
Remediación electrodiálitica de suelo contaminado con cobre

Claudia Gutiérrez, Henrik K. Hansen*, Catalina Gonzalez

Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad Técnica Federico Santa María, Casilla 110V, Valparaíso, Chile

Electrodialytic remediation of soil contaminated with copper

Descontaminació electrodiàlitica de sòl contaminat amb coure

Recibido: 12 de marzo de 2010; revisado: 19 de noviembre de 2010; aceptado: 3 de diciembre de 2010

RESUMEN

Hoy en día existe preocupación por la gran cantidad de desechos que genera la actividad minera, dentro de los cuales se encuentran los metales pesados. El presente trabajo consiste en la realización de un total de 6 experiencias de remediación electrodiálitica, considerando variables operacionales como duración del tratamiento, intensidad de la corriente aplicada y aplicación de pulsos eléctricos, a fin de evaluar la aplicabilidad de la técnica de remediación electrodiálitica en un suelo proveniente de la Ex Minera Montecarmelo, 5 Region, Chile, que se encuentra contaminado con metales pesados.

Al comparar los resultados, se concluyó que la mejor opción para realizar un tratamiento electrodiálitico al tipo de suelo estudiado, es por medio de pulsos con un régimen bajo; si bien esta experiencia en este trabajo no fue la que obtuvo la mayor remoción, fue la segunda mejor, con un valor de remoción de cobre del 24,7 % muy cercana a la mejor y por otro lado tubo la mejor eficiencia de corriente eléctrica, con un valor del 2,3 %.

Palabras clave: remediación electrocinética, suelo contaminado, metales pesados, cobre, campo eléctrico.

SUMMARY

Nowadays there is a concern over the large amounts of waste generated by mining activities - typically including high heavy metal content. The present work consists of carrying out a total of 6 electrodialytic remediation experiments, considering operational variables such as duration of treatment, intensity of the applied current and application of electrical pulses. This is done in order to assess the applicability of the technique when treating soil from the former copper mining site Montecarmelo, 5th Region, Chile, which is contaminated with heavy metals.

Comparing the obtained results, it could be concluded that the best electrodialytic treatment option for the soil type studied, is when applying low frequency pulses; although in this work the experiment, which had the second highest copper removal (24,7% of copper) could be considered as the best experiment with respect to copper current efficiency (2,3%).

Key words: electrokinetic remediation, contaminated soil, heavy metals, copper, electric field.

RESUM

Avui en dia, hi ha preocupació per la gran quantitat de deixalles que genera l'activitat minera, dins de les quals es troben els metalls pesants. En el present treball, es realitza un total de 6 experiències de descontaminació electrodiàlitica, considerant variables operacionals tals com la durada del tractament, la intensitat del corrent aplicat i l'aplicació de polsos elèctrics, per tal d'avaluar l'aplicabilitat de la tècnica de descontaminació electrodiàlitica en un sòl provinent de la Ex Minera Montecarmelo, 5 Regió, Xile, que es troba contaminat amb metalls pesants. En comparar els resultats, es conclou que la millor opció per a realitzar un tractament electrodiàlitic al tipus de sòl estudiat és mitjançant polsos amb un règim baix. Tot i que en aquest treball aquesta experiència no ha estat la que ha comportat la major descontaminació, n'ha estat la segona millor, amb un valor d'eliminació de coure del 24,7%, molt propera a la millor; a més, ha assolit la millor eficiència de corrent elèctric, amb un valor del 2,3%.

Mots clau: descontaminació electrocinètica, sòl contaminat, metalls pesants, coure, camp elèctric.

* Autor de correspondencia: henrik.hansen@usm.cl; tel. +56 322654030, Fax: +56 322654278

1. INTRODUCCIÓN

Durante décadas, la minería del cobre ha tenido un rol importante en la economía de Chile, por ser éste uno de los principales productores de cobre a nivel mundial [1]. Durante el procesamiento y concentración de los minerales sulfurados de cobre, se produce un volumen considerable de residuos líquidos, sólidos y gaseosos que contienen metales pesados, muchos de ellos con un elevado potencial tóxico [2]. Los metales pesados no son ni química ni biológicamente degradables y se acumulan en el ambiente durante largos periodos de tiempo.

