

Diseño y construcción de un sistema para el estudio a escala de laboratorio de fenómenos electrocinéticos en suelos. Remediación electroquímica de suelos contaminados

Design and construction of a system for the study on laboratory scale of electrokinetics phenomena in grounds. Electrochemical remediation of contaminated grounds

[✉]Méndez, María y Peña, Mariano
Universidad de Los Andes. Facultad de Ingeniería
Mérida-Venezuela
[✉]mendezme@ula.ve

Recibido: 12-02-2008

Revisado: 20-03-2009

Resumen

Los suelos en general proporcionan soporte físico y nutrientes para el crecimiento de las plantas y los microorganismos, siendo estos de capital importancia para el normal desenvolvimiento de la vida en el planeta tierra. Proteger y conservar la integridad del suelo es una tarea de los profesionales de la ingeniería, sobre todo cuando la agresión y deterioro que sufre este recurso es consecuencia de los procesos industriales y domésticos que han evolucionado a lo largo de la historia. Durante los últimos años, se han desarrollado un conjunto de técnicas físico químicas para restaurar el suelo contaminado. Una de las estrategias de vanguardia es la electro remediación, en la cual se movilizan y extraen contaminantes mediante la aplicación de un campo eléctrico a una muestra de suelo. La investigación en este campo se encuentra en vías de desarrollo y para ello se construyen celdas que permitan tratar en el laboratorio muestras representativas de un emplazamiento contaminado. Un equipo para tal fin fue diseñado, construido y probado con una muestra de arcilla contaminada deliberadamente con tolueno. Como resultado de ese procedimiento fueron verificados los fenómenos electrocinéticos característicos del sistema estudiado y removidos cerca del 48% por cien del tolueno agregado.

Palabras clave: Electroósmosis, remediación electroquímica, remoción de tolueno.

Abstract

The soils in generally provide a physical support as well as nutrients for plants and the microorganisms growth, as a very important contribution to the normal development of the life on Earth. Protecting soil integrity is the task of engineering professionals, especially in presence of aggression and deterioration as a consequence of the industrial and domestic processes. In the last years, physicochemical technologies have been developed to restore the contaminated soil. One of the forefront strategies is the so-called electro remediation, in which pollutants are mobilized and extracted by applying an electrical field to soil sample. The development of special cells in which contaminated soil sample are treated, has been a key issue for this research. An equipment for such purpose was designed, constructed and tried on a sample of clay contaminated with toluene. The experiment resulted in a 48% yield in the removal of the toluene by electroosmosis.

Key words: Electroosmosis, electrochemical remediation, toluene remotion.

1 Introducción

Hoy en día, la contaminación de los suelos se encuentra en la mira de la gestión medioambiental debido principalmente al riesgo que un suelo contaminado puede suponer para la salud humana y para el correcto funcionamiento de los ecosistemas.

Es importante señalar que el grado de contaminación y su extensión, así como la difusión a otros medios no es una propiedad del agente contaminante en si mismo, sino que depende de la interacción entre el tipo de sustancia y las características del medio que la recibe. La manera de cuantificar esta afirmación es la definición del coeficiente de distribución, este es un valor empírico constante que describe de qué forma se distribuye una sustancia química entre dos medios distintos y esta definido por:

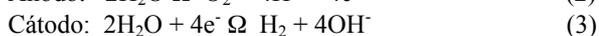
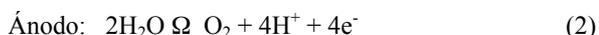
$$K_{a/b} = \frac{C_a}{C_b} \quad (1)$$

donde: $K_{a/b}$ es el Coeficiente de distribución entre las los medios a y b (adimensional); C_a es la concentración del contaminante en el medio a; C_b es la concentración del contaminante en el medio b (La Greca 1996).

Con la finalidad de paliar los efectos de los contaminantes presentes en los emplazamientos, se recurre a técnicas de recuperación para extraer los compuestos nocivos y devolver en parte o en su totalidad las condiciones originales al suelo. La circulación de agua a través de los poros del suelo es un factor muy importante en la aplicación de los principales procedimientos de remediación, ya que una porción de los contaminantes pueden ser movilizados al solubilizarse, suspenderse o emulsificarse en la fase líquida. (Azam 2001, Chen 2002, Chilingar 1997).

La mayoría de los suelos son conductores porque contienen iones disueltos entre los que se cuentan sodio, potasio, calcio, magnesio, cloruros, sulfatos, fosfatos, nitratos, carbonatos, ácidos grasos. Además aún cuando parezcan secos, los suelos tienen más de un 5 % de humedad y es en esa parte de agua donde se solubilizan en mayor o menor grado las especies iónicas o moleculares presentes en el suelo. Si un par de electrodos se introducen en el suelo y una corriente directa circula entre ellos, se generará un campo eléctrico que transportará las especies cargadas presentes hacia las zonas adyacentes a los electrodos de carga opuesta (Dzenitis 1997, Moreau 1997, Schultz 1997).

La corriente eléctrica aplicada ocasiona la electrólisis de las moléculas de agua en los electrodos. Así, en el ánodo se generan protones y oxígeno, y en el cátodo, hidrógeno y oxidrilos, de manera que se tienen condiciones ácidas en el ánodo y alcalinas en el cátodo.



