

## **I-165 - COMPARACIÓN DE LA REMOCIÓN ELECTROQUÍMICA DE SÍLICE EN AGUA DE POZO, RESIDUAL TRATADA Y CIRCULANTE DE TORRES DE ENFRIAMIENTO, UTILIZANDO UN REACTOR A PRESIÓN DE ELECTROCOAGULACIÓN**

**Silvia L. Gelover Santiago** <sup>(1)</sup>

**Instituto Mexicano de Tecnología del agua** Paseo Cuauhnáhuac No. 8532. Col. Progreso. Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México. Tel. +52 (777) 3293662 Fax +52(777) 3194381.e-mail: [sgelover@tlaloc.imta.mx](mailto:sgelover@tlaloc.imta.mx)

**Sara Pérez Castrejón** <sup>(1)</sup>

**Instituto Mexicano de Tecnología del agua** Paseo Cuauhnáhuac No. 8532. Col. Progreso. Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México. Tel. +52 (777) 3293662 Fax +52(777) 3194381.e-mail: [sgelover@tlaloc.imta.mx](mailto:sgelover@tlaloc.imta.mx)

**Alejandra Martín Domínguez** <sup>(1)</sup>

**Instituto Mexicano de Tecnología del agua** Paseo Cuauhnáhuac No. 8532. Col. Progreso. Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México. Tel. +52 (777) 3293662 Fax +52(777) 3194381.e-mail: [sgelover@tlaloc.imta.mx](mailto:sgelover@tlaloc.imta.mx)

**Agustín Montes Brito**

**Instituto Mexicano de Tecnología del agua** Paseo Cuauhnáhuac No. 8532. Col. Progreso. Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México. Tel. +52 (777) 3293662 Fax +52(777) 3194381.e-mail: [sgelover@tlaloc.imta.mx](mailto:sgelover@tlaloc.imta.mx)

### **ABSTRACT**

In the petroleum, power generation and chemical cooling systems are among the largest consumers of water. This paper explores the use of electrocoagulation technology as an option for the water conditioning industry. The procedure removes silica, allowing the treated water to be used as makeup water increasing cycles of concentration.

The aim of this paper is to present the experimental results for silica removal by electrocoagulation in closed reactors in three different matrices: well water, treated wastewater and cooling tower water. The tests were performed in a closed nylacero walled reactor and aluminum electrodes in a monopolar arrangement. The output of the reactor is diverted to a clariflocculator where, as the name implies, occurs flocculation and sedimentation or clarification of treated water, the final system consists of a sand filter for final effluent polishing.

The amount of aluminum produced at the reactor outlet, and the silica concentration at the entrance and exit of the system and to the output of the settler was measured. There was also a record of remaining aluminum content at the outlet of the settler and at the filter output, for each one of the studied matrices.

In general the silica removal was achieved in substantial percentages for each of the tested matrices. The silica removal achieved is primarily a function of aluminum dosed. The trend in the efficiency of removal of silica is presented in the order: well water> wastewater> cooling towers water, for the same theoretical dose of aluminum.

The results for the removal of silica obtained by the present system are promising. The matrix offering more operational advantages for the electrocoagulation process is well water, as the electrodes take longer to passivation, the dosage of aluminum undergoes little change over time and the removal of silica is almost constants during the treatment. The reuse of treated wastewater is a good choice for areas where water is scarce and therefore expensive. The use of cooling tower blowdown is a technically feasible option, the adoption of this type of treatment to recover water from the drains must be analyzed for each particular case, it may represent economic benefits beyond the environmental implications.

There are still significant challenges to overcome in order to adopt this system as a functional option at industrial level. The main disadvantages are associated with the passivation of the electrodes, and to the construction of the reactors.

**KEY WORDS:** Silica removal, electrocoagulation, cooling towers.

## INTRODUCCIÓN

En la situación actual, la preocupación por la escasez de agua, es una situación generalizada. Los usos del agua son revisados y modificados a fin de tratar de aliviar al menos en parte la enorme presión que la creciente población mundial ejerce sobre este importante recurso.