La remediación de sitios contaminados con metales, puede realizarse a través de métodos fisicoquímicos, térmicos y/o biológicos. Una técnica de remediación de suelos contaminados con metales pesados es la electroremediación [3-5]. Esta técnica se basa en la aplicación de una corriente continua de baja intensidad a través de dos electrodos insertados en una celda electroquímica que contiene el suelo a tratar. De este modo se genera un campo eléctrico que provoca el transporte (principalmente mediante electroósmosis e intercambio iónico) de las especies iónicas cargadas hacia el electrodo de carga opuesta, de modo de obtener un suelo libre de contaminantes. Una mejora en la electro-remediación es la denominada remediación electrodiálítica, que combina la electro-remediación con el uso de membranas de intercambio iónico, evitando que los productos resultantes de las reacciones en los electrodos penetren en el suelo, mejorando de esta manera, las eficiencias en la remoción [6,7]. Con la remediación electrodiálítica se ha removido cobre desde residuos mineros pero utilizando reactivos químicos para promover la disolución de los minerales con cobre [8].

El objetivo de este trabajo es aplicar una técnica de remediación electrodiálítica a una muestra de suelo contaminado con metales pesados, para evaluar tanto la aplicabilidad así como la eficiencia de remoción que presenta esta técnica en un tipo determinado de suelo. Para ello se realizará un conjunto de experiencias de laboratorio, considerando las siguientes variables: intensidad de corriente aplicada, tiempo de remediación y aplicación de pulsos eléctricos. Los experimentos se llevarán a cabo sin la adición de compuestos químicos al suelo para no afectar las características del suelo tratado y así evitar el deterioro de sus propiedades y funciones.

2. ANTECEDENTES

La electro-remediación es una técnica físico-química basada en un proceso electroquímico, en donde un campo eléctrico es generado por la aplicación de una corriente o un voltaje directo a través de dos electrodos inertes (ánodo y cátodo) insertos en una celda electroquímica. La aplicación de un campo eléctrico genera cambios fisicoquímicos e hidrológicos en el suelo, induciendo el transporte de las especies contaminantes en función de su carga eléctrica, hacia el ánodo o el cátodo [4,5].

En la remediación electrocinética los electrodos (ánodo y cátodo) son aplicados directamente en el suelo; una mejora a este método de remediación, es la remediación electrodiálítica que incorpora la utilización de membranas de intercambio iónico, para evitar que los productos generados en los electrodos entren en contacto con el suelo durante el tratamiento [6]. De este modo, el objetivo de las

membranas es aislar al suelo en tratamiento, de las especies generadas en los electrodos producto de la reacción de electrolisis, pero permitir el paso de las especies contaminantes desde el suelo hacia las soluciones presentes en las cámaras anódicas y catódicas. La Figura 1 describe un sistema de remediación electrodiálítica.

Por otro lado, la aplicación de un campo eléctrico externo provoca la orientación y distribución de las especies químicas en función del campo aplicado, creándose un dipolo inducido, de forma que se genera un proceso de polarización en la misma dirección del campo externo aplicado [8]. El fenómeno de polarización genera que el suelo actúe como un elemento capacitor, almacenando energía en forma de un campo eléctrico. Lo anterior produce una disminución en el transporte de iones y por consiguiente, una disminución en la eficiencia de remoción de contaminantes. Una manera de disminuir la polarización del sistema y los efectos capacitivos del suelo, es mediante la aplicación de un campo eléctrico en forma de pulso, que consiste en la aplicación de una corriente eléctrica en intervalos de tiempo [10].

En este trabajo, la remediación electrodiálítica de suelos utiliza un nivel bajo de corriente directa, del orden de mili amperes por centímetro cuadrado (mA cm^{-2}) de una sección transversal de suelo, para transportar y remover especies desde el suelo. Para poder evaluar la eficiencia de la remediación electrodiálítica se calcularán parámetros tales como, concentración relativa de cobre, eficiencia de remoción de cobre y eficiencia de corriente.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materia Prima

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó una muestra de suelo proveniente de la Ex Minera Montecarmelo, ubicada en la comuna de Puchuncaví, Región de Valparaíso, Chile. Se extrajeron 10 [kg] de suelo desde la superficie del terreno, desde cuatro puntos diferentes, seleccionados al azar. Posteriormente, las muestras provenientes de cada uno de estos puntos fueron mezcladas hasta lograr una única muestra homogénea. La muestra de suelo presentó una concentración promedio de cobre de 419 ± 27 [mg kg^{-1} peso seco], valor que es superior al valor de intervención de 190 [mg kg^{-1} peso seco] indicado por el Ministerio de Medio Ambiente de los Países Bajos [11]. Estos valores de intervención se utilizan actualmente en Chile como referencia en caso de contaminación de suelo.