Los suelos se caracterizan por presentar una carga superficial negativa y una vez que el agua ocupa sus poros se establece una doble capa con una alta densidad catiónica. Debido al bajo diámetro de los poros encontrado en las arcillas, el campo eléctrico impuesto moviliza los cationes de la doble capa generándose el flujo electroosmótico. La electroosmosis es descrita mediante una ecuación similar en forma a la ley de Darcy:

$$Q = -Ke \times ie \times A \quad (4)$$

donde: Q es el flujo electroosmótico (m^3s^{-1}); Ke es la conductividad electroosmótica ($\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$); ie es el gradiente de voltaje (Vm^{-1}) y A es la sección transversal m^2 . Los valores de Ke para varios tipos de suelo están entre 10^{-8} y $10^{-10} \text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ (Segall 1992, Page 2002).

La técnica de electro descontaminación de suelos se considera como una alternativa viable para la limpieza de suelos con baja conductividad hidráulica (poca permeabilidad), en los cuales los tratamientos convencionales como la biodescontaminación o el lavado son menos efectivos. En una situación como éste método se presenta como una técnica en desarrollo y potencialmente interesante para el tratamiento de suelos de baja permeabilidad contaminados con mezclas de residuos.

Lo anteriormente expuesto representa una motivación suficiente para diseñar y construir un dispositivo que permita estudiar a escala de laboratorio las distintas variables involucradas en los fenómenos electrocinéticos que puedan presentarse en el suelo, con la finalidad de usarlos en los procesos de remediación.

2 Diseño y construcción

Para los electrodos se emplearon prismas rectangulares de grafito (The A to Z of Materials 2007) a los cuales se les empotró un conductor metálico de acero inoxidable 308 (Engineering Fundamentals 2007) para el ánodo y de bronce (Engineering Fundamentals 2007) para el cátodo. El grafito se usa frecuentemente como electrodo debido a su inercia química y resistencia a la corrosión. La forma de los electrodos de grafito genera un campo eléctrico no uniforme pero se ha demostrado que este tipo de campo tiene alta efectividad en el proceso de remoción de contaminantes lo que aumenta su aplicabilidad para los tratamientos in-situ (Q.Luo 2005). El material de partida para la construcción de las piezas que conformarían la celda fue un tubo de vidrio borosilicato de sodio (Enciclopedia El Ateneo 1965) de 6 cm de diámetro y 0,3 cm de espesor. Entre las ventajas del vidrio borosilicato de sodio está la reversibilidad de los procedimientos de conformado, siendo posible variar algunos detalles como incluir, prolongar o suprimir salidas en los compartimientos. La celda construida constó de cinco compartimientos, Fig.1:

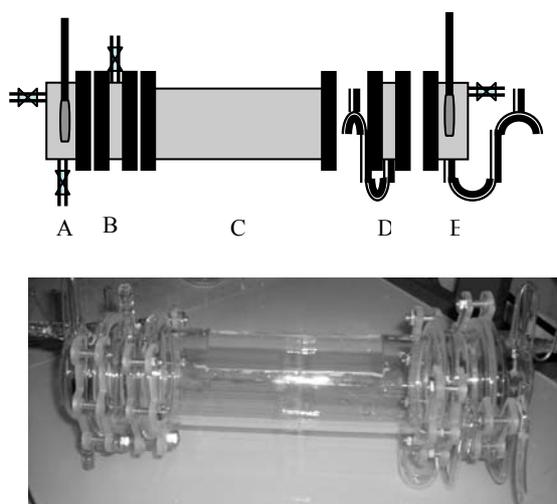


Fig. 1. Esquema de los compartimientos que conforman la celda para el estudio electrocinético en suelos. A y E, compartimientos electroquímicos. B y D, compartimientos de transición. C, compartimiento central. Además una imagen de la celda ensamblada.

- **Uno central abierto (C)** para contener la muestra de suelo, de 200 mm de longitud y 60 mm de diámetro. A diferencia de la mayoría de las celdas precedentes, la construida fue abierta a la atmósfera en su parte superior con una tapa de vidrio no hermética. Esta abertura permite la inclusión de la muestra de suelo como uno de los últimos procedimientos en el armado del sistema, así como también la toma de muestras de suelo durante el tratamiento sin interrumpir el mismo.
- **Dos electroquímicos (A y E)**, de 30 mm de longitud y 60 mm de diámetro. Uno para el ánodo y otro para el cátodo, ambos cerrados en uno de los extremos y provistos de una entrada y una salida para fluidos.
- **Dos de transición (B y D)**, de 30 mm de longitud y 60 mm de diámetro abiertos en los dos extremos, cada uno con una salida. Eventualmente alguno de los compartimientos de transición puede emplearse para contener la muestra. En este caso la porción de suelo tendrá forma cilíndrica y estará completamente aislada de la atmósfera.

Uno de los compartimientos electroquímicos y uno de transición (D y E), incluyen en la salida un sifón abierto en su parte superior para mantener el nivel de líquido en el mismo, actuando a su vez como conducto de drenaje de la solución de lavado.

