



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y**  
**VINCULACIÓN**



**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN INTERNOS SIN FINANCIAMIENTO O**  
**AUTOGESTIONADOS**

**ANEXO 2 – DETALLES DE LA PROPUESTA**

Investigación Básica <input type="checkbox"/>	Investigación Aplicada <input checked="" type="checkbox"/>
<b>DEPARTAMENTO(S) Y/O INSTITUTO(S):</b> 1. METALURGIA EXTRACTIVA	
<b>LINEA(S) DE INVESTIGACIÓN:</b> 1. IMPACTO DE EFLUENTES EN AGUAS Y SUELOS 2. SUELOS Y SEDIMENTOS	

<b>DISCIPLINA CIENTÍFICA (Marque X, solamente una opción)</b>	
Ciencias Naturales y Exactas;	
Ingeniería y Tecnologías;	X
Ciencias Médicas;	
Ciencias Agrícolas;	
Ciencias Sociales;	
Humanidades	

<b>OBJETIVO SOCIOECONÓMICO (Marque X, solamente una opción)</b>	
Exploración y explotación del medio terrestre;	
Ambiente;	X
Exploración y Explotación del espacio;	
Transporte, telecomunicaciones y otras infraestructuras;	
Energía;	
Producción y tecnología industrial;	
Salud;	
Agricultura;	
Educación;	
Cultura, ocio, religión y medios de comunicación;	
Sistemas políticos y sociales, estructuras y procesos;	
Defensa;	
Avance general del conocimiento: I+D financiada con los Fondos Generales de Universidades (FGU);	
Avance general del conocimiento: I+D financiados con otras fuentes.	



1 Proyecto de Investigación

**Título:**

Evaluación de la remediación electrocinética para suelos contaminados con arsénico y cobre

**Resumen del proyecto** (máximo 200 palabras)

La actividad industrial ha originado en muchas ocasiones la contaminación de suelos con metales pesados debido a la persistencia de estos elementos y a la toxicidad directa que podrían producir en los seres vivos, ya que estos se mueven a través de la cadena alimenticia vía consumo de plantas por animales y estos a su vez por humanos.

El presente proyecto busca evaluar la remediación electrocinética aplicada a suelos agrícolas contaminados con As y Cu. Esta técnica consiste en aplicar una corriente eléctrica de baja intensidad, entre electrodos enterrados en el suelo contaminado, que permite la movilización de agua, iones y partículas pequeñas cargadas. La oxidación en el ánodo genera protones H<sup>+</sup>, que se mueven hacia el cátodo creando un frente ácido. Este favorece la desorción de los cationes del suelo y contribuye en la disolución de contaminantes precipitados como carbonatos, hidróxidos. Los iones OH<sup>-</sup> generados en el cátodo por la reducción del agua provocan la precipitación de los metales y la consecuente descontaminación de suelos.

La electroremediación resulta eficaz para el tratamiento de suelos que son difíciles de recuperar por otros medios, es de bajo costo, comparada con otros métodos alternativos y puede ser aplicada *in situ* evitando gastos de transporte y construcciones complejas.

**Palabras clave (4-6):**

Electrocinética, descontaminación, arsénico, cobre



**2 | Objetivos, relevancia, productos y resultados esperados de esta propuesta de investigación**

**2.1 Objetivos**

**2.1.1 Objetivo General**

- Evaluar la remediación electrocinética para suelos contaminados con arsénico y cobre

**2.1.2 Objetivos Específicos**

- a. Muestrear y caracterizar un suelo agrícola de la zona de Machachi (Cantón Mejía)
- b. Elaborar e implementar celdas para remediación electrocinética de 2 L de capacidad
- c. Realizar ensayos de remediación electrocinética con suelos contaminados con arsénico y cobre
- d. Determinar la influencia de la adición de bentonita en la remediación electrocinética con suelos contaminados con arsénico y cobre
- e. Evaluar la remoción de arsénico y cobre de los suelos tratados por remediación electrocinética con el "Toxicity Characteristic Leaching Procedure" (Test TCLP)

