

Evaluación del proceso de electrocoagulación para remoción de Arsénico y Flúor presentes en agua de consumo humano

Technical evaluation of electrocoagulation process for the removal of Arsenic and Fluoride present in water for human consumption

RAMÍREZ-QUEZADA, María Guadalupe*†, PÁRAMO-VARGAS, Javier, REYNOSO-CUEVAS, Liliana y MURILLO-HERNÁNDEZ, Martha Betzabé

Universidad Tecnológica de León, Blvd. Universidad Tecnológica # 225, C.P. 37670, Colonia San Carlos. León, Gto.

ID 1^{er} Autor: *María Guadalupe, Ramírez-Quezada* / ORC ID: 0000-0001-8418-0667, Researcher ID Thomson: S-6852-2018, CVU CONACYT ID: 828598

ID 1^{er} Coautor: *Javier, Páramo-Vargas* / ORC ID: 0000-0003-4022-7050, Researcher ID Thomson: S-4970-2018, CVU CONACYT ID: 66460

ID 2^{do} Coautor: *Liliana, Reynoso-Cuevas* / ORC ID: 0000-0001-8736-8374, Researcher ID Thomson: A-9508-2015, CVU CONACYT ID: 42645

ID 3^{er} Coautor: *Martha Betzabé, Murillo-Hernández* / ORC ID: 0000-0001-9146-1125, Researcher ID Thomson: S-5887-2018, CVU CONACYT ID: 521401

Recibido 23 Enero, 2018; Aceptado 20 Marzo, 2018

Resumen

En este trabajo se evaluó el proceso de electrocoagulación (EC) en un prototipo para remoción de arsénico y flúor en agua de pozo, con el objetivo de atender la problemática actual del agua para consumo humano contenida en el acuífero del Valle de Guadiana, ubicado en el municipio de Durango, que históricamente ha presentado concentraciones de flúor entre 0.18 y 27 ppm y de arsénico entre 0.0049 y 0.3202 ppm. El estudio se realizó a escala piloto, trabajando con agua sintética, preparada con condiciones semejantes a las del acuífero, con ello se buscó atender un problema de salud pública. El tren de tratamiento se integró por la EC, seguida de, sedimentación y filtración de las muestras. Con este proceso se logró obtener agua que cumplió con el valor guía de 0.010 mg/L para arsénico y 0.7 mg/L para flúor, sugerido por la Organización Mundial de la Salud (OMS), el cual es más bajo que el límite máximo permisible de 0.025 mg/L para arsénico y 1.5 mg/L para flúor, establecido por la modificación del año 2000 a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Los costos resultaron bajos, ya que se consideró la inversión inicial del prototipo a nivel escala, tratando únicamente 1.5 L de muestra y la filtración se realizó de forma manual.

Arsénico, Flúor, Electrocoagulación, Aluminio, Densidad de corriente

Abstract

In this work we evaluated the electrocoagulation (EC) process in a prototype to remove arsenic and fluoride from well water, in order to solve the problem of water for human consumption in the Valley of Guadiana, located in the town of Durango, which has historically presented fluoride concentrations between 0.18 and 27 ppm and for arsenic between 0.0049 and 0.3202 ppm. The study was conducted on a pilot scale, preparing synthetic water, with similar conditions to those of a source of water supply for human consumption. The treatment train was integrated by the EC, followed by sedimentation and filtration of the samples. With this process it was possible to obtain water that met the guide value of 0.010 mg/L for arsenic and 0.7 mg/L for fluoride, suggested by the World Health Organization (WHO), which is lower than the maximum permissible limit of 0.025 mg/L for arsenic and 1.5 mg/L for fluoride, established by the modification in 2000 year to the Official Mexican Standard NOM-127-SSA1-1994. The cost of treatment is low, because it requires few chemicals.

Arsenic, Fluoride, Electrocoagulation, Aluminum, Current density

Citación: RAMÍREZ-QUEZADA, María Guadalupe, PÁRAMO-VARGAS, Javier, REYNOSO-CUEVAS, Liliana y MURILLO-HERNÁNDEZ, Martha Betzabé. Evaluación del proceso de electrocoagulación para remoción de Arsénico y Flúor presentes en agua de consumo humano. Revista de Simulación y Laboratorio 2018, 5-14: 1-12.

*Correspondencia al Autor (Correo electrónico: mgramirezquezada@gmail.com)

†Investigador contribuyendo como primer Autor

Objetivo

Evaluar la remoción de arsénico y flúor mediante el proceso de electrocoagulación en agua para consumo humano proveniente del acuífero del Valle del Guadiana en Durango, Durango.

Metodología

1. Desarrollar el muestreo de los pozos del acuífero del Valle del Guadiana.
2. Caracterización del agua de los pozos del acuífero del Valle del Guadiana.
3. Desarrollar las pruebas de tratabilidad con el proceso de electrocoagulación.
4. Analizar los resultados obtenidos.

Contribución

El presente trabajo ha permitido obtener conocimiento de la aplicación de un tratamiento innovador, la electrocoagulación; variante de la coagulación convencional para la depuración de arsénico y flúor contenidos en el agua para consumo de la población en el municipio de Durango, atendiendo un problema de salud pública en el municipio.

Introducción

En los 1,964 millones de km² de superficie en nuestro país, en el año 2015, se registró una población de 119, 530, 753 habitantes y se tiene una proyección de aumento para el año 2030 a 137, 500,000 habitantes (CONAGUA, 2016). Esto incrementa la necesidad de poder disponer de agua en cantidad y calidad suficiente para el consumo de toda la población y poder cubrir una de las demandas básicas de los seres humanos, que impactan directamente en la salud de la población.

Diversos estudios, como; “Mecanismos que liberan arsénico al agua subterránea de la Comarca Lagunera, estados de Coahuila y Durango, México” (Mejía-González, González-Hita, Briones-Gallardo, Cardona-Benavides, & Soto-Navarro, 2014).