El ensamble de la celda se hace mediante bridas en forma de "U" construidas con Plexiglass Ω o vidrio acrílico (Wikipedia 2007) y unidas mediante tornillos con tuerca de hierro galvanizado (Fig. 2). Las dimensiones de las bridas fueron 62 mm de diámetro interno, 83 mm de diámetro externo, 83 mm de altura.

La característica más revelante de la celda es que los compartimientos de transición puede incluirse o no en el ensamble de la misma dependiendo de las condiciones de operación del sistema. La fig. 3 ilustra las alternativas consideradas en el armado de la celda. En la fig. citada, la columna A, muestra los compartimientos separados, mientras que la B, la celda ensamblada usando las bridas de unión.

- Tres compartimientos:** dos electroquímicos y uno de transición destinado para contener un cilindro de muestra de suelo.
- Tres compartimientos:** dos electroquímicos y el central abierto.
- Cinco compartimientos:** dos electroquímicos, el central abierto y dos de transición a cada lado del central.
- Cuatro compartimientos:** dos electroquímicos, el central abierto y uno de transición del lado catódico.
- Cuatro compartimientos:** dos electroquímicos, uno central abierto y uno de transición del lado del ánodo.
- Cuatro compartimientos:** dos electroquímicos, uno de transición empleado para contener la muestra de

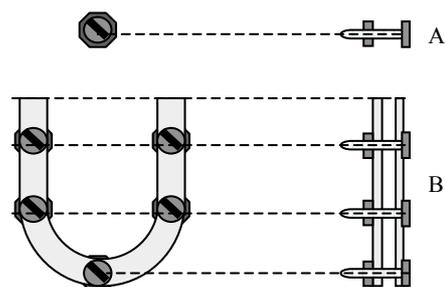


Fig. 2. Imagen de la brida y vistas del sistema de unión de los compartimientos de la celda. A, tornillo de acero galvanizado con tuerca. B, bridas de vidrio acrílico acopladas con los tornillos.

suelo y otro de transición del lado catódico.

En todos los casos se incluyen membranas de separación entre los compartimientos, éstas pueden ser inertes (papel de filtro) o de intercambio iónico o polar (catiónicas, aniónicas o no - iónicas) según el objetivo del estudio.