En la industria petrolera, de generación y química, los sistemas de enfriamiento figuran entre los mayores consumidores de agua. Originalmente agua de primer uso, agua superficial y de pozo, era utilizada para estos sistemas. Diversas estrategias de manejo de agua para reducir su consumo han sido implementadas. Como ejemplo, desde hace más de 30 años, en EEUU, diversas industrias optaron por emplear agua residual tratada en sus sistemas de enfriamiento, y diversas e innovadoras metodologías son propuestas para minimizar el consumo de agua e incluso buscar la descarga cero de purga. Diversas estrategias han sido propuestas, quizá las fundamentales sean: 1) los tratamientos de agua convencionales a base de dispersantes y anti incrustantes para mantener las sustancias poco solubles en el agua circulante y 2) la adopción de sistemas de tratamiento para retirarlas del agua circulante. De las sustancias poco solubles presentes en el agua, la sílice representa un mayor riesgo para los sistemas de enfriamiento, por la dureza de las incrustaciones que origina y lo difícil y costoso que resulta retirarlas.

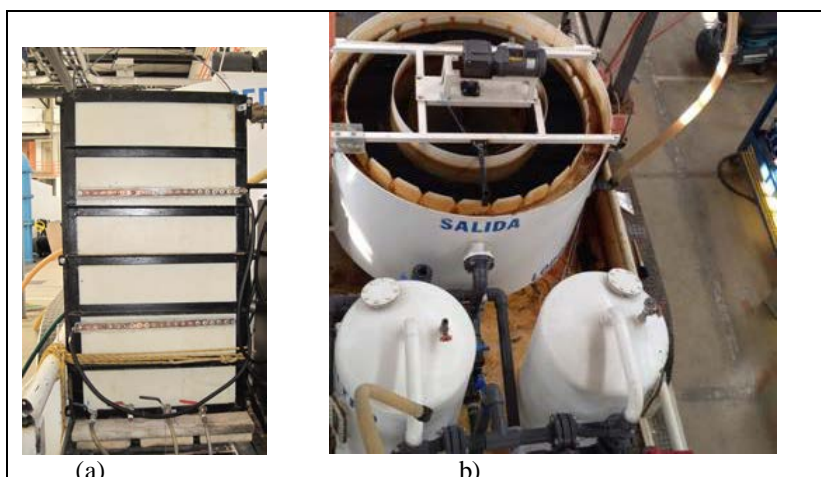
En este trabajo se explora el uso de la tecnología de electrocoagulación como opción para el acondicionamiento de agua para la industria. El procedimiento remueve sílice (Schulz, *et al.*, 2009) permitiendo utilizar el agua tratada como agua de repuesto aumentando los ciclos de concentración, cc, parámetro utilizado como una medida del tiempo que puede permanecer el agua recirculando en los sistemas de enfriamiento antes de ser purgada.

## OBJETIVO DEL TRABAJO

El objetivo del presente trabajo es presentar los resultados obtenidos experimentalmente para la remoción de sílice, mediante electrocoagulación en reactores cerrados, en tres matrices diferentes: agua de pozo, agua residual tratada y agua de torres de enfriamiento y determinar cuál de estas matrices puede ofrecer mayores ventajas como opción para ser tratada a fin de ser utilizada en los sistemas de enfriamiento.

## METODOLOGÍA UTILIZADA

Las diferentes matrices fueron sometidas al tratamiento por electrocoagulación, se comparó la calidad del agua en cuanto a su contenido de sílice antes y después del tratamiento. Las pruebas se realizaron en un reactor cerrado con paredes de nylacero y electrodos de aluminio en un arreglo de 22 pares electrodos de aluminio con dimensiones de 0.96m x 0.15 m x 0.055 m, conectados a una fuente de poder de corriente directa en arreglo monopolar. El agua tiene un recorrido, dentro del reactor, en forma de zig-zag; la hidráulica se calculó para tener un flujo pistón. El efluente del reactor pasa a un clarifloculador en donde suceden la floculación y la sedimentación o clarificación del agua tratada. La parte final del sistema consiste en un filtro de arena, para realizar un pulido final del efluente. Ver Figura 1.



**Figura 1.** Fotografías de la planta piloto. (a) Reactor de electrocoagulación, b) Clarifloculador y filtros.

Para la producción del catión coagulante ( $Al^{+3}$ ) se hace pasar una corriente directa a los ánodos de sacrificio. La densidad de corriente y el tiempo de residencia hidráulico en el reactor, se mantuvieron constantes a  $23 A/m^2$  y 62.55 segundos respectivamente, estas condiciones, han sido elegidas, tomando como base resultados obtenidos en estudios anteriores no mostrados aquí, en dónde se observó que a densidades de corrientes por debajo de  $30 A/m^2$  se mejora la eficiencia electroquímica (Martín *et al.*, 2009) y a tiempos de residencia menores a 90 segundos, se evita la acumulación de flóculos sobre los electrodos. Las velocidades del flujo estudiadas fueron 0.23 y 0.63 m/s.