“Análisis técnico y económico del proceso de coagulación con cloruro férrico para remover arsénico de agua subterránea” en la ciudad de Torreón Coahuila (IMTA, 2011) y el “Estudio de tratabilidad y coexposición a arsénico y fluoruros en aguas de bebida” (Rivera Huerta, 2013), han encontrado y confirmado que, en México, muchos de los acuíferos de la parte norte y centro del país, que se explotan para agua de consumo humano, sobrepasan los límites máximos permisibles de flúor y arsénico establecidos por la NOM-127-SSA1-1994; norma que establece los criterios que debe cumplir el agua para consumo humano en México, al igual que los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud aún más bajos que los de la norma.

La Figura 1 presenta las zonas con concentraciones de As, que sobrepasan los límites para consumo humano en México.



Figura 1 Ubicación de zonas con concentraciones elevadas de As: (1) Comarca Lagunera, (2) Valle del Guadiana, (3) Hermosillo, (4) Meoqui, (5) Zimapán, (6) San Antonio-El Triunfo, (7) Sta. Ma. De la Paz, (8) Morales, (9) Los Azufres, (10) Los Humeros, (11) Altos de Jalisco, (12) Acolulco, (13) Río Verde, (14) Independencia, (15) Salamanca, (16) Acámbaro
Fuente: (J. Bundschuh, 2008)

La Figura 2, presenta las entidades donde se han encontrado concentraciones superiores a 1.5 mg/L de fluoruros, en fuentes de abastecimiento de agua potable en México.



Figura 2 Mapa de localización de acuíferos en México, cuya concentración de fluoruros es mayor a 1.5 mg/L
Fuente: (IMTA, 2011)

Actualmente, el municipio de Durango se abastece del acuífero del Valle del Guadiana, el cual, según estudios previos, no cumple con los límites máximos permisibles para arsénico y flúor (J. Bundschuh, 2008), establecidos en la NOM-127-SSA-1994, y tampoco con los valores recomendados por la OMS; representando una problemática actual de salud pública en el municipio. Procesos alternativos, como la electrocoagulación se presenta como un método viable debido a su bajo o nulo consumo de reactivos químicos.

El sistema de electrocoagulación (EC) es una variante de la coagulación química (CQ); con la característica de que no se agregan coagulantes, pues los cationes que cumplen esa función se generan gracias al paso de una corriente eléctrica a través de la oxidación del ánodo de sacrificio. En los 2 procesos referidos, la coagulación inicia cuando los cationes actúan en el agua; proviniendo de una sal en el caso químico (CQ) y generados in situ en el caso de la electrocoagulación (EC).

Los resultados del proceso de electrocoagulación fueron favorables para remover arsénico con una cantidad de energía mínima y un tiempo de proceso corto; sin embargo, con respecto al flúor, el proceso presentó mayor complejidad, requiriendo valores de densidad de corriente y tiempo más prolongados.

Marco Teórico

El agua es un recurso indispensable para el desarrollo de la vida. La Organización de las Naciones Unidas (ONU), ha declarado un derecho humano el acceso a agua potable segura, para las poblaciones del planeta.

Actualmente, el abastecimiento en calidad y cantidad adecuada es un problema; particularmente para la población rural, que es la que presenta mayores afectaciones por enfermedades hídricas (J. Bundschuh, 2008). Muchos de estos problemas derivan de la contaminación antropogénica o natural del agua. La primera se relaciona con actividades diversas realizadas por el hombre para satisfacer sus necesidades; mientras que la segunda se relaciona con factores presentes en el medio, como los de tipo geológico, relacionados con la disolución de minerales presentes en el suelo o subsuelo, como la fluorita y arsenopirita; minerales relacionados con la contaminación natural por flúor y arsénico respectivamente. Esta contaminación natural depende de propiedades diversas del medio como pH, salinidad, temperatura del agua y ubicación.

Los fluoruros son un constituyente natural del agua subterránea, asociado a diferentes tipos de rocas, actividad volcánica y uso de fertilizantes fosfatados; cuya principal afectación es la fluorosis, que actualmente afecta a más de 70 millones de personas en el mundo, estimándose que más de 200 millones de personas consumen agua con concentración de fluoruros mayor a 0.7 mg/L, valor de referencia establecido por la OMS (IMTA, 2011).

El flúor, normalmente en solución está presente como el ion fluoruro, F^- . Cuando su consumo es adecuado, actúa como un micronutriente, tiene un efecto benéfico sobre la salud bucal en niños y adultos (previene las caries a través de varios mecanismos y vías), presente en la saliva de modo constante y en bajas concentraciones, acelera la remineralización de las lesiones en el esmalte del diente; interfiere con la glucólisis, el proceso por el cual las bacterias carcinogénicas metabolizan azúcares para producir ácido; tiene una acción bactericida sobre bacterias carcinogénicas y otras bacterias.

Cuando la ingestión de flúor es superior a la dosis óptima, hay daños fisiológicos, que dependen de la intensidad y la frecuencia con la cual se ha rebasado el límite establecido (IMTA, 2012). Consumo de concentraciones superiores a 4.0 mg/L provoca fluorosis dental, que se manifiesta en decoloraciones de los dientes, manchas amarillas, dientes frágiles y mayor número de caries (CONAGUA, n.d.).

Consumos mayores, entre 8 y 20 mg/L, pueden provocar fluorosis de los huesos, esto es descalcificación (G.S., 2005) (OMS, 2017). El arsénico es considerado por el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (CIIC), como carcinógeno. Su toxicidad depende de la forma como se encuentra. En el agua se presenta con valencia III (Arsenitos) y V (arseniatos); siendo el primero la forma más tóxica. En cuanto a la ingesta, efectos tóxicos importantes como lesiones en la piel y problemas de cáncer, se presentan a concentraciones mayores a 200 µg/L. El As es un elemento que tiende a movilizarse a valores típicos de pH, entre 6.5 y 8.5; aunque su desplazamiento es afectado por la adsorción (J. Bundschuh, 2008) (G.S., 2005).