**2.2 Detalle de los resultados esperados (con relación a los objetivos)**

- a. Se dispondrá de datos de análisis físicos, químicos y mineralógicos de un suelo agrícola característico de la zona de Machachi (Cantón Mejía)
- b. Se dispondrá de celdas para ensayos de remediación electrocinética de suelos contaminados con metales pesados
- c. Se definirán las mejores condiciones experimentales para realizar ensayos de remediación electrocinética de suelos contaminados con arsénico y cobre
- d. Se definirá la influencia de la granulometría en los ensayos de remediación electrocinética de suelos contaminados con arsénico y cobre
- e. Se dispondrá de datos de la eficacia de la remediación electrocinética como técnica de depuración de suelos

**3 | Relevancia de la propuesta de investigación y su relación con la(s) líneas de investigación**

El Departamento de Metalurgia Extractiva (DEMEX) desarrolla investigaciones aplicadas en el área de recursos minerales y medio ambiente, con principal atención en el procesamiento de minerales, metalurgia extractiva, tratamiento de efluentes y reciclaje de materiales industriales. Una de sus líneas de investigación es el estudio del "Impacto de efluentes en aguas y suelos", que es el campo en el cual se enmarca este trabajo y que contribuirá evidentemente a fortalecer esta área de investigación en el DEMEX. Además, se afianzará otra de las líneas de investigación referente a "Suelos y sedimentos" que es un tema que se debe ser fortalecido actualmente en el Departamento.

En esta investigación, tanto los objetivos como los resultados esperados, se han planteado con base en las características de un "*proyecto interno*". El desarrollo de este trabajo permitirá disponer de una metodología para remediación electrocinética de suelos contaminados con arsénico y cobre y evaluar su efectividad para aplicaciones posteriores.

Si se tiene en cuenta que varias empresas ecuatorianas generan efluentes contaminados con metales pesados, las perspectivas de desarrollo de futuras investigaciones, a partir de los resultados que genere este trabajo, son muy importantes. Además, se podrá evaluar la posibilidad de aplicación del proceso en el caso de otros metales contaminantes, lo que nos da la idea de la importancia de la ejecución de esta investigación tanto para el DEMEX como para el sector profesional y empresarial.



4	Productos esperados (marcar con una "X" al menos uno de los productos no señalados)
---	---

Tipo de Producto:	Marcar con una "X"
a. Disertación a la Comunidad Politécnica (obligatorio);	X
b. Presentación de un artículo en formato de la Revista Politécnica (obligatorio)	X
c. Proyecto de Titulación;	X
d. Aplicación tecnológica construida o implementada;	
e. Patente presentada;	
f. Perfil de proyecto de mayor impacto científico, técnico, pedagógico o de innovación.	
g. Publicaciones científicas indexada en SCIMAGO-SCOPUS /WoS/ SCIELO/Latindex Catálogo o un artículo en congreso indexado en SCOPUS.	

5	Descripción y metodología y diseño del proyecto
---	---

### 5.1 Descripción, metodología y diseño del proyecto (Máximo dos carillas)

El suelo se ha convertido en un medio receptor de sustancias potencialmente contaminantes, ya que actúa como interfase entre la biosfera, la litosfera y la atmósfera. Los metales pesados en el suelo, cuando están en concentraciones mayores a las habituales sobrepasan el poder amortiguador de éste medio<sup>1</sup>. Los contaminantes pueden permanecer retenidos grandes períodos de tiempo o ser tan móviles como para incorporarse al medio circundante impactando la calidad de los alimentos, la seguridad de la producción de cultivos y la salud del medio ambiente, ya que estos se mueven a través de la cadena alimenticia<sup>2</sup>.

