

# APLICACIÓN DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA ELIMINACIÓN DE SILICIO EN AGUA DE ENFRIAMIENTO

## NOMBRE DE LOS AUTORES

### **Georgina Blass Amador** <sup>(1)</sup>

Químico industrial y Maestro en Ciencias por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México. Investigador del Área Procesos Químicos en el Instituto de Investigaciones Eléctricas. Ha participado y dirigido proyectos de investigación relacionados principalmente con procesos para control de contaminación ambiental en matrices agua y aire.

### **Luz Angélica Panamá Tirado.**

Licenciada en Ingeniería Química por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México. Investigador en el Instituto de Investigaciones Eléctricas desde 1981 donde ha dirigido y colaborado en proyectos técnicos relacionados con las áreas de contaminación ambiental, química analítica y procesos químicos.

Aplicar

Foto

**Dirección (1):** Calle Reforma 113. Col. Palmira. Cuernavaca Morelos. C.P.62490. México. Tel.:(+52)777 362 3811-Fax: (+52) 777 362 3832- e-Mail: [gbllass@iie.org.mx](mailto:gbllass@iie.org.mx)

## RESUMEN

La extracción de agua para uso industrial, a pesar de su volumen relativamente pequeño, se ha convertido en un factor importante tanto por la gran competencia con otros usuarios por el abastecimiento de agua, como por la cantidad y diversidad de contaminantes que descarga. El agua para las torres de enfriamiento empleada en las centrales termoeléctricas constituye un volumen relativamente bajo, del orden de 200 millones de m<sup>3</sup>. Sin embargo, este sector empieza a competir por el agua con otros usos, principalmente en zonas donde la sobre explotación del recurso es un factor importante. Así pues, es necesario realizar un mayor esfuerzo en el tratamiento de agua para su reaprovechamiento, tomando en consideración las opciones que por su costo y facilidad de aplicación sean las más adecuadas para ser utilizadas en el país. Es en ese contexto en el que se enmarca el objetivo del presente trabajo, en el que se ha aplicado la electrocoagulación como una tecnología alternativa para la eliminación de sílice y otros contaminantes en agua proveniente de la purga de torre de enfriamiento de una central termoeléctrica y su acondicionamiento para su reutilización haciendo uso de procedimientos de coagulación químicos tradicionales. Se realizaron pruebas químicas para determinar las mejores dosis de hierro que se generarían posteriormente en la celda de electrocoagulación. Se probaron dosis de hierro en el intervalo de 10 a 60 mg/L. Se utilizó un programa para calcular la corriente necesaria para generar hierro en la celda de tal forma que se tuvieran las concentraciones deseadas. Los resultados obtenidos en la eliminación de silicio bajo diferentes condiciones mostraron que con la simple adición del poli electrolito catiónico al efluente de la celda de electrocoagulación, el contenido residual de silicio en el agua disminuye a niveles que permiten su recicló, por lo que se considera, bajo las condiciones a las que se llevaron a cabo los experimentos y para este tipo de agua, que el proceso propuesto es favorable, y que es viable de aplicar ya que no requiere de la adición de otro reactivo que haría el proceso más caro.

## PALABRAS CLAVE:

Electrocoagulación, agua de enfriamiento, sílice, eliminación de sílice.

## INTRODUCCIÓN

La extracción de agua para uso industrial, a pesar de su volumen relativamente pequeño, se ha convertido en un factor importante tanto por la gran competencia con otros usuarios

por el abastecimiento de agua, como por la cantidad y diversidad de contaminantes que descarga. Se calcula que en el año 2000 se extrajeron 72,000 m<sup>3</sup> de agua de ríos, lagos y acuíferos para los principales usos consuntivos, lo que representa el 15% del agua disponible [1] [2].

