

Gutiérrez-Laffon, Y.M., Muñoz-Talango, D.G., Abatal, M., Anguebes-Franceschi, F. 2025. Técnicas y Materiales Aplicados para el Ablandamiento de Agua, p. 283-302. En: J.G. Cerón Bretón, R. M. Cerón Bretón y M. López Cisneros (ed.). Tópicos Selectos de Contaminación Ambiental. Universidad Autónoma de Campeche. 366 p. ISBN 978-607-8907-33-5. doi 10.26359/EPOMEX01202514.

Técnicas y Materiales Aplicados para el Ablandamiento de Agua

*Y. M. Gutiérrez-Laffon¹, D. G. Muñoz-Talango¹,
M. Abatal¹ y F. Anguebes-Franceschi²*

¹Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma del Carmen

²Facultad de Química
Universidad Autónoma del Carmen

Resumen

En este capítulo, se presentan los parámetros fisicoquímicos del agua y sus límites permisibles de acuerdo a las normativas nacionales e internacionales. Los parámetros como el pH, la alcalinidad, la conductividad, entre otros, resulta esencial para garantizar la calidad del agua. Se presentan los métodos para la eliminación de la dureza, tales como, tecnología de membranas, ósmosis inversa, electrodiálisis, intercambio iónico, adsorción y biofiltración. Así como los factores que influyen sobre el porcentaje de la eliminación de la dureza del agua como, el tiempo de contacto, el pH de la solución, la temperatura. Se resaltó que las tecnologías de membranas e intercambio iónico son eficientes y de bajo costo, pero pueden verse afectadas por sus altos costos de mantenimiento. En comparación con la ósmosis inversa y la electrocoagulación son técnicas de alta eficiencia de eliminación de dureza, pero de alto costo de operación. Finalmente, la biofiltración se considera atractiva debido a la disponibilidad de diversos bioadsorbentes naturales.

Palabras clave: dureza del agua, ablandamiento del agua, técnicas y materiales sostenibles.

Abstract

In this chapter, we present the physicochemical parameters of water and their permissible limits according to national and international regulations. Parameters such as pH, alkalinity, and conductivity are essential for ensuring water quality. We also discuss methods for removing hardness; including membrane technology, reverse osmosis, electro-dialysis, ion exchange, adsorption, and bio-filtration. We examine the factors that influence the percentage of water hardness removal, such as contact time, solution pH, and temperature. We highlight that membrane and ion exchange technologies are efficient and low-cost, but can be affected by high maintenance costs. Compared to reverse osmosis and electrocoagulation, these techniques are highly efficient for removing hardness but come with high operating costs. Finally, bio-filtration is considered attractive due to the availability of various natural adsorbents.

Keywords: Water hardness, Water softening, Sustainable techniques and materials.

Introducción

El agua es un recurso vital para la subsistencia de la humanidad. A pesar de que la Tierra está compuesta en un 70 % de agua, solamente el 3 % es dulce y el 0.06 % es accesible (Ahuja, 2016), por lo que ha generado preocupaciones sobre la disponibilidad y acceso al agua potable.

Los recursos hídricos son muy importantes para mantener un suministro adecuado de alimentos y un entorno productivo para los organismos. El crecimiento demográfico contribuye a la demanda mundial, tomando en cuenta la disponibilidad de agua por persona (Kılıç, 2020), aproximadamente mil millones de personas en el mundo no pueden acceder al agua potable. En la actualidad, hay dificultades para asignar equitativamente los recursos de agua dulce tanto a nivel nacional como internacional. La contaminación del agua es una problemática global, se estima que hasta un 90% de las aguas residuales fluyendo se descargan sin tratamiento, contaminando las aguas superficiales como subterráneas y afectando no

solo la salud humana, sino que también deteriora la calidad del agua disponible (Kılıç, 2020). Por ello, varios investigadores han desarrollado varios procesos de tratamiento del agua con el fin de mejorar los parámetros físicoquímicos del agua natural de acuerdo con las normativas nacionales e internacionales.

La dureza del agua presenta riesgos para la salud como osteoporosis, nefrolitiasis, cáncer colorrectal, hipertensión, accidente cerebrovascular, enfermedad de las arterias coronarias, entre otras (Akram & Rehman, 2018), además provoca problemas como incrustaciones en tuberías y electrodomésticos (Tang *et al.*, 2021). El ablandamiento del agua es crucial para mitigar estos problemas y garantizar un suministro seguro y saludable del agua. Este capítulo se centra en técnicas y materiales aplicados para el ablandamiento del agua, explorando métodos que buscan eliminar la dureza del agua y mejorar su calidad.

Métodos y técnicas de investigación

Parámetros físicoquímicos del agua

Antes de analizar las diferentes técnicas de ablandamiento del agua, es necesario conocer los parámetros físicoquímicos del agua para determinar si es apta para el uso y el consumo humano.

La dureza del agua corresponde principalmente a la suma de los cationes de calcio y magnesio disueltos en el agua, y se añaden

otros iones como el aluminio, hierro, manganeso, entre otros. Su medida se expresa en miligramos por litro (mgL^{-1}). La norma NOM-127-SSA1-1994 establece el límite máximo permisible de dureza total en 500 MgL^{-1} en aguas residuales tratadas que se descargan en cuerpos de agua receptores. La dureza del agua es causada por carbonatos, sulfatos y cloruros que son disueltos en el agua a su paso por el suelo, estos tienen diferentes

efectos sobre el agua. (Dey *et al.*, 2024). Las sales como los carbonatos son las que generan las incrustaciones, mientras que sales de cloruro son corrosivas (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 2000; Secretaría de Economía, 2001).

El agua proveniente de manantiales naturales tiene ciertas concentraciones de minerales que provocan su dureza, la cual se clasifica como blanda, moderadamente dura, dura o muy dura dependiendo de la cantidad de CaCO_3 (tabla 1).

La dureza del agua tiene interacción con otros parámetros fisicoquímicos que caracterizan el agua como el pH, el cual se define la concentración de iones de hidrogeno. La escala es de 0 a 14, tomando como 7 neutro, los valores inferiores a 7 se consideran ácidos y los mayores a 7 alcalinos. (Secretaría de Salud, 2021) (figura 1).

La norma mexicana NMX-AA-008-SCFI-2016, analiza el pH en las aguas naturales, residuales y residuales tratadas. El agua con dureza menor a 100 MgL^{-1} , pueden tener una capacidad de amortiguación del pH baja y ser más propensa a corroer las tuberías de agua. En aguas alcaninas puede propiciar la formación de incrustaciones. La cantidad de dureza carbonatada frente a la dureza no carbonatada se puede determinar mediante la medición de la alcalinidad en función de la suma de las concentraciones de iones carbonato (CO_3^{2-}), bicarbonato (HCO_3^-) e hidroxilos (OH^-) en menor cantidad.

