo. 2022. Diseño y construcción de un prototipo automatizado para desinfectar agua superficial usando ozono y radiación ultravioleta en el aeropuerto de Jaén. *Revista Científica Pakamuros*, 10(1). <https://revistas.unj.edu.pe/index.php/pakamuros/article/view/170>
- Chakraborty, S.K., S.K. Chakraborty. 2021. Water: Its properties, distribution, and significance. *Riverine Ecology Volume 1: Eco-functionality of the Physical Environment of Rivers*, 23-55. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-53897-2_2
- Chian, E.S., W.N. Bruce, H.H. Fang. 1975. Removal of pesticides by reverse osmosis. *Environmental Science & Technology*, 9(1), 52-59. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es60099a009>
- Cirelli, A.F. 2012. El agua: un recurso esencial. *Química viva*, 11(3), 147-170. <https://www.redalyc.org/pdf/863/86325090002.pdf>
- Comisión Nacional del Agua. 2022. La desalinización de agua de mar es una alternativa viable para incrementar la disponibilidad del agua a la población. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conagua/prensa/la-desalinizacion-de-agua-de-mar-es-una-alternativa-viable-para-incrementar-la-disponibilidad-del-agua-a-la-poblacion>
- Comisión Nacional del Agua. 2023. Reporte del Clima en México 2022. Servicio Meteorológico Nacional. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>
- Curto, D., V. Franzitta, A. Guercio. 2021. A review of the water desalination technologies. *Applied Sciences*, 11(2), 670. <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/2/670>
- Dashtpour, R., S.N. Al-Zubaidy. 2012. Energy efficient reverse osmosis desalination process. *International Journal of Environmental Science and Development*, 3(4), 339. <https://fgwater.com/static/upload/file/20230615/1686809996898981.pdf>
- Dévora-Isiordia, G.E., R. González-Enríquez, S. Ruiz-Cruz. 2013. Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(3), 27-46. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222013000300002&script=sci_arttext
- Du Plessis, A. 2019. Current and Future Water Scarcity and Stress. In: *Water as an Inescapable Risk*. Springer Water. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03186-2_2
- Eshkoraev, S. 2024. Innovative methods in water purification: paving the way for sustainable clean water solutions. *Journal of universal science research*, 2(11), 458-463. <https://inlibrary.uz/index.php/universal-scientific-research/article/view/70900>
- Franco, E.F., R. Ramos, A. Ovando-Javier, E. Montero-Españat, S. Bonilla, A. Veda, 2023. Sensores de calidad de agua para el control de la contaminación fisicoquímica en los acuíferos de Latinoamérica: una revisión. *Ciencia, Ambiente y Clima*, 6(1), 45-70. <https://doi.org/10.22206/cac.2023.v6i1.pp45-70>
- Gabarron, S., G. Ferrero, M. Dalmau, J. Comas, I. Rodríguez-Roda. 2014. Assessment of energy-saving strategies and operational costs in full-scale membrane bioreactors. *Journal of Environmental Management*, 134, 8-14. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.023>
- Galal-Gorchev, H. 1996. Chlorine in water disinfection. *Pure and Applied chemistry*, 68(9), 1731-1735. <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1351/pac199668091731/html>
- García-Barradas, O. 2019. Un corto viaje por la química, agua, sal y aceite: aprender a hablar y escribir como químico. *Revista Eduscientia*. Divulgación de la ciencia educativa, 2(3), 49-57. <https://eduscientia.com/index.php/journal/article/view/43>
- Gil, M. J., A.M. Soto, J.I. Usma, O.D. Gutiérrez. 2012. Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción limpia*, 7(2), 52-73. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-04552012000200005&script=sci_arttext
- Glaze, W.H. 1987. Drinking-water treatment with ozone. *Environmental science & technology*, 21(3), 224-230. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es00157a001>
- Hernández Lozano, R., N.P. Pavón, 2024. Índices para el monitoreo de cuerpos de agua usando sensores remotos. *Acta universitaria*, 34. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-62662024000100108&script=sci_arttext
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2021. Censo de Población y Vivienda 2020: Panorama sociodemográfico de Nuevo León. INEGI. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Kordbacheh, F., G. Heidari, 2023. Water pollutants and approaches for their removal. *Materials Chemistry Horizons*, 2(2), 139-153. https://mch.du.ac.ir/article_324.html
- Leijon, J., C. Boström, 2018. Freshwater production from the motion of ocean waves – A review. *Desalination*, 435, 161-171. <https://doi.org/10.1016/j.DESAL.2017.10.049>
- Malaeb, L., G.M. Ayoub, 2011. Reverse osmosis technology for water treatment: State of the art review. *Desalination*, 267(1), 1-8. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916410006351>
- Martínez-Canales, L.A. 2023. "¡ No es sequía, es saqueo!" Propaganda y movimiento social durante la crisis hídrica en Monterrey, México, desde el sentido común de Gramsci. *Transdisciplinar. Revista de Ciencias Sociales del CEH*, 3(5), 130-172. <https://transdisciplinar.uanl.mx/index.php/t/article/view/74>
- Medrano, H., J. Bota, J. Cifre, J. Flexas, M. Ribas-Carbó, J. Gulías. 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones geográficas* (Esp), (43), 63-84. <https://www.redalyc.org/pdf/176/17604304.pdf>
- Mishra, R.K. 2023. Fresh water availability and its global challenge. *British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies*, 4(3), 1-78. <https://bjmas.org/index.php/bjmas/article/view/455>
- Pérez-Vidal, A., J. Díaz-Gómez, K.L. Salamanca-Rojas, L.Y. Rojas-Torres. 2016. Evaluación del tratamiento de agua para consumo humano mediante filtros Lifestraw® y Olla Cerámica. *Revista de Salud Pública*, 18, 275-289. <https://www.scielosp.org/pdf/rsap/2016.v18n2/275-289/es>
- Perilla Portilla, F.E., J.F. Quiroz Ortega. 2023. Microplásticos, una amenaza invisible para la salud humana y ambiente. *Revista Cubana de Salud Pública*, 49(4):e18019 http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-34662023000400010&lng=es&tlng=es.
