

# Tratamiento magnético en la potabilización y el tratamiento de aguas residuales. Parte I

**Nuria de los Ángeles Vaillant López**E-MAIL: [nuryvaillant@gmail.com](mailto:nuryvaillant@gmail.com)

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Calle 114 #11901 e/ Ciclovía y Rotonda. Marianao, La Habana, Cuba.

**Guillermo Ribeaux Kindelán**E-MAIL: [ribeaux@uo.edu.cu](mailto:ribeaux@uo.edu.cu)

Centro de Electromagnetismo Aplicado (CNEA), Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba.

## RESUMEN

En la actualidad, es imprescindible incorporar métodos y tecnologías más limpias y eficientes en la mejora del conjunto de técnicas para la potabilización y el tratamiento de aguas residuales. En el presente trabajo se indaga acerca de las investigaciones y beneficios del tratamiento magnético en estos procesos, revelándose como una tecnología innovadora, limpia, de rápida amortización, sin consumo adicional de energía, y de fácil y sencilla aplicación, por lo que ha sido reconocida a nivel mundial desde inicios del siglo XX. En este primer trabajo de dos partes, la principal conclusión de la revisión de la literatura es que la aplicación de campos magnéticos tiene la facultad de influir directamente en los procesos de coagulación, y en la eliminación de incrustaciones.

**PALABRAS CLAVE:** *coagulación, desincrustante, tratamiento magnético*

## Magnetic technology in potabilization and wastewater treatment

### ABSTRACT

At the present time, it is essential to incorporate cleaner and more efficient methods and technologies to improve the techniques used for water purification and wastewater treatment. This study examines research into and the benefits of magnetic treatment in these processes, revealing it to be an innovative, clean technology that offers a quick return on investment, requires no additional energy, and is simple to apply—qualities for which it has been recognized worldwide since the early 20th century. In this first of two papers, the main conclusion drawn from the literature review is that the application of magnetic fields can directly influence coagulation processes and the elimination of scale deposits.

**KEYWORDS:** *coagulation, scale remover, magnetic treatment*

## 01 INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, se ha venido estudiando el uso del tratamiento magnético (TM) para el tratamiento de agua para consumo humano e industrial, y en el tratamiento de aguas residuales. El tema ha recibido mucha atención de la comunidad científica por la implicación que tiene en lo económico y en el cuidado del medio ambiente, conociendo que los tratamientos convencionales poseen los inconvenientes del uso de químicos y aguas de desecho contaminantes, la producción de malos olores producto de la materia en remoción en el caso de tratamiento de aguas residuales, el costo de los reactivos, constante supervisión y mantenimiento, altos niveles de pretratamiento y altos costos de inversión inicial y de operación, en algunos casos; por lo que adquiere mayor importancia el uso de tecnologías limpias como el TM, de fácil aplicación, rápida amortización, sin consumo adicional de energía y resultados comprobados.

De forma general, no existen dudas de la efectividad del TM, pero sí coexisten discrepancias en la explicación

del fenómeno que se observa, existiendo incógnitas en la explicación teórica de la influencia del campo magnético (CM) sobre las propiedades de los sistemas acuosos. Muchos artículos describen diferentes tipos de mecanismos de acción del campo magnético y varios de ellos incluso están en conflicto entre sí. Este asunto se complejiza si se tiene en cuenta la influencia de parámetros externos como la temperatura, el material de las tuberías y el amplio rango de frecuencias, intensidad, tiempo de exposición y velocidad del fluido, entre otros (Vaillant López et al., 2022).

El Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA) líder del desarrollo de esta tecnología, la ha aplicado en sistemas ingenieros industriales desde 1992, en el sector agrícola desde el 2000 y en el pecuario-avícola desde el 2009, con ejemplos bien documentados que muestran que es un método eficiente para prevenir y reducir las incrustaciones, el tratamiento de combustibles, mejorando el intercambio de calor, ahorrando energía y recursos (Arias Gilart et al., 2018; Campos et al., 2015; CNEA, 2011; Espinoza, 2019; Gálvez Vidaurre, 2010; Ribeaux Kindelán & Mesa Pérez, 2001).

## 02 MATERIALES Y MÉTODOS

Para la búsqueda y localización de la información se utilizaron palabras claves, se enfatizó en investigaciones de los últimos diez años y los idiomas español, inglés y ruso, aunque se realizó búsqueda automatizada en bases de datos online, revistas que publican artículos sobre el tema en cuestión, y de otras fuentes bibliográficas impresas, sin restricción de fechas e idiomas. Se identificaron los autores más destacados en el tema, mediante el Science Citation Index, referencias de estudios personales y artículos de revisión.

Los procedimientos y metodologías utilizados por los investigadores referenciados para obtener las muestras y resultados, son de naturaleza variada, por lo que se especifica en cada caso sus aspectos esenciales. Con el objetivo de concretar las teorías y resultados investigativos expuestas en este trabajo, se han ordenado por tipo de aplicaciones y año de publicación. Además, se respetan literalmente las ideas y conclusiones de sus autores, y no es objetivo de este trabajo analizarlas críticamente, sino exponer la diversidad y alcance de las mismas. El tratamiento analizado en la presente revisión incluye el campo eléctrico (CE), el campo magnético (CM) y los campos electromagnéticos (CEM).

En este trabajo (**parte I**), se indaga acerca de las investigaciones y posibles beneficios del TM en la potabilización y el tratamiento de aguas residuales, explorando específicamente su contribución en los procesos de coagulación floculación, y sus efectos en la cristalización del Carbonato de Calcio, y otras sales disueltas en agua.

## 03 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Tratamiento Magnético

La observación del efecto de los CM en el TM del agua es conocida desde el siglo XIX, no obstante, la actualización de esta técnica se acredita en 1945, al ingeniero belga Theo I. S. Vermeiren que utilizó el fenómeno descubierto por Michael Faraday para el tratamiento del agua industrial. En 1957 también propuso la primera aplicación práctica para el control de incrustaciones (Vermeiren, 1958).