El estudio se hizo con agua de pozo cuya conductividad fue ajustada a  $1000 \mu S/cm$  con NaCl y agua de purgas de torres de enfriamiento (con alta conductividad y elevada concentración en sales). Se hicieron cambios de polaridad cada 25 minutos como una manera de evitar la pasivación mediante una limpieza electroquímica y para lograr el desgaste homogéneo de los electrodos. Se monitoreó la concentración de aluminio cada hora durante el proceso, cuidando que la muestra fuera tomada cuando el sistema se había estabilizado, después de efectuados los cambios de polaridad. Entre cada una de las pruebas, el reactor se lavó químicamente con una solución comercial antiincrustante al 5 % (ésta actividad se realizó al finalizar cada prueba).

Los parámetros utilizados para dar seguimiento al proceso fueron: caudal a la entrada del reactor, medido con un rotámetro; presión a la entrada y a la salida del reactor, determinadas con manómetros de glicerina, con los que se calculó la caída de presión o delta H ( $\Delta H$ ) en el reactor; corriente y voltaje aplicados al reactor electroquímico, ambos valores leídos directamente de la fuente de poder utilizada para suministrar la energía al sistema electroquímico, en modo de corriente constante, por lo que el potencial sufría variaciones de acuerdo a los cambios que ocurrían dentro del reactor electroquímico.

En cuanto a la calidad del agua, se realizó la caracterización de cada una de las matrices de agua utilizada, resaltando la determinación de sílice, pH y conductividad. Sólo en el caso del agua de pozo (conductividad del orden de  $250$  a  $300 \mu S/cm$ ) fue necesario incrementar la conductividad (a valores de  $1000 \mu S/cm$ ), mediante la adición de NaCl, para abatir el valor de potencial requerido para el funcionamiento del sistema.

Se determinó la cantidad de aluminio producida, a la salida del reactor y la concentración de sílice a la entrada y salida del sistema, así como a la salida del sedimentador, también se hizo un registro del contenido de aluminio remanente a la salida del sedimentador y a la salida del filtro.

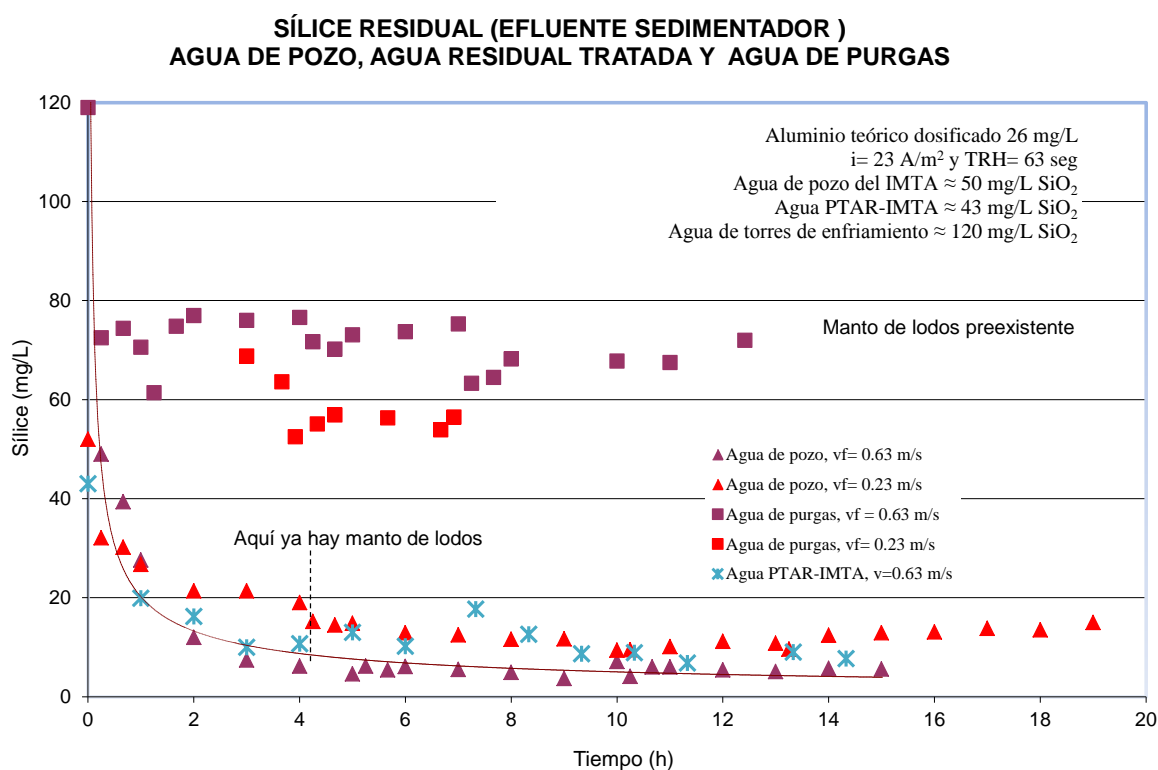
Las mediciones de conductividad y pH, se realizaron en equipos de la marca ORION modelo 145 y 420 A respectivamente. Los equipos se calibraron con disoluciones estándar cada vez que se hicieron las pruebas. Las mediciones de sílice se realizaron mediante el método del silicomolibdato, utilizando el método #8185 de HACH®; este es un método colorimétrico basado en la reacción que ocurre entre sílice monomérico y el ion molibdato bajo condiciones ácidas, esta reacción produce ácido silicomolibdico, el cual presenta un color amarillo y es medido como  $SiO_2$ . Para la determinación del  $Al^{3+}$  se utilizó el método Aluver® (método #8326) de HACH®; éste es un método colorimétrico basado en la reacción que ocurre entre cianina de eriocromo-R ( $C_{23}H_{15}Na_3O_9S$ ) y aluminio. Esta reacción forma un complejo rojo-rosa, la intensidad del color desarrollado