3.2. Reactivos

Agua destilada, ácido sulfúrico (H_2SO_4) 95 % y ácido nítrico (HNO_3) 65% - grado analítico.

3.3. Equipos

El tratamiento electrodiálítico del suelo contaminado con metales pesados se llevó a cabo en una celda de acrílico, el diagrama se muestra en la Figura 1. El suelo a tratar se introdujo en el compartimiento central, con dimensiones de 15 [cm] de largo, 8 [cm] de diámetro interno, y 1 [cm] de espesor. Cada extremo de la cámara contenedora se unió mediante tornillos a una cámara de electrodo (una cámara anódica y una catódica), de 4 [cm] largo cada una.

Se utilizaron electrodos de titanio, los cuales se insertaron en las cámaras de electrodo respectivas, sumergidos en agua destilada. Entre el suelo y los compartimientos ca-

tódico y aniónico se colocaron membranas de intercambio iónico, en la zona del cátodo se utilizó una membrana de intercambio catiónico marca Ultrex modelo CMI-7000, mientras que en la zona anódica se utilizó una membrana de intercambio aniónico marca Ultrex AMI-7001. Para poder administrar una corriente constante al circuito de la celda y registrar los datos en un computador, se conectó la celda a un adquisidor de datos modelo UT60A y a una fuente externa de poder marca Hewlett Packard E3612A 60/120 [V], 0.5/0.25 [A]. Cuando se trabajó con pulsos, además se utilizó un programador de pulsos.

3.4. Métodos analíticos

3.4.1. Análisis granulométrico

El análisis granulométrico se realiza pesando 4 muestras de 0.5 [kg] cada una, de suelo seco; se colocan los tamices apilados y cargados con 0.5 [kg] de suelo, se agitan los tamices durante 20 [min] y se pesan las fracciones en los tamices. El procedimiento anterior se realiza con las 4 muestras.

3.4.2. Medición de pH

La medición de pH se realizó mediante el estándar SW-846 Método 9045 de la US-EPA que define "pH en líquidos y sólidos".

3.4.3. Determinación de cobre total

La determinación del cobre total, se realizó según el estándar danés N° 259 que define "Determinación de Metales Pesados en aguas, lodos y sedimentos, pautas generales para la determinación por Espectrofotométrica de Absorción Atómica AAS".

3.5. Preparación y caracterización final de la muestra

Se toma una muestra de suelo de entre 1400 y 1500 [g] y se le agrega agua destilada para preparar una masa homogénea con un 20% de humedad, la que posteriormente se introduce en la celda de acrílico para llevar a cabo el tratamiento electrodiálítico. Una vez finalizado el tratamiento, el suelo tratado es extraído de la celda y es dividido en seis partes similares, iniciando desde la zona catódica, tal como se muestra en la Figura 1.

Cada una de las fracciones obtenidas es llevada al horno durante 24 [h] a 100 [°C] para el secado de la muestra, una vez seca y fría la muestra es molida para luego realizar la medición de pH y cobre total, según los procedimientos mencionados anteriormente. Todos los procedimientos realizados durante la fase experimental de este trabajo se realizan en duplicado.

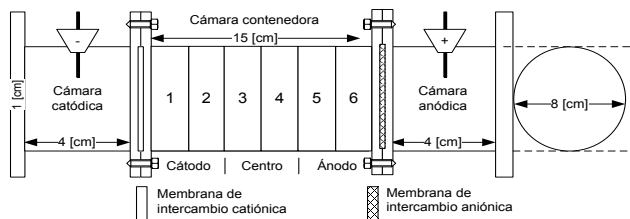


Figura 1. Esquema celda electrodiálítica utilizada, se indican las particiones realizadas al suelo luego del tratamiento.

3.6. Planificación Experimental

En el desarrollo de este trabajo, se planificaron un total de seis experiencias de remediación electrodiálítica. De estas seis experiencias, cuatro se realizaron a una corriente constante y las dos últimas se realizaron mediante la aplicación de un campo eléctrico pulsado. La Tabla 1 presenta las condiciones experimentales utilizadas para cada una de las experiencias realizadas durante la fase experimental de este trabajo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis Granulométrico

Con el análisis granulométrico se concluyó, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS [12] que el suelo utilizado para este estudio, corresponde a un suelo grueso tipo arena, que varía entre arena arcillosa o arena limosa, dependiendo de los parámetros de límites de plasticidad y límite líquido.