El arsénico y flúor pueden ser removidos con procesos como precipitación, adsorción, intercambio iónico, procesos de membranas como la ósmosis inversa y la electrocoagulación (J. Bundschuh, 2008). La electrocoagulación es un proceso electroquímico fundamentado en la generación in situ de iones metálicos, normalmente de hierro o aluminio a partir de la oxidación de ánodos de sacrificio, que posibilitan se dé la coagulación-adsorción; con la generación paralela de gases que permiten la separación de flóculos (Mahmad, Rozainy, Abustan, & Baharun, 2016).

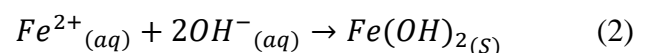
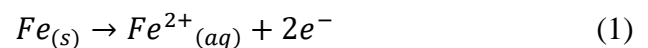
Este método permite separar material disuelto y suspendido del agua (arsénico, turbiedad, hierro, manganeso, fosfato y flúor). Este método permite también obtener reducciones significantes de olor, color y precursores de trihalometanos (IMTA, 2012). La electrocoagulación se caracteriza por la producción reducida de lodos; no se requiere el manejo de químicos; el proceso es controlado eléctricamente; tiene la ventaja de remover partículas coloidales debido a la aplicación de un campo eléctrico y no se incrementan los sólidos disueltos por la adición de sustancias químicas, como sucede en la coagulación convencional.

Los flóculos formados en la EC se dan de modo más rápido, generalmente son más grandes, tienen menos agua y son más estables; lo que facilita su separación por procesos de sedimentación, flotación y/o filtración.

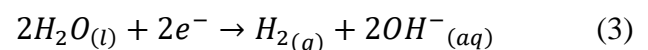
La EC, por lo ya referido es un proceso económico, aun cuando se tienen que reemplazar periódicamente los electrodos de sacrificio, por su consumo y el deterioro provocado por su mantenimiento, para evitar la formación de una capa de óxido en su superficie, fenómeno conocido como pasivación; el cual reduce la eficiencia del proceso y aumenta el potencial necesario (IMTA, 2012).

La pasivación es un proceso de ensuciamiento de los electrodos, que los inactiva, pues se reduce la superficie activa, al haber formación de depósitos de materiales o películas. Estas incrustaciones suelen ser precipitados de calcio y magnesio, asociados con carbonatos o sulfatos. Cuando se usan electrodos de hierro, las reacciones que se dan son las siguientes (El-Taweel, Nassef, Elkheriany, & Sayed, 2015); (Li, Song, Guo, Wang, & Feng, 2011).

Ánodo:



Cátodo:



Materiales y métodos

Materiales y reactivos

Las muestras que se manejaron para su tratamiento fueron soluciones de agua sintética, adicionando a agua potable embotellada (ya que contiene características similares al agua de acuífero), se adicionaron los volúmenes necesarios de soluciones patrón preparadas con arsenato de sodio dibásico heptahidratado granular (Na₂HAsO₄·7H₂O) marca J.T. Baker al 99% y fluoruro sódico (NaF) marca J.T. Baker, 99.5% de pureza. Para la calibración del potenciómetro se ocuparon soluciones buffers con valores de 4.01 7.01 y 10.01 marca Thermo Scientific trazables norma NIST. En relación con la conductividad, se usó para calibración del equipo, un estándar de 1412 µS/cm marca Thermo Scientific.

Para la calibración del espectrofotómetro de absorción atómica, se utilizó una Solución Patrón Fluka Analytical trazable norma NIST a 1000 ppm de As. Para la calibración del cromatógrafo se utilizó el estándar Dionex™ combined seven anion standard I, 50 mL.

Equipos

Para la medición del pH se utilizó un equipo de la marca Orion VersaStar-Thermo Scientific con electrodo para pH ROSS Ultra 8157 BNUMD pH/ATC ORION. La conductividad se midió con un equipo multiparamétrico de la marca VersaStar-Thermo Scientific, con electrodo de grafito ORION 013005MD Conductivity Cell.

La determinación de As total se llevó a cabo, utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica con generador de hidruros, marca GBC, modelo Explor AA Dual-Generador de hidruros modelo AG-3000. Finalmente, la determinación de flúor se llevó a cabo por cromatografía iónica, equipo Dionex Integrion chromatography system columna IonPac ASII-HC, 2x250 mm. Para las pruebas experimentales se utilizó una fuente de poder de corriente directa GW INSTEK GPC 30300.

Métodos de análisis

El pH de las muestras se determinó con el método electroquímico (potenciométrico por electrodo de vidrio), tomando como base el procedimiento establecido en la NMX-AA-008-SCFI-2016. La conductividad eléctrica se determinó por el método de conductancia por electrodo de grafito con base al procedimiento establecido en la NMX-AA-093-SCFI-2000. La determinación del arsénico se llevó a cabo utilizando el método espectrofotométrico de absorción atómica con generador de hidruros, 3114-C Arsenic And Selenium by Hydride Generation/Atomic Absorption Spectrometry. La determinación de flúor y demás aniones inorgánicos se llevó a cabo por cromatografía de intercambio iónico, tomando como base el método 300.0 parte A de la U.S. Environmental Protection Agency. El procedimiento general para las pruebas de EC consistió en preparar las placas de hierro lavándolas y lijándolas hasta remover por completo el aceite de la superficie. Posterior a estos tratamientos, en cada corrida experimental, los electrodos se lijaron y lavaron de igual forma para evitar la posible pasivación de estos entre cada prueba.