Para la remediación de suelos contaminados con metales pesados existen varias tecnologías que pueden llevarse a cabo de manera "in situ", estas son: la fitorremediación, la solidificación/estabilización y la electroremediación<sup>3,4</sup>. La electroremediación consiste en aplicar una corriente eléctrica de baja intensidad entre electrodos introducidos directamente en el suelo contaminado, la que permite la movilización de agua, iones y partículas pequeñas cargadas. Los aniones se mueven hacia el electrodo positivo y los cationes hacia el electrodo negativo<sup>5,6</sup>.

En el presente proyecto se busca evaluar la remediación electrocinética para suelos contaminados con arsénico y cobre a causa de actividades industriales. Con este fin se empleará la metodología que se describe a continuación:

#### a. Muestreo y caracterización de un suelo agrícola de la zona de Machachi

Se tomarán muestras de suelo agrícola de la zona de Machachi (parroquia Güitig Alto, Cantón Mejía), ubicado a una altura de 3150 msnm. La técnica empleada será un muestreo simple al azar, a una profundidad de hasta 40 cm. La muestra de suelo seco a temperatura ambiente se preparará empleando un tamiz vibratorio de 2 mm de abertura, para retirar restos de raíces y la fracción de tamaño inferior a 2mm se homogenizará y cuarteará hasta obtener porciones de 2 kg, que serán empleadas para los análisis y ensayos posteriores.

Para la caracterización físico química y mineralógica del suelo se determinarán propiedades como: contenido de materia orgánica, densidad real, densidad aparente, pH, acidez, textura, granulometría por tamizado, porosidad, contenido de macronutrientes (N, P, K), nutrientes (Ca, Mg, S) y micronutrientes (Cu, Mn, Zn y Fe)<sup>7</sup>. Además, se determinará el contenido de los elementos mayores por fluorescencia de rayos X (Equipo S8 Tiger). El análisis mineralógico se efectuará por difracción de rayos X (D8 Advance).

#### b. Elaboración e implementación de celdas para remediación electrocinética de 2 L de capacidad

Se diseñarán y construirán tres celdas de material acrílico, cada una con una capacidad de alrededor de 2 L cada una, de 24 cm de largo, 8 cm de ancho y 10 cm de altura<sup>8</sup>. Se realizarán perforaciones de 1 mm de radio



cada 5 mm a lo largo y ancho de toda la base de cada celda para facilitar la humectación de las muestras por capilaridad. Para aplicar la diferencia de potencial, la celda se elaborará con canales laterales que permitan el ingreso de dos electrodos de grafito de 0,5 cm de espesor, 8 cm de ancho y 10 cm de alto, que serán colocados a 2,5 cm de cada lado de la celda.

Previo a la aplicación de la remediación electrocinética se acondicionarán 600 gramos de muestras de suelo, que se dispondrán en la celda de forma tal que se alcance la densidad aparente del suelo original, por control de altura. El suelo de la celda se humectará por capilaridad, con soluciones 0,1 M de sulfato ferroso heptahidratado ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )<sup>9</sup> colocadas en bandejas en contacto directo con las celdas. Esta solución contendrá además arsénico y cobre disueltos (en concentraciones que permitan alcanzar  $15 \text{ mgKg}^{-1}$  y  $1000 \text{ mgKg}^{-1}$  respectivamente en el suelo ensayado), provenientes de cloruro cúprico dihidratado ( $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y arseniato de calcio ( $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ ). Una vez transcurrido un periodo de 12 horas de humectación la celda se dejará en reposo por 2 horas para que libere el exceso de solución y la muestra de suelo conserve su humectación a la capacidad de campo. Se registrarán en todos los casos los volúmenes de solución empleados.

*c. Ensayos de remediación electrocinética con suelos contaminados con arsénico y cobre*

Las celdas que contienen el suelo humectado a capacidad de campo (con soluciones de sulfato ferroso, cloruro cúprico y arseniato cálcico) son llevadas a tratamiento electrocinético. Con este fin la celda se colocará en una fuente de poder y se conectarán cada uno de los electrodos a los terminales de esta y se programará la misma con 10 V de potencia y 0,1 A de intensidad de corriente<sup>10</sup>, el proceso se realizará en continuo por 48 horas. Una vez finalizado el ensayo, el suelo de la celda se dividirá en 8 fracciones para el análisis del contenido de los elementos de interés en cada fracción, por la aplicación del test Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP).