4.2. pH

Un factor fundamental en el tratamiento electrocinético es el pH, debido a que este parámetro determina el grado de adsorción de iones por las partículas del suelo, afectando así su solubilidad, movilidad, disponibilidad y formas iónicas de un contaminante y otros constituyentes del suelo. La solubilidad de muchos contaminantes inorgánicos cambia en función del pH y normalmente su movilidad disminuye con valores altos de pH.

La Tabla 2 expone los resultados obtenidos de las mediciones de pH para cada una de las experiencias realizadas. Se incluye el valor de pH antes y después del tratamiento electrodiálítico aplicado, en función de las diferentes secciones de suelo estudiadas. La nomenclatura utilizada, es la misma que se presentó en la Figura 1, donde 1 corresponde al cátodo y 6 corresponde al ánodo.

De la Tabla 2, se puede observar que existe una variabilidad del pH durante el tratamiento electrocinético, observándose una acidificación del suelo hacia la zona anódica. Esta acidificación tiene su fundamento en la generación de protones en la interfase suelo membrana aniónica, debido a la deficiencia de flujo de aniones desde el suelo hacia la superficie de la membrana aniónica para transportar la corriente aplicada. Esta acidificación del suelo es favorable para el tratamiento aplicado, ya que facilita la desorción de las especies iónicas presentes en el suelo. Se observa de los perfiles de pH de cada una de las experiencias que en la zona catódica se produce un aumento del pH con respecto al valor inicial, excepto en la experiencia 6, donde el pH final bajó levemente con respecto al original. Debido a que en todas las experiencias se utilizaron membranas de intercambio iónicas, el aumento de pH por sobre el valor de pH inicial en las cercanías de la zona catódica no debiera ocurrir, ya que, en teoría, el uso de una membrana intercambio catiónico impide el paso de iones OH⁻ desde la solución electrolítica hacia la muestra de suelo tratada, y por tanto el pH de la zona catódica nunca debiera superar el valor de pH inicial. Esto indica, que la corriente de límite se sobrepasó como registrado en casos similares [13].

4.3. Concentración de cobre

La Tabla 3 expone los resultados obtenidos de las concentraciones de Cu y masas para cada una de las partes

Tabla 1. Planificación Experimental.

Parámetro	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6
Duración ensayo [días]	7	7	12	7	7	7
Masa suelo tratada (peso seco) [kg]	1.5	1.5	1.4	1.4	1.4	1.4
Humedad del suelo % peso	20	20	20	20	20	20
Característica	CC	CC	CC	CC	CEP	CEP
Corriente [mA]	10	20	10	30	10.5	11
Tiempo con corriente (t_{on}) [min]	-	-	-	-	100	100
Tiempo sin corriente (t_{off}) [min]	-	-	-	-	5	10
Tiempo ciclo ($t_{on}+t_{off}$) [min]	-	-	-	-	105	110
Régimen de Pulso (t_{on}/t_{off})	-	-	-	-	20	10

CC equivale a Corriente Constante. CEP equivale a Campo Eléctrico Pulsado. (-) No aplica

Tabla 2. Mediciones de pH en las distintas experiencias realizadas.

Experiencia	pH ₀	pH final según parte					
		1	2	3	4	5	6
1	6.9	7.0	6.1	6.1	6.0	5.2	3.6
2	6.7	7.6	5.9	5.9	4.7	3.6	3.3
3	6.8	7.7	6.1	6.3	6.1	4.2	3.5
4	6.8	9.0	6.2	4.3	3.7	3.6	3.5
5	6.8	8.1	6.4	6.4	6.2	5.3	3.4
6	6.8	6.5	6.4	6.1	6.1	5.3	3.5

pH₀ indica el pH inicial de la muestra sólida antes de llevar a cabo el tratamiento.

Tabla 3. Concentraciones de cobre y masas obtenidas en cada experiencia.