Del total de agua que consume la industria, el 96% se utiliza en 7 ramas industriales principales, tales como la del azúcar, química, petróleo y petroquímica, celulosa y papel, hierro y acero, textil, alimento y bebida, mientras que en termoeléctricas se utiliza el 4% con 200 millones m<sup>3</sup>. Respecto a la generación eléctrica, en México se recurre a diversas fuentes de energía para obtenerla: geotermia, hidráulica, eólica, nuclear y combustibles fósiles, destacando tanto en el nivel de producción como en la capacidad instalada la utilización de las centrales que aprovechan combustibles fósiles y en segundo lugar las hidroeléctricas [3]. La utilización del agua para la generación de electricidad se considera de dos tipos: el uso de agua para el sistema agua vapor y para el sistema de enfriamiento en centrales termoeléctricas y el aprovechamiento de la energía potencial del agua mediante la construcción de presas de almacenamiento o derivación para centrales hidroeléctricas [3].

El agua para las torres de enfriamiento empleada en las centrales termoeléctricas constituye un volumen relativamente bajo, del orden de 200 millones de m<sup>3</sup>. [2], [3]. Sin embargo, este sector empieza a competir por el agua con otros usos, principalmente en zonas donde la sobre explotación del recurso es un factor importante. Así pues, es necesario realizar un mayor esfuerzo en el tratamiento de agua para su reaprovechamiento, tomando en consideración las opciones que por su costo y facilidad de aplicación sean las más adecuadas para ser utilizadas en el país. Debido a que el agua de enfriamiento contribuye con la demanda de agua en la industria, es esta el área en la cual puede esperarse el beneficio más significativo en reciclo ya que esto facilita los esfuerzos del control de la contaminación reduciendo o eliminando una corriente de desecho líquida potencialmente contaminada, beneficiando económicamente a la industria e instalaciones debido a la reducción en el costo de agua de abastecimiento. Este ahorro es más significativo en lugares de escasez de agua, donde el reciclar es una medida de conservación necesaria. Las principales limitaciones para aumentar el reciclo del agua de enfriamiento están asociadas con problemas de calidad del agua, siendo el más común la formación de compuestos inorgánicos que se depositan en las superficies de intercambiadores de calor causando pérdidas de eficiencia [4] se han encontrado una gran variedad de depósitos químicos, pero aquellos que contienen sílice son de particular interés. La eliminación de sílice es una manera atractiva de controlar tales depósitos. En resumen, existen procesos de tratamiento que permiten que el agua de enfriamiento sea reciclada. Varias modificaciones del proceso de ablandamiento pueden remover la mayoría de los principales precursores de incrustaciones o depósitos (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> y PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>). Los métodos convencionales generan una gran cantidad de lodos, los que conllevan a otros problemas ambientales. Estos inconvenientes han forzado a varias industrias entre ellas la eléctrica, a investigar sobre técnicas de tratamiento alternativo efectivas para la eliminación de sílice y otros contaminantes, entre ellos los métodos electroquímicos

Ante esta situación se hace necesario encontrar un sistema de tratamiento alternativo eficiente, económico, fácil de implementar y que solucione primordialmente los problemas de la sobreexplotación de los cuerpos de agua. Aún cuando la coagulación sigue siendo un método comúnmente empleado para la remoción de contaminantes del agua residual, al inicio de los años 80's la aplicación de electricidad se convirtió en un método atractivo para el tratamiento de aguas residuales. Este sistema incluye procesos conocidos como electrocoagulación (EC), electro-floculación, electro-aglomeración, etc., es aplicado en la actualidad en diferentes ramas de la industria para el tratamiento de aguas residuales industriales y recuperación de subproductos de proceso. [5]a [8].

Debido a lo expuesto anteriormente, en México se realizan estudios y aplicación de tecnologías alternativas para el tratamiento de agua en la industria y es en ese contexto en el que se enmarca el objetivo del presente trabajo, que es la aplicación de la electrocoagulación como una tecnología alternativa para la eliminación de sílice en agua de purga de torre de enfriamiento de una central termoeléctrica y su acondicionamiento para

su reutilización, pero sin sustituir totalmente los procedimientos de coagulación químicos que se han venido aplicando comúnmente. Aquí se presentan los resultados del trabajo en cuanto a remoción de sílice durante el desarrollo del proyecto.