Los acondicionadores magnéticos se ubican en los sistemas de manera que el fluido circule a través del CM, en el que interactúan las líneas de inducción magnética directamente con el fluido, según muestra la figura 3.1. Para garantizar un tratamiento eficiente deben cumplirse varios requerimientos, de los cuales los más importantes son: lograr la perpendicularidad de líneas de inducción magnética  $\vec{B}$  con respecto al movimiento del fluido. El segundo requerimiento está relacionado con el tiempo de exposición del fluido al CM (Ribeaux Kindelán, 2011). Actualmente se comercializan varios tipos de imanes permanentes y dispositivos magnéticos (DM), que se encuentran en el mercado con costos relativamente altos. Estos presentan diferentes configuraciones e intensidades de CM, y están diseñados para distintos diámetros de tubería, pero su uso ha causado muchas controversias debido al poco entendimiento que se tiene sobre los mecanismos y parámetros de diseño de los dispositivos magnéticos por parte de los proveedores. Para la fabricación de imanes se utilizan los siguientes materiales: aleaciones de Neodimio, Hierro y Boro (NdFeB); aleaciones de Samario y Cobalto (SmCo); aleaciones Alnico y

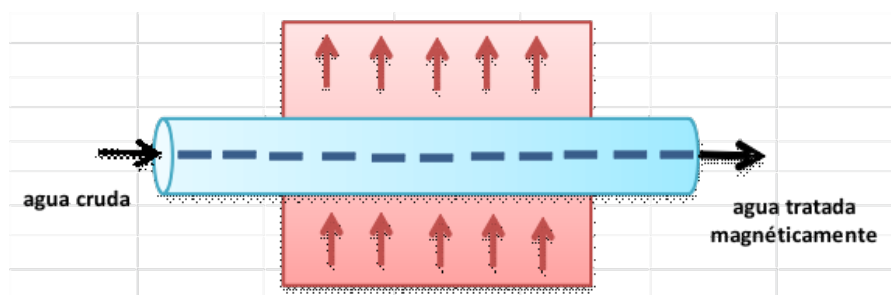


Figure 3.1. Tratamiento magnético del agua.

Ferritas Cerámicas.

Los diferentes enfoques para la aplicación del tratamiento magnético tienen efectos significativamente diferentes en el rendimiento de cada sistema. El uso de imanes permanentes normalmente crea un CM uniforme. Sin embargo, el campo se puede variar cambiando la orientación y disposición de los imanes. Diferentes formas (y geometría) de imanes permanentes también pueden exhibir diferentes valores de intensidad de CM.

Los dispositivos de campos electromagnéticos pueden colocarse en el agua tratada antes de que entre en los sistemas de agua, o en la superficie propensa a la formación de incrustaciones, lo que se denomina pretratamiento y cotratamiento, respectivamente.

### 3.2. Efectos del campo magnético sobre la cristalización del carbonato de calcio disuelto en agua

Las incrustaciones más comunes en los sistemas de agua son compuestos de  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{SrSO}_4$ ,  $\text{BaSO}_4$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , sílice y silicatos. La formación de incrustaciones se produce cuando la concentración de una sal poco soluble supera su solubilidad en agua. Generalmente, resulta de cambios en el pH, la temperatura, la desgasificación o la presión, que afectan la solubilidad de las sales, y de un proceso de concentración o evaporación. Por ejemplo, cuando la temperatura del agua aumenta, la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$  disminuye, lo que provoca su precipitación sobre superficies calentadas (Alabi et al., 2015).

La formación de incrustaciones depende principalmente de la química del agua de alimentación. Los tipos comunes de incrustaciones se pueden clasificar en alcalinas (p. ej.,  $\text{CaCO}_3$ ), no alcalinas (p. ej.,  $\text{CaSO}_4$ ) y a base de sílice (Antony et al., 2011). El  $\text{CaCO}_3$  es el componente más común de las incrustaciones, proveniente de los iones de calcio y bicarbonato presentes en aguas superficiales, subterráneas, salmueras y aguas industriales (Piyadasa et al., 2018). Otras sales que forman incrustaciones incluyen una variedad de compuestos con baja solubilidad en agua, como  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{BaSO}_4$ ,  $\text{Fe}_2(\text{CO}_3)_3$ , óxidos de hierro, silicatos, fluoruros y fosfatos.

La presencia de sales de magnesio y calcio en el agua depende fundamentalmente de las formaciones geológicas atravesadas por el agua de forma previa a su captación. Por lo general, el agua subterránea es más dura que el agua de superficie. El agua subterránea, rica en ácido carbónico y oxígeno disuelto, suele poseer un alto potencial solubilizante, lo que va a provocar un mayor grado de erosión del suelo o de las rocas, las cuales contienen cantidades apreciables de minerales como la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ) y dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) lo que, en consecuencia, puede llegar a elevar los niveles de dureza en varios miligramos por litro. Las aguas subterráneas procedentes de acuíferos con composición eminentemente silicatada como basalto, arenisca y granitos, dan lugar a un agua blanda, es decir, con cantidades muy bajas de sales de calcio y magnesio. El  $\text{CaCO}_3$ , uno de los principales compuestos que produce incrustaciones, posee tres variedades morfológicas: calcita (más abundante y estable), aragonita, y vaterita (raramente encontrada). La calcita es un tipo de cristal que al precipitar se adhiere a las superficies de transferencia de calor como incrustación de difícil remoción, pero la aragonita precipita como partículas suspendidas en el agua y se adhiere poco sobre dichas superficies, formando granos de menor tamaño o depósitos de una incrustación suave, estable con la temperatura. Nótese en la figura 3.2 la diferencia en la morfología de sus cristales.

La cristalización a partir de soluciones es un proceso complejo que se caracteriza por las etapas de formación de



**Figure 3.2.** Cristales de (A) calcita, (B) aragonita y (C) vaterita (Bolívar, 2019).

supersaturación, nucleación y crecimiento cristalino, así como de fenómenos secundarios, tales como agregación, aglomeración, quebramiento, redisolución y maduración (Ribeaux Kindelán, 2011).

Si un CM puede afectar la formación y el desarrollo de una capa incrustante, sería resultado de una modificación en el comportamiento de la cristalización de la sustancia formadora de la capa. Tales modificaciones podrían ser conseguidas, por ejemplo, por la influencia sobre la velocidad de nucleación o de crecimiento de los cristales o por una alteración en una propiedad física del sistema (solubilidad de equilibrio, viscosidad, pH, tensión superficial), lo que a su vez influenciaría el curso de la cristalización.

Está bien establecido por todos los estudios revisados, que al pasar un CM, producido en general por imanes permanentes, a través de un fluido a determinada velocidad y distribución espacial, el efecto fundamental observado en el caso del agua, es la reducción de las incrustaciones de sales, e incluso, la disolución de las mismas. Además, se observa la aceleración de la formación de cristales del tipo aragonita en la misma medida en que se intensifica la inducción del CM al que se somete el agua; y en ausencia del mismo, los cristales formados son fundamentalmente del tipo calcita.