EXP	Cu Total Inicial [mg kg ⁻¹]	Masa Suelo Inicial [g]	Distribución de masa final											
			Cátodo				Centro				Ánodo			
			Cu Total [mg kg ⁻¹]		Masa Suelo [g]		Cu Total [mg kg ⁻¹]		Masa Suelo [g]		Cu Total [mg kg ⁻¹]		Masa Suelo [g]	
			Parte 1	Parte 2	Parte 1	Parte 2	Parte 3	Parte 4	Parte 3	Parte 4	Parte 5	Parte 6	Parte 5	Parte 6
1	428.6	1272.8	489.3	375.3	218.0	191.1	395.5	439.7	206.4	208.3	406.5	325.6	203.8	245.3
2	428.1	1219.1	507.2	476.3	193.5	207.6	469.4	417.8	207.0	201.6	369.7	321.5	168.7	240.8
3	413.1	1287.7	541.6	464.2	220.5	209.0	343.9	421.2	203.3	209.2	325.0	302.6	209.9	235.8
4	425.7	1248.5	519.3	490.0	233.4	211.4	392.0	326.7	192.9	198.1	316.4	307.8	178.0	234.6
5	409.7	1218.7	521.0	471.1	167.0	171.8	455.6	405.8	191.1	229.2	335.3	314.6	258.0	201.6
6	413.5	1252.8	545.0	481.4	223.5	220.9	421.2	373.1	190.7	189.2	319.8	302.6	213.4	215.1

Tabla 4. Eficiencia de remoción y de corriente.

EXP	Concentraciones ponderadas de cobre por zona [mg kg ⁻¹]			Concentraciones relativas de cobre por zona			Eficiencia de remoción de cobre sección anódica %	Carga total [C]	Eficiencia de corriente sección anódica %
	Cátodo	Centro	Ánodo	Cátodo	Centro	Ánodo			
1	436.0	417.7	362.3	1.02	0.97	0.85	15.5	6032	1.50
2	491.2	443.9	341.4	1.15	1.04	0.80	20.3	12137	0.89
3	503.9	383.1	313.1	1.22	0.93	0.76	24.2	10446	1.30
4	505.4	358.9	311.5	1.19	0.84	0.73	26.8	18207	0.79
5	495.7	428.4	326.2	1.21	1.05	0.80	20.4	5845	1.99
6	513.4	397.3	311.2	1.24	0.96	0.75	24.7	5835	2.28

para cada experiencia realizada. Con los resultados de la Tabla 3, se pueden calcular las concentraciones ponderadas de cada zona, las concentraciones relativas por zona, la eficiencia de remoción de cobre en la zona anódica y la eficiencia de la corriente, y esto se presenta en la Tabla 4. En base a lo presentado en la Tabla 4, se puede observar que existe una tendencia creciente de los valores de concentración relativa a medida que se avanza hacia la sección catódica. Esto indica que, en la zona anódica, todas las experiencias lograron una remoción de cobre, mientras que en la zona catódica se produjo una acumulación de cobre proveniente de la zona central y anódica.

En la Tabla 4, también se puede ver que las eficiencias de corriente calculadas son bajas, esto es un indicador de que sólo una parte de la corriente aplicada al sistema se utilizó para el transporte del ión Cu^{+2} . El resto de la corriente se pudo haber perdido debido al transporte de H^+ y otras especies químicas presentes en el suelo, las cuales no fueron medidas en este estudio.

4.3.1. Efecto de la intensidad de corriente

Para estudiar el efecto de la intensidad de corriente aplicada se compararán las remociones de cobre obtenidas en las experiencias 1, 2 y 4, como se muestra en la Figura 2. Queda demostrado mediante el análisis de la Figura 2, que existe una relación inequívoca entre la intensidad de corriente y las eficiencias de remoción en la zona anódica, encontrándose la máxima eficiencia de remoción en la zona anódica en la experiencia 4, donde se aplicó una corriente de 30 [mA] durante 7 días consecutivos. Por otro lado si se observan los resultados presentados en la Tabla 4, se pueden ver que esta experiencia es la que tiene la menor eficiencia de corriente, y la que presenta la mejor eficiencia de corriente corresponde a la experiencia 1 en la cual se utilizó el menor valor de corriente eléctrica aplicado al sistema y se obtuvo el valor menor de eficiencia de remoción anódica.

Pese a que en todas las experiencias hubo una migración de cobre desde el ánodo hacia el cátodo, las intensidades de corriente aplicada no fueron suficientes para que el cobre migre en su totalidad hasta la sección catódica.

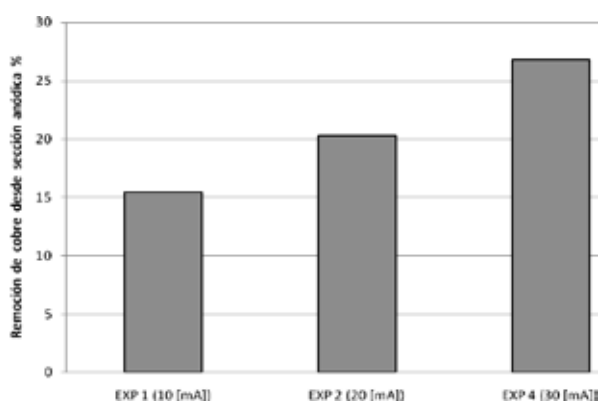


Figura 2. Eficiencias de remoción en sección anódica según la intensidad de corriente aplicada.

