

## Tratamiento de lodos generados por electrocoagulación de lixiviados del relleno sanitario El Huixmí

### Treatment of sludge generated by electrocoagulation of leachate from El Huixmí Sanitary landfill

OCAMPO-RODRÍGUEZ, Dulce Brigitte<sup>1</sup>, QUERO-GUTIÉRREZ, Edgar<sup>2</sup> y LEÓN-CASTELAZO, Yolanda<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Pachuca

<sup>2</sup>Centro Nacional de Innovación y Transferencia de Tecnología de Hidalgo

ID 1<sup>er</sup> Autor: Dulce Brigitte, Ocampo-Rodríguez / ORC ID: 0000-0002-9307-3641, Researcher ID Thomson: P-6586-2018, PubMed ID: dulce\_ocampo

ID 1<sup>er</sup> Coautor: Edgar, Quero-Gutiérrez / ORC ID: 0000-0001-6071-4273, Researcher ID Thomson: P-7224-2018, PubMed ID: edgarq

ID 2<sup>do</sup> Coautor: Yolanda, León-Castelazo / ORC ID: 0000-0001-5139-8803, Researcher ID Thomson: P-6775-2018, arXiv Autor ID: yola-37

Recibido: Septiembre 18, 2018; Aceptado: Noviembre 27, 2018

#### Resumen

En los rellenos sanitarios se recuperan lixiviados que constituyen una fuente importante de contaminación que podría filtrarse por el subsuelo y llegar a los mantos freáticos. Un método favorable para tratar estos lixiviados es la electrocoagulación, en donde se precipitan elementos reducidos en forma de lodos, los cuales al ser depurados pueden utilizarse en actividades agrícolas. El objetivo de esta investigación fue proponer un tratamiento de los lodos formados al tratar lixiviados del relleno sanitario El Huixmí ubicado en el municipio de Pachuca de Soto, Hidalgo; con el fin de estabailizarlos y para su uso posterior. La investigación de campo realizada fue de tipo analítico y observacional. Las determinaciones y los análisis del lixiviado se efectuaron antes y después de la electrocoagulación, en el laboratorio de suelos del Centro Nacional de Innovación y Transferencia de Tecnología de Hidalgo. Los resultados obtenidos muestran que durante el proceso de electrocoagulación aumentó la concentración de algunos elementos importantes y mínimo de contaminantes, cumpliendo en ese caso con la parte correspondiente de la norma NOM-004-SEMARNAT-2002. Para el uso de los lodos obtenidos en suelos agrícolas se recomienda la eliminación de sodio por intercambio iónico y la adición de micorrizas permitiendo la absorción de fósforo.

**Relleno Sanitario, Lixiviados, Electrocoagulación, Lodos.**

#### Abstract

In landfills are recovered leached that constitute an important source of pollution that could seep through the subsoil and reach the groundwater. A favorable method to treat these leachates is electrocoagulation, where small elements are precipitated in sludge form, which when purified can be used in agricultural activities. The objective of this research was to propose a treatment of the sludge formed when treating leachates from the El Huixmí landfill located in the municipality of Pachuca de Soto, Hidalgo; in order to standardize them and for later use. The field research carried out was analytical and observational. The determinations and the leachate analyzes were carried out before and after the electrocoagulation, in the soil laboratory of the Centro Nacional de Innovación y Transferencia de Tecnología de Hidalgo]. The results obtained show that during the electrocoagulation process the concentration of some important elements and minimum of contaminants increased, fulfilling in that case the corresponding part of the norm NOM-004-SEMARNAT-2002. For the use of the sludge obtained in agricultural soils, the elimination of sodium by ion exchange and the addition of mycorrhizae allowing the absorption of phosphorus are recommended.

**Sanitary Landfill, Leachate, Electrocoagulation, Sludge**

**Citación:** OCAMPO-RODRÍGUEZ, Dulce Brigitte, QUERO-GUTIÉRREZ, Edgar y LEÓN-CASTELAZO, Yolanda. Tratamiento de lodos generados por electrocoagulación de lixiviados del relleno sanitario El Huixmí. Revista de Tecnologías en Procesos Industriales. 2018, 2-5: 1-6

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: bri20rodriguez@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

Los rellenos sanitarios, son una gran concentración de diversos materiales, de sólidos a líquidos y con una composición química diversa desde elementos (hierro, cobre y aluminio, entre otros) a moléculas (proteínas, grasas, antibióticos), con un entorno proporcionado por agua, gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{SH}_2$ ) y biota diversa que se desarrolla en ambientes con baja demanda de oxígeno. Este complejo de concentrados, a través de su interacción puede generar materiales, desde tóxicos a tener un alto uso en diferentes áreas productivas como la biotecnología, la agricultura y la industria.