La NOM-127-SSA1-2021 definen como sólidos disueltos totales (TDS) a la cantidad total de materiales disueltos en el agua, esto incluye las sales y los minerales. El nivel máximo admisible de TDS $1\,500 \text{ MgL}^{-1}$, el cual garantiza que las aguas residuales trata-

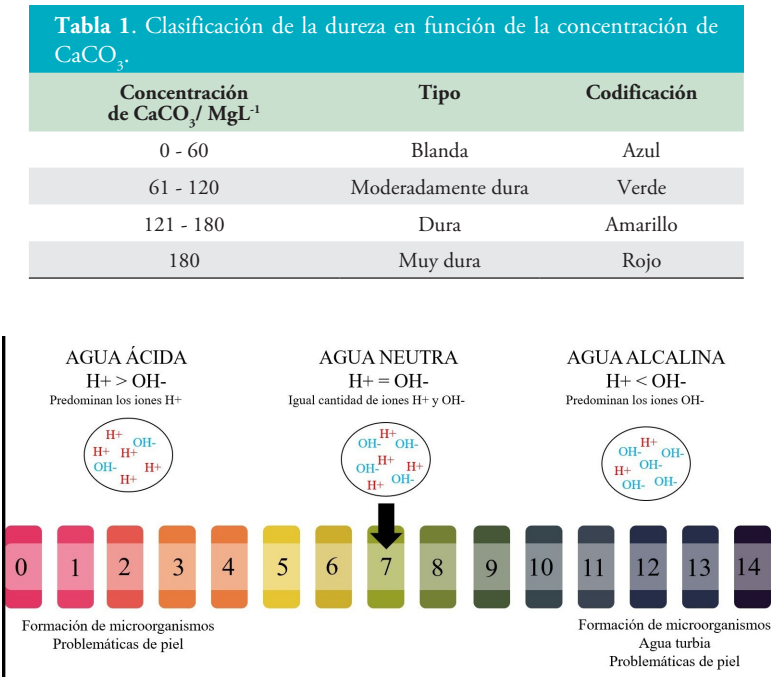


Figura 1. Escala de pH.

das que se vierten no contengan una concentración excesiva de sólidos disueltos que pueda afectar a la calidad del agua (Secretaría de Salud, 2021).

Otra propiedad del agua es su capacidad de conducir corriente eléctrica y se atribuye a la presencia de iones disueltos en la solución. Cuanto mayor sea la concentración de iones en el agua, mayor será su conductividad eléctrica. La determinación de conductividad es de gran importancia pues da una idea del grado de mineralización del agua (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 2000; Secretaría de Salud, 2021). En la tabla 2 se presentan los límites permisivos de los parámetros fisicoquímicos del agua para el uso y consumo humano, de acuerdo a la norma oficial mexicana y otros organismos internacionales.

Técnicas de ablandamiento del agua

En esta sección, se describen los diferentes métodos que se han empleado para la conversión de agua dura a blanda como las técnicas electroquímicas, tecnología de membranas, adsorción e intercambio iónico.

Ablandamiento por membranas

Los procesos de membrana ofrecen una solución eficiente para la eliminación de una amplia gama de contaminantes encontrados en el agua, además de su simplicidad de operación y costo relativamente bajo. La mayoría de los procesos de membrana utilizan diferencias de presión y temperatura. El proceso de transferencia de sustancias en la membrana se basa en las fuerzas impulsoras de transferencia de masa y fenómenos asociados (Wang, 2024). Estos sistemas pueden ser sistema de presión y sistema de vacío. (figura 2).

Esta tecnología se compone principalmente de una película porosa llamada membrana, este sistema de separación está basado por el tamizado de partículas, se basa en la relación existente entre el diámetro de los poros, la densidad superficial de poros y la porosidad en volumen de la membrana. Las partículas excluidas quedan detenidas, por otra parte, algunas partículas pueden llegar a traspasar la membrana. (figura 3).

Las membranas de microfiltración (MF) se utilizan para remover el color, turbiedad y patógenos. Los poros de estas membranas

Tabla 2. Límites permisibles de la calidad del agua para uso y consumo humano (Environmental Protection Agency, 2024; Secretaría de Salud, 2021; World Health Organization, 2022).

Parámetro	NOM-127-SSA1-2021	Organización Mundial de Salud	EPA
Turbiedad (UNT)	4.0	4.0	-
pH	6.5 a 8.5	6.5 a 8.5	6.5 a 8.5
Dureza total como CaCO_3 (MgL^{-1})	500.00	200	-
Alcalinidad	-	-	-
Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$) a 25 °C	5.0 Máx.	-	-
Sólidos disueltos totales (MgL^{-1})	1000.00	1000.00	500.00

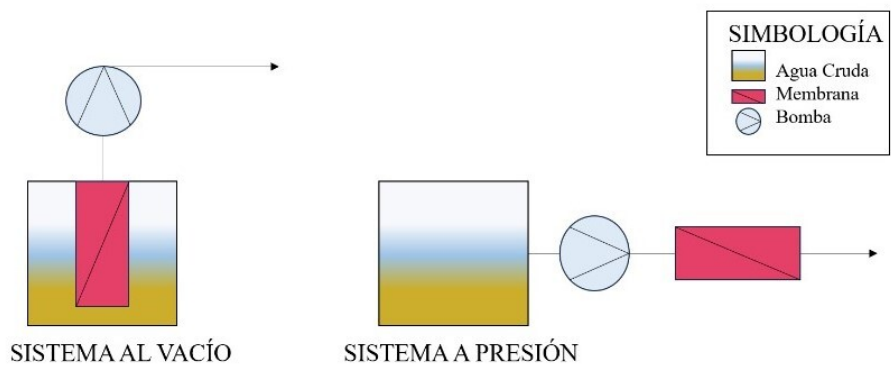


Figura 2. Clasificación de sistema de membranas por presión.

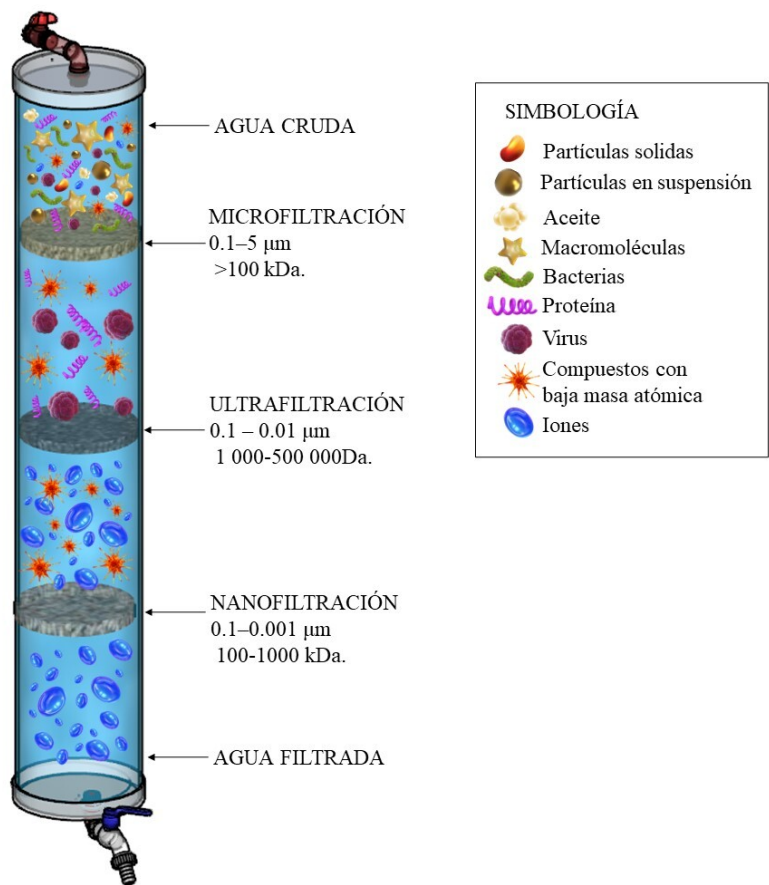


Figura 3. Funcionamiento de membranas.