## **METODOLOGÍA**

Se empleó un reactor de electrocoagulación consistente en una celda cerrada de acrílico con electrodos de hierro dispuestos en forma intercalada lo que permite un flujo serpenteante tipo pistón y una fuente de poder para alimentar la corriente eléctrica [9]. Se utilizó agua proveniente de la purga de una torre de enfriamiento de la Central Termoeléctrica "El Sauz", de la Comisión Federal de Electricidad con un contenido de silicio total de 98.2 mg/L. En todos los casos, el agua problema a tratar y tratada, se caracterizó empleando un espectrofotómetro de absorción atómica Varian modelo AA220-FS. Los elementos analizados fueron: silicio, calcio, magnesio, potasio, hierro. Asimismo, se determinó el pH y la conductividad empleando para ello el equipo multi-parámetro de HACH modelo SensION 156. La determinación de silicio después de cada prueba se realizó empleando tanto absorción atómica como el espectrofotómetro HACH DR3000.

Se realizaron pruebas químicas empleando cloruro férrico y el equipo de jarras para determinar las mejores dosis de hierro que se generarían posteriormente en el reactor de electrocoagulación. Se probaron dosis de hierro en el intervalo de 10 a 60 mg/L. Los mejores resultados se obtuvieron a dosis entre 30 a 40 mg/L de hierro. Con base en estos resultados se realizaron pruebas en el reactor de electrocoagulación, asimismo se probaron diferentes flujos de agua, se trabajó a una temperatura de  $27 \pm 1$  °C y se midió el pH y la conductividad del agua antes y después del tratamiento. El efluente de la celda se dejó flocular, se agitó mecánicamente adicionando en esta etapa un poli electrolito y/o se ajustó el pH adicionando un álcali, el agua posteriormente siguió el proceso de clarificación y separación de sólidos. El agua clarificada se analizó y se almacenó para su re-uso.

## **REACTOR DE ELECTROCOAGULACIÓN:**

Se diseñó y construyó un reactor de electrocoagulación consistente en una celda cerrada, de un litro de capacidad neta, sin vertedor con electrodos de acero de 10 cm de altura y 5 cm de ancho y un espacio entre electrodos de 0.5 cm. Se empleó una fuente de poder con capacidad de 0-40 volts y capacidad de corriente de 0-15 Amper.

Para evaluar el sistema de electrocoagulación en cuanto a la eficiencia de generación de hierro, se varió la corriente aplicada, se probaron tres diferentes flujos de agua de la red y se tomaron muestras del efluente para cuantificar el hierro real que se generó, los resultados se presentan más adelante. El valor de hierro teórico se calculó a partir de un programa en Excel diseñado de tal forma que toma en cuenta las condiciones de operación del sistema, el diseño del reactor y los aspectos hidráulicos y electroquímicos de la celda donde para cada flujo de agua a tratar el programa proporciona la corriente requerida para la producción de hierro entre otros datos.

## **DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.**

El agua a tratar se hace pasar a través del reactor donde sigue un camino "serpenteante" a través de las placas de acero a las que se les aplica una corriente que provoca que el ánodo genere iones ferrosos en el agua. La polaridad en las placas se invierte periódicamente lo que mantiene limpia la superficie e iguala la velocidad de corrosión. Al aplicar la corriente, los ánodos se disuelven lentamente generando iones ferrosos en el agua, El hierro ferroso reacciona químicamente con los contaminantes o bien actúa como coagulante, durante la reacción hay una elevación del pH y el hierro se convierte en hidróxido de hierro y otros compuestos, lo que resulta en un efecto de coprecipitación. El agua, una vez que sale del reactor de electrocoagulación entra al tanque (equipo de jarras) que hace las veces de floculador, el agua es agitada mecánicamente y en esta etapa se adiciona el poli electrolito o bien se realiza el ajuste del pH adicionando un álcali. El

polímero agregado mejora la formación del floc y el agua sigue el proceso de clarificación, los sólidos separados podrán disponerse y el agua clarificada filtrada se va a un tanque de almacenamiento, se analiza y se dispone de ella. El diagrama del proceso descrito se esquematiza en la Figura 1.

