



Estudio de los procesos de remoción de hierro y manganeso en aguas subterráneas: una revisión

Study of iron and manganese removal processes in groundwater: a review

Estudo dos processos de remoção de ferro e manganês em águas subterrâneas: uma revisão

Johandra Raquel Guillen-Rivas ^I
jguillen9977@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-8898-1445>

Alex Raziel Jaramillo-Cedeño ^{II}
ajaramillo9013@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-1939-310X>

Ricardo José Baquerizo-Crespo ^{III}
ricardo.baquerizo@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-6268-3965>

Rosa Alexandra Córdova-Mosquera ^{IV}
rcordova@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-4299-4798>

Correspondencia: jguillen9977@utm.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículos de investigación

***Recibido:** 16 de julio de 2021 ***Aceptado:** 30 de agosto de 2021 * **Publicado:** 09 de septiembre de 2021

- I. Estudiante, Carrera de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Manabí, Ecuador.
- II. Ingeniero Químico, Departamento de Procesos Químicos, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.
- III. Ingeniera Química PhD, Departamento de Procesos Químicos, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.
- IV. Investigador Independiente.

Resumen

El hierro y el manganeso son de los elementos contaminantes más comunes en el agua subterránea, los cuales en la mayoría de las ocasiones superan los límites impuestos por las legislaciones que regulan los parámetros del agua de consumo. Considerando que cuando las concentraciones de estos metales superan dichos límites, estos pueden causar problemas estéticos, operativos e inclusive de salud pública; esta revisión proporciona información referente a las diferentes investigaciones sobre procesos de remoción de hierro y manganeso mediante procesos físicos, químicos y biológicos, profundizando en tecnologías convencionales e innovadoras. Este estudio se basa en el análisis de los procesos de remoción de hierro y manganeso en aguas especialmente las de origen subterráneo, buscando comparar la eficiencia de remoción de hierro y manganeso de dichos procesos, basados en datos de investigaciones. Encontrando así que el desarrollo de los métodos de remoción de los últimos años, logran eficiencias superiores al 90%, por lo general en compañía de procesos suplementarios y que la selección de la tecnología de remoción estará determinada por criterios técnicos y económicos de acuerdo a las condiciones del efluente.

Palabras clave: Eficiencia de remoción; metales pesados; impacto antropogénico; remoción convencional; remoción biológica; tecnología de membrana; nanotecnología.

Abstract

Iron and manganese are the most common pollutants in groundwater, which in most cases exceed the limits imposed by the laws that regulate the parameters of drinking water. Considering that when the concentrations of these metals exceed these limits, they can cause aesthetic, operational and even public health problems; This review provides information regarding the different investigations on iron and manganese removal processes through physical, chemical and biological processes, delving into conventional and innovative technologies. This study is based on the analysis of the iron and manganese removal processes in waters, especially those of underground origin, seeking to compare the iron and manganese removal efficiency of these processes, based on research data. Thus, finding that the development of removal methods in recent years achieve efficiencies greater than 90%, usually in the company of supplementary processes and that the selection of removal technology will be determined by technical and economic criteria according to the effluent conditions.

Keywords: Removal efficiency; heavy metals; anthropogenic impact; conventional removal; biological removal; membrane technology; nanotechnology.

Resumo

Ferro e manganês são os poluentes mais comuns nas águas subterráneas, que na maioria das vezes ultrapassam os limites impostos pelas leis que regulamentam os parâmetros da água potável. Considerando que quando as concentrações desses metais ultrapassam esses limites, podem causar problemas estéticos, operacionais e até de saúde pública; Esta revisão traz informações sobre as diferentes investigações sobre os processos de remoção de ferro e manganês por meio de processos físicos, químicos e biológicos, aprofundando-se em tecnologias convencionais e inovadoras. Este estudo se baseia na análise dos processos de remoção de ferro e manganês em águas, principalmente aquelas de origem subterrânea, buscando comparar a eficiência de remoção de ferro e manganês desses processos, com base em dados de pesquisas. Assim, constatar que o desenvolvimento de métodos de remoção nos últimos anos atinge eficiências superiores a 90%, geralmente na empresa de processos complementares e que a seleção da tecnologia de remoção será determinada por critérios técnicos e econômicos de acordo com as condições do efluente.

Palavras-chave: Eficiência de remoção; metais pesados; impacto antrópico; remoção convencional; remoção biológica; tecnologia de membrana; nanotecnologia.

Introducción

El agua subterránea es uno de los recursos principales del bioma terrestre, tomando en cuenta que esta representa más del 97 % del agua dulce accesible (Jakeman, Barreteau, Hunt, Rinaudo, & Ross, 2016). El hierro y el manganeso son de los elementos más abundantes en la corteza terrestre, lo que los convierte en contaminantes comunes en aguas subterráneas y superficiales (Kwakye et al., 2019). Aunque de forma natural estos elementos se pueden encontrar en concentraciones más altas en aguas subterráneas en comparación con las superficiales (Rusydi et al., 2021), la contaminación causada por iones de Fe (II) y Mn (II) puede conducir a interacciones complejas con otros componentes disueltos como los aniones inorgánicos o el carbono orgánico disuelto (Kwakye et al., 2019). Así la presencia de hierro puede provocar coloración, olor y generación de turbidez en las aguas debido a la oxidación de este compuesto, y la presencia de manganeso en

niveles elevados se consideran indeseables ya que la interacción de este componente con el aire provoca la oxidación a Mn (IV) el cual otorga un sabor amargo o metálico y en interacciones con ciertos materiales provoca manchas en estos (Kwakye et al., 2019); otro dato a considerar es que existe evidencia de que altas concentraciones de manganeso por periodos prolongados están asociadas a enfermedades del sistema nervioso como el Parkinson (Aschner et al., 2009). Desde lo planteado es importante considerar que la presencia de estos elementos además de los problemas estéticos y de salud mencionados, ocasionan problemas de operación y mantenimiento en los sistemas de abastecimiento y distribución. Los precipitados de Fe y Mn si se acumulan reducen la capacidad de las tuberías ocasionando así, pérdidas de la presión de la red de distribución, traduciendo como problemáticas de carácter técnico y financiero.