son de 0.1–5 μm o >100 kDa. Es capaz de eliminar materia de tamaño micrométrico, como partículas suspendidas, patógenos importantes, bacterias grandes, proteínas y células de levadura basándose en el principio de separación física. (Anis *et al.*, 2019). La capacidad de eliminar una variedad de contaminantes a gran escala hace que MF sea un proceso de membrana versátil. Las condiciones de operabilidad del sistema de microfiltro deben contar con una presión que oscila entre 0.1 y 2 atm. En cuestiones de temperatura, se considera temperaturas superiores al ambiente.

La ultrafiltración es un proceso efectivo, prácticamente evita el paso de la mayoría de las sustancias presentes en el fluido hasta tamaños pequeños como los virus, coloides, proteínas y azúcares. La ultrafiltración (UF) se ha aprovechado en la filtración por membrana para separar mecánicamente materiales de una mezcla. Este proceso de separación se dirige a moléculas que contienen un mayor peso molecular y sólidos suspendidos, dependiendo del límite de peso molecular. El principal mecanismo utilizado para la UF es la exclusión por tamaño; sin embargo, dependiendo de los compuestos presentes, las reacciones entre las partículas y la membrana podrían impedir el máximo eficiencia del proceso (Al Aani *et al.*, 2020). En las membranas de ultrafiltración el tamaño de poro ronda entre 10–100 nm y su valor de corte es de 1–100 kDa.

La nanofiltración nos permite obtener un agua de alta calidad. El sistema de nanofiltración reduce aún más la porosidad, evitando componentes de 0.1 a 0.0001 nm. La nanofiltración se halla entre la ósmosis inversa y la ultrafiltración. Las características distin-

tivas de las membranas nanofiltración (NF) son el bajo rechazo de iones monovalentes, alto rechazo de iones divalentes y mayor flujo comparado con las membranas de ósmosis inversa (Mohammad *et al.*, 2015). Es por ello que la nanofiltración es ideal para el ablandamiento de agua, la eliminación de metales pesados, eliminación de orgánicos disueltos, nitratos y como tratamiento de aguas residuales. Otras aplicaciones en la industria farmacéutica y biotecnología, e ingeniería de alimentos.

Las membranas pueden fabricarse con diversos materiales como cerámica, grafito, metal, óxidos metálicos y polímeros. También pueden ser clasificadas por su estructura y material, así como por el tamaño de sus poros (tabla 3). Su estructura puede ser simétrica o asimétrica. En la simetría los diámetros de los poros no varían, mientras que en la simétrica los diámetros de los poros aumentan de un lado de la membrana al otro en un factor de 10–1000 (Strathmann, 2011).

Ablandamiento por ósmosis inversa

La ósmosis inversa es conocido como sistema de separación físico, es una técnica útil y bien desarrollada para la purificación y desalinización del agua. Se ha considerado un tratamiento económico para la desalinización del agua de mar y agua salobre, obteniendo agua ultrapura y agua pura. Según las estadísticas, desde que la tecnología de ósmosis inversa entró en el mercado de desalinización de agua de mar en 1969, representó el 88 % del mercado mundial de desalinización de agua de mar en 1995 (Wang, 2024).

Tabla 3. Materiales utilizados para la fabricación de las membranas.				
Tipo de membrana	Material	Tamaño de poro (µm)	Proceso de preparación	Aplicaciones
Simétrico	Cerámico, metal, polímero y grafito	0.1-20	Prensado y sinterización de polvo	Microfiltración, separación de gases
Simétrico	Polímero con cristalinidad parcial	0.2-10	Extrusión y estiramiento de películas	Microfiltración, separador de batería
Simétrico	Polímero, mica	0.05-5	Irradiación y grabado de películas	Microfiltración, filtros de punto de uso
Simétrico	polímero, metal, cerámico	0.5-20	Plantilla de lixiviación de películas	Microfiltración
Simétrico	Polímero	0.5 - 10	Inversión de fase inducida por la temperatura	Microfiltración
Asimétrico	Polímero	< 0.01	Inversión de fase inducida por difusión	Ultrafiltración
Asimétrico	Cerámico	< 0.01	Gel de membrana compuesta – proceso sol	Ultrafiltración

El proceso de ósmosis consiste en pasar el agua a través de una membrana semipermeable que permite el paso al agua, reteniendo contaminantes disueltos y no disueltos del agua. (Biesheuvel *et al.*, 2022) Al contrario de una ósmosis normal, la ósmosis inversa emplea una mayor presión en el lado en que la concentración de impurezas y salinidad es mayor. (figura 4) Las membranas son una tecnología complementaria de ósmosis inversa.

La ósmosis inversa tiene como principal objetivo en la desalinización de agua de mar y agua salobre, descontaminación de aguas urbanas e industriales, así como el uso en procesamiento de alimentos y concentración de algunos productos (vinos, aceites, medicamentos, etc.) (Wang, 2024) El proceso de ósmosis inversa ayuda a producir agua potable de buena calidad con sabor neutro. Su calidad de filtración dependerá de la presión osmótica, la concentración, el gradiente electroquímico y la temperatura de las moléculas o de los solutos, así como del material en que están compuesto las membranas.