En la figura 3.3 se muestran cristales de  $\text{CaCO}_3$  con TM y sin TM. Se utilizó difracción de rayos x y se observan claramente la casi ausencia de cristales de aragonita al ser aplicado el TM. Es importante resaltar, que el TM no es una tecnología para remover dureza del agua, sino que influye directamente sobre la formación de los cristales, principalmente del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

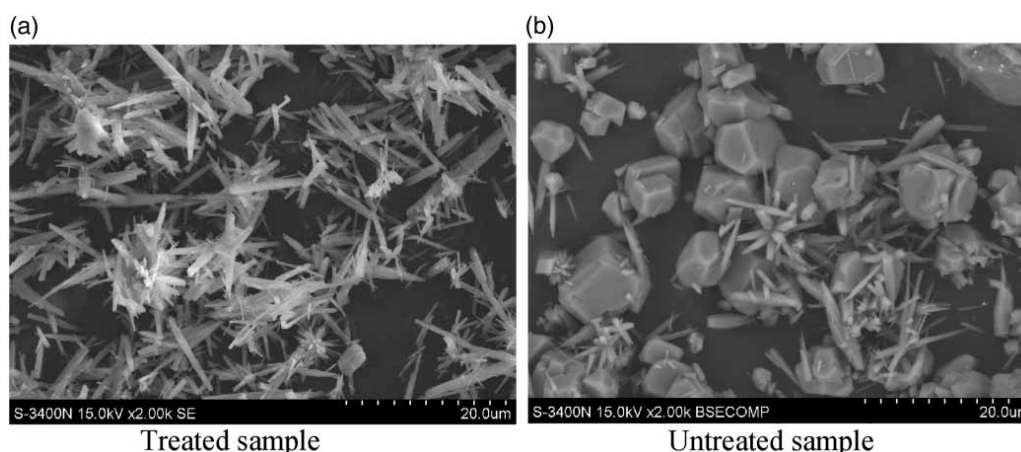


**Figure 3.3.** Cristales obtenidos: (a) con TM y (b) sin TM (Zhao et al., 2014).

El TM tiene un prolongado y controvertido trayecto en lo que respecta a su validez contra la formación de incrustaciones en los sistemas de tratamiento de agua, a pesar de haberse demostrado su eficacia en numerosas aplicaciones industriales. Miles de estudios han descrito la acción antiincrustante asociada a los CM y el número de publicaciones ha aumentado exponencialmente con los años, lo que corrobora, a pesar de algunos detractores, que los CM constituyen una tecnología eficiente para el control de las incrustaciones.

De acuerdo con los resultados de Higashitani et al. (1992), en la misma medida en que se intensificaba la inducción del CM a la que se sometían las sustancias reaccionantes ( $\text{CaCl}_2$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  a 30 °C), se aceleraba la formación de cristales del tipo aragonita; y en ausencia del CM, los cristales formados eran del tipo calcita. La precipitación del  $\text{CaCO}_3$  estuvo marcada por una velocidad de nucleación más lenta y un cristal de más rápido crecimiento.

En investigaciones relacionadas, Wang et al. (1997) indagaron en la cristalización del  $\text{CaCO}_3$ , a partir de  $\text{CaCl}_2$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  a 30 °C, bajo la influencia del CM, y observaron que los cristales formados, después de agitar las sustancias reaccionantes por 1 min., tenían formas rómbicas y esféricas. Los primeros son calcita y los últimos podrían ser vaterita. El tamaño del grano fue de 5 a 10  $\mu\text{m}$ . Pero, en presencia del CM, la mayoría de los cristales tenían formas irregulares (aragonita) y su diámetro (1  $\mu\text{m}$ ) era muy pequeño para identificar su estructura por microscopía óptica. Ellos asocian que este pequeño tamaño de partícula se deba a la rápida nucleación y precipitación de los cristales.

Kobe y colaboradores, ya desde el año 2001 observaron que bajo la influencia de un CM superior a 500 mT (miliTesla), la nucleación y el posterior crecimiento de aragonita podrían utilizarse con éxito como una forma de prevenir las incrustaciones. En el 2003, demostraron que, al cambiar la intensidad del campo, la relación calcita / aragonita / vaterita varió. En el 2008 explicaron que la presencia de un CM en la interfase líquido/sólido favorecía la transformación de los cristales de calcita a aragonita debido a la diferencia entre los estados electrónicos de las dos formas cristalinas. Los cálculos del estado electrónico de calcita y de aragonita dieron como resultado que se necesitaron 28 electronvoltio (eV) para pasar del estado electrónico de la calcita a la aragonita, esta energía la puede proporcionar un CM de 45 T (Tesla), para desplazar una distancia de 0.5 nm entre los iones de calcio y carbonato. Por tanto, la energía cinética que se requirió para hacer la transformación la suministró el CM externo y el flujo turbulento. Todo lo anterior lo describieron cuantitativamente a través de las ecuaciones de Navier-Stokes y Maxwell (Cefalas et al., 2008; Kobe et al., 2001, 2003).

También en el 2001 Gabrielli y sus colaboradores, estudian el problema desde una aproximación electroquímica, midiendo con un electrodo selectivo de  $\text{Ca}^{2+}$ , la cantidad de calcio iónico después del TM y la deposición electroquímica del  $\text{CaCO}_3$  en un electrodo, mediante una sensible balanza de cuarzo, dando la cantidad de  $\text{CaCO}_3$  depositado en función del tiempo. La idea es que, si el TM promueve la cristalización del  $\text{CaCO}_3$  disuelto, la cantidad de calcio iónico debe disminuir después de realizado este y la capacidad de esta agua, que ha perdido calcio iónico, para depositar  $\text{CaCO}_3$  en la interfase agua metal, debe disminuir. Los autores también encuentran mayor efecto en la disminución del calcio iónico cuando hay mayor gradiente de campo (Gabrielli et al., 2001).

En las investigaciones de Szkatula et al. (2002) se han reportado observaciones contradictorias sobre el efecto del CM hacia la cristalización. Para aguas duras que contienen sílice, demuestran que la aplicación magnética causa menos efecto en la cristalización. La masa total del depósito del agua tratada que contenía sílice era aproximadamente 25 veces menor que en el agua no tratada.