La tecnología más aplicada para la eliminación de estos metales suele ser una combinación de oxidación, precipitación y filtración utilizando una variedad de agentes oxidantes como oxígeno, cloro, permanganato de potasio, dióxido de cloro y ozono (Burbano, 2011). Actualmente, las técnicas de eliminación de hierro y manganeso con eficiencias de eliminación superiores al 80% o más se están estudiando a escala piloto o de laboratorio y proporcionan información sustancial para la aplicación de alternativas a los procesos convencionales más utilizados. El objetivo de la presente, es evaluar los diferentes procesos de remoción de hierro y manganeso en aguas subterráneas y de otras fuentes con la finalidad de identificar los diferentes enfoques que buscan la máxima eficiencia de remoción de estos metales.

Metodología

El presente artículo de revisión es de carácter descriptivo cuali-cuantitativo. Para la presente investigación se utilizará como datos de estudio, información de bases de datos científicas referente a los procesos de remoción de hierro y manganeso de aguas, correspondiente a los últimos seis (6) años, información que será utilizada para analizar y examinar los indicadores de remoción establecidos a partir del análisis documental de información digital, mediante la utilización de instrumentos como fichas de investigación y tablas dinámicas de Excel, para ordenar los datos de acuerdo a los métodos estudiados y otros subtemas de interés, la información que será reflejada en tablas y gráficos para facilitar su análisis, obtención de valoraciones y conclusiones respectivas.

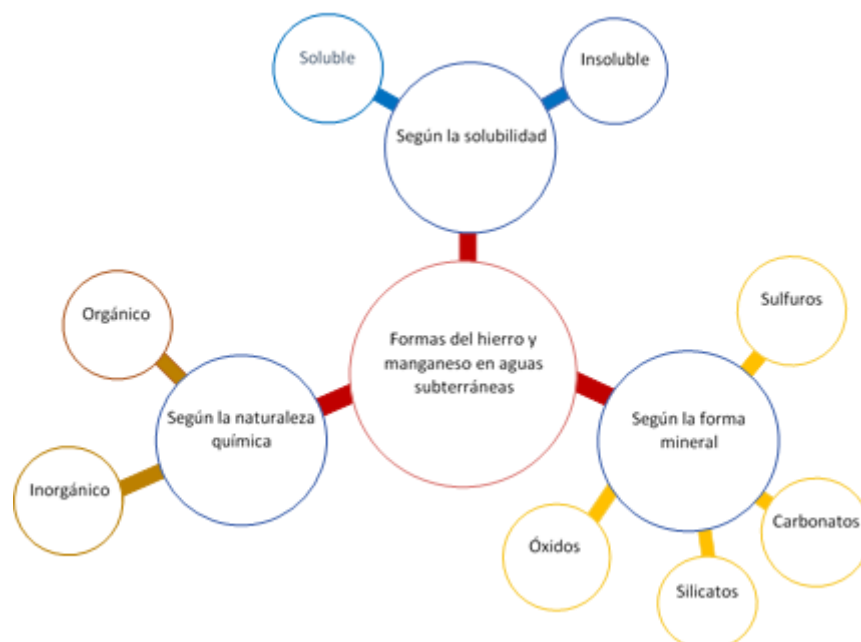
Resultados y discusión

Existe una variada gama de métodos de remoción de hierro y manganeso las cuales han sido investigadas en los últimos años, esta variedad es presentada de acuerdo al tipo de tratamiento (físico, químico, biológico o mixto) a implementar el cual muchas veces depende de las características intrínsecas del efluente a tratar. Las investigaciones referentes a estos métodos de tratamiento en aguas subterráneas han ido en aumento en los últimos años, exponiendo así el interés de la comunidad científica en mejorar el proceso de remoción de estos metales.

1. Hierro y manganeso en aguas subterráneas

El hierro y el manganeso se encuentran en diversas formas dentro de los efluentes subterráneos y superficiales y estas pueden clasificarse basados en la forma mineral, la solubilidad y la naturaleza química (Khatri et al., 2017), como se muestra en la figura 1.

Figura 1: Formas de hierro y manganeso en aguas subterráneas



La presencia de iones de Fe en las aguas subterráneas se atribuye generalmente a la disolución de rocas y minerales que contienen Fe, que son principalmente óxidos (hematita, magnetita y limonita), sulfuros, carbonatos y silicatos en condiciones anaeróbicas en presencia de agentes reductores como materia orgánica y sulfuro de hidrógeno (Dalai et al., 2015). Por lo que los valores correspondientes a estos elementos pueden variar considerablemente en función de las condiciones geográficas y la actividad antropogénica, los que se relacionan de forma directa con las

concentraciones de estos elementos, las cuales deben ser determinadas para seleccionar el proceso más conveniente para llevar dichas concentraciones a los niveles de concentración deseados.

Los niveles máximos de concentración de hierro y manganeso en el agua de consumo según las diferentes legislaciones a nivel mundial no deben exceder los 0.2 mg L⁻¹ de hierro y 0.05 mg L⁻¹ (Vries et al., 2017), aunque estos valores suelen variar muy levemente como se puede apreciar en la Tabla 1.

Tabla 1: Límites máximos permisible según las diferentes legislaciones a nivel global

Continente	País	Fe (mg/L)	Mn(mg/L)	Fuente
América	Ecuador	0,3	0,1	(INEN, 2006)
	Canadá	0,3	0,12	(Health Canada, 2020)
	Estados Unidos	0,3	0,05	(Swistock, 2019)
	México	0,3	0,15	(NOM, 1994)
	Colombia	0,3	0,1	(Ministerio de Protección Social, 2007)
Europa	España	0,2	0,05	(SINAC, 2004)
	Francia	0,2	0,05	(COUNCIL, 2020)
	Alemania	0,2	0,05	(COUNCIL, 2020)
	Italia	0,2	0,05	(COUNCIL, 2020)
Asía	Reino Unido	0,2	0,05	(COUNCIL, 2020)
	Japón	0,3	0,04	(Hiroshi, 2016)
	India	0,3	0,1	(Mizoram, 2012)

2. Análisis del impacto antropogénico y natural del hierro y el manganeso en aguas subterráneas.

La contaminación de los efluentes subterráneos está influenciada por procesos naturales tales como la disolución de rocas y minerales que contienen Fe y Mn que se encuentran en forma de óxidos, sulfuros, carbonatos y silicatos (Anu, 2015); y antropogénicos los cuales presentan mayor preocupación, dado a que si se identifica la causa antropogénica de contaminación de determinado

lecho, es posible tomar medidas de remediación (Palmucci , Rusi, & Di Curzio, 2016). Desde el enfoque antropogénico, sin lugar a dudas las principales fuentes de contaminación por iones de Fe y Mn en los recursos subterráneos son los que se producen a partir de las aguas residuales industriales, por nombrar algunas tenemos las generadas por la minería, plaguicidas, productos químicos orgánicos, curtidoras, farmacéuticos procesamiento de metales (Anu, 2015), y a pesar de que es sabido que antes de que estas lleguen hasta los acuíferos subterráneos estas tienen la oportunidad para filtrar los contaminantes a través de las rocas y el suelo subterráneo (Jusoh et al., 2005), es necesario tomar en cuenta que se requieren condiciones geográficas específicas para que este proceso se lleve a término.