4.3.2. Efecto de la duración del tratamiento

Para ver el efecto de la duración del tratamiento se compararán las remociones de cobre obtenidas en las experiencias 1 y 3, como se muestra en la Figura 3. De la figura se observa que existe una relación directa entre la duración del tratamiento y la eficiencia de remoción de cobre

en la sección anódica, obteniéndose la máxima eficiencia de remoción cuando la duración de la experiencia es de 12 días. Si además se compara las concentraciones relativas por zona, como se muestra en la Figura 4, se nota que en la zona catódica aumenta la acumulación de cobre, mientras que en la zona central y anódica se produce un aumento en la remoción de cobre a medida que aumenta la duración del tratamiento. Por otro lado si se observan los resultados presentados en la Tabla 4, se puede ver que las eficiencias de corriente son muy similares, siendo un ligeramente mayor la eficiencia de corriente de la experiencia 1.

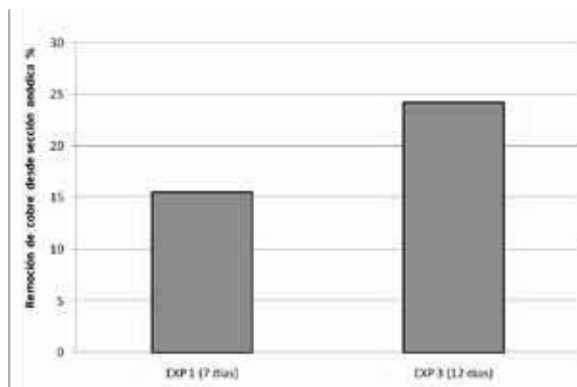


Figura 3. Eficiencias de remoción en sección anódica según la duración del tratamiento electrodiálisis aplicado.

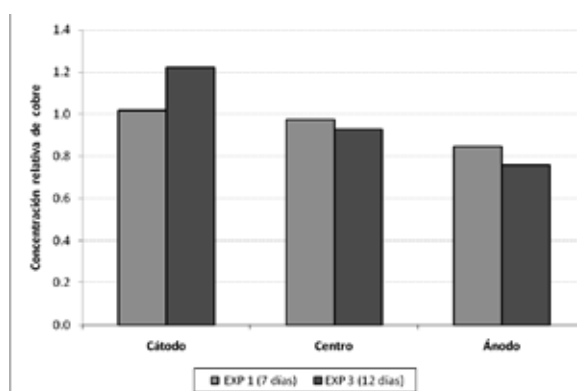


Figura 4. Distribución del cobre según la duración del tratamiento.

4.3.3. Efecto de la duración e intensidad del tratamiento

Para ver el efecto de la duración e intensidad del tratamiento se compararán las remociones de cobre obtenidas en las experiencias 2 y 3, como se muestra en la Figura 5. De la figura, se observa una relación entre la eficiencia de remoción en la sección anódica y la duración e intensidad del tratamiento, los resultados indican que es más eficiente, desde el punto de vista de la remoción del contaminante, realizar un tratamiento de mayor duración pero con una intensidad de corriente baja, ya que la máxima remoción se obtiene cuando el tratamiento aplicado tiene una duración de 12 [días] con una intensidad de corriente de 10 [mA]. Si se fija en los resultados de eficiencia de corriente mostrados en la Tabla 4, además se puede observar que la experiencia 3 es la que presenta una mejor eficiencia en el uso de la corriente eléctrica, lo que nos reafirma la con-

clusión anterior de que aplicar un tratamiento de mayor duración con baja intensidad de corriente es mejor.

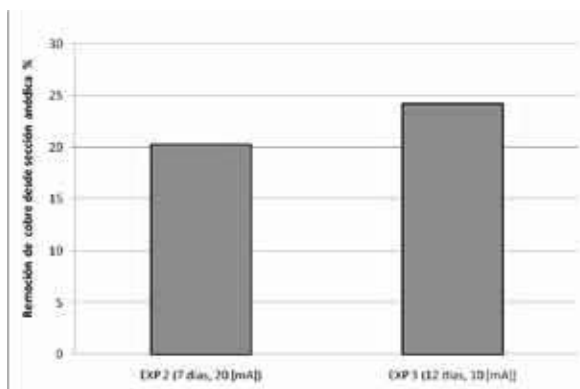


Figura 5. Eficiencias de remoción en sección anódica según la duración e intensidad del tratamiento.