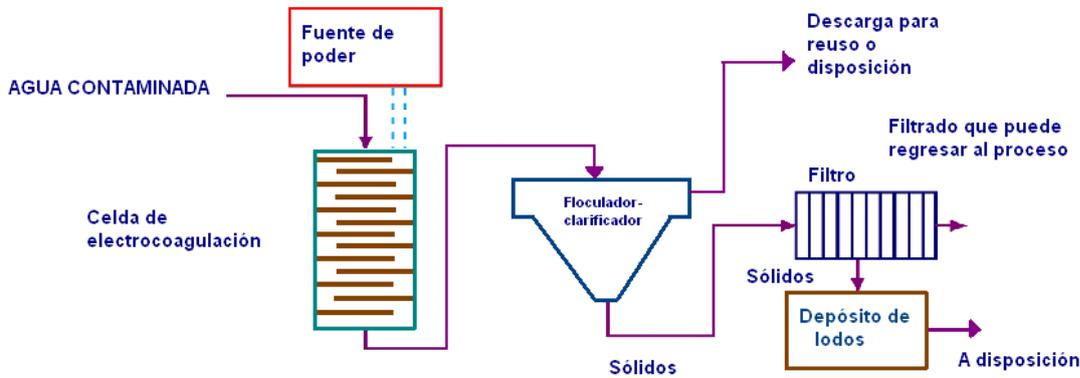


Figura 1: Diagrama del proceso de electrocoagulación empleado.

## DESARROLLO Y RESULTADOS.

**Prueba de jarras.** Se realizaron una serie de pruebas químicas previas en el equipo de jarras con el fin de encontrar las condiciones óptimas de dosis de hierro requeridas para la eliminación de silicio, adicionando diferentes concentraciones de hierro como coagulante proveniente de una solución de cloruro férrico y controlando el pH. Con base en las pruebas de jarras los mejores resultados se obtuvieron entre 30 y 40 mg/L, ya que a mayor cantidad de hierro, la mejora fue mínima, Figura 2. Para el trabajo con la celda de electrocoagulación se trabajó en un intervalo de 30 a 57 mg/L de hierro.

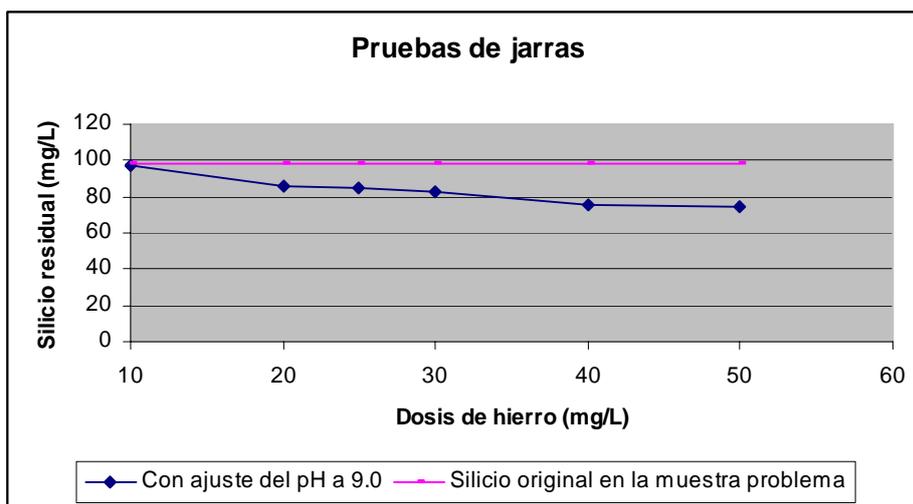
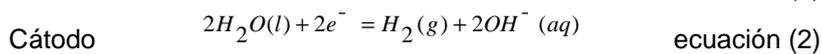
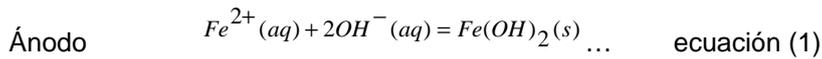
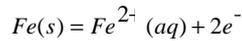