3. Métodos de remoción de hierro y manganeso en aguas subterráneas

a) Métodos convencionales

i. Procesos de oxidación, precipitación y filtración

Este tipo de proceso normalmente consiste de sistemas de dosificación del compuesto químico seleccionado de acuerdo a las condiciones del proceso, que permitan la reacción de oxidación, la cual promueve la conversión de materia soluble a un estado insoluble y precipitable; para después ingresar a un filtro (Khatri et al., 2017), donde dependiendo de las condiciones y configuración del proceso se pueden alcanzar eficiencias de remoción de hasta el 99% para hierro y 98% para manganeso en aguas subterráneas (Bora et al., 2017). Los oxidantes empleados generalmente incluyen hipoclorito, permanganato de potasio, peróxido de hidrogeno, cloro, ozono, dióxido de cloro entre otros, de los que es necesario determinar la dosis optima de acuerdo a las características del proceso (Vigneswaran & Visvanathan, 1995). Duque (2009) menciona que al utilizar sustancias químicas como oxidante de hierro y manganeso, es importante garantizar un tiempo de contacto entre 5 y 30 minutos que permita una eficiente y completa reacción química, para tal fin, es necesario incorporar tanques de contacto que garanticen el tiempo requerido en donde se podrá llevar a cabo secuencialmente ajuste del pH, aplicación del oxidante y retiro de material precipitado.

ii. Procesos de ablandamiento por zeolita/ intercambio iónico

En este proceso ocurre un intercambio de iones, catiónicos o aniónicos. Este es un proceso útil en la separación, descontaminación y purificación de soluciones que contengan iones tales como el hierro y manganeso (Shkolnikov et al., 2012). Minerales como la zeolita tienen capacidad de intercambio iónico, esta es una magnitud que da una medida del total de equivalentes de un catión, que es capaz de retener por intercambio iónico, una determinada cantidad de este mineral. Esta capacidad está directamente relacionada con el catión Al presente en la red zeolítica y depende directamente de su composición química (Pavon & Xilomen, 2018). Este proceso puede alcanzar mayores porcentajes de remoción de hierro llegando a tasas de remoción de hasta el 98% y dependiendo de las características del material se puede alcanzar valores de remoción de entre el 18 y 97% de manganeso en aguas subterráneas y superficiales (Zevi et al., 2018).

iii. Procesos basados en materiales de carbonato de calcio

Los materiales, que se basan en carbonato de calcio, se han utilizado como compuestos efectivos para la remoción de compuestos metálicos di y trivalentes durante el tratamiento de aguas pudiendo lograr remoción de hasta el 95 % de hierro y 86% de manganeso (Aziz et al., 2001; Wang et al., 2016). La técnica presenta factores de costos y materiales eficaces ya que estos incluyen a la piedra caliza para la remediación de metales (Komnitsas et al., 2004). Dichos materiales a base de carbonato de calcio (CCBM) se han empleado para la remediación de hierro y manganeso en aguas (Wang et al., 2016). El desempeño de estos materiales durante la remoción de hierro y manganeso puede verse afectado por el pH ya que se ha demostrado que la dependencia del pH de la cinética de oxidación del Fe (II) está relacionada con la especiación del Fe (II) y que cada especie reacciona de acuerdo con una tasa distinta con el oxígeno, la materia orgánica natural la cual puede interferir con el área de contacto y los cationes coexistentes que pueden inhibir el proceso de remoción (Mettler et al., 2009).

iv. Procesos de separación por medios filtrantes

Los medios filtrantes son recursos variados utilizados para diferentes procesos incluida la remoción de hierro y manganeso en las aguas; existen diversos materiales granulares para la filtración, así como diversas configuraciones para la elaboración de los filtros en donde incluso se incluyen materiales adsorbentes, dependiendo de la configuración pueden llegar a porcentajes de remoción de hasta el 99% de hierro y manganeso en aguas subterráneas. Entre los medios más comunes tenemos arenas en combinación con carbón de antracita y carbón activado (El-naggar, 2010). Los

filtros son dispositivos de tratamiento físico y los mecanismos de eliminación incluyen procesos de atrapamiento físico tales como la adsorción, asentamiento por gravedad, impactación, tensión, intercepción y floculación. La filtración lenta de arena logra la remoción dentro de los primeros milímetros de profundidad desde la superficie de la arena. Tanto los filtros granulares de lecho profundo como los filtros de pre-revestimiento, hacen uso de un medio de filtrado, y la filtración elimina eficazmente la mayoría esas partículas de metal precipitan que no se sedimentarán (Patil et al., 2016). Se puede realizar una filtración mejorada acondicionando el medio filtrante como por ejemplo, con permanganato para formar una capa de óxido de manganeso en la superficie del medio o usando arena verde la cual es un glauconítico natural capaz de reducir los iones mencionados anteriormente a través de la oxidación y de la filtración (Roccaro et al., 2007).

v. Separación por sorción de sólidos/ adsorción

La separación por sorción de sólidos es un proceso en el que el soluto de un fluido líquido se acumula en la superficie del adsorbente, que puede ser sólida o líquida, y forma una estructura molecular o atómica, también conocido como adsorbato. El proceso, comúnmente conocido como adsorción, es uno de los procesos más utilizados para la descontaminación de aguas residuales (Tang et al., 2014). Por lo mencionado es oportuno mencionar que este es un método que puede ser utilizado para la eliminación de metales de las aguas residuales, superficiales o subterráneas incluso a bajas concentraciones lográndose porcentajes de remoción entre 80 y 90% de hierro y manganeso en aguas subterráneas (Aji et al., 2015). Varios tipos de adsorbentes, como carbón activado, cenizas, arcilla, etc., son explotados por varios científicos de todo el mundo para la remediación del hierro y manganeso del agua (Khatri et al., 2017).