4.3.4. Efecto de la aplicación de Pulsos Eléctricos.

Para ver el efecto de la aplicación de pulsos eléctricos se compararán las remociones de cobre obtenidas en las experiencias 1, 5 y 6. La principal diferencia entre las tres experiencias es el mecanismo por el cual la corriente eléctrica fue aplicada. En el caso de la experiencia 1, la corriente fue aplicada de modo constante, sin la aplicación de pulso eléctrico. Por otro lado, las experiencias 5 y 6 se realizaron mediante la aplicación de pulsos eléctrico, siendo el régimen de pulso de 20 y 10, respectivamente. Los resultados se muestran en la Figura 6. De la Figura 6, se observa que la mínima eficiencia de remoción en la sección anódica se obtiene cuando el tratamiento es realizado sin la aplicación de pulsos eléctricos y al comparar los resultados de las experiencias realizadas con pulsos eléctricos, se observa que a medida que el régimen de pulso disminuye, la eficiencia de remoción aumenta. Este fenómeno se debe principalmente a que un menor régimen de pulso indica un mayor tiempo sin la aplicación de corriente, por lo que el sistema tiene mayor tiempo para revertir los efectos capacitivos y de polarización del sistema.

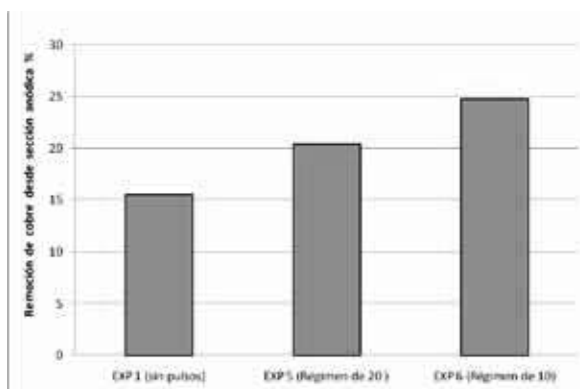


Figura 6. Eficiencias de remoción en sección anódica según aplicación de pulsos eléctricos.

Al graficar los resultados de las concentraciones relativas por zona de estas experiencias, como se ve en la Figura 7; existe una mayor acumulación de cobre total en la zona catódica cuando el tratamiento se realiza mediante la aplicación de pulsos eléctricos. Sin embargo, no se presenta una diferencia significativa entre la concentración relativa

de cobre y el régimen de pulso aplicado a las experiencias con pulsos (experiencias 5 y 6).

Si además se observan los resultados de eficiencia de corriente mostrados en la Tabla 4, se puede ver que los mejores resultados en la eficiencia de corriente eléctrica, también son los de la experiencia 6, lo que nos lleva a la conclusión que realizar un tratamiento con la utilización de pulsos en un régimen bajo de éstos es una buena alternativa de tratamiento.

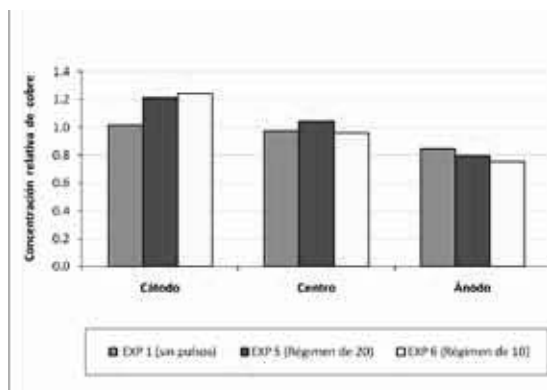


Figura 7. Distribución del cobre en función de la aplicación de pulsos eléctricos.

4. CONCLUSIONES

Con este trabajo se establece la capacidad de la técnica de remediación electrodiálítica para eliminar cobre de una muestra de suelo arenoso proveniente de la Ex minera Montecarmelo.

En la totalidad de las experiencias realizadas se presentó una remoción de cobre en la zona anódica, mientras que se produce una acumulación de la especie contaminante en la zona catódica.

Al analizar el efecto de remoción en la zona anódica, se observa que aumenta la remoción al aumentar la intensidad de corriente, pero por otro lado la eficiencia de corriente disminuye.