El estudio de Lipus and Dobersek (2007) sobre el tratamiento con CEM en superficies de intercambio de calor concluyó que las partículas finas en suspensión formadas en la solución a granel eran arrastradas por el flujo de agua. También se informó de que el CEM alteraba la precipitación del  $\text{CaCO}_3$ , pasando de formar incrustaciones nucleadas en la superficie a cristalización mediante el aumento de la cantidad total de precipitado y favoreciendo su formación en la solución principal en lugar de su incrustación en las paredes.

Otros autores también han observado las contraacciones de los cationes de sílice y carbonato bajo la cristalización inhibidora de la exposición al CM (Coey & Cass, 2000; Higashitani et al., 1992). En el caso de Shahwan et al. (2010) se reportó que la masa total del depósito del agua tratada que contenía sílice era aproximadamente 25 veces menor que en el agua no tratada.

E. Chibowski en el 2003 establece también que el TM influye en el tamaño y la morfología de los cristales de carbonato de calcio que se forman, con una tendencia a favorecer la cristalización de la aragonita en lugar de la calcita, aunque él agrega que depende también del sustrato y de la composición del agua. En el 2018 agrega que el gradiente del CM es más importante para los efectos obtenidos, que la fuerza del campo en sí (Chibowski & Szczeń, 2018; Chibowski et al., 2003).

Alimi y colaboradores entre el 2007 y el 2009 encontraron que el TM genera una pre-precipitación del  $\text{CaCO}_3$  y carbonato de magnesio ( $\text{MgCO}_3$ ) en forma de partículas finas que se encuentran en suspensión y que depende del pH, caudal de agua y tiempo de residencia (Alimi et al., 2007, 2009).

Coey y Cass, quienes desde el 2000 y hasta la actualidad vienen haciendo aportaciones en este tema, reportaron un aumento de la proporción de cristales de tipo aragonita respecto a los de calcita (A/C). El experimento se realizó con un CM de 0.1T, velocidad del flujo entre 0.04 y 1.2 m/s. La mayor relación A/C se observó cerca de las 40 h después del tratamiento magnético y se mantuvo por cerca de 200 horas (memoria magnética), por lo que agregó que el CM no solo influye en la estructura y morfología del  $\text{CaCO}_3$  sino también que el agua podría adquirir una impresión magnética de larga duración.

Aunque reconoce que los efectos de la memoria en el agua tuvieron una historia infeliz, su artículo se basó en la evidencia de un mecanismo de nucleación no clásico para el  $\text{CaCO}_3$  y se pone en duda la teoría clásica de nucleación, sugiriendo una teoría en la que las soluciones de  $\text{CaCO}_3$  (no saturadas) contienen racimos o grupos pre-nucleados termodinámica-estables llamados DOLLOPs (Dynamically-Ordered Liquid-Like Oxyanion Polymers), que serían los que, cuando están sujetas a un CM alteran su composición y se deforman, favoreciendo un cierto tipo de estructura de racimo, que son los que permiten tener una gran memoria magnética en la solución (Coey, 2012; Coey & Cass, 2000).

Para Zhaohui Xi y sus colaboradores, cuando el agua fue tratada por una alta potencia y alta frecuencia electromagnética, el tamaño y la forma de los cristales de  $\text{CaCO}_3$  cambiaron significativamente, y el efecto desincrustante fue característico (Xi et al., 2010).

Resulta interesante lo observado en algunos estudios, donde la eficiencia de la inhibición de incrustaciones aumenta con el tiempo de tratamiento electromagnético, pero no se muestran cambios significativos tras un cierto tiempo de exposición, que en el caso de Ge et al. (2010) fue de 60 minutos. Se ha observado que los efectos de la aplicación electromagnética en la formación de incrustaciones dependen exponencialmente de la dureza del agua. Otros parámetros podrían verse afectados de forma conjunta con la aplicación del CM, como la disminución del pH y el aumento de la concentración de oxígeno disuelto.

En los resultados obtenidos del trabajo de investigación de Vaca Jiménez, en 2014 parece comprobarse la teoría de cambio estructural de las sales disueltas y lo correspondiente a la memoria magnética debido a la presencia de los DOLLOPs, ya que la disminución de incrustaciones en la caldera no correspondió a un cambio de régimen de flujo en el equipo (Vaca Jiménez, 2014).

Hon Siau Shi investigó varios parámetros como pH, turbidez y sólidos suspendidos totales (SST), en agua sin TM y agua con 3 densidades de flujo magnético y velocidades de flujo diferentes, donde obtuvo que el CM redujo la turbidez y los SST de la muestra de agua alrededor del 50 % y 20 % respectivamente. En la salida de la muestra de agua del sistema con CM, la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  fue 90 % y 20 % más alta que el sistema sin CM. Además, con la mayor velocidad de flujo (1.5 ml/s), los dispositivos magnéticos invertidos, en la salida de muestra de agua se obtuvieron concentraciones 40 % mayores que con los magnetizadores no invertidos. También, para mayor densidad de flujo magnético (0,4 T) se eliminó 40 % más de calcio y magnesio. Concluyendo, la presencia de TM mejoró la eliminación de incrustaciones y redujo la turbidez y SST, a mayor densidad de flujo magnético y mayores caudales (Shi, 2014).

Cuando Zhao et al. (2014) investigaron los CM en la precipitación de  $\text{CaCO}_3$ , tanto teóricamente como experimentalmente, los resultados indicaron que el ajuste de la velocidad del flujo de agua, la electrostática de alto voltaje y los CEM pulsados, de frecuencia variable, como efecto combinado, favorecen la aparición y el crecimiento de aragonita y restringe la transición a la calcita, aunque el mecanismo para la reducción de escamas se discute.

En los estudios de Mahmoud et al. (2016), los parámetros químicos del agua tratada electromagnéticamente tenían prácticamente los mismos valores que el agua de referencia, por lo que el tratamiento solo afecta a la morfología cristalina del  $\text{CaCO}_3$ , y no consigue ningún efecto en las características químicas del agua tratada. En el año 2016 se utilizó el equipo de electromagnetismo comercial Antical RF, y agua principalmente de la red, aunque también con agua sintética para poder experimentar con concentraciones conocidas. Se utilizó el test de Meigen para los análisis de formación de cristales de aragonita/calcita. Estos investigadores concluyen

que tras la aplicación del CM se produce mayor formación de cristales de aragonito y una disminución de los cristales de calcita. La reversibilidad del proceso fue estimada en 72 horas aproximadamente en las condiciones del experimento (Verdú, 2016).

Los hermanos Hafidi, estudiaron los efectos del TM de agua en las incrustaciones de  $\text{CaCO}_3$ , y expusieron cómo los imanes permanentes ayudan a eliminar la costra existente en los depósitos en el agua. Demostraron que el aumento del CM influye fuertemente en la proporción de aragonita/calcita obtenida (Hafidi & Hafidi, 2017).