es proporcional a la concentración de aluminio. Ambos parámetros se midieron en un espectrofotómetro HACH® modelo DR2800.

## RESULTADOS OBTENIDOS

De manera general se logró remover la sílice en porcentajes considerables para cada una de las matrices analizadas. La remoción de sílice alcanzada es principalmente una función del aluminio dosificado. La tendencia observada en cuanto a la eficiencia de remoción de sílice se presentó en el orden: agua potable > agua residual > agua de torres de enfriamiento, para una misma dosis teórica de aluminio, como se observa en la Figura 2.

Se toma como referencia la dosis teórica de aluminio producida por el sistema, porque en el sistema real, se presentan algunas variaciones, atribuidas principalmente al estado de los electrodos, cuya superficie cambia constantemente por la misma reacción de oxidación y es afectada también por la naturaleza de la matriz.



**Figura 2** Concentración de sílice en el efluente del sedimentador para agua de pozo, residual tratada y agua circulante de torres de enfriamiento.

En la Figura 2 se muestra la remoción de sílice para las tres matrices como función del tiempo. Se observa que se requiere alrededor de un par de horas, periodo en que se forma el manto de lodos característico del clarifloculador, para alcanzar un estado estacionario, el manto permite mejorar y estabilizar el grado de remoción. Las diferencias observadas en la remoción se atribuyen a la calidad del agua en cada caso (ver Tabla 1).

El agua de pozo en general, es un agua con bajos contenidos de aniones y cationes, el agua residual tratada contiene mayor concentración de inorgánicos y un importante contenido de materia orgánica oxidable (Tabla 1). El agua de torres es la matriz más compleja, rica en aniones y cationes en la que se encuentran, además, especies químicas utilizadas para evitar la incrustación y la proliferación microbiana.

**Tabla1.- Características relevantes de calidad del agua promedio para las matrices estudiadas.**

PARÁMETRO	UNIDAD	AGUA DE POZO	AGUA PTAR-IMTA	AGUA PURGA
<b>Alcalinidad</b>	mg/l CaCO <sub>3</sub>	35	57-127	76
<b>Aluminio</b>	mg/l	ND	ND	0.005
<b>Cloruros</b>	mg/l	8.38	ND	ND
<b>Color aparente</b>	UPt/Co	8	ND	356
<b>Conductividad</b>	μS/ cm	250 (ajustada a 1000)	390-800	1226
<b>Dureza de calcio</b>	mg/l CaCO <sub>3</sub>	ND	78	416
<b>Dureza total</b>	mg/l CaCO <sub>3</sub>	94.5	88-154	586
<b>Fluoruros</b>	mg/l	0.453		
<b>Fosfatos</b>	mg/l	ND	6.12	9.8
<b>Hierro</b>	mg/l	ND	0.16	0.72
<b>Manganeso</b>	mg/l	ND		0.191
<b>Nitratos</b>	mg/l	3.28	4.1	
<b>pH</b>		7.1	7.22	7.67
<b>SDT</b>	mg/l	192	ND	760
<b>Sílice</b>	mg/l	50	43	120
<b>Sulfatos</b>	mg/l	25.2	30	260