En la actualidad, los materiales de membranas de ósmosis inversa incluyen principalmente acetato de celulosa, aromáticos y poliamida. También se utilizan algunos materiales para mejorar el rendimiento de la membrana o preparar membranas polibenzimidazol (PBI), óxido de polifenileno (PPO), polivinilbutiral (PVB), etc. Las características de las membranas utilizadas en las técnicas de ósmosis inversa deben considerar una alta tasa de rechazo y alto flujo de agua, así como su flexibilidad y resistencia mecánica, vida útil larga, preparación y mantenimiento sencillo, estabilidad física y química, resistencia a altas temperaturas y buena resistencia a las posibles incrustaciones. (Wang, 2024)

Ablandamiento por electrodiálisis

La mayor parte de las aguas naturales, industriales o domésticas contienen iones de calcio y carbonato, que son susceptibles de provocar problemas de incrustaciones en las instalaciones provocando fallos graves. Se utilizan métodos electroquímicos para pre-

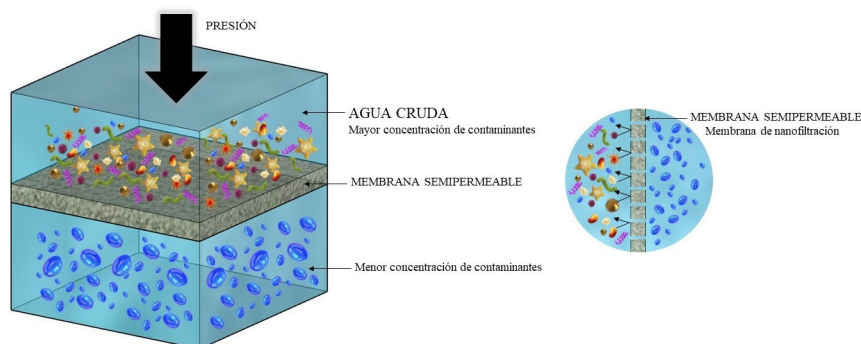


Figura 4. Proceso de ósmosis inversa.

venir la incrustación de estos compuestos. (Gabrielli *et al*, 2006). La tecnología electroquímica tiene gran potencial en la aplicación industrial, en los últimos años se ha avanzado mucho en la mejora del sistema electroquímico de ablandamiento de agua para la eliminación de la dureza y esto ha sentado las bases para promover la aplicación industrial de esta tecnología.

La electrodiálisis se originó a partir de la combinación de diálisis y electrólisis para realizar la desmineralización (Scarazzato *et al.*, 2020). En la electrodiálisis se utilizan dos tipos de membranas: de intercambio aniónico y de intercambio catiónico. Estos dos tipos de membranas se alternan en una pila de membranas de modo que se obtiene una unidad repetitiva que consta de un compartimento con una membrana de intercambio aniónico en el lado derecho y una membrana de intercambio catiónico en el izquierdo. Se aplica una diferencia de potencial eléctrico utilizando electrodos en ambos extremos de la pila. Los iones pasan fácilmente a través de las membranas de intercambio de cationes con carga negativa,

pero son retenidos por las membranas de intercambio de aniones con carga positiva. De manera similar, se puede observar en la figura 5, que los aniones cargados negativamente migran hacia el ánodo, pasan a través de la membrana de intercambio de aniones y son retenidos por la membrana de intercambio de cationes (Van der Bruggen, 2015).

La electrodiálisis es un proceso físico que presenta la ventaja de evitar cualquier adición de productos químicos y requiera un mantenimiento ligero. También podrían considerarse “tecnologías verdes” porque se necesitan pocos o ningún producto químico para facilitar el tratamiento del agua.

Ablandamiento por intercambio iónico

El intercambio iónico es un proceso fundamental en la química y la ingeniería de materiales, que implica el movimiento reversible de iones entre dos fases, parcialmente una fase sólida y una fase líquida. En este proceso, los iones presentes en una solución acuosa son adsorbidos selectivamente por un material sólido, conocido como intercambiador iónico o resina de intercambio

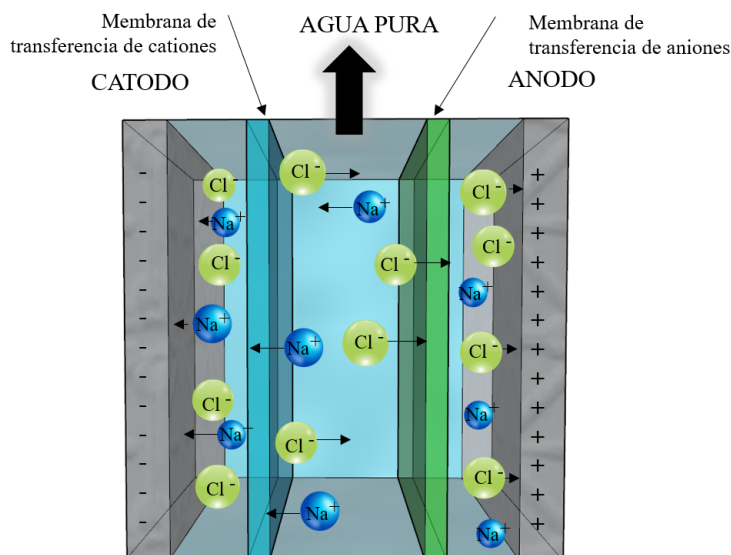


Figura 5. Proceso de electrodiálisis.

iónico, y son reemplazados por iones de carga opuesta presentes en el material sólido (Sillanpää & Levchuk, 2015). Esta capacidad de intercambio de iones es característica de ciertos materiales con grupos funcionales específicos que pueden interactuar electrostáticamente con los iones en solución.

El intercambiador iónico, al ser inmisible en la fase líquida, permite la movilización selectiva de iones sin ocasionar cambios estructurales significativos en él (Sillanpää & Levchuk, 2015). Esto significa que el material de intercambio iónico puede retener y liberar selectivamente iones según las condiciones de la solución y sus propiedades. Además, la capacidad para preservar su estructura es fundamental para su reutilización y su rendimiento a largo plazo en aplicaciones de tratamiento de agua o en otras áreas.

Los intercambiadores de cationes tienen grupos funcionales cargados positivamente

que atraen y retienen cationes de carga positiva presentes en la solución, como los iones de calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+), entre otros. Por otro lado, los intercambiadores de aniones tienen grupos funcionales cargados negativamente que atraen y retienen aniones de carga negativa, como los iones de cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}), nitrato (NO_3^-), entre otros (Sillanpää & Levchuk, 2015; Tang *et al.*, 2021). Este proceso de intercambio se basa en las fuerzas electrostáticas entre los grupos funcionales de la resina y los iones en solución, lo que resulta en una preferencia por los iones de la misma carga. Esta distinción permite la selección específica del tipo de material según las necesidades del proceso de tratamiento de agua.

El intercambio iónico se ha convertido en una técnica ampliamente utilizada para el ablandamiento del agua, ofreciendo una

solución efectiva para reducir la dureza del agua y prevenir la formación de incrustaciones. En este proceso, la resina de intercambio iónico es el material más utilizado (World Health Organization, 2022), atrapando selectivamente los iones de calcio y magnesio, el resultado es un agua ablandada que es más compatible con una variedad de aplicaciones industriales y domésticas. Las resinas están compuestas de polímeros porosos una gran área superficial para el intercambio de iones. Además, suelen tener forma de pequeños gránulos redondos, lo que facilita su uso en sistemas de lecho fijo o columnas de intercambio iónico (Boonpanaid & Piyamongkala, 2023). Estos gránulos pueden tener diferentes tamaños, dependiendo de la aplicación específica y del fabricante de la resina.