vi. Electrocoagulación

La electrocoagulación (EC) es un método para desestabilizar los contaminantes disueltos o suspendidos presentes en el agua mediante la aplicación de corriente eléctrica en el agua contaminada (Ruiz, 2005). El contaminante se elimina del agua debido a la neutralización de su carga eléctrica (Mollah et al., 2001). Las ventajas del proceso incluyen el no uso de productos químicos, menor producción de lodos y fácil operación (Khatri et al., 2017). La técnica a menudo se combina con electro flotación las cuales se utilizan ampliamente para la remoción de los metales estudiados. Pudiéndose llegar a porcentajes de remoción de hierro y manganeso de hasta el 98 % en aguas pretratadas o potables (Ganesan et al., 2013; Das & Nandi, 2019).

vii. Aeración-filtración

La aireación es el método de introducir oxígeno o aire en los sistemas de tratamiento para la eliminación de metales (Khatri et al., 2017), este proceso por lo general va acompañado de sistemas de filtración y se recomienda para agua con alta concentración de hierro (mayor de 5 mg/L) con el fin de disminuir los costos en reactivos. El equipo usado en este proceso incluye comúnmente un aireador, un tanque de retención y filtros (Civardi & Tompeck, 2015). El oxígeno de la atmósfera reacciona con las formas solubles de hierro y manganeso (Fe^{+2} y Mn^{+2}) del agua cruda para producir óxidos relativamente insolubles (Fe^{+3} y Mn^{+4}) de estos elementos. La velocidad de reacción depende del pH de la solución, siendo más rápida a valores de pH altos. Ya que el manganeso tiene una velocidad de oxidación muy lenta vía el O_2 (ac) esta técnica no es muy efectiva para la remoción de Mn^{+2} , excepto a valores de pH mayores de 9.5. Para disminuir las concentraciones de manganeso al nivel deseado se requieren frecuentemente un tiempo de reacción y un tratamiento químico adicionales (Khatri et al., 2017); obteniendo así porcentajes de remoción en aguas subterráneas de hierro y manganeso de hasta un 99%, si se combinan con procesos de filtración (Štembal et al., 2005).

b) Métodos biológicos

Las estrategias biológicas, generalmente denominadas biorremediación, implican la utilización de microorganismos para eliminación de los diversos contaminantes en el agua y sin duda el hierro y el manganeso pueden ser removidos biológicamente. Existen bacterias que oxidan estos elementos por ejemplo tenemos para el hierro a la *Acidithiobacillus ferrooxidans* y manganeso a la *Acinetobacter* sp, existiendo así un potencial de remediación de estos elementos de fuentes de agua gracias a que estos organismos oxidan biológicamente los componentes antes mencionados. Los tratamientos biológicos siempre requieren de calidades y condiciones específicas del agua cruda, y no todas las aguas subterráneas o superficiales son factibles económicamente de ser tratadas (Civardi & Tompeck, 2015). Los tratamientos biológicos pueden emplearse cuando los costos de inversión y operación son menores que los de un proceso físico-químico, aunque es necesario tomar en cuenta las condiciones iniciales del agua (Khatri et al., 2017). Al no implicar el uso de oxidantes químicos, se logra reducir los costos operativos del proceso. Pudiendo cultivar estos organismos en biofiltros, que luego se utilizan para la eliminación de hierro y manganeso en el agua, lográndose eficiencias de remoción de hasta un 93% en agua superficial con pretratamientos (Tekerlekopoulou, 2016). Sin embargo, este método presenta inconvenientes tales como el tiempo

de generación de la película bioactiva y la pérdida de la misma por arrastre del sistema en los lavados, disminuyendo así la eficiencia del proceso de forma significativa (Li et al., 2016).

c) Métodos basados en tecnologías de membrana

En los últimos años las tecnologías de separación por membranas han sido de las más desarrolladas por los investigadores ya que permite la eliminación de innumerables contaminantes del agua incluidos metales como el hierro y manganeso. Algunas de las técnicas comunes, que implican diferentes tipos de membranas y de acuerdo a sus características son ultra filtración (UF), microfiltración (MF) y ósmosis inversa (RO) (Le & Nunes, 2016), la selección del proceso de membrana, dependerá del tamaño de los contaminantes a eliminar en el agua aunque por lo general se logran tasas de remoción del 99,9% para hierro y manganeso (L.-H. Cheng et al., 2020). La principal diferencia entre estos métodos es el tamaño de los poros de las membranas, y aunque tengan buenos rendimientos, es necesario tener en cuenta las características iniciales del agua para la selección del tratamiento, por lo tanto en la mayoría de las ocasiones será necesario un pretratamiento para evitar el taponamiento de los poros (Labanda et al., 2009).

d) Métodos basados en nanotecnologías

Los procesos nanotecnológicos son considerados aquellos que implican la fabricación y utilización de objetos de dimensión inferior a 100 nm. Estos objetos generalmente se denominan nano materiales o nano partículas (Pandey et al., 2016). Estos objetos han sido utilizados para una serie de problemas ambientales, incluido el control de la contaminación del agua, la remediación de las aguas subterráneas, el tratamiento de agua potable y el control de la calidad del aire (Khatri et al., 2017). Entre las tecnologías implementadas en el tratamiento y remoción de metales como el hierro y manganeso tenemos, los nanotubos de carbono (CNT) con los cuales se han logrado tasas remoción de 71,5 % para hierro y 52 % para manganeso (Elsehly et al., 2015). Los CNT son nano materiales gráfiticos huecos y bien ordenados, que forman parte de sp^2 átomos de carbono hibridados dispuestos de forma cilíndrica. Poseen una alta relación de aspecto, una gran superficie, buenas estabilidades térmicas y químicas con excelentes propiedades ópticas y electrónicas.

4. Comparación de eficiencia de los procesos de eliminación de Fe y Mn

A continuación, se muestran los diferentes tipos de procesos (Tabla 2) en donde se reportan los máximos porcentajes de remoción de acuerdo a los parámetros estudiados en cada investigación,

este resumen nos permite comparar y conocer de una manera simple la efectividad en remoción de los tratamientos investigados.