Para la preparación de la muestra, se adicionaron los volúmenes necesarios de soluciones patrón preparadas con arsenato de sodio dibásico heptahidratado ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) y fluoruro sódico (NaF), para cada caso, usando agua embotellada comercial. Para las pruebas de tratabilidad se colocó 1.5 L de la muestra de agua a tratar en el reactor y se montaron los dos electrodos de hierro (ánodo y cátodo) para las pruebas de arsénico y 2 electrodos de aluminio (ánodo y cátodo) para las de flúor, con el fin de generar las especies coagulantes para cada uno de los contaminantes, con una separación de 0.5 cm entre placas. Los electrodos se conectaron a la fuente de corriente directa de manera monopolar paralelo (MP-P), en la cual cada electrodo está activo en sus dos caras con la misma carga (Figura 3).

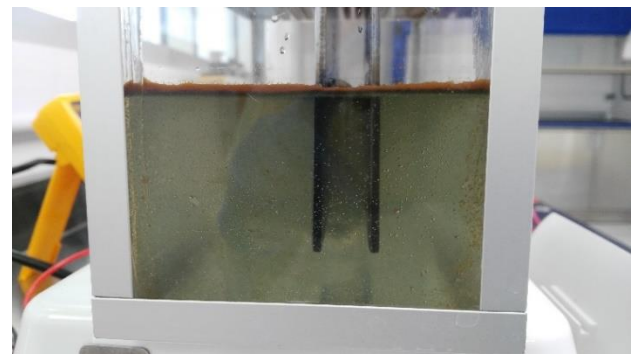


Figura 3 Arreglo monopolar de los electrodos
Fuente: *Elaboración Propia*

Una vez corridas las pruebas como se describe en el diseño experimental, fueron filtradas para retirar los coágulos de hierro. Se adicionó KI y HCl concentrado como parte de su preparación para en análisis de arsénico en el espectrofotómetro absorción atómica. En el caso de las muestras de flúor, se filtraron con papel de fibra de vidrio de 0.47 micras para su lectura en el cromatógrafo de iones.

Dispositivo experimental

Los ensayos de electrocoagulación se llevaron a cabo en un prototipo diseñado en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados unidad Durango, por la Ing. Miriam López Guzmán. Consta de un reactor rectangular de acrílico con capacidad de 1.5 L, como se muestra en las Figuras 4 y 5. Los electrodos utilizados fueron placas de hierro de 0.5 mm de espesor y medidas de 17.5 x 5.6 cm y placas de aluminio de 0.3 mm de espesor y medidas de 17.5 x 5.1 cm.

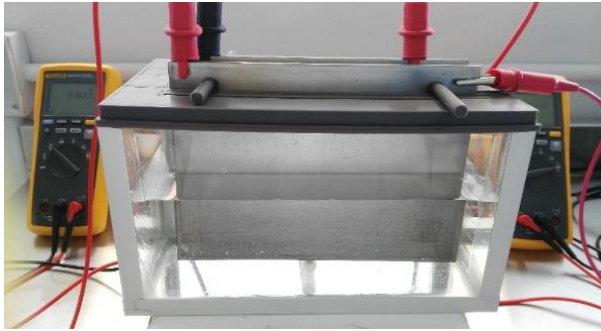


Figura 4 Prototipo de electrocoagulación

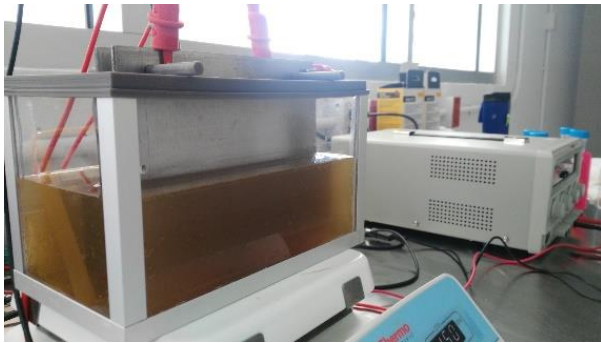


Figura 5 Arreglo del prototipo conectado a una fuente de poder

Diseño experimental

Se realizó un diseño estadístico tipo factorial 2^3 en el cual, se incluyeron como variables de estudio: la concentración inicial fluoruros (F^-) y arsénico (As), el tiempo de proceso y la densidad de corriente (mA/cm^2) aplicada. La variable de respuesta fue el porcentaje de remoción tanto para fluoruros como para arsénico. Las concentraciones objetivo fueron en primera instancia las recomendadas por la OMS ($F^- = 0.7$ mg/L y As = 0.010 mg/L), pues al cumplir con estos parámetros automáticamente se cumplirán con los establecidos por la NOM-SSA1-127-1994 ($F^- = 1.5$ mg/L y As = 0.025 mg/L). Se obtuvieron un total de 18 corridas para cada contaminante, arsénico y flúor.

El diseño se llevó a cabo con el software de diseño de experimentos Statgraphics centurión versión XV. Los factores que se mantuvieron constantes fueron: el número de electrodos, dos en este caso para cada prueba, el pH (original de la muestra), la temperatura (ambiente) y la velocidad de agitación de 160 rpm, así como el volumen de agua a tratar de 1.5 L en cada prueba. Los valores establecidos en el diseño experimental se presentan en la Tabla 1.

Factores		Bajo	Centro	Alto	Unidades
Concentración (CI-As)	Inicial	40	60	80	ppb
Concentración (CI-F)	Inicial	2.5	6.25	10	ppm
Densidad de Corriente (DC)		0.5	2.5	4.5	mA/cm^2
Tiempo (t)		5	12.5	20	Minutos

Tabla 1 Factores considerados para la experimentación

La Tabla 2 muestra la matriz de prueba y el orden que se realizaron las corridas experimentales para la remoción de As. También se incluyeron puntos al centro y una réplica con el fin de incorporar grados de libertad al error y obtener el análisis de varianza (ANOVA) para los dos contaminantes.