Es importante conocer si la variación en la concentración de los metales pesados (arsénico y cobre) se produce solamente por la aplicación del campo eléctrico, o es influenciada por factores como la presencia de materia orgánica propia del suelo original, o por la presencia de material arcilloso, para lo cual se comparará la concentración de arsénico y cobre en las distintas secciones del suelo contaminado, pero sin la aplicación de un campo eléctrico. Todos los ensayos se realizarán por triplicado y el análisis estadístico de los datos se realizará empleando el método de varianza global ANOVA.

Para el análisis de la efectividad de la remediación electrocinética, se tomarán como referencia dos criterios<sup>6</sup> asociados al cambio de concentración debido al tratamiento, estos son:

- a) Identificación de cambios de concentración debidos al tratamiento: Para que se tenga un cambio de concentración significativa, la diferencia entre la concentración máxima y mínima de metales pesados al final de cada ensayo debe ser mayor a la desviación estándar de la concentración de metales pesados en el suelo sin tratamiento, ya que así se tendría una diferencia de concentración que sobrepasa los límites de incertidumbre.
- b) Identificación de la ocurrencia representativa de la migración de las especies: Para que exista una migración de especies representativa; la concentración promedio en cada una de las fracciones de suelo debe ser significativamente distinta que la concentración del suelo sin tratar. Si la concentración promedio de metales pesados presentes en un suelo tratado esta fuera de los límites de incertidumbre del suelo sin tratar, se dice entonces que ocurrió migración iónica en el suelo. Siempre y cuando el valor de la concentración promedio se encuentre por debajo del límite inferior de incertidumbre de la muestra de suelo sin tratar

*d. Determinación de la influencia de la adición de bentonita en la remediación electrocinética con suelos contaminados con arsénico y cobre*

Considerando que el proceso de remediación electrocinética es más efectivo en suelos con menor permeabilidad o con contenidos superiores de arcillas<sup>7</sup>, se realizarán ensayos con adición controlada de bentonita (2%). Esta variación se implementará previo a la humectación por capilaridad, ya que se homogenizará la bentonita con el suelo para obtener un peso de 600 g de muestra. Los ensayos de remediación electrocinética se realizarán con el procedimiento descrito anteriormente y para la evaluación se emplearán los mismos criterios asociados al cambio de concentración debido al tratamiento, ya señalados.

La bentonita empleada será caracterizada por fluorescencia y difracción de rayos X.

*e. Evaluación la remoción de arsénico y cobre de los suelos tratados por remediación electrocinética con el Test TCLP*

Una vez que hayan finalizado los ensayos de tratamiento electrocinético, se procederá a su evaluación mediante el Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)<sup>11</sup>. El TCLP iniciará con la división



longitudinal del suelo tratado en la celda en 8 fracciones, cada fracción se dejará secar separadamente a temperatura ambiente por 24 horas. Cada una de las fracciones se lleva al Test TCLP, por 18 horas, con control de pH por adición de solución de ácido acético. Los lixiviados obtenidos de analizarán por absorción atómica e ICP-OES. El análisis estadístico de los datos se realizará empleando el método de varianza global ANOVA.