Tabla 2: Eficiencia de remoción de hierro y manganeso de acuerdo a los métodos estudiados

Método	Tipo de agua	Material utilizado	Variables evaluadas	pH	Eficiencia de remoción de Fe (%)	Eficiencia de remoción Mn (%)	Referencia
PO-P-F	ST	NaClO	pH y concentración del oxidante	6-9	88	90	(Kan et al., 2012)
PO-P-F	ST	KMnO ₄	pH, concentración de oxidante y concentración de floculante.	7-10	99	95	(Elsheikh et al., 2017)
PO-P-F	ST	NaHCO ₃ / KMnO ₄ / FeCl ₃	pH, concentración de oxidante y concentración de floculante.	7-7.5	99	98	(Bora et al., 2017)
PBMCC	ST	Piedra caliza / Hormigón	Tipo de material, Granulometría	7-9	95	86	(Wang et al., 2016)
PSMF	ST	Carbón activado a partir de residuos	Profundidad de columna	-	99	99	(Dalai et al., 2015)
PSMF	ST-S	Arena de manganeso	-	6.5-7	99	90	(L.-H. Cheng et al., 2020)
PA	ST	Carbón activado	Tiempo de contacto, dosis de adsorbente	6.84	90	84	(Aji et al., 2015)

PAZ/II	ST	Mordenita natural y activada	Método de activación, tiempo de retención	-	98	18	(Zevi et al., 2018)
PAZ/II	ST	Zeolita sintetizada	Tiempo de retención, masa de adsorbente	6.5-7.5	98	97	(Kwakye-Awuah et al., 2019)
Aeración	ST	Sistema de aeración y filtro	Velocidad de flujo	7-8	99	99	(Štembal et al., 2005)
Aeración	ST	Inyección de aire	Tipo de irrigación; Condiciones hidrológicas	6-7	33,7	5	(Pleasant et al., 2014)
EC	AP	Electrodo de aluminio	Tiempo, amperaje, distancia entre electrodos	6.34-7	98,5	-	(Das & Nandi, 2019)
EC		Ánodo de magnesio/cátodo de hierro	pH, amperaje, configuración del electrodo, distancia entre electrodos	3-11	-	97,2	(Ganesan et al., 2013)
POB	ST	Zeolita, CBPB, CBEO	Condiciones del cultivo, temperatura, pH	7-7.5	99,75	96,7	(Li et al., 2016)
PBA	ST	MTB	Tiempo de interacción	7-7.5	47,86	15.26	(Diaz-Alarcón et al., 2019)

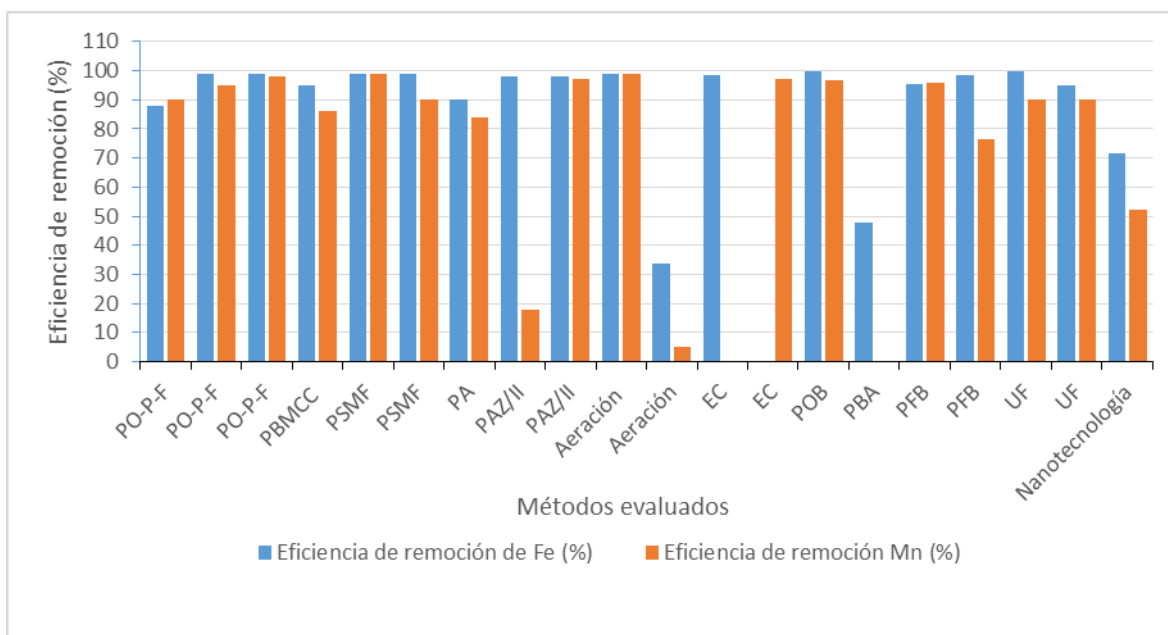
PFB	ST	Antracita, arena de manganeso, consorcio bacteriano	Profundidad del filtro, tiempo de proceso	7	95,48	95,9	(Q. Cheng et al., 2017)
PFB	ST	Polvo de carbón activado, consorcio bacteriano	Presión, tiempo	6.5-8.5	98,6	76,4	(Du et al., 2017)
UF	AS	Membrana de ultrafiltración de aleación cloruro de polivinilo	Condiciones de pretratamiento	6-7.10	100	90	(L.-H. Cheng et al., 2020)
UF	ST	membrana de ultrafiltración de polipropileno	Intensidad de mezclado	8	95	90	(Lin et al., 2013)
Nanotecnología	AS	Nanotubos de carbono	pH, masa de filtro	3-8	71,5	52	(Elsehly et al., 2015)

ST: agua subterránea, ST-S: agua subterránea simulada, PO-P-F: Proceso de oxidación-precipitación- filtración, PBMCC: Procesos basados en materiales de carbonato de calcio, PSMF: Procesos de separación por medios filtrantes, BRP: barrera reactiva permeable, PA/A: Procesos de Adsorción, PAZ/II: Procesos de ablandamiento por zeolita e intercambio iónico, POB: Procesos de oxidación bacteriana, CBPB: Cepas bacterianas productoras de biopelículas, CBEO: Cepas bacterianas eficaces oxidantes de hierro y manganeso, PBA: Proceso biológico alternativo, MTB: Bacterias Magneto tácticas, PFB: Proceso de filtro bacteriano, UF: Ultrafiltración, AS: Agua subterránea simulada

Se puede observar que la mayoría de los procesos analizados cuentan con eficiencia de remoción superiores a 90% y 80% de hierro y manganeso respectivamente (Figura 2), pero es necesario destacar que dicha capacidad de remoción es lograda gracias a procesos suplementarios que suelen incluirse en la metodología de remoción de los experimentos evaluados. En el caso del estudio realizado por Pleasant et al. (2014) se implementó únicamente inyección de aire directa a los pozos subterráneos y los resultados comprenden a la caracterización del agua sin tratamientos posteriores obteniendo así los resultados mostrados en la Tabla 2, en la misma tabla se puede observar los

rendimientos de un proceso de aireación desarrollado por Štembal et al. (2005) en donde los valores son significativamente mejores gracias a la incorporación de un sistema de filtrado.