N°	CI-As (ppb)	DC (mA/cm^2)	t (min)
1	40.0	4.5	20.0
2	40.0	4.5	5.0
3	60.0	2.5	12.5
4	80.0	4.5	5.0
5	40.0	0.5	20.0
6	80.0	4.5	20.0
7	80.0	0.5	20.0
8	40.0	0.5	5.0
9	80.0	0.5	5.0
10	40.0	4.5	20.0
11	40.0	4.5	5.0
12	60.0	2.5	12.5
13	80.0	4.5	5.0
14	40.0	0.5	20.0
15	80.0	4.5	20.0
16	80.0	0.5	20.0
17	40.0	0.5	5.0
18	80.0	0.5	5.0

Tabla 2 Matriz de diseño experimental factorial 2^3 para la evaluación de As

La Tabla 3 muestra la matriz de prueba y el orden que se realizaron las corridas experimentales para el tratamiento del F^- .

N°	CI-F	DC (mA/cm^2)	t (min)
1	2.5	0.5	5
2	10	0.5	5
3	2.5	4.5	5
4	10	4.5	5
5	2.5	0.5	20
6	10	0.5	20
7	2.5	4.5	20
8	10	4.5	20
9	6.25	2.5	12.5
10	2.5	0.5	5
11	10	0.5	5
12	2.5	4.5	5
13	10	4.5	5
14	2.5	0.5	20
15	10	0.5	20
16	2.5	4.5	20
17	10	4.5	20
18	6.25	2.5	12.5

Tabla 3 Matriz de diseño experimental factorial 2^3 para la evaluación de flúor

Resultados

El porcentaje de remoción de arsénico se calculó con la ecuación 4.

$$\text{Eficiencia de remoción (EF)} = \frac{CI - Cf}{CI} \times 100 \quad (4)$$

Donde: CI = concentración inicial del contaminante y Cf= concentración final del contaminante. La Tabla 4 presenta los resultados de las pruebas de arsénico, con la aplicación del proceso de electrocoagulación. La información se presenta en forma no aleatoria, para facilitar su análisis.

CI-As (ppb)	DC (mA/cm ²)	t (min)	CF-As (ppb)	EF %
40.0	0.5	5.0	<5	100
40.0	0.5	5.0	<5	100
40.0	0.5	20.0	<5	100
40.0	0.5	20.0	<5	100
40.0	4.5	5.0	<5	100
40.0	4.5	5.0	<5	100
40.0	4.5	20.0	<5	100
40.0	4.5	20.0	<5	100
80.0	0.5	5.0	<5	100
80.0	0.5	5.0	<5	100
80.0	0.5	20.0	<5	100
80.0	0.5	20.0	<5	100
80.0	4.5	5.0	<5	100
80.0	4.5	5.0	<5	100
80.0	4.5	20.0	<5	100
80.0	4.5	20.0	<5	100
60.0	2.5	12.5	<5	100
60.0	2.5	12.5	<5	100

Tabla 4 Resultados de las pruebas de EC de As

Cómo se presenta en la Tabla 4, todas las pruebas presentaron una remoción completa, por debajo de las 5 ppb, cumpliendo con el mínimo que se buscaba que es de 10 ppb. No se presentan valores exactos de las concentraciones finales de los experimentos debido a que 5 ppb es el límite de detección el equipo.

La Tabla 5 presenta los resultados de las pruebas de flúor con la aplicación del proceso de electrocoagulación.

CI-F (ppm)	DC (mA/cm ²)	t (min)	CF-As (ppb)	EF %
2.5	0.5	5	2.13	14.8
10	0.5	5	8.28	17.2
2.5	4.5	5	1.04	58.4
10	4.5	5	5.48	45.2
2.5	0.5	20	1.49	40.4
10	0.5	20	6.19	38.1
2.5	4.5	20	0.27	89.2
10	4.5	20	1.52	84.8
6.25	2.5	12.5	2.02	59.6
2.5	0.5	5	2.16	13.6
10	0.5	5	8.39	16.1

2.5	4.5	5	1.08	56.8
10	4.5	5	6.09	39.1
2.5	0.5	20	1.53	38.8
10	0.5	20	5.57	44.1
2.5	4.5	20	0.118	95.6
10	4.5	20	1.38	86.2
6.25	2.5	12.5	2.05	59

Tabla 5 Resultados de las pruebas de EC de Flúor

Como se observa en la Tabla 5, no todos los resultados para remoción de flúor mediante electrocoagulación resultaron favorables. De acuerdo con los datos presentados en esta tabla, cuando se utilizó la corriente más baja y el tiempo de proceso más corto, la remoción de flúor fue baja; caso contrario cuando se emplearon la densidad de corriente alta y mayor tiempo de exposición, sin que la concentración inicial sea un factor determinante en la remoción. Además, se observó que, durante el desarrollo de las pruebas, mientras mayor es el tiempo de proceso y la densidad de corriente, el agua presenta mayor turbiedad y producción de lodos residuales.

En la Figura 6, se muestra el comportamiento de la remoción de flúor mediante el proceso de electrocoagulación, donde cada línea representa una densidad de corriente (0.5, 2.5 y 4.5 mA/cm²). En la gráfica se puede apreciar la influencia de la densidad de corriente con respecto al tiempo de exposición sobre la concentración de flúor en la solución.

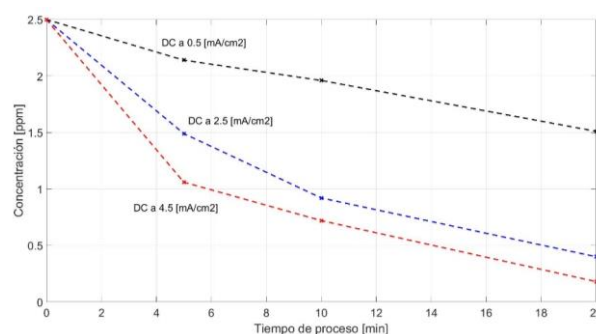


Figura 6 Remoción de flúor mediante electrocoagulación con una concentración inicial de 2.5 ppm

En la Figura 7 se muestra el comportamiento del proceso con una concentración inicial de 5 ppm, observando los resultados con la aplicación de las 3 densidades de corriente con respecto a los 3 tiempos de proceso.