Por ejemplo, las resinas comerciales como Amberlite (A) y NuoSep (B) se utilizan comúnmente para ablandar el agua en hogares de la ciudad de Bankoko (Boonpanaid & Piyamongkala, 2023). Después de perder eficacia, estas resinas pueden regenerarse para su reutilización. Sin embargo, la desventaja de esa regeneración es que tiende a deteriorarse más rápidamente, lo que limita su vida útil. Esto se debe a que los iones de sodio utilizados en la regeneración no pueden reemplazar por completo los iones de dureza en la resina debido a su débil atracción electrostática, reduciendo así su capacidad de intercambio iónico.

Además de las resinas, existen otras alternativas para el ablandamiento del agua, como los bioadsorbentes y las zeolitas (Dey *et al.*, 2024; Hailu *et al.*, 2019). Los bioadsorbentes son materiales derivados de fuentes biológicas, como los desechos y detritos

agrícolas entre otros, que tienen la capacidad de adsorber contaminantes o iones en soluciones acuosas (Dey *et al.*, 2024). Los grupos funcionales cargados presentes en algunos bioadsorbentes tienen afinidad por los iones de dureza en el agua, lo que facilita su adsorción o intercambio con otros iones como iones de hidrógeno o sodio (Dey *et al.*, 2024). Este proceso de intercambio iónico en los bioadsorbentes proporciona una solución efectiva y sostenible para el ablandamiento del agua, ya que aprovecha los materiales naturales que son considerados como desechos.

Por otro lado, las zeolitas son materiales naturales o sintéticos con una estructura cristalina porosa que les confiere propiedades únicas para el tratamiento del agua. Estos minerales tienen una alta estabilidad química y mecánica. Su estructura tridimensional está compuesta por tetraedros de silicio y aluminio, con canales y poros de tamaño uniforme que permiten la adsorción selectiva de iones y moléculas (Krstić, 2021). En el proceso de ablandamiento del agua, las zeolitas actúan intercambiando iones de calcio y magnesio por iones de sodio presentes en su estructura (Hailu *et al.*, 2019; Krstić, 2021). Además de su uso en el ablandamiento del agua, las zeolitas también se utilizan en la eliminación de metales pesados, compuestos orgánicos volátiles y otros contaminantes presentes en el agua (Krstić, 2021; Van Bekkum *et al.*, 2001). Su versatilidad y eficacia las convierten en una opción popular en una variedad de aplicaciones de tratamiento de agua. Cada material tiene sus propias características y aplicaciones en el proceso de ablandamiento del agua, ofreciendo alternativas a las resinas de inter-

cambio iónico en función de las necesidades específicas del sistema y las condiciones de operación.

Para garantizar la eficacia y el rendimiento óptimo en el ablandamiento del agua y para otras aplicaciones, es necesario que los intercambiadores de iones cumplan con una serie de requisitos. Estos requisitos incluyen la hidrofiliidad del material, estabilidad química y física, una velocidad adecuada de intercambio iónico, así como un tamaño de partícula y área superficial efectiva, adecuados para la aplicación (Sillanpää & Levchuk, 2015; Van Bekkum *et al.*, 2001).

Los materiales utilizados para el intercambio iónico en el ablandamiento del agua pueden aplicarse de diversas formas, dependiendo de las condiciones de operación. Una de las técnicas comunes es el uso de columnas de intercambio iónico, por ejemplo, la resina de intercambio iónico se empaqueta en una columna a través de la cual fluye el agua dura (World Health Organization, 2022). También, se puede realizar el proceso en lotes, donde el intercambiador iónico se mezcla con la solución en un tanque y luego se separa (Dey *et al.*, 2024; Sillanpää & Levchuk, 2015). Sin embargo, este método puede ser menos eficiente en términos de regeneración del material, lo que limita su uso en aplicaciones industriales a gran escala.

La regeneración del intercambiador iónico permite restaurar la capacidad de intercambio del material usado después de su agotamiento, es decir, cuando los sitios activos de intercambio están ocupados por iones adsorbidos (Krstić, 2021). Este proceso de regeneración generalmente implica el lavado con una solución concentrada de cloruro de sodio (Boonpanaid & Piyamongkala, 2023;

Dey *et al.*, 2024; Hailu *et al.*, 2019), para reemplazar los iones adsorbidos con iones de carga opuesta. Es importante destacar que, con el tiempo y el uso continuo, la eficiencia de regeneración del intercambiador iónico puede disminuir, lo que puede requerir la sustitución periódica del material (Boonpanaid & Piyamongkala, 2023). Por lo tanto, es crucial llevar a cabo un adecuado control y monitoreo del proceso.

El intercambio iónico asegura un ablandamiento efectivo del agua además de la capacidad de reutilización de los materiales de intercambio iónico, lo convierte en una opción popular y rentable en el tratamiento de aguas duras. Este método permite la eliminación eficiente de una amplia gama de contaminantes orgánicos al igual que inorgánicos, como metales pesados, los nitratos, fluoruros, arseniato y uranio. Además de su uso en el tratamiento de aguas, el intercambio aniónico también encuentra aplicaciones en la industria de detergentes, donde ayuda a eliminar iones no deseados que pueden afectar la calidad del producto final (Dey *et al.*, 2024; Van Bekkum *et al.*, 2001; World Health Organization, 2022). Su capacidad para purificar y mejorar la calidad del agua y otros productos lo convierte en una técnica valiosa en una variedad de contextos industriales.

Ablandamiento por adsorción

La adsorción es un proceso mediante el cual sustancias, como iones o moléculas, se adhieren a la superficie del adsorbente, quedando retenidas en ella debido a diversas interacciones, como fuerzas de atracción intermoleculares o enlaces químicos débiles, lo que resulta en una concentración mayor de estas

sustancias en la superficie del adsorbente en comparación con el líquido circundante. A diferencia del intercambio iónico, donde se produce un intercambio de iones entre el adsorbente y la solución, la adsorción implica una acumulación física en la superficie del adsorbente, lo que conlleva un diseño más simple en comparación con el intercambio iónico. Además, la adsorción suele ser más económica que la ósmosis inversa, que, aunque efectiva, puede ser costosa.

La adsorción puede emplear una variedad de adsorbentes para la remoción de la dureza del agua. Entre estos adsorbentes, la arcilla ha demostrado ser eficiente para el ablandamiento del agua debido a su estructura porosa y su capacidad para adsorber iones de dureza. Por ejemplo, un estudio ha demostrado que la Biyagama (arcilla de cuarzo y caolinita) y Deniyaya (arcilla de cuarzo, caolinita y goethita), los cuales son un tipo de arcilla, puede reducir significativamente la dureza del agua (Wickramasuriya *et al.*, 2021). Además, se demostró que la arcilla al ser modificada con NaCl aumenta aún más su eficacia en la adsorción. Por otro lado, la combinación de adsorbentes también ofrece resultados prometedores. Por ejemplo, la combinación de arcilla con biopolímeros como el quitosano ha mostrado una eficacia del 90 % para la remoción de dureza en el agua (Mohamed *et al.*, 2023).