ND = No determinado

La remoción de sílice depende de la cantidad de aluminio producida. Para el agua de pozo las eficiencias de producción observadas van de 185 a 285 %, dependiendo de la velocidad del flujo entre las placas o electrodos del reactor. La eficiencia para este caso, se favorece con velocidad de flujo elevada, es decir 0.63 m/s. Así mismo, eficiencias superiores al 100% han sido reportadas por otros autores (Schulz *op cit*; Mouedhen *et al.*, 2008) cuando se utilizan electrodos de aluminio, pues el aluminio que se disuelve en una celda electroquímica, proviene de procesos electroquímicos (aluminio generado en el ánodo) y posiblemente químicos (aluminio generado en el cátodo y en el ánodo por oxidación del aluminio por el agua).

En el caso del agua de purgas, la eficiencia de producción del aluminio observada va de 70-125% notándose una mayor inestabilidad de la dosis que con el agua residual tratada o agua de pozo. La disminución en la eficiencia de la producción de aluminio, y con ello de la remoción de sílice, puede deberse a la presencia de los diferentes agentes químicos adicionados a las aguas de recirculación de las torres como son: antiincrustantes, anticorrosivos, biocidas y dispersantes.

De entre las especies inorgánicas que mayor efecto tienen sobre la eficiencia del proceso resaltan los sulfatos. Se ha verificado experimentalmente que una mayor concentración de estos aniones modifica el pH de mínima solubilidad del hidróxido de aluminio (Villegas, 2011) especie que remueve la sílice; de acuerdo con Mouedhen *op cit.*, los iones sulfato catalizan la formación del hidróxido de aluminio.

El ensuciamiento de los electrodos, manifestado como el incremento en la caída de presión del reactor ( $\Delta H$ ) y del potencial requerido para mantener la corriente electroquímica fue en el orden: agua de pozo < agua residual tratada < agua de torres de enfriamiento. Se asoció este orden a la complejidad de la matriz. A pesar de los buenos resultados obtenidos hasta ahora, los reactores son, por ahora, un producto artesanal, susceptible a la presencia de fugas tanto hidráulicas como eléctricas, su armado requiere un trabajo muy minucioso y detallado que encarece su fabricación, por lo que se está en la búsqueda de sistemas más prácticos y funcionales.

## CONCLUSIONES / RECOMENDACIONES

Los resultados para la remoción de sílice obtenidos con el sistema presentado son prometedores. La matriz que ofrece más ventajas operacionales para el proceso de electrocoagulación es el agua de pozo, los electrodos tardan más en pasivarse y la dosificación de aluminio sufre pocas variaciones en el tiempo y eso lleva a que los niveles de remoción de sílice también sean constantes durante el tratamiento. El reúso del agua residual tratada es una buena opción para zonas en donde el agua es escasa y por lo tanto cara. El aprovechamiento de agua de purgas de torres de enfriamiento es una opción técnicamente posible, la adopción de este tipo de tratamientos para recuperar agua de las purgas se debe analizar para cada caso en particular, pues puede representar ventajas económicas más allá de las ambientales.

Existen aún retos importantes a superar para poder adoptar este sistema como opción funcional a nivel industrial. Las principales desventajas se asocian a la pasivación de los electrodos, y a la construcción de los reactores.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Martín D. A., Gelover S. S., Pérez C. S. y Villegas M. I. E. (2009). Remoción de sílice para uso en torres de enfriamiento mediante un método electroquímico. VIII Congreso internacional de ciencias ambientales, XIV Congreso nacional de ciencias ambientales, 3er. Congreso del medio ambiente. Santa Cruz, Tlaxcala, México. 2009 TBA 339-O
2. Mouedhen G., Feki M., De Petris Wery M., Ayedi H.F. (2008). Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process. *J. of Hazardous Materials*, 150, 124 -135
3. Schulz M. C., Baygents J. C., Farrell J. (2009). Laboratory and pilot testing of electrocoagulation for removing scale forming species from industrial process waters. *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, 6 (4 ), 521-526.
4. Villegas Mendoza Iván Emmanuel (2011). Estudio del efecto de nitratos, sulfatos y cloruros en un sistema electroquímico para remoción de sílice. Tesis de maestría. UNAM.