Las técnicas electromagnéticas han sido utilizadas desde hace tiempo en multitud de campos para diferentes tipos de tratamientos. En el ámbito del agua uno de sus principales usos es reducir los depósitos de cal, dado que estas técnicas tienen influencia en la formación cristalina de los precipitados de carbonato cálcico que producen incrustaciones, en forma de calcita en ausencia de tratamiento. Las técnicas electromagnéticas dan lugar a la cristalización como aragonito, cuya precipitación no produce incrustaciones en las conducciones de agua, e incluso es capaz de disolver precipitados de calcita previamente formados (Martínez Moya et al., 2019).

En las investigaciones de Vaillant López et al. (2022) se relaciona la dureza total (DT) con la posibilidad de la eliminación de incrustaciones, buscando una posible causa estructural, y se obtienen disminuciones significativas de la DT en las muestras sometidas al CM. Además, se puede observar disminución de la misma con el aumento de la intensidad del CM e independiente del tiempo de exposición.

Fathi Alimi realiza experimentaciones para determinar el efecto del CM en el agua de mar. Sus resultados muestran que la aplicación del TM al agua de mar estándar tuvo un efecto significativo en la cinética de deposición de cristales. Este TM aumentó el tiempo de nucleación del carbonato de calcio de 7.5 a 12 horas y el tiempo de escalado de 19 a 23 horas. A partir de la formación de dos capas superpuestas observadas, postula que existen diferentes formas de grupos de  $\text{CaCO}_3$  en la solución sobresaturada después de la aplicación de un CM. Así, la calcita se depositó sobre la capa de aragonita porque los grupos favorables para la calcita no fueron adsorbidos por la superficie del cristal como los de la aragonita (Alimi, 2024).

Gao y colaboradores investigaron el efecto y el mecanismo del pretratamiento de magnetización sobre la inhibición de incrustaciones en el proceso de Ósmosis Inversa. Ellos muestran que el efecto de la inhibición de incrustaciones se vuelve más obvio con el aumento del flujo, porque cuando la velocidad del flujo es demasiado baja (menos de 0,24 m/s), casi no hay efecto de inhibición de incrustaciones. A esta velocidad, sólo se puede lograr una inhibición de incrustaciones muy débil cuando el tiempo de magnetización es de 10 a 20 minutos (Gao et al., 2024).

Entre los estudios revisados, solo Salman et al. (2015) no observó ningún efecto de los CEM sobre el agua potable y el agua de mar. Los resultados demostraron que los CEM afectaban claramente a la turbidez y al contenido total de sólidos en suspensión del agua analizada, pero no alteraban la composición química, la dureza, los compuestos orgánicos ni los oligoelementos, tanto en el agua potable como en el agua de mar en las pruebas a escala piloto. Sin embargo, lograron reducir la formación de incrustaciones de  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$  y  $\text{BaSO}_4$  en las pruebas a pequeña escala de laboratorio con soluciones sintéticas. En consecuencia, la eficacia de los CEM dependió de diferentes parámetros, como la composición química del agua, el caudal, los parámetros de funcionamiento y la potencia magnética.

### 3.3. Tratamiento magnético para optimizar los procesos de coagulación

Varios autores investigaron los efectos del CM sobre la estabilidad de las partículas coloidales y sugieren que el CM afecta la estabilidad coloidal al alterar la estructura de las moléculas de agua e iones adsorbidos en la superficie de la partícula o en el medio. En consecuencia, las partículas se alinearon perpendicularmente a la dirección del campo aplicado lo que dio como resultado una mejora de la coagulación.

La coagulación – floculación es uno de los tratamientos realizados en los procesos de potabilización y tratamiento de aguas residuales. Se utiliza para lograr la remoción de turbiedad orgánica e inorgánica, color verdadero y aparente, sustancias productoras de sabor, bacterias y organismos patógenos susceptibles de ser separados, y la destrucción de algas y plancton en general. Como la mayoría de los coloides están cargados negativamente, son estables debido a la repulsión electrostática las partículas. Esta repulsión sobrepasa las fuerzas de atracción de Van der Waals, por lo que no se aglomeran y, por lo tanto, no precipitan (Vaillant López et al., 2026).

Varios factores afectan el proceso: pH (por el rango de pH en que es más efectivo el coagulante), tiempo de contacto (el reactivo debe difundirse y neutralizar las cargas de todo el coloide antes de la formación de los floculos), el gradiente de velocidad (debe estar en los rangos adecuados según etapa de mezcla en que se encuentre), concentración del coagulante, temperatura (las bajas disminuyen la efectividad del proceso), y la calidad del agua.

No existe fórmula alguna que permita calcular a priori la concentración de coagulante necesaria para cada tipo de agua, por lo que debe recurrirse a métodos empíricos para su determinación. Por esa razón, se realizan pruebas (Ensayo de Jarras) utilizando diferentes concentraciones de coagulantes y floculantes a fin de evaluar los rendimientos de depuración esperables, y las dosis de reactivos necesarias para ello.

Teniendo en cuenta la importancia de los procesos de coagulación floculación en los procesos de potabilización y el tratamiento de aguas residuales, este trabajo también explora la posible influencia del TM en la disminución de reactivos químicos por su incidencia negativa en el medioambiente y como posible vía para el ahorro económico y la ecosostenibilidad.

El CM se ha aplicado con éxito con fines de separación, ya que en combinación con otros procesos, puede mejorar la eficiencia de la tecnología de purificación. Este tratamiento físico ayuda a evitar el uso de productos químicos como polifosfatos o sustancias corrosivas, que son caras y pueden ser perjudiciales para la vida humana o perjudiciales para el medio ambiente.

Higashitani (1996) investigó los efectos del CM en la estabilidad de partículas coloidales y sugirió que este, afecta la estabilidad coloidal alterando la estructura de las moléculas de agua y los iones adsorbidos en la superficie de la partícula, o en el medio. En consecuencia, las partículas fueron alineadas perpendicularmente a la dirección del campo magnético aplicado, resultando así en una mejora de la coagulación. La coagulación mejorada debido a la alineación de partículas también fue investigada por Wang et al. (1994), quien demostró un aumento en la tasa de agregación al tratar una solución con CM estático.