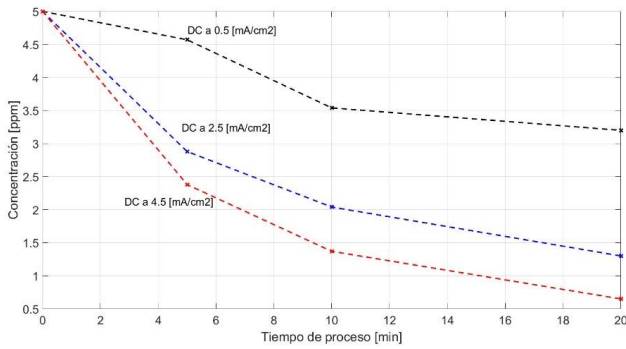


Figura 7 Comportamiento del proceso a una concentración inicial de 5 ppm

La Figura 8, muestra el comportamiento del proceso con una concentración inicial de 10 ppm.

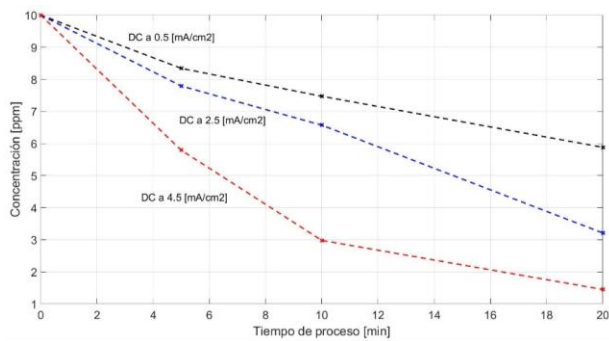


Figura 8 Comportamiento del proceso a una concentración inicial de 10 ppm

Análisis estadístico

El análisis estadístico se llevó a cabo con el software Statgraphics centurión. La Tabla 6, presenta el análisis ANOVA, donde se particiona la variabilidad del % Remoción en piezas separadas para cada uno de los efectos, por lo tanto, prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. La uniformidad de los resultados obtenidos de la remoción de arsénico mediante EC, no permitieron realizar el análisis estadístico.

En el caso de la remoción de flúor, 4 efectos tienen un valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%. De las variables estudiadas, la densidad de corriente y el tiempo resultaron significativas y dos interacciones, la concentración inicial con la densidad de corriente y la densidad de corriente con el tiempo, indicando que son significativamente diferente de cero con un nivel de confianza de 95%. Es decir, fueron las que mostraron mayor peso específico sobre la respuesta % de remoción.

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	F	P
A: CI	84.64	1	84.64	2.89	0.1234
B: DC	6897.3	1	6897.3	235.47	0.0000
C: t	4096.0	1	4096.0	139.83	0.0000
AB	172.923	1	172.923	5.90	0.0380
AC	14.44	1	14.44	0.49	0.5004
BC	200.223	1	200.223	6.84	0.0281
ABC	22.5625	1	22.5625	0.77	0.4030
bloques	0.142222	1	0.142222	0.00	0.9460
Error total	263.628	9	29.292		
Total (corr.)	11751.9	17			

Tabla 6 Análisis de varianza para la concentración final de fluoruros

El estadístico R² indicó que el modelo, así ajustado, explica 97.7567% de la variabilidad en el % Remoción. El estadístico R² ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es del 95.7627%. Las variables significativas y el efecto de las interacciones antes mencionadas se muestran en la gráfica de Pareto (Figura 9).

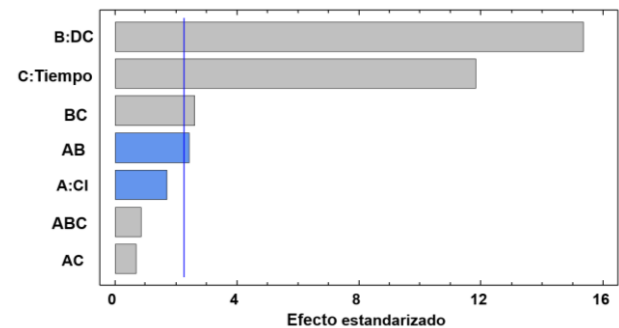


Figura 9 Gráfico de Pareto para el nivel de significancia de los factores

En la Figura 10 se muestran los efectos principales de las variables estudiadas, donde se observa que para lograr un alto porcentaje de remoción se requiere los valores máximos de densidad de corriente y tiempo de proceso, aun cuando se presenta la concentración inicial de fluoruros más baja.

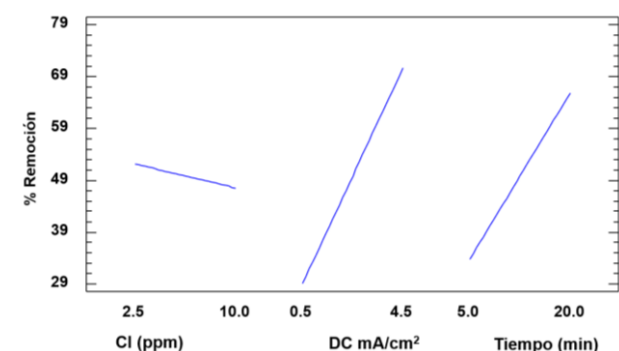


Figura 10 Efectos principales de las variables estudiadas

Por lo tanto, las siguientes condiciones favorecen el desempeño del proceso de EC para remoción de fluoruros: concentración inicial baja de fluoruros (2.5 ppm), alta densidad de corriente (4.5 mA/cm²) y el mayor tiempo de proceso (20 minutos). La gráfica de superficie de respuesta mostró un comportamiento lineal (Figura 11).