- Portillo, M.T.E., Muñoz, G.E., J.A.S. Plata. 2006. Evaluación de los procesos de purificación de una despachadora de agua potable en Ciudad Juárez. *CULCYT: Cultura Científica y Tecnológica*, 3(13), 2. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7292790>

- Preston, T. 2018. A Ceramic Water Filter Design: Increasing Effectiveness of Safe Drinking Water Solutions (Doctoral dissertation, University of Guelph). <https://atrium.lib.uoguelph.ca/server/api/core/bitstreams/8c400a0d-64b3-4f0a-8f34-6adc82f102f9/content>
- Quinteros Ortega, L. 2017. Evolución de los derechos de aprovechamiento de aguas afectos al cobro de la patente por no uso de las aguas: período 2013-2015 (Doctoral dissertation, Universidad Academia de Humanismo Cristiano). <https://bibliotecadigital.academia.cl/items/9ec3462e-9f62-4c9d-91a8-6e30ad6452f9>
- Ramón, J.A. 2005. Tratamiento de aguas residuales urbanas utilizando la depuración simbiótica. Bistua: *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 3(2), 26-33. <https://www.redalyc.org/pdf/903/90330204.pdf>
- Riveros-Perez, E., R. Riveros. 2018. Water in the human body: An anesthesiologist's perspective on the connection between physicochemical properties of water and physiologic relevance. *Annals of medicine and surgery*, 26, 1-8. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2049080117304272>
- Román, P. 2024. Estado instala sistema de bombeo en Presa Libertad; garantiza 500 litros por segundo. *ABC Noticias*. <https://abcnoticias.mx/local/2024/4/27/estado-instala-sistema-de-bombeo-en-presa-libertad-garantiza-500-litros-por-segundo-215057.html>
- Salamanca, E. 2016. Tratamiento de aguas para el consumo humano. *Módulo Arquitectura - CUC*, 17(1), 29-48. <https://doi.org/10.17981/moducuc.17.1.2016.02>
- Sarria, V. M., S. Parra, Á.G. Rincón, C. Pulgarín, R.A. Torres, 2005. Nuevos sistemas electroquímicos y fotoquímicos para el tratamiento de aguas residuales y de bebida. *Revista colombiana de química*, 34(2), 161-173. https://www.lareferencia.info/vufind/Record/CO_721ec7881c11f7d2d8293035992b6ca1
- Secretaría de Salud. 2021. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua (NOM-127-SSA1-2021). Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650703&fecha=20/12/2021
- Serra Añó, P., E. Barba Campos, D. Corella Piquer. 2024. Más claro, agua: Guía para un uso del agua más saludable y sostenible. *Publicacions De La Universitat De València*. Recuperado a partir de <https://omp.uv.es/index.php/PUV/catalog/book/642>
- Siddique, I. 2021. Sustainable Water Management in Urban Areas: Integrating Innovative Technologies and Practices to Address Water Scarcity and Pollution. *The Pharmaceutical and Chemical Journal*, 8(1), 172-178. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4883898
- Siong, Y.K., J. Idris, M. Atabaki. 2013. Performance of activated carbon in water filters. *Water Resources*, 1-19. https://www.researchgate.net/profile/Jamaliah-Idris/publication/234060484_Performance_of_activated_carbon_in_water_filters/links/0912f511d935786b08000000/Performance-of-activated-carbon-in-water-filters.pdf
- The New York Times en Español. (2022, 3 de agosto). Sequía en México: el país enfrenta una emergencia del agua. <https://www.nytimes.com/es/2022/08/03/espanol/mexico-montreyy-agua-sequia.html?smid=url-share>
- UNESCO. 2024. Las aguas residuales – El recurso desaprovechado. Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2017.
- Vargas, A.K., J. Calderón, D. Velásquez, M. Castro, D.A. Núñez, 2020. Análisis de los principales sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales domésticas en Colombia. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 28(2), 315-322. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052020000200315>.
- Voutchkov, N. 2022. Desalinated Water. In: Qadir, M., Smakhtin, V., Koo-Oshima, S., Guenther, E. (eds) *Unconventional Water Resources*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90146-2_11
- Wei, C., F. Zhang, Y. Hu, C. Feng, H. Wu. 2017. Ozonation in water treatment: the generation, basic properties of ozone and its practical application. *Reviews in Chemical Engineering*, 33(1), 49-89. <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/revce-2016-0008/html>
- Zuñiga, J.M.M., N.E.P. Ávila. 2023. Evaluación y diseño de políticas públicas para abordar la disponibilidad y calidad del agua en la crisis hídrica de Monterrey y su área metropolitana. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(3), 7865-7878. <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/6768>