Ablandamiento por biofiltración

Los biofiltros son una técnica sustentable utilizados para la remoción de contaminantes en el agua. (Anderson *et al.*, 2022). La bioadsorción es la capacidad que tienen algunos materiales orgánicos de llevar a cabo un proceso físico-químico y metabólica-

mente independiente basado en una variedad de mecanismos que incluyen absorción, adsorción, intercambio iónico, complejación de superficies y precipitación (Fomina & Gadd, 2014) (figura 6). La bioadsorción solo ocurre en ambientes específicos y no necesita ningún tipo de energía por lo cual se considera una tecnología verde y de bajo costo (Dey *et al.*, 2024). Existen factores que influyen capacidad de adsorción, como son el pH, la temperatura, la presión, la activación y la concentración de contaminantes (Dey *et al.*, 2024; Fomina & Gadd, 2014). La biosorción se lleva a cabo en dos fases, la fase sólida incluye biosorbentes, material biológico, y detritos. Y la fase líquida incluye disolventes (Fomina & Gadd, 2014). Se caracterizan en dos categorías: diseñados o pasivo. Los biofiltros diseñados optimizan la acumulación de biomasa activa por medios filtrantes y estrategias como ajuste de pH, creando un entorno diseñado dentro del medio filtrante promoviendo el crecimiento de microbacterias. Mientras que los biofiltros pasivos resultan de crecimiento involuntario de biomasa. Algunos biofiltros son mejorados, añadiendo componentes para alcanzar mejores niveles de adsorción.

En la actualidad, los biosorbentes se utilizan para eliminar o reducir la alcalinidad, así como el cloruro del agua. Esto ocurre porque los biosorbentes tienen ciertas características en ellos, como la presencia de ciertos grupos químicos funcionales: amina, amida, imidazol, tioéter, sulfonato, carbonilo, sulfhidrilo, carboxilo, di-éster de fósforo, fenólico, imina y fosfato (Dey *et al.*, 2024). Algunos biosorbentes los podemos encontrar en microorganismos, materiales de origen vegetal, deshechos agrícolas o industriales.

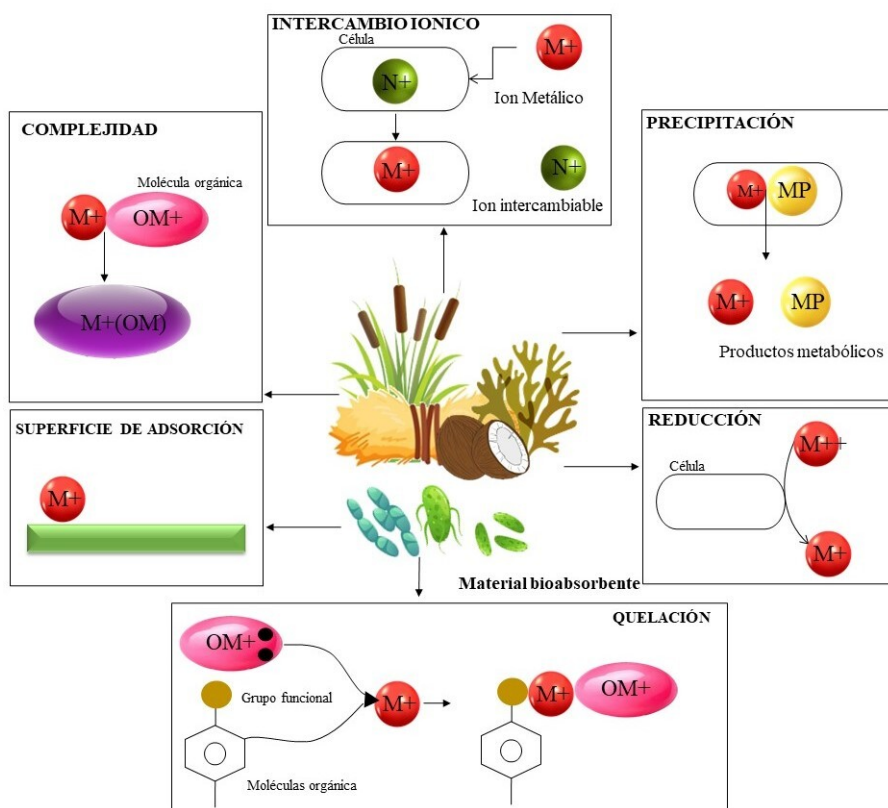


Figura 6. Diferentes mecanismos para la eliminación de la dureza por los biosorbentes.

Los bioadsorbentes han demostrado ser eficaces en la remoción de dureza del agua mediante procesos de biosorción (Dey *et al.*, 2024). Estos materiales orgánicos, derivados de microorganismos, materiales vegetales, desechos agrícolas o industriales, son capaces de adsorber iones de dureza, como calcio y magnesio, gracias a la presencia de diversos grupos químicos funcionales en su estructura, como amina, amida, carboxilo, sulfonato, entre otros (Dey *et al.*, 2024). La

capacidad de los bioadsorbentes para interactuar con los iones de dureza se ve facilitada por su superficie porosa y su capacidad de intercambio iónico, lo que los convierte en una opción prometedora y sostenible para el ablandamiento del agua (Dey *et al.*, 2024). Además, la biosorción es un proceso natural y de bajo costo, lo que hace que los bioadsorbentes sean una alternativa atractiva en comparación con otros métodos convencionales de tratamiento de agua.

Resultados y discusión

En este apartado analizaremos la optimización de los tratamientos para la eliminación de la dureza de agua. Definiendo las condiciones en las que se encontraba el agua, la técnica, el porcentaje de optimización y algunos de los materiales empleados.

En el caso de las membranas y ósmosis inversa existen procesos híbridos para la eliminación de dureza en agua, donde hay un mejor porcentaje de recuperación como en el caso de la investigación realizada por Elazhar *et al.*, donde el sistema híbrido analiza las diferentes presiones aplicadas de 10 bar correspondientes a 90.91 y 41.38 L/h de flujo de agua respectivamente. Se compara el rendimiento del consumo de energía de la (NF-NF) y el sistema híbrido (NF-RO) en la eliminación de dureza con una recuperación de 95 % y un menor coste energético. (tabla 4)

En la investigación realizada por Bachiri *et al.* (2024), (tabla 5) donde se emplea la electrodialisis como técnica de eliminación de la

dureza del agua, obtiene una eficiencia del 87% utilizando para su diseño experimental tres bombas y tres tanques de solución para concentrado, diluido y enjuague de electrodos, cada uno con una capacidad de 2 litros. La celda (Modelo TS-2-10) está compuesta por diez células repetidas con membranas de intercambio aniónico (Modelo Neosepta AXE-01) y catiónico (Modelo Neosepta cmx-sb).

En la tabla 6, se presentan los resultados obtenidos del estudio sobre la eficacia de diversos adsorbentes en la eliminación de la dureza del agua. Se analizaron los porcentajes de eliminación de dureza en relación con diferentes parámetros de operación, incluyendo tiempo de contacto, pH, tipo de adsorbente utilizado, entre otros.

La tabla 6 proporciona una visión general de la eficiencia de cada adsorbente en la eliminación de la dureza del agua bajo diferentes condiciones de operación. Los adsorbentes evaluados en este estudio abarcan

Tabla 4. Procesos híbridos de membrana para la eliminación de dureza en agua.