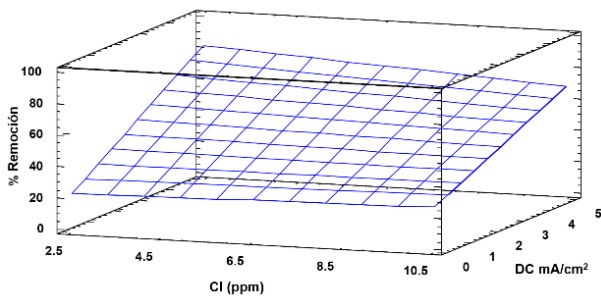


Figura 11 Superficie de respuesta estimada

El comportamiento lineal del gráfico muestra que la variable de respuesta es directamente proporcional a los factores de la región experimental, dicho comportamiento nos indica que, si el factor densidad de corriente disminuye, la variable de respuesta en este caso el porcentaje de remoción también disminuye, de igual forma si aumenta, el porcentaje de remoción también presentará un incremento. Mostrando que la condición ideal para una buena remoción es: alta densidad de corriente y baja concentración inicial.

Esto se cumple únicamente para la región experimental en la que se evaluaron los tratamientos, para trabajo futuro se pueden agregar más puntos a efecto de observar una curvatura en la superficie de respuesta o bien corroborar dicho comportamiento lineal. En la Tabla 7 se muestran los coeficientes de regresión con los cuales se pudo construir un modelo lineal para predecir el Porcentaje de Remoción de fluoruros.

Coefficiente	Estimado
constante	0.0833333
A:Concentración Inicial	0.72
B: DenCorriente	11.8222
C: Tiempo	1.6625
AB	-0.702222
AC	-0.019
BC	0.103889
ABC	0.0211111

Tabla 7 Coeficientes de regresión para % de Remoción de F⁻

Revisando la información presentada en el gráfico de Pareto (Figura 9), los factores densidad de corriente, tiempo y la interacción Densidad de Corriente-Tiempo son los que más contribuyen a la respuesta % Remoción de fluoruros. Por lo anterior el modelo que se propone es el siguiente:

$$\% R = 0.0833 + 0.72*CI + 11.8222*DC + 1.6625*t - 0.7022*CI*DC - 0.019*CI*t + 0.1039*DC*t + 0.0211*CI*DC*t.$$

Donde:

- R = remoción
- CI = Concentración Inicial
- DC = Densidad de Corriente
- t = tiempo

Análisis de resultados

Tanto en la evaluación de la electrocoagulación como en la adsorción, las pruebas se realizaron a nivel laboratorio. La concentración de arsénico al finalizar el tratamiento de EC logra cumplir con el valor guía de 10 µg/L, que recomienda la Organización Mundial de la Salud para agua de bebida. Derivado de las pruebas experimentales para remoción de As, se identificaron cómo optimas, incluso para concentraciones de 80 ppb, las condiciones de proceso siguientes: corriente menor (0.5 mA/cm²) y un tiempo de proceso de 5 minutos.

Para lograr esta remoción se calculó un requerimiento de hierro de 4.30 mg de Fe II para un tratamiento de 1.5 L. Durante este tiempo de proceso no se tuvo pasivación electroquímica, ya que la caída del potencial se mantuvo constante, según lo registrado en los multímetros. El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), en un estudio expresa que una dosis de 8.5 mg/L en promedio resulta ser la mejor opción de dosificación estudiada de hierro en el agua.

En cuanto al flúor, las condiciones óptimas de proceso fueron: la densidad de corriente más grande (4.5 mA/cm²) y el tiempo de proceso más prolongado de 20 minutos; con estas condiciones de proceso, incluso con la concentración inicial más alta (10 ppm) se logró obtener un resultado dentro de norma. Para está condición de proceso el aluminio dosificado fue de 0.0673 g/1.5 L.

Durante este tiempo de proceso no se tuvo pasivación electroquímica, ya que la caída del potencial se mantuvo constante, según lo registrado en los multímetros. La Figura 12, presenta el comportamiento de las corridas experimentales para la remoción de flúor, representando las distintas combinaciones entre la densidad de corriente y el tiempo de proceso, y sus respectivos porcentajes de remoción.

Durante el desarrollo de las pruebas de electrocoagulación, se observó que mientras la corriente aplicada y el tiempo de proceso es mayor, se presenta una mayor turbiedad en el agua, derivado de las especies formadas durante el proceso, además de la coagulación de los contaminantes, por lo que al término de las pruebas es necesaria la aplicación de una ultrafiltración para quitar el color y los coágulos formados por el proceso. En cuanto al comportamiento del pH y la conductividad del agua tratada, la electrocoagulación no los modifica con respecto a los valores iniciales.

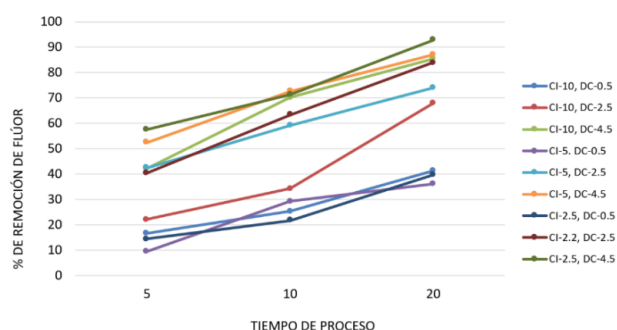


Figura 12 Remoción de flúor con distintas combinaciones de parámetros

Conclusiones

De los pozos muestreados y de acuerdo con la norma NOM-127-SSA1-1994, ninguna de las muestras sobrepasó el límite máximo permisible de arsénico, lo que significa que las concentraciones de este contaminante han ido disminuyendo en el acuífero con respecto a los registrados con anterioridad.

