

## **ESTUDIO PRELIMINAR DE LA ELECTROREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS DE LA ZONA MINERA DE ZIMAPÁN EN UNA CELDA CILÍNDRICA**

**García Hernández Laura<sup>1</sup>**, Reyes Cruz Víctor E<sup>1</sup>, Veloz Rodríguez María Aurora<sup>1</sup>, González Martínez. Ignacio<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, ICBI, UAEH. Car. Pachuca-Tulancingo Km. 4.5, 42128, Mineral de la Reforma, Hidalgo. México

<sup>2</sup>Departamento de Química de UAM-I. Departamento de Química, San Rafael Atlixco 185, Col. Vicentina 09340 México D. F. Email <sup>1</sup>:lauragh09@yahoo.com.mx

### **RESUMEN**

Debido a la actividad antropogénica diversos sitios presentan niveles de concentración de diversas sustancias tóxicas por arriba de los límites permisibles, un caso de particular importancia lo presentan los metales pesados provenientes de la lixiviación natural de residuos mineros (jales). Una alternativa para remediar los altos niveles de metales en suelos lo representa el proceso de electroremediación. En el presente trabajo se realiza una electroremediación preliminar de un suelo contaminado por jales históricos del distrito minero de Zimapán. Las respuestas voltamperométricas sobre los electrodos de pasta de carbón de las 5 secciones en las que se fracciona el suelo remediado indican que se presenta una disminución en la cantidad de Pb en la sección próxima al ánodo, así como un incremento gradual del plomo conforme se acerca a la región catódica, estos resultados hablan de que la electroremediación es un proceso viable para el tratamiento de suelos con esta problemática. Una forma de optimizar este proceso es mediante la simulación del mismo con un modelo que permita predecir el comportamiento del movimiento de las especies y un futuro escalamiento de la celda de electroremediación. Por ello que en este trabajo se presentan resultados preliminares de un suelo humectado sin contaminantes en el que se simula en dos dimensiones el flujo con la ley de Darcy y la ecuación de Nernst-Planck para el balance de masa dentro de la celda realizado en COMSOL 3.2, los resultados del software muestran que la especie  $H^+$  fluye a lo largo de la celda, y el  $OH^-$  se encuentra cercano a la región catódica.

### **INTRODUCCIÓN**

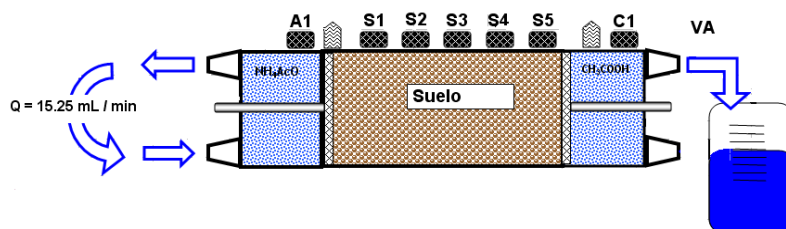
Los diferentes procesos mineros, tales como la exploración, explotación, beneficio, fundición, refinación, causan diversos impactos ambientales, la operación de presas de jales que trae consigo el arrastre de residuos peligrosos, la descarga de aguas residuales y la emisión de polvo <sup>[1,2]</sup>. Para el tratamiento de estos sitios contaminados en las últimas décadas se han propuesto diversas tecnologías, el término «tecnología de tratamiento» implica cualquier operación unitaria o serie de operaciones unitarias que altera la composición de una sustancia peligrosa o contaminante a través de acciones químicas, físicas o biológicas de manera que reduzcan la toxicidad, movilidad o volumen del material contaminado <sup>[3]</sup>. El uso de una tecnología de remediación en particular depende además de los factores específicos del sitio y de las propiedades fisicoquímicas del contaminante, de su disponibilidad, de la fiabilidad demostrada o proyectada, de su estado de desarrollo (laboratorio, escala piloto o gran escala) y de su costo <sup>[4]</sup>. Estas tecnologías pueden clasificarse de diferentes maneras, con base en los siguientes principios: Estrategias de remediación, lugar en el que se realiza el proceso de remediación, tipo de tratamiento se basa en el principio de la tecnología de remediación y se divide en tres tipos biológicos, térmicos y fisicoquímicos.

Dentro de los tratamientos fisicoquímicos, la remediación electrocinética también conocida como electroremediación, electrorestauración, electroreclamación, descontaminación electroquímica o electromigración, es una tecnología en desarrollo que aprovecha las propiedades conductivas del suelo, cuyo objetivo es separar y extraer contaminantes orgánicos e inorgánicos (metales) de suelos, lodos y sedimentos, con el uso de un campo eléctrico que permite remover las especies cargadas (iones) <sup>[6,7]</sup>. Debido al tiempo requerido para estos procesos una buena alternativa para predecir el flujo de las especies cargadas en el suelo la presentan los modelos matemáticos ya que se pueden simular los fenómenos de transporte involucrados en la electroremediación, es por ello que en el presente trabajo se realiza una electroremediación y se toma como fundamento para el desarrollo de un modelo matemático.

### MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

El suelo para llevar a cabo el experimento fue obtenido de un muestreo sistemático de malla cerrada de las principales zonas de exposición de riesgo en el distrito minero de Zimapán, Hidalgo.

El experimento se realiza en una celda de electroremediación cilíndrica de 0.045 m de diámetro y 0.1 m de longitud con dos electrodos funcionando como ánodo y cátodo con dos compartimentos anódico y catódico, se empaqueta la celda con suelo humectado, en el compartimento anódico se hace recircular una solución de acetato de amonio  $10^{-3}$  M con un flujo de 15,25 mL/min, mientras que el compartimento catódico se utilizó una solución de ácido acético  $10^{-3}$  M para el control del pH, se aplicó una densidad de corriente de 0.5 mA el experimento se llevó a cabo durante 24 horas.



**Figura 1.** Celda de electroremediación. Con regiones anódica y catódica y fracciones para el análisis de suelo.

Terminado el experimento se recupera el suelo y se fracciona en 5 secciones (figura 1) para su análisis químico, y su caracterización electroquímica por voltamperometría con electrodos de pasta de carbón.

Para los estudios electroquímicos, se utilizó una celda típica de tres electrodos a temperatura ambiente y acondicionada para mantener una atmósfera inerte. Como contraelectrodo se utilizó una barra sólida de grafito. Como electrodo de referencia se utilizó un electrodo saturado de sulfatos (SSE)  $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{SO}_{4(s)}/\text{K}_2\text{SO}_{4(\text{sat})}$ . Para preparar los electrodos de trabajo se utiliza de grafito, aceite de silicón y la muestra de suelo. La pasta resultante se colocó dentro de un tubo de 7 cm de longitud con 0.2 cm de diámetro interno, el cual tiene la función de contenedor del electrodo de trabajo. La superficie del electrodo fue renovada y homogeneizada antes de cada experimento. El electrolito usado es semejante a la solución lixivante de los jales mineros a un pH 8.0, ajustado con  $\text{HNO}_3$ . El electrolito fue burbujeado previamente y mantenido con atmósfera de nitrógeno durante todo el experimento.

Para la caracterización química se realizan digestiones ácidas y se analizan por espectroscopia de plasma por inducción acoplada (ICP)

Modelo Matemático. La ley de Darcy es el pilar fundamental de la hidrología subterránea, el software COMSOL maneja el cálculo de las velocidades de Darcy, que junto con la ecuación de continuidad,

simula el movimiento del fluido en un medio poroso homogéneo. Para definir el flujo electrocinético se considera un material de porosidad media con dos electrodos generando una diferencia de potencial, la conductividad es muy pequeña y los efectos de las reacciones electroquímicas sobre las superficies de los electrodos es despreciable.

Las ecuaciones para el balance de masa esta dado por:  $\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot N = 0$

Donde N es el vector de flujo acorde a la siguiente ecuación de Nenrts\_Planck

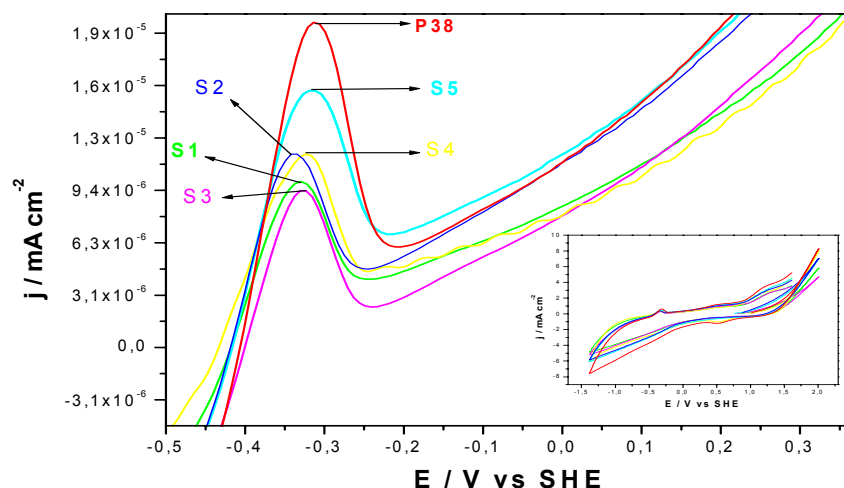
$$N = -D\nabla c - z\mathbf{u}_m Fc\nabla\phi + cu$$

Donde D es la difusividad ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ), c la concentración ( $\text{mol m}^{-3}$ ), z la carga,  $\mathbf{u}_m$  la movilidad ( $\text{mol m}^2\text{J}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) y F es la constante de Faraday ( $\text{A s mol}^{-1}$ ).

Se trabajo a un tiempo de 36000 segundos a intervalos de 60 segundos considerando un factor de escala de 1 y 920 nodos de mallado.