En los experimentos de Busch and Busch (1997), se atribuyó el efecto al fenómeno de cizalla que alteró las condiciones de flujo del fluido y produjo gradientes del diferencial de velocidad para las partículas coloidales. Los CM pueden también afectar los vórtices del flujo de fluidos. Tal gradiente de velocidad inducida magnéticamente también puede promover la coagulación.

Otros como Kney and Parsons (2006) propusieron que el mecanismo de superficie acelera la coagulación y la precipitación. Sakurazawa et al. (1999) demostraron que un CM de menos de 1 T alteró la orientación las moléculas en el CM que indudablemente facilitó la precipitación. Esta evidencia estaba de acuerdo con la de Wang et al. (1997) y Sorensen and Madsen (2000), quienes observaron una alteración de la precipitación de sales inorgánicas cuando se expone a un CM.

Por otro lado, también se encontró que el TM dinámico intenso reduce el potencial zeta en un 25 %, lo que aumentó la tendencia de la suspensión electrolítica a coagular (Gehr et al., 1995). Esto también está respaldado por la investigación anterior realizada por Ledion et al. (1980), quien observó una reducción de potencial zeta bajo la exposición de campos magnéticos.

Los resultados presentados por Coureoneaux-Font et al. (2025) demuestran que un CM estático es capaz de influir en el proceso de sedimentación y coagulación, ya que las partículas coloidales son las causantes de la turbiedad del agua y, para eliminarlas, se recurre al proceso de coagulación, infiriendo que el CM realiza una compresión de la doble capa y permite que las partículas coloidales se aglomeren para formar floculos y facilitar su aglomeración.

Bajo las condiciones experimentales de la investigación de Martínez, se demuestra que la aplicación de esta tecnología en los procesos de potabilización de agua representa un ahorro de reactivo químico en el proceso de floculación de entre 15 y 20 % de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  que pueden representar un efecto económico de más de \$2000 en MN y 3000 en USD. También se constata que la formación de los floculos del agua con TM comienza a observarse antes que el agua sin TM (Martínez Morales, 2007).

Waleed Alabdraba y colaboradores también estudian la influencia del CM en la eficiencia del proceso de coagulación para eliminar la turbidez y disminuir la dosis óptima de coagulante, haciendo uso de sulfato de alúmina como uno de sus coagulantes químicos y aplicando diferentes valores de intensidad. Los resultados mostraron

que el CM afecta clara y fuertemente a la hora de aumentar la eficiencia de la eliminación de las impurezas del agua (turbiedad reducida de 662 NTU a 0,36 NTU y de 45,25 NTU a 0 NTU), y sobre la reducción del coagulante químico (reducción de la dosis óptima de unos 10 mg/L). Él demuestra que la eficiencia del proceso de coagulación aumenta en gran medida con el CM y que es posible reducir la dosis óptima de coagulante mediante el uso de un CM adecuado (Alabdraba et al., 2013).

Nur Syamimi Zaidi define que el CM en combinación con otros procesos, puede mejorar la eficiencia de la tecnología de purificación. Agrega que este tratamiento físico ayuda a evitar el uso de productos químicos como polifosfatos o sustancias corrosivas, que son caras y pueden ser perjudiciales para la vida humana o perjudicial para el medio ambiente (Zaidi et al., 2014).

Vaillant López et al, evalúan el efecto del CM en los procesos de coagulación – floculación, la influencia en la formación de los flóculos a diferentes dosis de sulfato de aluminio, utilizando la Prueba de Jarras, para agua cruda previa a su tratamiento de potabilización. Se concluye que existe influencia directa del CM en cada una de las propiedades estudiadas antes y después de realizada la Prueba de Jarras, (aumento de pH al aplicar CM, disminución de conductividad, pH y turbidez luego de la Prueba de Jarras) bajo las condiciones establecidas de niveles de inducción de CM aplicados (330, 276 y 240 mT). Estos autores, demuestran que el TM incide en los procesos de coagulación-floculación para la potabilización de agua, propiciando una disminución en la dosis del coagulante aplicado en un 27 %. Además, pareciera que el TM puede mejorar la eficiencia de los coagulantes utilizados en el proceso de tratamiento de agua (Vaillant López et al., 2026).

En los últimos años, con el progreso continuo de la ciencia y la tecnología, han surgido nuevos métodos de tratamiento de agua por coagulación y floculación, entre los cuales la tecnología de floculación magnética ha recibido amplia atención por ser altamente eficiente y respetuoso con el medio ambiente (Hu et al., 2024).

A base de semillas magnéticas, la floculación magnética mejora la formación de partículas y acelera el proceso de sedimentación. En comparación con la coagulación convencional, la floculación magnética tiene las ventajas de un proceso corto, ahorro de energía y bajo costo. Esta tecnología promueve la coagulación y sedimentación de contaminantes mediante la adición de núcleos magnéticos o floculantes magnéticos al sistema de tratamiento, logrando así una rápida separación.

Para mejorar aún más la eficiencia y adaptabilidad del tratamiento, la tecnología de floculación magnética se ha combinado ampliamente con otras tecnologías de tratamiento de agua en los últimos años, creando varios procesos de tratamiento integrales.

## 04 CONCLUSIONES

La tecnología de CM es muy adecuada para varios tipos de entornos y aplicaciones de ingeniería. Resultados significativos de las aplicaciones magnéticas han sido demostrados bajo varios tipos de dispositivos y tratamientos magnéticos (imanes permanentes, corriente continua o alterna, imanes magnéticos adsorbentes, HGMS y superconductores).

El TM es una tecnología sostenible, de fácil aplicación y amigable con el medio ambiente. Su uso ahorra costos pues se compran en etapa de instalación y poseen altos rendimientos por varios años. Sus limitaciones constituyen desafíos que pueden superarse mediante una mayor investigación y mejora.

Con el uso de TM puede observarse la transformación de los cristales de calcita a aragonita; afectación del tamaño del cristal propiciando su crecimiento en el seno de la solución y su posterior precipitación en forma de una incrustación de fácil remoción, e inclusive, rompimiento o aglomeración del cristal propiciando que la incrustación formada sobre las paredes de las tuberías disminuya o sea menos densa.

Sin embargo, para el tratamiento de agua que contiene sílice, la exposición del CM debe realizarse de manera precisa para que se exponga una cantidad precisa de sílice, así, el proceso normal de cristalización de  $\text{CaCO}_3$  puede ocurrir.

En combinación con otras técnicas, el TM puede mejorar la eficiencia de la tecnología de purificación en los procesos de coagulación y ayuda a evitar el uso de productos químicos.