Figura 2: Eficiencias de remoción de los métodos evaluados



Otro punto que es importante destacar son las ventajas y desventajas en función de los costos, eficacia, facilidad de manejo, estabilidad del proceso y formación de subproductos de interferencia que pueden ofrecer estos procesos. A continuación, se describen las principales ventajas y desventajas relacionadas con los procesos evaluados (Tabla 3).

Tabla 3: Ventajas y desventajas de los diferentes procesos de remoción de Fe y Mn

Método	Ventajas	Desventajas	Costo
Proceso de oxidación-precipitación-filtración	<ul style="list-style-type: none"> Operación simple del sistema Eliminación de agentes patógenos de acuerdo a la elección del oxidante 	<ul style="list-style-type: none"> Posible dificultad logística para el transporte y almacenamiento del oxidante Corrosión en los sistemas de tratamiento por acción del oxidante 	Bajo
Procesos basados en materiales de carbonato de calcio	<ul style="list-style-type: none"> La temperatura del afluente no afecta la eficiencia de remoción Altas eficiencias de remoción 	<ul style="list-style-type: none"> La eficiencia se ve reducida en presencia de materia orgánica y cationes 	Bajo

Procesos de separación por medios filtrantes	<ul style="list-style-type: none"> • No requiere de productos químicos • Altas eficiencias y velocidad de remoción • Efectivo en la remoción de microorganismos patógenos 	<ul style="list-style-type: none"> • La eficiencia es reducida a altas temperaturas • Es necesario recurrir a los retro lavados de forma constante 	Bajo
Procesos de Adsorción	<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiencia de remoción • No requiere de productos químicos • Operación simple del sistema 	<ul style="list-style-type: none"> • Inefectivo en la remoción de microorganismos patógenos • La eficiencia se ve reducida en presencia de materia orgánica y cationes 	Bajo
Procesos de ablandamiento por zeolita e intercambio iónico	<ul style="list-style-type: none"> • Efectivo en la remoción de las formas orgánicas de FE y Mn • Capacidad de regeneración de los materiales de remoción 	<ul style="list-style-type: none"> • Menos efectivo en procesos con altas concentraciones iniciales de los metales • Obstrucción del sistema por oxidación 	Bajo
Procesos de aeración- filtración	<ul style="list-style-type: none"> • No requiere de productos químicos • Altas tasas de transferencia de masa 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevados tiempos de residencia • De acuerdo a las condiciones del afluente, puede requerirse procesos adicionales • Altos costos iniciales de operación 	Medio
Electrocoagulación	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamiento del sistema simple • Operación simple del sistema • Eficiencias de remoción elevadas • Posibilidad de autonomía energética mediante la utilización de paneles solares 	<ul style="list-style-type: none"> • Inefectivo en pH bajos • Requiere de elevados potenciales eléctricos • Es necesario el reemplazo de electrodos 	Medio
Procesos biológicos	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiencias de remoción elevadas • Alta especificidad de remoción • No requiere de productos químicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de condiciones de pH específicas • Requiere de tiempos de espera elevados para la formación de las biopelículas • Pérdida de microbios durante el lavado 	Bajo

Procesos basados en tecnologías de membrana en combinación con pretratamientos	<ul style="list-style-type: none"> • Mínimos volúmenes retenidos • Remoción efectiva de los contaminantes 	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste de las membranas • Decrecimiento de la eficiencia en periodos prolongados de tratamiento 	Alto
Procesos basados en nanotecnologías	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada selectividad de remoción • Eficiencias de remoción elevadas • Elevada área superficial 	<ul style="list-style-type: none"> • Toxicidad de las nano partículas • Dificultad de remoción de las nano partículas del efluente 	Alto

Los tratamientos para eliminación de hierro y manganeso suelen implicar diversos procesos unitarios para obtener eficiencias de remoción adecuadas para que el efluente obtenido sea aceptable para su utilización o consumo. Partiendo desde dicha premisa es necesario establecer que las tecnologías convencionales suelen ser las más adecuadas desde el punto de vista técnico-financiero ya que los principios de dichas tecnologías suelen implicar procesos de clarificación (química, física o físico-química) y filtración de forma sencilla para altas cantidades de afluentes. Además de suelen ser tecnologías de fácil operación y no emplean tecnologías patentadas (Civardi & Tompeck, 2015).

Conclusiones

Los diferentes procesos de remoción de hierro y manganeso, cuentan con eficiencias de eliminación de estos metales significativamente altas, sin embargo, dichos valores están relacionados a características y parámetros específicos. Por lo que el proceso de evaluación, selección y desarrollo de la estrategia de tratamiento implica conocer dichas características y parámetros para lograr un mayor impacto en el tratamiento. Las tecnologías convencionales como los procesos de oxidación, precipitación y filtración para la remoción de hierro y manganeso suelen ser las opciones más utilizadas ya que son de sencilla operación, funcionan para altas cantidades de afluentes y su costo suele ser bajo, pero es oportuno mencionar dado a la información recolectada que las tecnologías

innovadoras presentan resultados atractivos y pueden ser beneficiosas de acuerdo a las condiciones del medio donde se pretenda desarrollar el proceso.