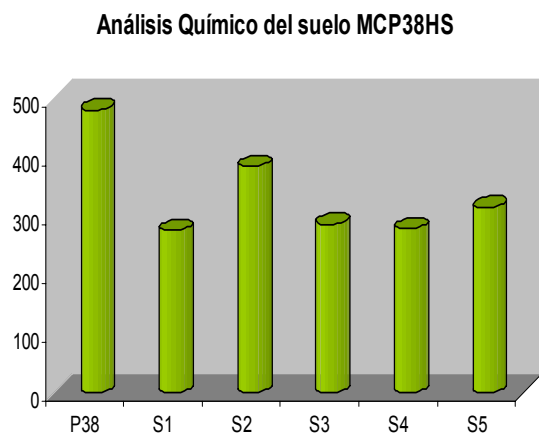
### RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Una vez terminado el experimento de electroremediación se analizo cada fracción por voltamperometria con electrodos de pasta de carbono encontrándose los siguientes resultados, figura 2.

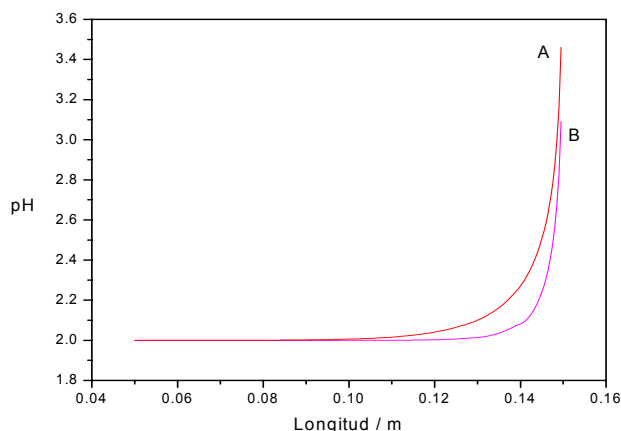


**Figura 2.** Voltamperogramas de el suelo MCP38HS y de cada fracción después de la electroremediación en celda.

En base a las respuestas voltamperometricas en S1 que es la más próxima al ánodo se aprecia una disminución considerable de la concentración de Pb con respecto a la concentración inicial, mientras que en S2 aumenta esta concentración, cuando que se aproxima a S3 la concentración de Pb vuelve a disminuir. Este comportamiento se puede deber que entre más cerca este a la región anódica la generación de  $\text{H}^+$  favorece la migración del Pb. Por otra parte, en las secciones S4 y S5 la concentración de Pb se vuelve a incrementar, lo cual es atribuidos a que la movilidad de Pb que se reduce en el cátodo.



**Figura 3.** Análisis químico del suelo MCP38HS después de un proceso de electroremediación



**Figura 4.** Resultados de la variación del pH a lo largo de la celda de acuerdo al modelo matemático A) a 3600 s, B) a 36000 s

En el análisis químico de las secciones de suelo lo podemos observar en la figura 3, donde se puede observar que en la S1 del proceso de electroremediación hay una disminución de la cantidad de Pb presente en el suelo en S2 aumenta en S3 disminuye permaneciendo muy semejante en S4 y en S5 vuelve a aumentar. La tendencia de estos resultados concuerda con la caracterización electroquímica de la figura 2.

En la figura 4 se observa como el modelo matemático refleja el comportamiento del pH dentro de la celda, ácido cercano a la región anódica y como aumenta rápidamente conforme se acerca a la región catódica.

### CONCLUSIONES.

- Es posible caracterizar por medios electroquímicos las fracciones de suelo electroremediado.
- Los electrodos de pasta de carbono representan una alternativa para este tipo de caracterización.
- La celda de electroremediación representa una alternativa para disminuir el impacto ambiental de los jales en las zonas mineras, ya que debido a la baja corriente aplicada no se alteran las propiedades físicas del suelo.
- El modelo matemático indica la migración del frente ácido a lo largo de la celda y el incremento del pH cerca de la región catódica.

### REFERENCIAS.

- [1] S.T Volke, J.A.Velasco 2002 *Tecnologías de Remediación para suelos contaminados*. INE-SEMARNAT. México
- [2] U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2001. Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report. 10<sup>th</sup> Edition. Office of solid waste and Emergency Response.
- [3] K.R, Reddy, R.E. Saichek, K. Maturi., P Ala. *Indian Geotechnical Journal*. 32 (2), (2002), 258.
- [4] Van Deuren, et al. 1997. Remediation Technologies Screening Matriz and Reference Guide. 3<sup>a</sup>Ed. Technology Innovation Office. EPA. <http://www.epa.gov/tio/remed.htm>.
- [5] Van Cauwenberghe, L. 1997. Electrokinetics. Technology Evaluation Reports TO-97-03.GWRTAC E Series. USA. <http://www.gwrtac.org>.

- [6] Y.B. Acar, JR. Gale, GA. Putnam, J. Hamed, RL. Wong. Electrochemical processing of soils: theory of pH gradient development by diffusion migration and linear convection. *J Environ Sci Health*, 1990; A25 (6):687-714.