## 05 REFERENCIAS

- Alabdraba, W., Bayati, M., Radeef, A., & Rejab, M. (2013). Influence of magnetic field on the efficiency of the coagulation process to remove turbidity from water. *International Review of Chemical Engineering*, 5(4).
- Alabi, A., Chiesa, M., Garlisi, C., & Palmisano, G. (2015). Advances in anti-scale magnetic water treatment. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 1, 408–425. <https://doi.org/10.1039/C5EW00052A>
- Alimi, F. (2024). Effect of magnetic treatment on seawater determined by quartz crystal microbalance: Crystal deposition mechanisms. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(4), 14894–14898. <https://www.etasr.com>
- Alimi, F., Tlili, M., Ben Amor, M., Gabrielli, C., & Maurin, G. (2007). Influence of magnetic field on calcium carbonate precipitation. *Desalination*, 206(1-3), 163–168. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.02.064>
- Alimi, F., Tlili, M. M., Ben Amor, M., Maurin, G., & Gabrielli, C. (2009). Effect of magnetic water treatment on calcium carbonate precipitation: Influence of the pipe material. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48(8), 1327–1332. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2009.06.008>
- Antony, A., How Low, J., Gray, S., Childress, A., Le Clech, P., & Greg, L. (2011). Scale formation and control in high pressure membrane water treatment systems: A review. *Journal of Membrane Science*, 383, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.08.054>
- Arias Gilart, R., Berenguer Ungaro, M., Vázquez Nigorenko, J. A., Silveira Font, Y., & Alfaro Rodríguez, C. E. (2018). Disminución de las emisiones de monóxido de carbono con el tratamiento magnético del combustible. *Centro Azúcar*, 45, 21–31.
- Bolívar, G. (2019). Carbonato de calcio: Estructura, propiedades, formación, usos. <https://www.lifeder.com/carbonato-de-calcio/>
- Busch, K. W., & Busch, M. A. (1997). Laboratory studies on magnetic water treatment and their relationship to a possible mechanism for scale reduction. *Desalination*, 109(2), 131–148. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(97\)00059-3](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(97)00059-3)
- Campos, S. M., Moro-Martínez, A., León-Cañet, M., Silveira-Font, Y., & Falcón-Hernández, J. (2015). Tratamiento magnético sobre parámetros físico-químicos de muestras de petróleo. *Tecnología Química*, 35(3), 271–281.
- Cefalas, A. C., Kobe, S., Dražič, G., Sarantopoulou, E., Kollia, Z., Stražišar, J., & Meden, A. (2008). Nanocrystallization of caco3 at solid/liquid interfaces in magnetic field: A quantum approach. *Applied Surface Science*, 254(21), 6715–6724. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.04.056>
- Chibowski, E., Hołysz, L., & Szcześ, A. (2003). Adhesion of in situ precipitated calcium carbonate in the presence and absence of magnetic field in quiescent conditions on different solid surfaces. *Water Research*, 37(19), 4685–4692. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.07.001>
- Chibowski, E., & Szcześ, A. (2018). Magnetic water treatment — a review of the latest approaches. *Chemosphere*, 203, 54–67. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.160>
- CNEA. (2011). Uso del tratamiento magnético al agua en santiago de cuba. <https://magnetismocnea.wordpress.com/2011/05/04/uso-del-tratamiento-magnetico-al-agua-en-santiago/>
- Coey, J. M. D. (2012). Magnetic water treatment — how might it work? *Philosophical Magazine*, 92(31), 1–9. <https://doi.org/10.1080/14786435.2012.685968>
- Coey, J. M. D., & Cass, S. (2000). Magnetic water treatment. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 209(1-3), 71–74. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(99\)00648-4](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(99)00648-4)
- Coureoneaux-Font, C., Ribeaux-Kindelán, G., & del Toro Álvarez, D. (2025). Influencia de un campo magnético estático en el proceso de coagulación. *ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar*, 59(2), 61–64. <https://www.revista.icidca.azcuba.cu/wp-content/uploads/2025/07/articulo-7.pdf>

- Espinoza, M. A. (2019). Tecnología del tratamiento magnético del agua. <https://es.linkedin.com/pulse/tecnologia-del-tratamiento-magnetico-agua-marco-antonio-espinoza>
- Gabrielli, C., Jaouhari, R., Maurin, G., & Keddad, M. (2001). Magnetic water treatment for scale prevention. *Water Research*, 35(13), 3249–3259.
- Gálvez Vidaurre, C. (2010). Uso del desincrustante magnético (dm) para mejorar la calidad del agua en la industria. *Ingeniería Industrial*, 28(028), 139–154. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2010.n028.244>
- Gao, F., Zheng, Y., Li, J., Yin, Y., Jia, H., & Wang, J. (2024). Magnetization-coupled reverse osmosis (ro): Enhanced scale inhibition mechanisms and operational optimization. *Chemical Engineering Science*, 286, 119650. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.119650>
- Ge, H., Gong, X., Liu, R., Meng, X., & Gu, Y. (2010). Scale inhibition of electromagnetic water treatment and corrosion behavior of carbon steel in simulated water. *4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering (iCBBE)*.
- Gehr, R., Zhai, Z. A., Finch, J. A., & Rao, R. (1995). Reduction of soluble mineral concentrations in caso4 saturated water using a magnetic field. *Water Research*, 29(3), 933–940. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)00214-R](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)00214-R)
- Hafidi, M. Y., & Hafidi, M. E. (2017). Existing scale deposits removal by magnetic water treatment: Theoretical study and experiment. *International Journal of Water and Wastewater Treatment*, 3(3). <https://doi.org/10.16966/2381-5299.143>
- Higashitani, K. (1996). Effects of magnetic field on stability of non-magnetic colloidal particles. *Proceedings of the 2nd International Meeting on Anti-Scale Magnetic Treatment*.
- Higashitani, K., Okuhara, K., & Hatade, S. (1992). Effects of magnetic fields on stability of non-magnetic ultrafine colloidal particles. *Journal of Colloid and Interface Science*, 152(1), 125–131. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(92\)90013-C](https://doi.org/10.1016/0021-9797(92)90013-C)
- Hu, Z., Wu, K., Wang, Z., Shah, K. J., & Sun, Y. (2024). Research progress on magnetic flocculation in water treatment. *Magnetochemistry*, 10(56). <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry10080056>
- Kney, A. D., & Parsons, S. A. (2006). A spectrophotometer-based study of magnetic water treatment: Assessment of ionic vs. surface mechanisms. *Water Research*, 40(3), 517–524. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.11.019>
- Kobe, S., Dražič, G., McGuinness, P. J., Meden, T., Sarantopoulou, E., Kollia, Z., & Cefalas, A. C. (2003). Control over nanocrystallization in turbulent flow in the presence of magnetic fields. *Materials Science and Engineering*, 23(6), 811–815. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2003.09.136>
- Kobe, S., Dražič, G., McGuinness, P. J., & Stražičar, J. (2001). The influence of the magnetic field on the crystallisation form of calcium carbonate and the testing of a magnetic water-treatment device. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 236(1), 71–76. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(01\)00432-2](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(01)00432-2)
- Ledion, J., Leroy, P., Labbe, J. P., Durand, G., & Duigou, A. L. (1980). Scaling caused by natural water and the action of electric anti-scaling devices. *Matériaux et Techniques*, 68, 139–144.
- Lipus, L. C., & Dobersek, D. (2007). Influence of magnetic field on the aragonite precipitation. *Chemical Engineering Science*, 62(7), 2089–2095. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.12.051>
- Mahmoud, B., Yosra, M., & Nadia, A. (2016). Effects of magnetic treatment on scaling power of hard waters. *Separation and Purification Technology*, 171, 88–92. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.07.027>
- Martínez Morales, E. (2007). *La magnetización aplicada a la potabilización de agua* [Tesis de Maestría]. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”.
- Martínez Moya, S., Boluda Botella, N., & García Quiles, J. (2019). Técnicas electromagnéticas para el tratamiento de aguas y diseño de una planta piloto con dispositivo tk3k. *Congreso Nacional del Agua Orihuela 2019: innovación y sostenibilidad*, 1003–1014.
- Piyadasa, C., Yeager, T., Gray, S. R., Stuart, M. B., Ridgway, H. F., Pelekani, C., & Orbell, J. D. (2018). Antimicrobial effects of pulsed electromagnetic fields from commercially available water treatment devices — controlled studies under static and flow conditions. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 93(3), 871–877.