Figura 2: Resultados de las pruebas de jarras, ajustando el pH a 9.0

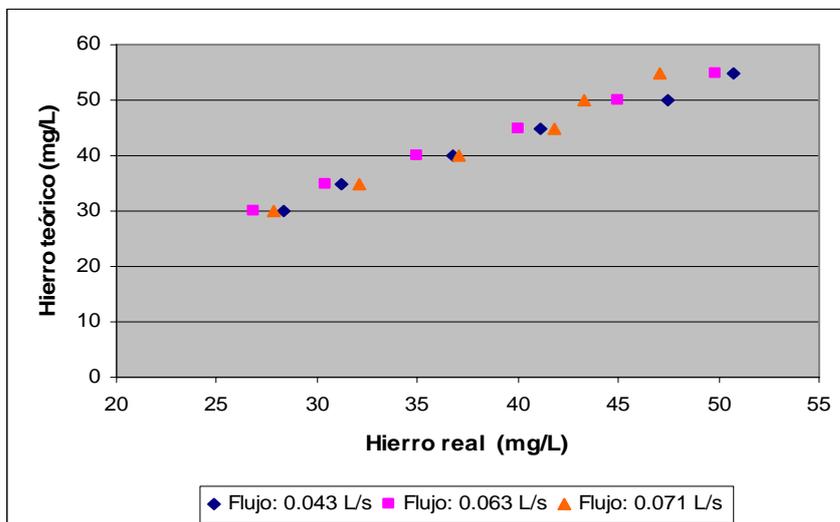
**Electrocoagulación.** Para evaluar el sistema de electrocoagulación en cuanto a la eficiencia de generación de hierro, se varió la corriente aplicada entre 7 y 15 Amperes, se probaron tres diferentes flujos de agua de la red (0.043, 0.063, 0.071 L/s), se colectaron muestras del efluente del reactor de electrocoagulación para cuantificar el hierro real que se generó, Los resultados de las pruebas para evaluar la eficiencia del reactor para la producción de hierro se presentan en la Figura 3. Los resultados muestran que a mayor

producción de hierro la eficiencia electroquímica disminuye y los valores teóricos y reales dejan de coincidir. Esto se ha atribuido a que en la electrocoagulación se combinan los efectos de la producción, por electrólisis, de gases como el H<sub>2</sub> y la producción de cationes polivalentes por la oxidación de ánodos de sacrificio, hierro en este caso, ecuaciones (1) y (2). Los iones metálicos pueden reaccionar con el OH<sup>-</sup> producido en el cátodo durante la formación del H<sub>2</sub>, formando hidróxidos insolubles que adsorben los contaminantes y contribuyen a la coagulación, pero también provocan pasivación en los electrodos, dando como resultado la disminución en la eficiencia electroquímica teórica.



El agua de enfriamiento a tratar, se hizo pasar por el reactor de electrocoagulación, se ajustaron los flujos para cumplir con el flujo deseado, después de equilibrarse, se tomaron varias lecturas para calcular el flujo promedio real. Una vez ajustado el flujo, se dejó por unos minutos al cabo de los cuales se inició la aplicación de la corriente necesaria para obtener una determinada cantidad de hierro, cuando el equipo marcaba la corriente necesaria, se equilibró el sistema por 2 minutos. Se determinó la concentración de hierro que se dosificaba, la conductividad y el pH en el efluente de la celda que continuó con el proceso de clarificación y sedimentación. Posteriormente se tomaron muestras del agua clarificada para su análisis químico.

Como se ha hecho mención además de la generación del coagulante, en el reactor ocurren otros procesos importantes para la coagulación. Se forma un perfil de pH entre el cátodo y el ánodo que favorece la aparición de diferentes especies químicas y por tanto dando origen a diferentes procesos en el interior de la celda. Así el incremento de pH que se genera en el cátodo puede favorecer la precipitación de iones metálicos y otros contaminantes o quedar adsorbidos sobre el flóculo. Debido a lo anterior, se decidió probar con una dosis alta de hierro y aprovechar este fenómeno con el fin de prescindir de la adición de cualquier otro reactivo químico en las pruebas realizadas.