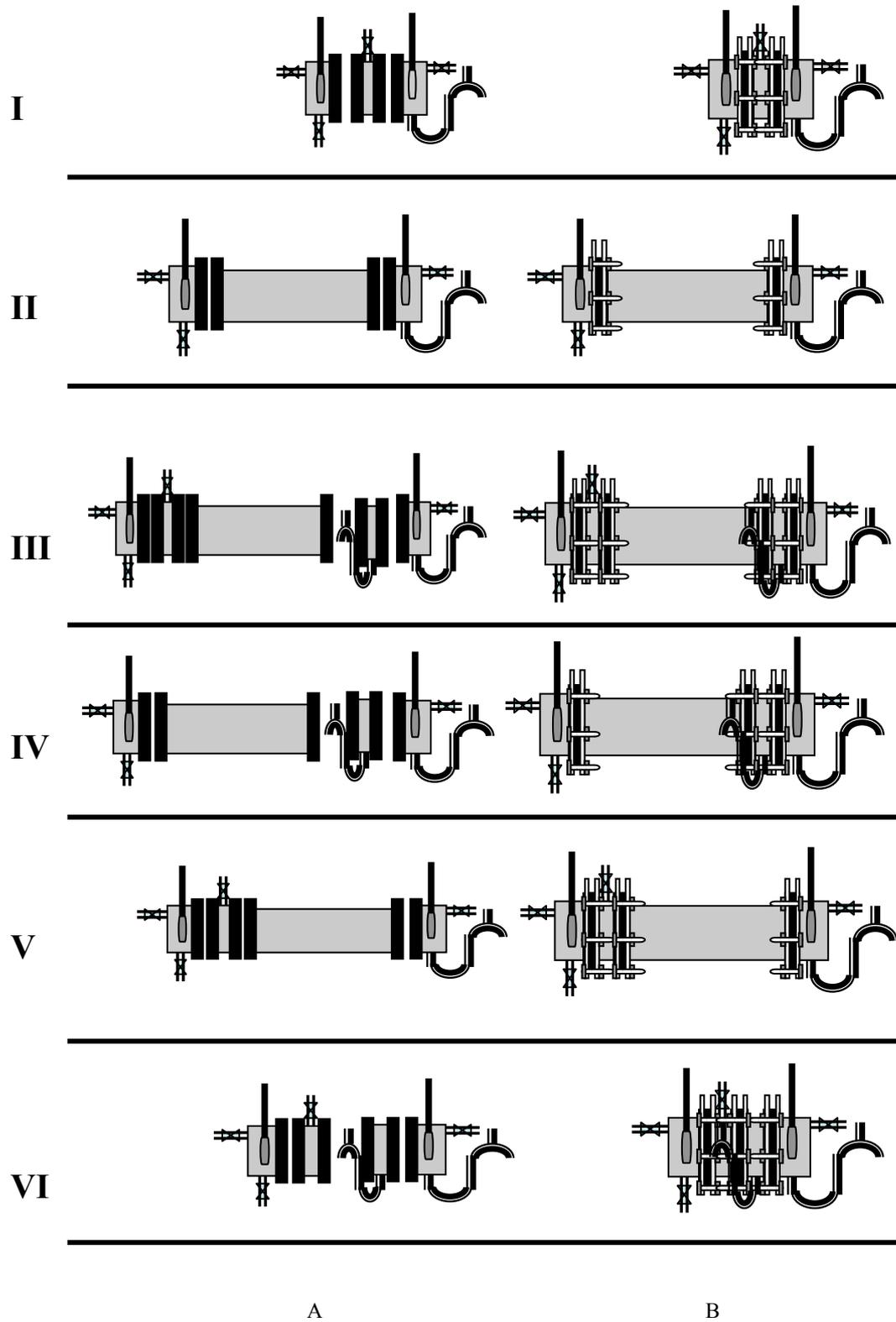


Fig. 3. Representación de las alternativas de ensamble de la celda construida

3 Uso de la celda diseñada y construida para el tratamiento de una muestra de suelo arcilloso contaminado con tolueno

De las alternativas de ensamble presentadas en el aparte precedente, se utilizó uno de los arreglos de tres compartimientos (Fig. 3; alternativa II) para la prueba de la celda. La evaluación inicial de la celda diseñada consistió en el estudio del fenómeno electroosmótico.

La muestra de suelo seleccionada fue una arcilla **Villa Rosa** procedente del Distrito Jiménez, Estado Lara- Venezuela; el análisis químico se incluye en la Tabla 1. La granulometría de la muestra de arcilla se realizó en un tamizador digital Ro-Tap, modelo RX29, usando tamices USA Standard ASTM E-11 con los números 30, 40, 100 y 325.

El resultado del ensayo se incluye en la Tabla 2.

Tabla 1. Análisis químico de arcillas Villa Rosa

Componente	Porcentaje
H ₂ O	2,1%
SiO ₂	67,24%
Fe ₂ O ₃	0,52%
Al ₂ O ₃	22,19%
CaO	0,28%
MgO	Trazas
Na ₂ O	0,43%
K ₂ O	1,33%
Pérdida al rojo	5,45 %

Fuente: (López, 2006)

Los compartimientos anódico y catódico se separaron del de la muestra usando membranas inertes (Papel de filtro Whatman 1). Los discos de papel se fijaron con teflón líquido Tangrip antes del ensamble. Los componentes de la celda fueron dispuestos según un arreglo que suponía un flujo electroosmótico desde el ánodo hasta el cátodo, incluyendo un reservorio de solución (balón de separación de 250 ml) conectado al compartimiento anódico y un colector (cilindro graduado de 50 ml) para la solución emergente del cátodo.

La solución empleada en el tratamiento tuvo una concentración de 2 mg/l KNO₃ para emular las condiciones de las aguas subterráneas promedio (Zhongming 1998).

Una vez seco el sellador y ensamblada la celda, se colocó en el compartimiento central abierto de la celda 350 g de Arcilla. Luego se agregó la solución de lavado en el reservorio anódico y en el compartimiento central hasta impregnar completamente la arcilla y que los niveles de líqui-

do se equilibraran.

Tabla 2. Distribución porcentual del tamaño de la partícula de la arcilla de Villa Rosa

Tamaño de partícula	Porcentaje
Ω600 μm	35.39
Ω425 μm < 600 μm	11.73
Ω150 μm < 425 μm	25.35
Ω45 μm < 150 μm	16.70
< 45 μm	10.83

La diferencia de potencial se impuso empleando una fuente de corriente directa HP modelo 6427BDC. Esta fue de 21,5 V y se monitoreó con un multímetro digital GW Modelo GDM8055. El valor citado se seleccionó con la finalidad de obtener un gradiente de potencial entre 1 y 2 Vcm⁻¹, para garantizar la generación del campo eléctrico que establezca un flujo electroosmótico (Segall 1992).

La Fig. 4 muestra la imagen y un esquema del sistema que incluye la celda armada según el arreglo de tres compartimientos, con los respectivos accesorios.

Inicialmente el nivel de la solución en todos los compartimientos se encontraba en equilibrio. El sifón de la salida del compartimiento catódico permitiría el drenaje del exceso de solución transportado hasta este último.

El avance de los frentes ácidos y alcalinos desarrollados durante la experiencia se midió usando cintas de papel indicador pHDralk 5-11 (Microessential Laboratory) de aproximadamente 19 cm de longitud, colocadas sobre la superficie de la arcilla a distintos tiempos.

Una vez controlado el flujo de solución a través de la arcilla, se procedió a evaluar la electroósmosis como un recurso para la descontaminación de una muestra de suelo. Para tal fin se introdujo dentro de la celda una muestra de arcilla contaminada deliberadamente con tolueno, manteniendo las condiciones de operación citadas en el párrafo precedente.

El proceso de descontaminación fue monitoreado mediante la determinación del contaminante disuelto en la solución emergente del compartimiento catódico y por extracciones de muestras de suelo húmedo.

El análisis de las soluciones se efectuó usando un espectrofotómetro UV-Vis Shimadzu.