Por otro lado, 9 de las 10 muestras tomadas sobrepasó el límite, duplicando o triplicando este valor para flúor. La condición más favorable para remover el arsénico fue dosificar 4.3 mg/L de hierro y 67.4 mg/L de aluminio para una remoción eficiente de flúor.

Estas condiciones permitieron obtener la mayor remoción de arsénico (100%) con el costo más bajo; en el caso del flúor se obtuvo el 92.80% de remoción con una concentración inicial de 2.5 ppm, del 87% con 5 ppm y del 85.5% con 10 ppm, con la densidad de corriente más alta (4.5 mA/cm²) y mayor tiempo de proceso (20 min). Bajo estas condiciones se logró obtener valores de los dos contaminantes por debajo de los establecidos en la NOM-127-SSA1-1994.

Se identificó que, las variables a controlar para el proceso de EC son más sencillas e incluso todo el proceso es in situ, no requiere de insumos ni depende de la compra y dosificación de materiales o reactivos, evitando errores por llevar a cabo procesos manuales, Es por ello, por lo que la EC se cataloga como un proceso innovador y eficiente para su aplicación.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Tecnológica de León, porque a través de los profesores y sus aulas logran transmitir todo el conocimiento y herramientas necesarias para formar profesionistas de alto desempeño. Al Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV), por la oportunidad de desarrollar el proyecto en sus laboratorios, al M.S.A. Luis Arturo Torres-Castañón, técnico académico del CIMAV, por su apoyo para la realización de los análisis. Al proyecto No. 267666 de la convocatoria FONCICYT, CONANCYT-INNOVATE-UK 2015.

Referencias

- Castro de Esparza, M. (2006). *Remoción del arsénico en el agua para bebida*. Ciudad de México: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- CENAPRED. (18 de enero de 2018). *Atlas Nacional de Riesgos*. Obtenido de Atlas Nacional de Riesgos: <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/app/fenomenos/>.
- CONAGUA. (s.f.). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. México, D.F.: CONAGUA.

- CONAGUA. (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle del Guadiana*. Durango: CONAGUA.
- CONAGUA. (14 de junio de 2015). Comisión Nacional del Agua. Obtenido de Comisión Nacional del Agua: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/durango-74895>.
- CONAGUA. (2016). *Estadísticas del Agua en México*. Ciudad de México: CONAGUA.
- CONAGUA. (2016). *Numeragua México*. México, D.F.: CONAGUA.
- El-Taweel, Y. A., Nassef, E. M., Elkheriany, I., & Sayed, D. (2015). Removal of Cr(VI) ions from waste water by electrocoagulation using iron electrode. *Egyptian Journal of Petroleum*, 24(2), 183–192. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.05.011>
- F.I. Arreguín Cortés, R. C. (s.f.). *Una revisión de la presencia de arsénico en el agua subterránea en México*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- Galindo G., J. L. (2005). *Arsénico en aguas: origen, movilidad y tratamiento. IV congreso hidrogeológico argentino*. Rio Cuarto, Argentina: G. Galindo, J.L. Fernández-Turiel, M.A. Parada, D. Gimeno Torrente.
- Guerrero, M. A. (27 de marzo de 2008). *Tesoro líquido*. El Universal.
- Humberto Gutiérrez Pulido, R. d. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. México, D.F.: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- IMTA. (2009). *La electrocoagulación (EC): una alternativa para el tratamiento de agua contaminada con arsénico*. Gaceta del IMTA, 1,2.
- IMTA. (2011). *Análisis técnico y económico de tecnologías para remoción de fluoruros*. México, D.F.: IMTA.
- IMTA. (2012). *Análisis técnico económico de tecnologías para remoción de fluoruros 2a parte y evaluación de riesgos a la salud por exposición a fluoruros presentes en agua*. México, D.F.: IMTA.
- IMTA. (2012). *Comparación técnico-económica entre coagulación química y electrocoagulación para remover arsénico del agua*. Repositorio Institucional del IMTA, 5-22.
- IMTA. (2013). *Estudio de tratabilidad y coexposición a arsénico y fluoruros en agua de bebida*. México, D.F.: IMTA.
- IMTA. (2014). *Mecanismos que liberan arsénico al agua subterránea de la Comarca Lagunera, estados de Coahuila y Durango, México*. México, D.F.: IMTA
- J. Bundschuh, A. P. (2008). *Distribución del arsénico en las regiones Ibérica e Iberoamericana*. Argentina: CYTED.
- Li, X., Song, J., Guo, J., Wang, Z., & Feng, Q. (2011). Landfill leachate treatment using electrocoagulation. *Procedia Environmental Sciences*, 10(PART B), 1159–1164. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.185>
- Ma. Teresa Leal Ascencio, S. S. (1991). *Evaluación de acuíferos de la mesa del norte. Jiutepec, Morelos, México*: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Mahmad, M. K. N., Rozainy, M. A. Z. M. R., Abustan, I., & Baharun, N. (2016). Electrocoagulation Process by Using Aluminium and Stainless Steel Electrodes to Treat Total Chromium, Colour and Turbidity. *Procedia Chemistry*, 19, 681–686. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.070>
- OMS. (07 de octubre de 2017). *Organización Mundial de la Salud*. Obtenido de Organización Mundial de la Salud: http://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/fluoride/es/
- Ortiz-Pérez, D. M. (2015). *Cuantificación de fluoruro y arsénico en agua distribuida para el consumo humano en México*. San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

SEDESOL. (2012). *Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Durango*. México, DF: SIGEMA SA DE CV.

Simeonova, V. P. (1999). *Estudio piloto para remoción del arsénico, Estado de Hidalgo, México*. Cuernavaca, Morelos.: IMTA.

(G.S., 2005)CONAGUA, C. N. del A. (n.d.). *Manual de Agua Potable , Alcantarillado y Saneamiento*.