Referencias

1. Aji, M., Gutti, B., & Highina, B. (2015). Application of activated carbon in removal of iron and manganese from alau dam water in maiduguri. *Columban J. Life Sci.*, 17(1), 35-39.
2. Anu, Y. (2015). Bioremediation of wastewater using various sorbents and vegetable enzymes. *Research in Biotechnology*, 6(5), 16-23. <http://updatepublishing.com/journal/index.php/rib/article/view/2482/2460>
3. Aschner, A., Erikson, V., Bebee, J., Jim, K., Beckett, M., & Clement, J. (2009). Manganese and its Role in Parkinson's Disease: From Transport to Neuropathology. *Neuromol. Med.*, 11(1), 252-266.
4. Aziz, H. A., Othman, N., Yusuff, M. S., Basri, D. R. H., Ashaari, F. A. H., Adlan, M. N., Othman, F., Johari, M., & Perwira, M. (2001). Removal of copper from water using limestone filtration technique: Determination of mechanism of removal. *Environment International*, 26(5), 395-399. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(01\)00018-6](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(01)00018-6)
5. Bin Jusoh, A., Cheng, W. H., Low, W. M., Nora'aini, A., & Megat Mohd Noor, M. J. (2005). Study on the removal of iron and manganese in groundwater by granular activated carbon. *Desalination*, 182(1), 347-353. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.03.022>
6. Bora, A. J., Mohan, R., & Dutta, R. K. (2017). Simultaneous removal of arsenic, iron and manganese from groundwater by oxidation-coagulation-adsorption at optimized pH. *Water Supply*, 18(1), 60-70. <https://doi.org/10.2166/ws.2017.092>
7. Burbano, L. M. M. (2011). REMOCIÓN DE HIERRO Y MANGANESO POR OXIDACIÓN CON CLORO Y FILTRACIÓN EN [Maestría, UNIVERSIDAD DEL VALLE]. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/7908/CB-0450286.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
8. Cheng, L.-H., Xiong, Z.-Z., Cai, S., Li, D.-W., & Xu, X.-H. (2020). Aeration-manganese sand filter-ultrafiltration to remove iron and manganese from water: Oxidation effect and fouling behavior of manganese sand coated film. *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101621. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101621>

9. Cheng, Q., Nengzi, L., Bao, L., Huang, Y., Liu, S., Cheng, X., Li, B., & Zhang, J. (2017). Distribution and genetic diversity of microbial populations in the pilot-scale biofilter for simultaneous removal of ammonia, iron and manganese from real groundwater. *Chemosphere*, 182, 450-457. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.075>
10. Civardi, J., & Tompeck, M. (2015). *Iron and Manganese Removal Handbook*. American Water Works Association.
11. COUNCIL. (2020). COUNCIL DIRECTIVE 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:31998L0083&from=EN>
12. Dalai, C., Jha, R., & Desai, V. R. (2015). Rice Husk and Sugarcane Baggase Based Activated Carbon for Iron and Manganese Removal. *Aquatic Procedia*, 4, 1126-1133. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.143>
13. Das, D., & Nandi, B. K. (2019). Removal of Fe (II) ions from drinking water using Electrocoagulation (EC) process: Parametric optimization and kinetic study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(3), 103116. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103116>
14. Diaz-Alarcón, J. A., Alfonso-Pérez, M. P., Vergara-Gómez, I., Díaz-Lagos, M., & Martínez-Ovalle, S. A. (2019). Removal of iron and manganese in groundwater through magnetotactic bacteria. *Journal of Environmental Management*, 249, 109381. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109381>
15. Du, X., Liu, G., Qu, F., Li, K., Shao, S., Li, G., & Liang, H. (2017). Removal of iron, manganese and ammonia from groundwater using a PAC-MBR system: The anti-pollution ability, microbial population and membrane fouling. *Desalination*, 403, 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.03.002>
16. Duque, A. L. (2009). Remoción de hierro y manganeso en aguas subterráneas mediante doble filtración con flujo a presión. Caso el hormiguero - Cali [UNIVERSIDAD DEL VALLE]. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/7663/7779-0393976.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

17. El-naggar, H. M. (2010). Development Of Low-Cost Technology For The Removal Of Iron and Manganese From Ground Water In Siwa Oasis. *J Egypt Pilbiic 1Tcnlth Assoc*, 5(3), 169-188.
18. Elsehly, E. M. I., Chechenin, N. G., Bukunov, K. A., Makunin, A. V., Priselkova, A. B., Vorobyeva, E. A., & Motaweh, H. A. (2015). Removal of iron and manganese from aqueous solutions using carbon nanotube filters. *Water Supply*, 16(2), 347-353. <https://doi.org/10.2166/ws.2015.143>
19. Elsheikh, M. A., Guirguis, H., & Fathy, A. (2017). Removal of Iron and Manganese from Groundwater: A Study of Using Potassium Permanganate and Sedimentation. *Mansoura Engineering Journal*, 42(3), 6.
20. Ganesan, P., Lakshmi, J., Sozhan, G., & Vasudevan, S. (2013). Removal of manganese from water by electrocoagulation: Adsorption, kinetics and thermodynamic studies. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 91(3), 448-458. <https://doi.org/10.1002/cjce.21709>
21. Health Canada. (09 de 2020). Guidelines for Canadian Drinking Water Quality - Summary Table. Obtenido de <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/environmental-workplace-health/reports-publications/water-quality/guidelines-canadian-drinking-water-quality-summary-table.html#t2>
22. Hiroshi, W. (2016). Revision of Drinking Water Quality Standards in Japan. *Water Supply Div.* <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryounn/tnn0264pdf/ks0264011.pdf>
23. INEN. (2006). AGUA PARA CONSUMO HUMANO. REQUISITOS 1108-2006. Quito : Servicio Ecuatoriano de Normalización.
24. Jakeman, A. J., Barreteau, O., Hunt, R. J., Rinaudo, J.-D., & Ross, A. (Eds.). (2016). *Integrated Groundwater Management: Concepts, Approaches and Challenges*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9>
25. Kan, C., Chen, W., Wan, M., Phatai, P., Wittayakun, J., & Li, K. (2012). The preliminary study of iron and manganese removal from groundwater by NaOCl oxidation and MF filtration. *Sustain. Environ. Res.*, 22(1), 25-30. <https://docplayer.net/39193642-The-preliminary-study-of-iron-and-manganese-removal-from-groundwater-by-naocl-oxidation-and-mf-filtration.html>