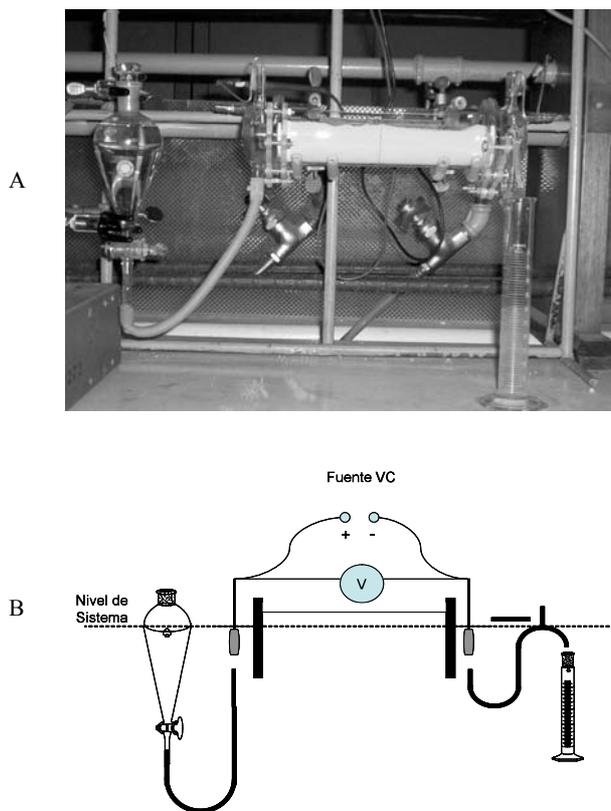


Fig. 4. A. Fotografía de la celda y de los recipientes anódicos y catódicos en el momento del tratamiento de la arcilla. La fuente de poder y el multímetro digital se encontraban fuera del campo de la imagen. B. Esquema del sistema diseñado para el estudio de fenómenos electrocinéticos en suelo. Incluye la celda construida, una fuente de voltaje directo, un multímetro digital los recipientes anódicos y catódicos.

4 Análisis y discusión de los resultados

4.1 Evaluación del flujo electroosmótico a través de una arcilla en la celda de tratamiento

Las características físico químicas de la arcilla (carga superficial negativa) y la baja fuerza iónica de la solución de lavado, condicionaron que el flujo electroosmótico se dirigiera desde el ánodo hasta el cátodo una vez impuesta la diferencia de potencial (Page 2004). El diseño de la celda permitió la salida de la solución de lavado para su posterior caracterización.

En la fig. 5 se muestra la variación del volumen de solución recolectado en el compartimiento catódico con el tiempo. De los datos experimentales se obtuvo que existe una variación lineal del volumen con el tiempo ($Q=2,04 \text{ ml h}^{-1}$). Seguidamente pudo determinarse la conductividad electroosmótica (K_e) a partir de la ecuación (4), resultando

éste igual a $1,94 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ incluida en el rango perteneciente a una gran variedad de suelos (Segall 1992). Durante el tiempo de tratamiento no se verificó descenso en la velocidad del flujo electroosmótico. En la figura 6 se muestra la variación con el tiempo del avance de los frentes ácido y alcalino desde el ánodo y desde el cátodo respectivamente. La medición del pH se efectuó usando una cinta de papel indicador colocada directamente sobre la arcilla húmeda, encontrándose que el pH del frente ácido era aproximadamente 4 y del alcalino mayor o igual a 11. La experiencia evidenció que la movilidad iónica del hidronio generado en el ánodo es mayor que la de los hidroxilos provenientes del cátodo (Page 2002).

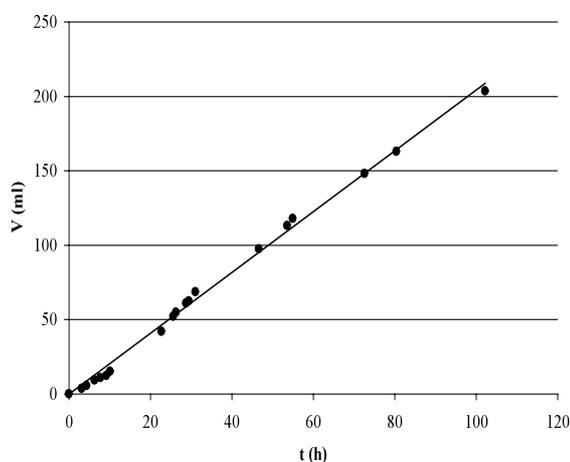


Fig. 5. Flujo electroosmótico a través de la arcilla medido a partir del volumen de solución de lavado emergente del compartimiento catódico. Diferencia de potencial (ΔE): 22,5 V. Longitud de la celda 20 cm. Concentración de la solución de lavado: 2g/l KNO_3 . 102 horas de tratamiento.