Tratamiento	Eficiencia de eliminación de dureza	Dureza inicial (mmol/L)	pH	Tiempo de tratamiento (min)	Temperatura	Referencias
RO- NF	94.98%	-	6.73	-	45°C	(Elazhar <i>et al.</i> , 2021)
NF-NF	45%	-	6.73	-	45°C	(Elazhar <i>et al.</i> , 2021)

Tabla 5. Proceso de membrana aplicada en la electrodialisis.

Tratamiento	Eficiencia de eliminación de dureza %	Dureza inicial (mmol/L)	pH	Tiempo de tratamiento (min)	Voltaje (V)	Temperatura °C	Referencias
ED	87	5.3	7.9	47	11	25	(Bachiri <i>et al.</i> , 2024)

Tabla 6. Capacidad de remoción de diversos adsorbentes para la eliminación de la dureza en el agua.									
No.	Material	Mecanismo	Remoción de dureza %	pH	Tiempo de contacto min	Tamaño de partícula µm	Dosis de adsorbente g	Temperatura °C	Referencia
1	Arcilla local modificada y quitosano (MCCh)	Adsorción	80	-	160	-	1	25	(Mohamed <i>et al.</i> , 2023)
			91	2	-	-	-	25	
2	Amberlite (A)	Intercambio iónico	46.00-44.95	-	10-180	-	1	25	(Boonpanaid & Piyamongkala, 2023)
4	NuoSep (B)		46.45-82.45	-	11-180	-	1	25	
5	Óxido de grafeno (GO)	Adsorción	23.8-77.7	6.8-7.2	-	-	-	-	(Rocha <i>et al.</i> , 2021)
6	Óxido de grafeno con amiónico k-carragenano		9.5-41.0	6.8-7.2	-	-	-	-	
7	Arcillas de Biyagama	Adsorción	79		30	-	10	350	(Wickramasuriya <i>et al.</i> , 2021)
			99		30	-	10	750	
8	Arcilla de Deniyaya	Adsorción	77		30	-	10	850	
			96		30	-	10	750	
9	Zeolita natural activada con 2M de NaCl	Intercambio iónico	75	6.9	5	1000	2	21	(Hailu <i>et al.</i> , 2019)
			80.2	6.9	30	1000	-	25	
10	Carbón activado a base de cáscara de coco	Adsorción	66.71	7.5	60	-	1.5	29	(Adewuyi & Olabanji, 1970)
11	Cáscara de durián	Intercambio iónico	25.2	-	1080	-	1	-	(Payus <i>et al.</i> , 2019)

una amplia gama de materiales, incluyendo tanto adsorbentes inorgánicos como orgánicos. Entre los adsorbentes inorgánicos se encuentran la arcilla modificada, zeolita natural activada con 2M de NaCl y óxido de grafeno. Estos materiales inorgánicos presentan una estructura cristalina y son conocidos por su alta capacidad de adsorción de iones de dureza en solución. Como se puede observar en la tabla 6, los ejemplos presentados tienen un rango de remoción de dureza entre el 80 y el 99 %, mayor a otros adsorbentes. Por otro lado, los adsorbentes orgánicos incluyen el quitosano, óxido de grafeno con amiónico k-carragenano, carbón activado a base de cáscara de coco y cáscara de durián. Estos adsorbentes orgánicos son

de fuentes naturales y biodegradables, y que han demostrado porcentajes de de adsorción entre el 25.2 y el 66.71 %. Además, se evaluaron otros adsorbentes como Amberlite y NuoSep, los cuales son resinas sintéticas ampliamente utilizadas en aplicaciones de tratamiento de agua siendo estas de una capacidad de remoción entre el 46 y el 82.45%. Cada uno de estos adsorbentes presenta características específicas que pueden influir en su capacidad para eliminar la dureza del agua, y su selección se basó en la disponibilidad, costo y eficacia esperada en el proceso de ablandamiento del agua. La temperatura puede influir en la velocidad de adsorción y en la afinidad del adsorbente por los iones de dureza, mientras que

el pH afecta la carga superficial del adsorbente y la especiación de los iones en solución. Además, el tiempo de contacto determina el tiempo necesario para que ocurra la adsorción, con tiempos más largos generalmente asociados con una mayor eliminación

de dureza. Por lo tanto, es fundamental optimizar estas condiciones de operación para cada adsorbente con el fin de maximizar su eficacia en el ablandamiento del agua como se mostraron en los trabajos presentados.

Conclusiones

El uso de las tecnologías de membranas para el ablandamiento del agua es considerablemente eficiente (45-98 %), simples y de bajo costo, también se pueden integrar con otros procesos, pero existen implicaciones de operaciones que influyen en una disminución en el flujo y un aumento en la presión transmembrana requerida, lo que conduce a un mayor consumo de energía, una vida útil más corta de la membrana y una reducción de la calidad de la purificación de agua.

Las tecnologías de ósmosis inversa implementan procesos de membranas, su optimización es del 80- 100 %, que varía de acuerdo a las membranas, dado que depende del diseño y material empleado para su fabricación ya que éstas deben resistir altas temperaturas, ácidos fuertes, disolventes orgánicos y otros. También las membranas influyen en el consumo de energía de este sistema. Al ser una tecnología que utiliza membranas es necesario considerar su mantenimiento para prolongar la vida útil de la membrana.

Las técnicas que implican electrocoagulación son procesos compactos, innovadores, eficaces a un 70-90 % y usan poco o ningún químico para su proceso. Como desventaja se puede considerar que emplean energía para su proceso, lo que puede limitar su uso, los materiales pueden ser caros, y durante su

empleo puede haber formación de subproductos de desinfección (DBPs).

El intercambio iónico se destaca por su alta eficacia en la eliminación de la dureza del agua, produciendo resultados de alta calidad. No obstante, su costo inicial y los gastos de mantenimiento de las resinas pueden ser significativos. Además, el proceso puede generar desechos salinos, especialmente si la concentración de iones es elevada, lo que requiere un tratamiento adicional. Por otro lado, la adsorción ofrece una alternativa más rentable que las resinas de intercambio iónico. Esta técnica no solo proporciona una eficaz remoción de la dureza del agua, sino que también evita la generación de contaminantes adicionales que necesitarían ser tratados.

La biofiltración emerge como una opción atractiva debido a su bajo costo operativo y su capacidad para tratar grandes volúmenes de agua. Es importante destacar que los bioadsorbentes, derivados de fuentes naturales y residuos agrícolas, abundan en la naturaleza. Aunque un bioadsorbente individual puede no tener una alta capacidad de remoción de dureza, la disponibilidad abundante de estos materiales permite su aplicación en cantidades suficientes para alcanzar los objetivos deseados de tratamiento de agua.

Agradecimientos

Agradecemos al Dr. Mohamed Abatal por su guía y ayuda durante esa investigación, al Consejo Nacional de Humanidades Cien-

cias y Tecnologías (Conahcyt) por su apoyo para realizar este proyecto, a la Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR).