- Ribeaux Kindelán, G. (2011). *Efecto de un campo magnético estático sobre la cristalización de la sacarosa en solución* [Tesis de Doctorado en Ciencias Técnicas]. Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado, Universidad de Oriente.
- Ribeaux Kindelán, G., & Mesa Pérez, J. M. (2001). Evaluación del sistema de evaporación del cai américa libre de santiago de cuba, con y sin la aplicación de la tecnología del tratamiento magnético. *Tecnología Química*, 21(2).
- Sakurazawa, S., Kubota, T., & Ataka, M. (1999). Orientation of protein crystals grown in a magnetic field. *Journal of Crystal Growth*, 196(2), 325–331. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(98\)00841-0](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(98)00841-0)
- Salman, M. A., Al-Nuwaibit, G., Safar, M., & Al-Mesri, A. (2015). Performance of the physical treatment method and various commercial antiscalants for controlling scale deposition in desalination plants. *Desalination*, 369, 18–25. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.04.023>
- Shahwan, T., Üzüüm, Ç. A., & Eroğlu, E. (2010). Synthesis and characterization of bentonite/iron nanoparticles and their application as adsorbent of cobalt ions. *Applied Clay Science*, 47(3-4), 257–262. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.10.019>
- Shi, H. S. (2014). *Effect of magnetic field on scale removal in drinking water pipeline* [Master Thesis]. Faculty of Civil Engineering, Universiti Teknologi Malaysia.
- Sorensen, J. S., & Madsen, H. E. L. (2000). The influence of magnetism on precipitation of calcium phosphate. *Journal of Crystal Growth*, 216(1-4), 399–406.
- Szkatula, A., Balanda, M., & Kopeć, M. (2002). Magnetic treatment of industrial water. silica activation. *European Physical Journal: Applied Physics*, 18(1), 41–49. <https://doi.org/10.1051/epjap:2002025>
- Vaca Jiménez, S. (2014). Aplicación de un campo magnético ortogonal al flujo en sistemas de agua para reducir la formación de incrustaciones. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Cuenca*, 10.
- Vaillant López, N., Carreras Fernández, G., & Ribeaux Kindelán, G. (2022). Efectos del campo magnético en la dureza total, calor específico y punto de ebullición del agua. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 43(4), 76–87. <https://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha/article/view/611>
- Vaillant López, N., Olivero Fortune, T., Carreras Fernández, G., & Ribeaux Kindelán, G. (2026). Influence of magnetic treatment on the coagulation-flocculation process for water purification. In *Advances in technical sciences and architecture* (pp. 393–406). Springer Nature. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-96157-1\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-031-96157-1_28)
- Verdú, D. (2016). *Efecto del electromagnetismo sobre la dureza del agua* [Trabajo fin de máster]. Universidad de Alicante.
- Vermeiren, T. (1958). Magnetic treatment of liquids for scale and corrosion prevention. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 5(7).
- Wang, Y., Babchin, A. J., Chernyi, L. T., Chow, R. S., & Sawatzky, R. P. (1997). Rapid onset of calcium carbonate crystallization under the influence of a magnetic field. *Water Research*, 31(2), 346–350. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(96\)00243-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(96)00243-6)
- Wang, Y., Pugh, R. J., & Forssberg, E. (1994). The influence of inter-particle surface forces on the coagulation of weakly magnetic mineral ultrafine in a magnetic field. *Colloids and Surfaces A*, 90(2-3), 117–133.
- Xi, Z., Xiong, L., Gao, B., Cheng, C., Lai, Q., & Wei, E. (2010). The design and experimental research of high-power and high-frequency electromagnetic anti-scaling system. *3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics*, 1318–1321. <https://doi.org/10.1109/BMEI.2010.5639257>
- Zaidi, N. S., Sohaili, J., Muda, K., & Sillanpää, M. (2014). Magnetic field application and its potential in water and wastewater treatment systems. *Separation & Purification Reviews*, 43(3), 206–240. <https://doi.org/10.1080/15422119.2013.794148>
- Zhao, J., Liu, Z., & Zhao, E. J. (2014). Combined effect of constant high voltage electrostatic field and variable frequency pulsed electromagnetic field on the morphology of calcium carbonate scale in circulating cooling water systems. *Water Science and Technology*, 70(6), 1074–1082. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.337>

**Conflicto de intereses**

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

**ORCID de los autores**

Nuria de los Ángeles Vaillant López <https://orcid.org/0000-0001-7362-084X>

Guillermo Ribeaux Kindelán <https://orcid.org/0000-0002-0870-0613>