4.2 Evaluación de la celda de tratamiento electrocinético en la remediación de una arcilla contaminada con tolueno:

La concentración inicial de la arcilla contaminada fue de 116 mg Tolueno por kg arcilla húmeda (35 % humedad). En la fig. 7 se muestra la variación de la concentración del tolueno con el tiempo y con la distancia medida desde el cátodo. A 15 cm del cátodo el arrastre de parte del contaminante en la zona por el flujo electroosmótico se evidenció por la disminución de la concentración del mismo durante todo el tratamiento. El lavado resultó más efectivo en esta región porque la arcilla fue atravesada por la solución exenta de tolueno que provenía del compartimiento anódico. A 5 cm del cátodo durante las primeras 45 h de tratamiento debido a la gran afinidad entre la molécula de tolueno y la arcilla ocurrió una acumulación del contaminante en esta zona. A medida que el tratamiento avanzó y el tolueno fue lavado se inició una disminución importante de la concentración residual en la arcilla.

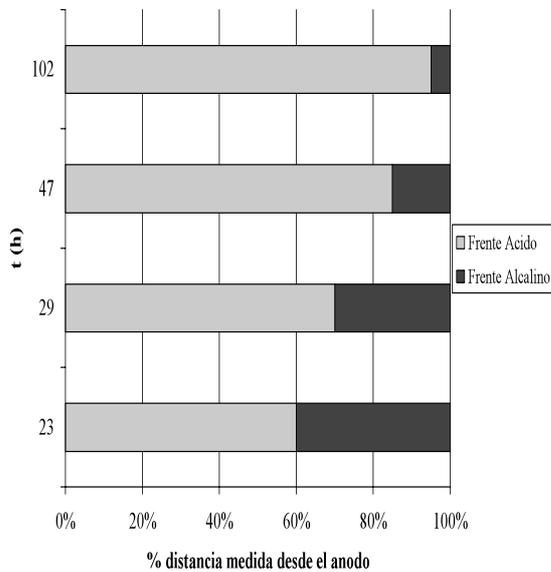


Fig. 6. Evolución del los frentes ácido y alcalino a través de la arcilla.

La alta superficie específica encontrada en las arcillas se debe a su estructura multilaminar; en un proceso de limpieza los compuestos adsorbidos requieren ser removidos de las regiones interlaminares. Se ha demostrado que los fenómenos de adsorción desorción del tolueno sobre arcilla son irreversibles, exhibiendo una menor velocidad en la desorción (Keyes 1994). El análisis de las soluciones de lavado provenientes del cátodo se muestra en la Figura 8, la concentración de tolueno en las mismas oscilaron entre 80 y 180 ppm. Estos cambios son consecuencia de la alteración del equilibrio del sistema arcilla – solución - tolueno por efecto de la circulación del flujo electroosmótico. En el proceso de lavado, algunas porciones de solución no arrastran al contaminante debido a que desplazan a la fase líquida rica en el mismo; la baja velocidad de desorción del tolueno superficial no es suficiente para enriquecerlas antes de que abandonen la celda (mínimos registrados). En contraposición otras porciones de solución algo más retardadas que las precedentes, logran solubilizar el tolueno desorbido extra-yéndolo (máximos registrados); este fenómeno se repite alternativamente. El comportamiento anteriormente descrito es encontrado frecuentemente cuando se aplican estas técnicas de lavado (Segall 1992). De los datos experimentales se estima que mediante el tratamiento electroosmótico se lograron extraer 29 ppm de Tolueno de los 60,8 ppm inicialmente ingresados al sistema, lo que representó un 47,7 % del total.

En la fig. 9 se muestra el porcentaje de rendimiento y la velocidad de la extracción, en donde se registra que la cantidad de tolueno extraído aumenta constantemente con el tiempo siendo la velocidad de extracción igual a 2,27 ppm Tolueno por hora., en 102 h de tratamiento.

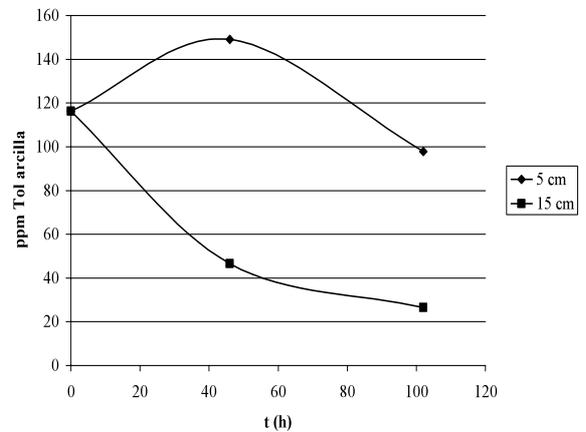


Figura 7. Variación de la concentración del tolueno (ppm peso) en la arcilla con el tiempo y con la distancia desde el cátodo. Sitios considerados: a 5 y a 15 cm. Duración del tratamiento electroosmótico: 102 h.

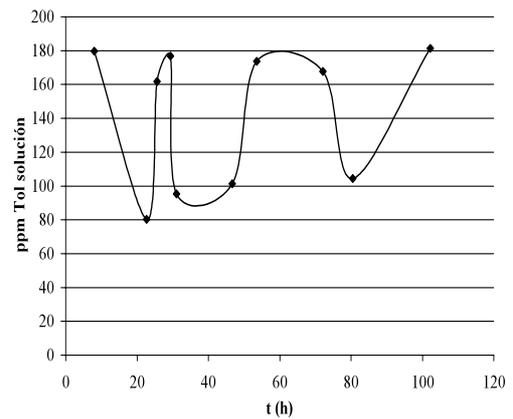


Figura 8. Concentración de tolueno (ppm) en el efluente catódico. Duración del tratamiento electroosmótico: 102 h.