*Citas bibliográficas*

1. Bautista, F. (2016). Introducción al estudio de la contaminación de suelos por metales pesados. Yucatán, México: Universidad Autónoma de Yucatán.
2. Belmonte F.; Romero A.; Alonso F.; Moreno J. y Rojo S. (2010). Afección de suelos agrícolas por metales pesados en áreas limítrofes mineras del suroeste de España. Papeles de Geografía Universidad de Murcia. (51-52).
3. Ortiz, B.; Sanz, J.; Dorado M. y Villar S. (2007). Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Informe de vigilancia técnico. Madrid, España
4. Khalid, S., Shahid, M., Niazi, N. K., Murtaza, B., Bibi, I., & Dumat, C. (2017). A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of Geochemical Exploration*, 182, 247–268. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.11.021>
5. Mattson, E. y Lindgren, E. (2004) Electrokinetics: An Innovative Technology for In-situ remediation of Heavy Metals. In Situ Remediation Technology Development Integrated Program. United States. Department of Energy. Office of Technology Development. 235-345. Recuperado de <http://info.ngwa.org/gwol/pdf/940160234>. PDF (diciembre 2019)
6. Molina, G.; Palestina, V. y Piedras, J.; (2004). Recuperación electrocinética de hidrocarburos sorbidos en suelos contaminados. Proyecto terminal previo a la obtención del Título de Ingeniero Químico, Universidad Autónoma Metropolitana. México D.F. México.
7. Soriano M., Sancho J., Verdú A., Giner J., Pons V., (2004), Práctica de diagnóstico y Fertilidad de Suelos, Editorial Politécnica de Valencia, España.
8. Aragón, C. (2013). *Diseño a escala laboratorio y piloto de un sistema de remediación electrocinética de suelos contaminados con metales pesados*. Retrieved from <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7072/1/CD-5240.pdf>
9. Pazos, M.; Sanromán, M. y Cameselle, C. (2016). Improvement in electrokinetic remediation of heavy metal spiked kaolin with the polarity Exchange technique. *Chemosphere*, 62(5), 817-822. Universidad de Alcalá del Círculo de Innovación en tecnologías Medioambientales y Energía (CITME).
10. Page M. y Page, C., 2002, "Electroremediation of contained soils. *Journal of Environment Engineering*, 128,208-219.
11. United States Environmental Protection Agency. (1992). Method 1311, Toxicity characteristic leaching procedure. <http://www.epa.gov/wastes.../hazard/test methods/sw846/pdfs/1311.pdf>, (Diciembre, 2012)

**6 Infraestructura, equipos y fondos adicionales.**

**6.1 Infraestructura y equipos**

- Indicar la infraestructura y equipos disponibles para la ejecución del proyecto, con la ubicación actual de los mismos

Infraestructura	Equipos	
	Nombre del Equipo	Ubicación del Equipo
Laboratorio del Departamento de Metalurgia Extractiva	Fluorescencia de rayos X	Laboratorios DEMEX
	Difracción de rayos X	
	Absorción Atómica	
	ICP-OES	
	Fuente de poder	
	Equipo para test TCLP	
	Materiales de vidrio y reactivos	



### 6.2 Breve justificación del equipo requerido

- Justificar la infraestructura y equipos solicitados para la ejecución del proyecto e indicar el departamento en el cual se ubicará dicho equipamiento.

El Departamento de Metalurgia Extractiva (DEMEX) posee un equipamiento completo en sus laboratorios para el análisis físico químico y mineralógico de diversos tipos de muestras, incluido suelos. Dispone de infraestructura para el procesamiento de minerales, ensayos metalúrgicos, tratamiento de efluentes, análisis de suelos, plantas, etc.

El DEMEX cuenta con equipos necesarios para el desarrollo de este proyecto, así:

- Para análisis químico se tienen dos instrumentos de absorción atómica (Perkin Elmer AAnalyst 200, AAnalyst 300), un ICP-óptico, un equipo de fluorescencia de rayos X (S8 Tiger-Bruker) y digestor de microondas Ethos One Milestone
- Para análisis mineralógicos se tienen dos difractómetros de rayos X (D8 Advance- Bruker).
- Equipamiento completo para preparación de muestras, estufas, muflas, picnómetros, tamices, agitadores, material de vidrio y reactivos.

### 6.3 Fondos Adicionales

- *Otros fondos de otros organismos (si los hubiere)*