**Figura 3: Resultados de hierro real contra hierro teórico**

En el proceso de electrocoagulación las variables más importantes son el voltaje aplicado a los electrodos y la corriente que se genera, ambas directamente relacionadas con la concentración de hierro que se generará en el reactor de electrocoagulación. Con base en las pruebas de jarras realizadas se decidió probar con concentraciones de hierro entre 30 y 50 mg/L, aquí se presentan los resultados de tres concentraciones de hierro, baja, media y

alta: 30 mg/L, 45 mg/L y 57 mg/L, que se generó trabajando con 7.5 Amper, 11.5 Amper y 15.0 Amper respectivamente y voltajes de 12 a 25 volts.

Asimismo, se probaron diferentes pH's en el intervalo de 9.5 a 11 adicionando hidróxido de calcio a la salida del reactor para alcanzar una mayor eficiencia en la remoción de sílice ya que el hidróxido de calcio como agente ablandador ha probado ser un agente químico efectivo para el tratamiento de este tipo de agua, el proceso convencional de ablandamiento es capaz de eliminar calcio, magnesio y sílice al eliminar dichos elementos por un mecanismo de adsorción-precipitación. [10]. Se presentan los resultados ajustando el pH a 10 y 11 que son los más recomendados en la literatura. También se realizaron una serie de pruebas sin la adición del hidróxido de calcio y otras en la que se adicionó un poli electrolito como auxiliar de la floculación. En la Tabla 1 se muestran las condiciones de operación probadas en el reactor de electrocoagulación así como características del mismo.

Condición de operación	Valores
Número de electrodos de hierro	34
Separación entre electrodos	5 mm
Tamaño de los electrodos	(5 X 10X 0.45 ) cm
Tipo de operación	Continuo
Q (L/s)	0.043 - 0.071
I (A)	7.5 -15

**Tabla 1: Condiciones de operación probadas en el reactor de electrocoagulación**

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos con la concentración baja, intermedia y alta y se presentan gráficamente en la Figura 4. Como puede observarse, los mejores resultados obtenidos son empleando la dosis de hierro más alta probada, 57 mg/L. Durante las pruebas, se observó un aumento en el pH del agua de 9.0 a 9.7 lo que se considera ventajoso para el proceso, sin embargo, realmente se notó un cambio en la eficiencia de producción de hierro debido a la lenta pero segura pasivación de los electrodos, los cuales fue necesario cambiar posteriormente, estas pruebas fueron las últimas realizadas para no afectar el sistema. Los resultados muestran que se logró una eliminación de silicio del 54 %, sin necesidad de adición de un álcali u otro reactivo, sin embargo, para obtener este resultado, el flujo del agua es bajo y el contenido de hierro muy alto, lo que debe considerarse ya que repercute en costos asociados al consumo de energía.

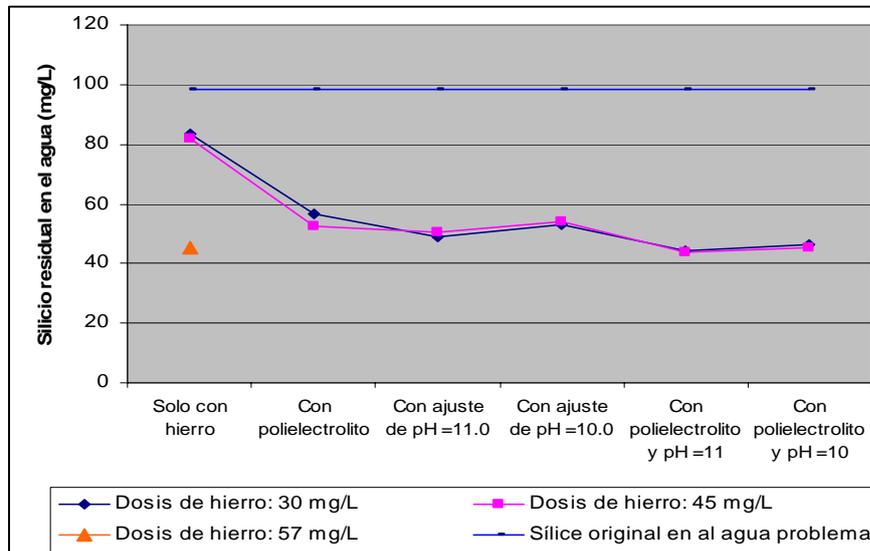
La dosis de 45 mg/L no representó un cambio sustancial respecto a 30 mg/L por lo tanto se consideró que a una dosis de hierro 30 mg/L los resultados obtenidos son muy buenos, ya que se tiene un compromiso entre la eficiencia y el costo asociado con la energía requerida para generar el hierro, además, sólo requirió la adición de un poli electrolito catiónico como auxiliar en el proceso de floculación para obtener un porcentaje de remoción de silicio del 42 % lo que representa que el agua podría volver a ser utilizada en el proceso de enfriamiento sin ningún problema de acuerdo con el usuario.