A partir de los datos experimentales, promediando las concentraciones de tolueno en las fases (solución de lavado y arcilla) se calculó el coeficiente de reparto según la ecuación (1) siendo este igual a 0,58 l kg⁻¹ valor concordante con los reportados previamente (Segall 1992).

4.3 Consumo eléctrico aproximado del tratamiento:

De acuerdo a la Ley de Joule (Sears 1976) para el caso en el que un circuito está representado por sólo una resistencia (R) y existe una caída de potencial (V) entre los extremos de la misma; la cantidad de energía por unidad de tiempo transmitida (P), es decir, la potencia, está dada por la siguiente expresión:

$$P = I^2 \times R \tag{5}$$

donde I es la corriente generada.

La resistividad (R) del medio se mantuvo constante en $0,16\Omega 0^6\Omega$ al igual que la intensidad de corriente (I) con un valor de $1,4\Omega 0^4A$ siendo la potencia igual a $3\Omega 0^3W$, para el tiempo de tratamiento se produjo un consumo de $0,31 W\cdot h$.

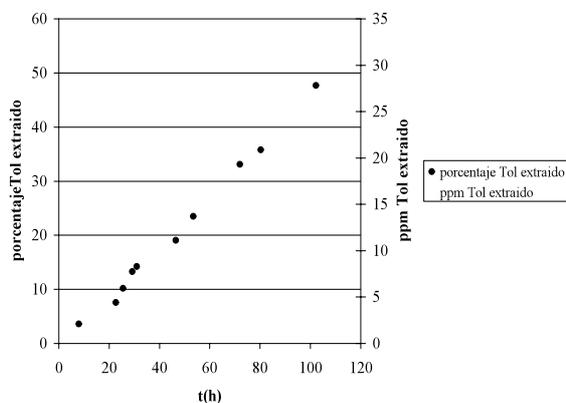


Fig. 9. Evolución de la extracción del tolueno en la solución de lavado. Porcentaje de rendimiento del proceso. Duración del tratamiento: 102 h.

5 Conclusiones

Fundamentándose en una serie de trabajos de laboratorio en los cuales se emplearon dispositivos para la remoción electroquímica de contaminantes en suelos, se dimensionó y construyó una celda para estudios electrocinéticos. Este instrumento fue planificado teniendo presente las distintas variantes que caracterizan a estos procedimientos, de manera de tener un equipo versátil que permita su uso en diferentes situaciones ya que cuenta con una multiplicidad de formas para ser ensamblado.

Para la construcción del cuerpo de las celdas se empleó vidrio boro - silicato de sodio, debido a su facilidad de manejo, inercia química y propiedades ópticas. Además, este material se caracteriza por la reversibilidad en el conformado ya que es posible hacer modificaciones importantes como incluir entradas, variar algunas longitudes y otras. La celda constó de varios compartimientos separados: dos electródicos, dos de transición y uno central. El ensamblaje más sencillo comprende el uso de tres compartimientos (dos electródicos y uno para contener la muestra de suelo) con dos membranas separadoras (inertes o de intercambio). Si el estudio lo requiere, se incluyen los dos compartimientos restantes con las respectivas membranas.

Las piezas de vidrio que conforman la celda se ensamblan entre sí usando bridas en forma de "U" construidas con vidrio acrílico ajustadas con tornillos y tuercas de hierro galvanizado.

Los electrodos consisten en prismas rectangulares de grafito, material conductor resistente a la corrosión y de bajo costo. Los conductores eléctricos para los electrodos fue-

ron acero inoxidable 308 para el ánodo y bronce para el cátodo; se seleccionó un material más resistente para el primero debido a la atmósfera oxidante presente en este electrodo.

Además de la celda con sus accesorios, el sistema para los estudios electrocinéticos incluyó una fuente de corriente directa para suministrar la diferencia de potencial entre los electrodos. También, un recipiente para contener el electrolito (que ingresaba a la celda por uno de los compartimientos electroquímicos) y un cilindro graduado para recolectar la solución que emergía de la celda del otro compartimiento electroquímico por efecto de la electroósmosis. La diferencia de potencial entre los dos electrodos se midió usando un multímetro.

El fenómeno de electroósmosis se consideró como la prueba inicial de la celda construida y el sistema descrito en el párrafo precedente. El arreglo empleado fue el que contemplaba tres compartimientos: dos electroquímicos y el central abierto para contener la muestra de suelo. Las membranas de separación usadas fueron inertes (papel de filtro). Como muestra de suelo se seleccionó una arcilla procedente de Villa Rosa (Estado Lara – Venezuela) y la solución de lavado consistió en $2g\ l^{-1} KNO_3$. La celda fue ensamblada de manera que la entrada de la solución de lavado se localizara en el recipiente anódico y el sifón de salida en el cátodo. El tiempo de operación fue de 102 h y el gradiente de potencial impuesto fue $1,125\ V\ cm^{-1}$. El resultado de esta prueba fue un flujo electroosmótico de $2,04\ ml\ h^{-1}$ desde el ánodo hasta el cátodo coincidente con la presunción inicial; una conductividad electroosmótica (K_e) igual a $1,94 \times 10^{-9}\ m^2V^{-1}s^{-1}$, valor incluido en el rango perteneciente a una gran variedad de suelos. De acuerdo con los planteamientos teóricos se desarrolló un frente ácido que se desplazó desde el ánodo hasta el cátodo a mayor velocidad que el alcalino generado desde el cátodo hasta el ánodo.