Un producto que se puede recuperar durante un largo tiempo en los rellenos sanitarios es el líquido que se drena en la parte inferior del relleno, el cual se denomina lixiviado.

Siendo los lixiviados una fuente de contaminación, su tratamiento con electrocoagulación permite una solución favorable; sin embargo, en el uso de esta técnica se producen lodos cuyas características y posibilidades de aprovechamiento no se han estudiado.

Los lodos deben cumplir con límites máximos permisibles de contaminantes para su posterior aprovechamiento y disposición final, regulados por la NOM-004-SEMARNAT-2002. Por tanto, es necesario caracterizar el lodo generado y definir el tratamiento adecuado para su utilización.

## Marco Referencial

En la búsqueda de estrategias para un mejor aprovechamiento del agua y a su vez corregir el deterioro ambiental provocado por los efluentes líquidos y su tratamiento, se han hecho estudios proponiendo mejoras a los procesos de tratamiento.

Una técnica propuesta y ya utilizada es la electrocoagulación, al respecto Arango (2005) y Giraldo (2007); entre otros autores exponen los beneficios y el diseño de las celdas. Con respecto a los lodos generados en este proceso, se han realizado también estudios que muestran los beneficios de su tratamiento, como lo indica Macías (2013).

Por su parte Cardoso (2002) muestra los resultados del tratamiento de lodos y su aplicación posterior en suelos agrícolas.

En el caso de lixiviados de los rellenos sanitarios se tienen pocos estudios documentados. La aplicación de la electrocoagulación para su tratamiento ha sido analizada y mejorada para algunos casos específicos (Giraldo, 2001), (Novelo, 2009), (Mauricio, 2015), (Huamán, 2016), (Guevara, et al, 2014),

Sin embargo, sobre el tratamiento y posterior aprovechamiento de los lodos provenientes del tratamiento de lixiviados, hacen falta estudios específicos; se requieren análisis y propuestas definidas en el lugar, caracterizando la problemática del tipo de lodos y generando propuestas de solución.

## Marco teórico

Un relleno sanitario incluye una fosa con una base revestida donde se entierran los desechos en capas, se compactan y finalmente se cubren. Después de muchos años la se llena y muy probablemente comienzan a filtrarse productos tóxicos desde ellos. (Conant y Fadem, 2011)

Los lixivados provienen de un proceso físico de traslado de materia que sucede cuando un solvente líquido traspasa un sólido, originando de esta manera la elusión de algún componente soluble en el sólido también conocido como lixiviación (General, sf.).

Los lixivados contienen todas las características de contaminantes, como alto contenido de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, y presencia de sustancias tóxicas como metales pesados (Giraldo, 2001). Sus características dependen fundamentalmente de las características del residuo depositado, de la meteorología del lugar, del modo de operación, de la edad del vertedero, de las características físicas del residuo sólido, del grado de estabilización y del contenido de humedad.

Su color varía entre 3000 y 15000 unidades de color (UC), en tonos que van del café-pardo-grisáceo cuando están frescos, hasta un color negro-viscoso cuando envejecen.

Sus olores altamente fétidos y sus características fisicoquímicas fuertemente variables en cantidad y en calidad, hacen que el lixiviado se clasifique como uno de los desechos más contaminantes (Novelo, 2009).

**Electrocoagulación y obtención de lodos.** La electrocoagulación, utilizada en el tratamiento de aguas residuales utilizando una corriente eléctrica a través de electrodos de hierro o aluminio, generando de forma electroquímica iones coagulantes en el ánodo que desestabilizan a los contaminantes. (Arango, 2005).

Una de las problemáticas en México la falta de recursos para el tratamiento de lodos provoca que sean descargados a drenajes e presas, terrenos o en las fuentes de suministro. (Castrejón, y otros, 2000)

Sin embargo los valores presentados de metales pesados y micronutrientes en los biosólidos se clasifican como excelentes de acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002. (Santoyo, y otros, 2010)

**Características de los suelos.** Las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos dependen de la superficie específica de las partículas que lo constituyen, más que del tipo de minerales presentes, y las reacciones que tienen importancia agrícola se producen en la superficie de las partículas o en las interfases (Agua, Lázaro, Saucedo y Namuche, 2010).

**La acidez de los suelos.** El pH es una variable necesaria para entender los procesos químicos, la génesis del suelo, fertilidad y disponibilidad de nutrientes para la planta. Y es utilizada junto con la capacidad neutralizante de acidez y la capacidad amortiguadora para caracterizar la acidez del suelo. (Zapata, s.f.).