Literatura citada

- Adeyemi, A. S., & Olabanji, T. O. (1970). The Use of Coconut-Shell Based Activated Carbon as an Adsorbent in the Treatment of Hard Water. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 26(3), 453–457.
- Ahuja, S. (2016). Overview: Sustaining Water, the World's Most Crucial Resource. In *Chemistry and Water: The Science Behind Sustaining the World's Most Crucial Resource* (pp. 1–22).
- Akram, S., & Rehman, F. U. (2018). Hardness in Drinking-Water, its Sources, its Effects on Humans and its Household Treatment. *J Chem Applications* (Vol. 4, Issue 1).
- Al Aani, S., Mustafa, T. N., & Hilal, N. (2020). Ultrafiltration membranes for wastewater and water process engineering: A comprehensive statistical review over the past decade. *Journal of Water Process Engineering* (Vol. 35).
- Anderson, L., Swinamer, R., Earle, M., Stoddart, A., Gagnon, G. A., Park, Y., & Sillanpää, M. (2022). NOM removal by biofiltration. In *Natural Organic Matter in Water: Characterization, Treatment Methods, and Climate Change Impact*, Second Edition (pp. 195–224).
- Anis, S. F., Hashaikheh, R., & Hilal, N. (2019). Microfiltration membrane processes: A review of research trends over the past decade. In *Journal of Water Process Engineering* (Vol. 32).
- Bachiri, B., Ayyoub, H., Tahaikt, M., Elmidaoui, A., & Taky, M. (2024). Optimizing water hardness removal through electro dialysis: A comprehensive exploration using Box-Behnken design analysis. *Kuwait Journal of Science*, 51(2).
- Biesheuvel, P. M., Porada, S., Elimelech, M., & Dykstra, J. E. (2022). Tutorial review of reverse osmosis and electro dialysis. *Journal of Membrane Science* (Vol. 647).
- Boonpanaid, C., & Piyamongkala, K. (2023). Using commercial resin for ion exchange to remove hardness from domestic water supply. *Materials Today: Proceedings*.
- Dey, S., Veerendra, G. T. N., Phani Manoj, A. V., & Babu Padavala, S. S. A. (2024). Removal of chlorides and hardness from contaminated water by using various biosorbents: A comprehensive review. *Water-Energy Nexus*, 7, 39–76.
- Elazhar, F., Elazhar, M., El-Ghizel, S., Tahaikt, M., Zait, M., Dhiba, D., Elmidaoui, A., & Taky, M. (2021). Nanofiltration-reverse osmosis hybrid process for hardness removal in brackish water with higher recovery rate and minimization of brine discharges. *Process Safety and Environmental Protection*, 153, 376–383.
- Environmental Protection Agency. (2024, January 2). National Primary Drinking Water Regulations. 2024. <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations#Inorganic>
- Fomina, M., & Gadd, G. M. (2014). Biosorption: Current perspectives on concept, defi-

- nition and application. *Bioresource Technology*, 160, 3–14.
- Gabrielli, C., Maurin, G., Francy-Chausson, H., Thery, P., Tran, T. T. M., & Tlili, M. (2006). Electrochemical water softening: principle and application. *Desalination*, 201(1–3), 150–163.
- Hailu, Y., Tilahun, E., Brhane, A., Resky, H., & Sahu, O. (2019). Ion exchanges process for calcium, magnesium and total hardness from ground water with natural zeolite. *Groundwater for Sustainable Development*, 8, 457–467.
- Kılıç, Z. (2020). The importance of water and conscious use of water. *International Journal of Hydrology*, 4(5), 239–241.
- Krstić, V. (2021). Role of zeolite adsorbent in water treatment. In *Handbook of Nanomaterials for Wastewater Treatment: Fundamentals and Scale up Issues*, 417–481.
- Mohamed, A. M. G., Mubarak, M. F., Snousy, M. G., Ahmed, H. A., Nafady, A., Mohamed, S. K., & Shahawy, A. El. (2023). Using modified clay-chitosan composite filter as a second stage in the conventional iron and manganese removal plant system to eliminate permanent hardness anions in drinkable groundwater. *Environmental Advances*, 13.
- Mohammad, A. W., Teow, Y. H., Ang, W. L., Chung, Y. T., Oatley-Radcliffe, D. L., & Hlail, N. (2015). Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospects. *Desalination*, 356, 226–254).
- Payus, C. M., Refdin, M. A., Zahari, N. Z., Rimba, A. B., Geetha, M., Saroj, C., Gasparatos, A., Fukushi, K., & Alvin Oliver, P. (2019). Durian husk wastes as low-cost adsorbent for physical pollutants removal: Groundwater supply. *Materials Today: Proceedings*, 42, 80–87.
- Rocha, L. S., Nogueira, J., Daniel-da-Silva, A. L., Marques, P., Fateixa, S., Pereira, E., & Trindade, T. (2021). Water softening using graphene oxide/biopolymer hybrid nanomaterials. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 105045.
- Scarazzato, T., Barros, K. S., Benvenuti, T., Rodrigues, M. A. S., Espinosa, D. C. R., Bernardes, A. M. B., Amado, F. D. R., & Pérez-Herranz, V. (2020). Achievements in electrodialysis processes for wastewater and water treatment. In *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes: Recent Achievements in Wastewater and Water Treatments*, 127–160.
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (2000). MX-AA-093-1984: Determinación de la conductividad electrolítica.
- Secretaría de Economía. (2001). NMX-AA-072-SCFI-2001: Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- Secretaría de Salud. (2021). NOM-127-SSA1-2021: Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.
- Sillanpää, M., & Levchuk, I. (2015). Ion Exchange. In *Natural Organic Matter in Water: Characterization and Treatment Methods* 239–273.
- Strathmann, H. (2011). Membrane Separation Processes, 3. Membrane Preparation and Membrane Module Constructions. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Tang, C., Rygaard, M., Rosshaug, P. S., Kristensen, J. B., & Albrechtsen, H. J. (2021). Evaluation and comparison of centralized drinking water softening technologies: Effects on water quality indicators. *Water Research*, 203.
- Van Bekkum, H., Flanigen, E. M., Jacobs, P. A., Jansen, J. C., Townsend, R. P., & Coker, E. N. (2001). Chapter 11: Ion Exchange In Zeolites. In *Studies in Surface Science and Catalysis*, 137, (2), 467–524).

- Van der Bruggen, B. (2015). Advances in electrodialysis for water treatment. In *Advances in Membrane Technologies for Water Treatment: Materials, Processes and Applications*, 185–203.
- Wang, Z. (2024). Reverse osmosis. In *Fundamentals of Membrane Separation Technology*, 241–412.
- Wickramasuriya, A. I. R., Arachchige, R. C. W., & Kottegoda, I. R. M. (2021). Characterization and Modification of Clay for Removal of Drinking Water Hardness. *Material Science Research India*, 18(3), 318–331.
- World Health Organization. (2022). Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda-quality. <https://www.who.int/publications/item/9789240045064>