Posteriormente se probó la celda con una arcilla Villa Rosa contaminada deliberadamente con tolueno (116 mg Tolueno por kg arcilla húmeda; 35 % humedad) con la finalidad de usar la electroósmosis para lavar la muestra y removerlo. Usando las mismas condiciones de operación impuestas en la prueba inicial, el resultado del tratamiento fue una extracción del 47,7 % del tolueno a una velocidad de 2,27 ppm por hora. A partir de los datos experimentales el coeficiente de reparto del tolueno en el sistema estudiado tuvo un valor de $0,58\ l\ Kg^{-1}$. El consumo eléctrico del tratamiento de descontaminación tuvo un valor aproximado de $0,31\ W\cdot h$.

De lo anteriormente expuesto se puede inferir que una de las alternativas de ensamblaje de la celda construida funciona satisfactoriamente en el estudio de los procesos electrocinéticos, resta entonces continuar con la evaluación de las otras opciones propuestas. Entre las variaciones probables está la inclusión de los demás compartimientos, uso de membranas de intercambio, cambios de la muestra de suelo y naturaleza de los contaminantes usados, empleo de sustancias tensoactivas, combinación de los tratamientos elec-

trocinéticos con procedimientos de remediación físico-química o biológica, entre otras opciones

Referencias

- Azzam R y Oey W, 2001, The utilization of electrokinetics in geotechnical and environmental engineering. *Transport in Porous Media* Vol. 42, 293-314.
- Chen J, Al-Abed S, Roulier M, Ryan J y Kemper M, 2002, Effects of electroosmosis on soil temperature and hydraulic head, I: Field observations. *Journal of Environmental Engineering-Asce* Vol. 128, pp.588-595.
- Chilingar G, Loo W, Khilyuk L F y Katz S, 1997, Electro bioremediation of soils contaminated with hydrocarbons and metals: Progress report. *Energy Sources* Vol. 19, pp. 129-146.
- Dzenitis J, 1997, Soil chemistry effects and flow prediction in electroremediation of soil. *Environmental Science and Technology* Vol. 31, pp. 1191-1197.
- Engineering Fundamentals, Stainless Steel AISI Type 308. Recuperado en Febrero de 2007 de <http://www.efunda.com/materials/>
- Engineering Fundamentals, Alloys Properties UNS C67500 Recuperado en Febrero de 2007 de <http://www.efunda.com/materials/>
- Enciclopedia El Ateneo, 1965, Tomo XII "El Hombre Constructor De Su Mundo". Segunda Edición. Buenos Aires-Argentina.
- Keyes B, Silcox G, Fundamental study of the thermal desorption of toluene from montmorillonite clay particles. *Environmental Science and Technology* Vol. 28, 840 – 849.
- La Greca M, Buckingham P y Evans, J, 1996, Gestión de Residuos Tóxicos. Mc Graw Hill. Primera Edición. Vol. 1 y 2. p.p. 1316.
- López V, Ascanio G y Guerrero V, Rocas Industriales de Venezuela <http://www.fundacite.arg.gov.ve/documentacion/fde/rocas/> Recuperado Diciembre 2006.
- Luo Q., Zhang X., Wang H., Qian Y., 2005, Mobilization of fenol and dichlorophenol in unsaturated soils by non – uniform electrokinetics. *Chemosphere* Vol. 59, 1289–1298.
- Moreau E, Grimaud P y Touchard G, 1997, Electrical decontamination of soils. *Journal of electrostatics*, Vol. 40&41, pp.675–680.
- Page M y Page Ch, 2002, Electroremediation of Contaminated Soils. *Journal of Environmental Engineering* Vol. 128, pp. 208-219.
- Sears F, 1976, *Electricidad y Magnetismo*. Addison-Wesley. Sexta Edición. p.p. 440.
- Segall B y Bruell C, 1992, Electroosmotic contaminants – removal processes. *Journal of Environmental Engineering*. Vol. 118, 84-99.
- Shapiro A y Probst R, 1993, Removal of contaminants from Saturated Clay by Electroosmosis. *Environmental Science and Technology* Vol. 27, pp. 283 – 291.
- The A to Z of Materials, Graphite (C) – Classifications, Properties and Applications of Graphite. Recuperado en Febrero de 2007 de <http://www.azom.com/graphite/>
- Wikipedia: the free encyclopedia, Acrylic glass. Recuperado en Febrero de 2007 de <http://en.wikipedia.org/wiki/Plexiglass>
- Zhongming Li Ji-Wei Yu y Neretieneks I, 1998, Electroremediation: Removal of Heavy Metals from Soils by Using Cation Selective Membrane. *Environmental Science and Technology* Vol. 32, pp.394-397.