Los resultados obtenidos adicionando hidróxido de calcio como agente alcalinizante y a su vez como auxiliar en la coagulación proporcionó una remoción promedio de eliminación de silicio del 50 % a un pH de 11.0 y de 45% a un pH de 10, el hecho de adicionar además el poli electrolito mejoró aproximadamente en un 4%, sin embargo esto se refleja particularmente en el tipo de flóculo que se formó, ya que sedimentó más rápidamente. La adición de hidróxido de calcio significa un aumento en la producción de lodos además de representar un costo extra por consumo de este reactivo. A este respecto, también se está trabajando en estimado de costos del sistema tal como se obtuvieron estos datos.

Respecto a los sólidos, las muestras se colocaron en conos de imhoff y al cabo de una hora se leyó el volumen de sólidos depositados, aquéllas muestras con polielectrolito, presentaron volúmenes promedio de sólidos sedimentables de 0.5 ml/L, mientras que aquéllas muestras a las que se adicionó el hidróxido de calcio pero no el electrolito, presentaron volúmenes de más de 4 ml/L y menos de 5.5 ml/L, además, como se ha hecho mención, la adición del poli electrolito mejoró la velocidad de sedimentación produciendo un flóculo menos "poroso", más compacto y consistente.

	Dosis de hierro real			Comentarios
	30 mg/L	45 mg/L	57 mg/L	
	Concentración de silicio residual en el agua (mg/L)			
Sólo con hierro	83.2 ± 1.0	81.9 ± 1.0	45.1 ± 0.6	A dosis de Fe de 57 mg/L el pH del efluente cambia de 9.1 a 9.7. A dosis de 45 mg/L el pH cambia de 9.1 a 9.3
Con adición de un polielectrolito catiónico	56.9 ± 0.5	52.5 ± 0.5	-----	
a) Con adición de hidróxido de calcio	49.1 ± 0.5	50.5 ± 0.5	-----	El pH se ajustó a 11.0
b) Con adición de hidróxido de calcio	53.2 ± 0.5	54.2 ± 0.5		El pH se ajustó a 10.0
a) Con adición de polielectrolito e hidróxido de calcio	44.4 ± 0.5	43.6 ± 0.5	-----	El pH se ajustó a 11.0
b) Con adición de polielectrolito e hidróxido de calcio	46.4 ± 0.5	45.2 ± 0.5		El pH se ajustó a 10.0
Flujo de agua (L/s)	0.071 ± 0.001	0.071 ± 0.001	0.043 ± 0.001	
Intensidad de la corriente (A)	7.5	11.5	15.0	
Concentración de silicio en el agua problema: <b>98.2 mg/L</b> .				
Temperatura promedio a la que se realizaron todas las pruebas: 27 ° C.				

**Tabla 2: Resultados obtenidos del proceso de electrocoagulación para la eliminación de silicio.**



**Figura 4: Silicio residual en el agua tratada bajo diferentes condiciones.**

Finalmente, en la Tabla 3, se presenta una evaluación final del agua tratada con una dosis de hierro de 30 mg/L. Se analizaron en las muestras con el fin de detectar si alguno de estos elementos caracterizados inicialmente, había disminuido su concentración después del tratamiento de electrocoagulación. Los resultados obtenidos mostraron que además de silicio, el magnesio disminuyó significativamente. El potasio y el calcio disminuyeron ligeramente y no se detectó hierro residual en al agua tratada.