26. Khatri, N., Tyagi, S., & Rawtani, D. (2017). Recent strategies for the removal of iron from water: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 19, 291-304. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.08.015>
27. Komnitsas, K., Bartzas, G., & Paspaliaris, I. (2004). Efficiency of limestone and red mud barriers: Laboratory column studies. *Minerals Engineering*, 17(2), 183-194. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2003.11.006>
28. Kwakye, B., Sefa, B., Von, E., Nkrumah, I., & Williams, C. (2019). Adsorptive Removal of Iron and Manganese from Groundwater Samples in Ghana by Zeolite Y Synthesized from Bauxite and Kaolin. *Water Journal*, 11(9), 1912. doi:10.3390/w11091912
29. Labanda, J., Khaidar, M. S., & Llorens, J. (2009). Feasibility study on the recovery of chromium (III) by polymer enhanced ultrafiltration. *Desalination*, 249(2), 577-581. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.06.031>
30. Le, N. L., & Nunes, S. P. (2016). Materials and membrane technologies for water and energy sustainability. *Sustainable Materials and Technologies*, 7, 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2016.02.001>
31. Li, C., Wang, S., Du, X., Cheng, X., Fu, M., Hou, N., & Li, D. (2016). Immobilization of iron- and manganese-oxidizing bacteria with a biofilm-forming bacterium for the effective removal of iron and manganese from groundwater. *Bioresource Technology*, 220, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.020>
32. Lin, J.-L., Huang, C., Pan, J. R., & Wang, Y.-S. (2013). Fouling mitigation of a dead-end microfiltration by mixing-enhanced preoxidation for Fe and Mn removal from groundwater. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 419, 87-93. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2012.11.053>
33. Mettler, S., Wolthers, M., Charlet, L., & Gunten, U. von. (2009). Sorption and catalytic oxidation of Fe(II) at the surface of calcite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(7), 1826-1840. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.01.003>
34. Ministerio de Protección Social. (2007). RESOLUCIÓN NÚMERO 2115. Bogotá: Ministro de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
35. Mizoram. (2012). Indian Standard Drinking Water- Specification. Government of Mizoram.

<https://mpcb.mizoram.gov.in/uploads/attachments/d6c72ef548b2660da564372278a7c125/pages-160-indian-standards.pdf>

36. Mollah, M. Y. A., Schennach, R., Parga, J. R., & Cocke, D. L. (2001). Electrocoagulation (EC)—Science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 84(1), 29-41. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00176-5)
37. NOM. (1994). NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994, "SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO-LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARASU POTABILIZACION". Mexico: Comisión Nacional del agua.
38. Pandey, G., Rawtani, D., & Agrawal, Y. K. (2016). Aspects of Nanoelectronics in Materials Development. En *Nanoelectronics and Materials Development*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/64414>
39. Patil, D. S., Chavan, S. M., & Oubagaranadin, J. U. K. (2016). A review of technologies for manganese removal from wastewaters. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), 468-487. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.11.028>
40. Pavon, R., & Xilomen, C. (2018). Efecto de la plata (Ag¹⁺) y el hierro (Fe³⁺) sobre la sorción de manganeso por zeolitas naturales modificadas [Universidad Autónoma Metropolitana (México). Unidad Azcapotzalco. Coordinación de Servicios de Información.]. <http://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/6814>
41. Pleasant, S., O'Donnell, A., Powell, J., Jain, P., & Townsend, T. (2014). Evaluation of air sparging and vadose zone aeration for remediation of iron and manganese-impacted groundwater at a closed municipal landfill. *Science of The Total Environment*, 485-486, 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.028>
42. Roccaro, P., Barone, C., Mancini, G., & Vagliasindi, F. G. A. (2007). Removal of manganese from water supplies intended for human consumption: A case study. *Desalination*, 210(1), 205-214. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.05.045>
43. Ruiz, Á. A. (2005). La electrocoagulación: Una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 2(1), 49-56.
44. Rusydi, A., Onodera, S., Saito, M., Ioka, S., Maria, R., Ridwansyah, I., & Delinom, R. (2021). Vulnerability of groundwater to iron and manganese contamination in the coastal alluvial plain of a developing Indonesian city. *SN Applied Sciences*, 3(2021), 399.

45. Shkolnikov, V., Bahga, S. S., & Santiago, J. G. (2012). Desalination and hydrogen, chlorine, and sodium hydroxide production via electrophoretic ion exchange and precipitation. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 14(32), 11534-11545. <https://doi.org/10.1039/C2CP42121F>
46. SINAC. (2004). *Calidad del agua de consumo humano en España*. Madrid : Ministerio de calidad y consumo.
47. Štembal, T., Markić, M., Ribičić, N., Briški, F., & Sipos, L. (2005). Removal of ammonia, iron and manganese from groundwaters of northern Croatia—Pilot plant studies. *Process Biochemistry*, 40(1), 327-335. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.01.006>
48. Swistock, B. (2019). *Iron and Manganese in Private Water Systems*. PennState Extension. Obtenido de <https://extension.psu.edu/iron-and-manganese-in-private-water-systems#:~:text=Manganese%20often%20results%20in%20a,manganese%20of%200.3%20mg%2FL>.
49. Tang, X., Zhang, Q., Liu, Z., Pan, K., Dong, Y., & Li, Y. (2014). Removal of Cu(II) by loofah fibers as a natural and low-cost adsorbent from aqueous solutions. *Journal of Molecular Liquids*, 191, 73-78. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2013.11.034>
50. Tekerlekopoulou, A. G., Vasiliadou, I. A., & Vayenas, D. V. (2006). Physico-chemical and biological iron removal from potable water. *Biochemical Engineering Journal*, 31(1), 74–83. doi:10.1016/j.bej.2006.05.020
51. Vigneswaran, S., & Visvanathan, C. (1995). *Water Treatment Processes: Simple Options*. CRC Press.
52. Vries, D., Bertelkamp, C., Schoonenberg Kegel, F., Hofs, B., Dusseldorp, J., Bruins, J. H., de Vet, W., & van den Akker, B. (2017). Iron and manganese removal: Recent advances in modelling treatment efficiency by rapid sand filtration. *Water Research*, 109, 35-45. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.032>
53. Wang, Y., Pleasant, S., Jain, P., Powell, J., & Townsend, T. (2016). Calcium carbonate-based permeable reactive barriers for iron and manganese groundwater remediation at landfills. *Waste Management*, 53, 128-135. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.02.018>

54. Wang, Y., Sikora, S., Kim, H., Bonzongo, J.-C., Rhue, D., & Townsend, T. G. (2013). Evaluation of mineral substrates for in situ iron removal from groundwater. *Environmental Earth Sciences*, 69(7), 2247-2255. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2054-8>
55. Zevi, Y., Dewita, S., Aghasa, A., & Dwinandha, D. (2018a). Removal of Iron and Manganese from Natural Groundwater by Continuous Reactor Using Activated and Natural Mordenite Mineral Adsorption. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 111, 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/111/1/012016>

© 2021 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)