Por otro lado, al analizar el efecto de la duración e intensidad del tratamiento, se puede concluir que es más eficiente aplicar un tratamiento de baja intensidad pero de mayor duración, que un tratamiento de alta intensidad por un periodo de tiempo menor. También se observa la misma tendencia en la eficiencia de la corriente.

Al analizar el efecto de la aplicación de pulsos eléctricos, desde el punto de vista de remoción de cobre en el ánodo, se observa una menor eficiencia cuando el tratamiento se realiza sin la aplicación de pulsos eléctricos. Por otro lado, a medida que disminuye el régimen de pulso, el tratamiento se vuelve más eficiente. También se observa la misma tendencia en la eficiencia de la corriente.

Dentro de este trabajo se puede concluir que la mejor opción para realizar un tratamiento electrodiálítico al tipo de suelo estudiado, es por medio de pulsos con un régimen bajo; si bien esta experiencia en este trabajo no fue la que obtuvo la mayor remoción, fue la segunda mejor, con un valor de remoción de cobre de 24.7 % muy cercana a la mejor y por otro lado tubo la mejor eficiencia de corriente eléctrica, con un valor de 2.3 %.

Pese a que en todas las experiencias hubo una migración de cobre desde la zona anódica hacia la zona catódica,

en ninguna de las experiencias se dieron las condiciones necesarias para bajar las concentraciones de cobre en la zona anódica por debajo de los 190 [mg kg⁻¹ peso seco] como lo indica la legislación. Por lo tanto para que el tratamiento sea aplicable con concentraciones finales bajo las normadas, se podría aumentar el tiempo de tratamiento con la utilización de pulsos con un régimen bajo. Otra alternativa sería aplicar el tratamiento utilizando los pulsos con un régimen bajo, luego dejar reposar el suelo por un tiempo, de forma que el cobre presente se disuelve aún más y aplicar el tratamiento nuevamente. También sería una alternativa aumentar la corriente aplicada, pero si bien en este caso la remoción de cobre es buena, las eficiencias de corriente son bajas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo económico del proyecto FONDECYT 1100440 y la ayuda de la Sra. Ana Gonzalez.

BIBLIOGRAFÍA

1. Informe tendencias del Mercado del cobre. Tercer trimestre 2009. Dirección de Estudios y Políticas Públicas, Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO), 2009. www.cochilco.cl.
2. The World Bank Group *Pollution Prevention and Abatement Handbook*, 1998; World Bank, Washington D.C., USA 1999.
3. Lageman R., Electroreclamation, *Environmental Science and Technology*, 27 (1993) 2648-2650.
4. Acar, Y.B. and Alshawabkeh, A.N., Principles of electrokinetic remediation, *Environmental Science and Technology* 27 (1993) 2638- 2647.
5. Probststein, R.F. and Hicks R.E., Removal of contaminants from soil by electric fields, *Science*, 260 (1993) 498-503.
6. Ottosen, L.M., Hansen, H.K., Laursen, S., Villumsen, A., Electrodialytic remediation of soil polluted with copper from wood preservation industry, *Environmental Science and Technology* 31 (1997) 1711-1715.
7. Hansen, H.K., Ottosen, L.M., Hansen, L., Kliem, B.K., Villumsen, A., Bech-Nielsen, G., Electrodialytic remediation of soil polluted with heavy metals - Key parameters for optimization of the process, *Trans IChemE - Chemical Engineering Research and Design* 77 (1999) 218-222.
8. Hansen, H.K. Rojo, A., Ottosen, L.M. Electrodialytic remediation of copper mine tailings, *Journal of Hazardous Materials*, B117 (2005) 179-183.
9. Virkutyte, J., Sillanpää, M., Latostenmaa, P., Electrokinetic soil remediation — critical overview, *The Science of The Total Environment*, 289 (2002) 97-12.
10. Hansen, H.K. and Rojo, A., Testing pulsed electric fields in electroremediation of copper mine tailings., *Electrochimica Acta*, 52 (2007) 3399-3405.
11. Soil Remediation Circular 2009, Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, The Netherlands (2009), <http://www.vrom.nl>
12. U.S. Bureau of Reclamation, 1974. Earth Manual; U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
13. Ottosen. L.M., Hansen, H.K., Hansen, C., Water Splitting at Ion-Exchange Membranes and Potential Differences in Soil During Electrodialytic Soil Remediation, *Journal of Applied Electrochemistry*, 30 (2000) 1199-1207.