Muestra original	<b>98.2</b>	<b>53.0</b>	<b>12.0</b>	<b>27.8</b>	<b>&lt; 0.2</b>
Con Hierro	83.2	52.0	11.0	23.0	< 0.2
Con polielectrolito	56.9	51.7	9.8	21.0	< 0.2
Con hidróxido de calcio para ajuste de pH a 11.0	49.1	41.0	1.0	18.7	< 0.2
Con hidróxido de calcio para ajuste de pH a 11.0 y con polielectrolito	44.4	39.0	0.6	16.8	< 0.2

**Tabla 3: Resultado de los análisis de muestras tratadas por electrocoagulación**

## CONCLUSIONES.

Los resultados mostraron que la eliminación de silicio en agua proveniente de purga de torres de enfriamiento se puede lograr sin la adición extra de algún reactivo químico bajo las condiciones probadas a dosis altas de hierro (57 mg/L) a una temperatura de  $27 \pm 1$  °C y a un flujo de 0.043 L/s. Bajo estas condiciones, se obtuvieron porcentajes promedio de remoción de silicio de 54 %. Sin embargo, debe de considerarse que fue necesario generar una mayor cantidad de hierro lo que podría repercutir en los costos asociados con el consumo de energía. A una dosis de 30 mg/L de hierro, con la sola adición de un poli electrolito catiónico que ayuda al proceso de floculación se obtuvo un porcentaje promedio de eliminación de silicio del 42 %. Con esta dosis se considera que los resultados son satisfactorios como para reciclar el agua en la torre de enfriamiento.

Al elevar el pH del efluente del reactor –para evitar la pasivación de los electrodos– utilizando hidróxido de calcio, se obtuvieron porcentajes de remoción promedio del 50 % aunque la adición de hidróxido de calcio significaría un aumento en la producción de lodos y en los costos. En la evaluación final, se logró también la disminución de la concentración de magnesio. No se detectó presencia de hierro ni exceso de calcio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2003) Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, 2002. Compendio de Estadísticas Ambientales. SEMARNAT 2003. ISBN 968-817-500-5.
2. Instituto Nacional de Geografía e Informática (INEGI) y Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) 2000. Estadísticas del Medio Ambiente, México 1999.
3. COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. Estadísticas del Agua en México, 1999 y 2005 Disponible en: [www.cna.gob.mx](http://www.cna.gob.mx)
4. PUCKORIUS. Disponible en: [www.puckorius.com](http://www.puckorius.com)
5. BALASUBRAMANIAN N., MADHAVAN K. Arsenic Removal from Industrial Effluent through Electrocoagulation. Chem. Eng. Technology. V. 24, Número 5. p. 519-521. 2001
6. CHARTRAND M.M. G., BUNCE, N. J. Electrochemical remediation of acid mine drainage. Journal of Applied Electrochemistry **33**: 259-264. . (2003).
7. PHUTDHAWONG W.; CHOWWANAPHOON S.; BUDDHASUKH D. Electrocoagulation and Subsequent Recovery of Phenolic Compounds. Analytical Sciences Vol. 16 p. 1083-1084. 2000
8. CHOWWANAPHOON S., CHEWCHANWUTTIWONG S., GARSON M. J., BUDDHASUKH, D. Electrocoagulation and recovery of tannins from tree barks. Journal of Applied Electrochemistry 33:p. 647-650. 2003.
9. MARTIN A., PANAMÁ L., BLASS G., BELTRÁN N. Informe Técnico Anual 2004 IIE/04/15/12333/I 002/P/DC/A0/V1. Marzo. 2005
10. BATCHELOR B., LASALA M.B., MCDEVITT M., PEACOCK E. Technical Feasibility of Ultra-High Lime Treatment of Recycled Cooling Water. Research Journal WPCF. 63. Num.7.1991.