El pH del suelo está influenciado por la composición de los cationes intercambiables y la concentración de las sales solubles y presencia o ausencia de yeso y carbonatos. (Agua, Lázaro, Saucedo y Namuche, 2010),

Los suelos se califican como se muestra en la Tabla 1.

pH	Calificación
<3.5	Ultra ácido
3.5-4.4	Extremadamente ácido
4.5-5.0	Muy fuertemente ácido
5.1-5.5	Fuertemente ácido
5.6-6.0	Moderadamente ácido
6.1-6.5	Ligeramente ácido
6.6-7.3	Neutro
7.4-7.8	Ligeramente alcalino
7.9-8.4	Moderadamente alcalino
8.5-9.0	Fuertemente alcalino
>9.0	Muy fuertemente alcalino

**Tabla 1** Calificación de suelos de acuerdo a su pH

Un pH de 8.5 o mayor, indica un porcentaje de sodio intercambiable del 15 o mayor y la presencia de carbonatos, con un pH menor de 7.5 casi nunca contiene carbonatos y si es menor de 7 contiene hidrógeno intercambiable. (Agua, Lázaro, Saucedo y Namuche, 2010).

Entre las causas generadoras de la acidez del suelo se encuentra el lavado de bases intercambiables por la lluvia, la descomposición de la materia orgánica, oxidación de azufre, nitrificación de amonio y la liberación de H<sup>+</sup> por las raíces cuando absorben Ca, Mg, y K (Sadeghian, 2016)

Cuando el suelo es ácido, se pueden presentar deficiencias en los minerales fósforo, calcio, magnesio, molibdeno y boro (Agromática, s.f.)

Cuando el pH es menor de 5.5 el suelo tiene problemas asociados a toxicidad de aluminio, fijación de fósforo, deficiencia de calcio y magnesio este evento reduce la absorción de los nutrientes y el desarrollo de la parte aérea de la planta (Sadeghian, 2016).

Cuando el pH es mayor de 6.5, los problemas están asociados a deficiencia de micro elementos en las plantas, si el p es más alto se genera problemas de deterioro físico del suelo. (Zapata, s.f.)

**Salinidad del suelo.** El contenido de sales en suelos agrícolas está relacionado con el material de origen (salinización primaria), también puede ser consecuencia de un cambio del régimen hídrico del medio y la transformación en zona de regadío (salinización secundaria). (Agua, Lázaro, Saucedo y Namuche, 2010).

La salinidad puede ocasionar una disminución en la disponibilidad de agua para las plantas, baja nacencia de semillas, problemas de toxicidad, bajo rendimiento en cultivos.

**Aplicación de lodos.** Los lodos provenientes de plantas de tratamiento pueden tener diversos beneficios, pueden utilizarse como fuente de energía o mejoradores de suelo en la agricultura dependiendo del tratamiento que se le den para cumplir con la la NOM-004-SEMARNAT-2002 en donde se especifican los límites máximos permitidos de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. (Macias, 2013)

**Uso en la agricultura.** La aplicación de lodos o biosólidos en el suelo es mejorar la cantidad de nutrientes, la renovación de materia orgánica, las características de este como es la textura y capacidad de absorción de agua, proporcionando un entorno favorable para el crecimiento de las raíces. (Macias, 2013).

## Metodología

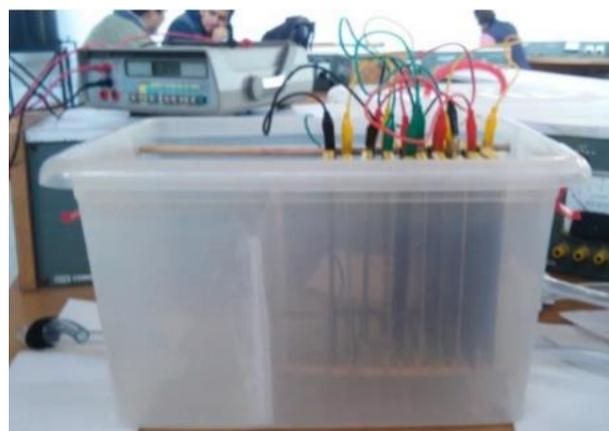
El relleno sanitario el Huixmi cuenta con 5 celdas, que cuentan con una fosa de medidas aproximadas de 15m x 10m x 5m, con un volumen de 750m<sup>3</sup> cada una, destinada para el almacenamiento de lixiviados

Los lixiviados del Huixmi se concentran en la fosa número 5. Su tratamiento es una recirculación a las celdas utilizando una motobomba de 4", esta actividad se realiza en un periodo de cuatro meses y antes de las épocas de lluvia; sin embargo, regresan a la fosa con una mayor cantidad de elementos, bacterias y metales, por tanto resulta un tratamiento no efectivo.

De esta fosa número 5 se tomaron muestras significativas de lixiviados para su pretratamiento y obtención de lodos.

1. Inicialmente se determinaron sus características físico-químicas y su composición.
2. Se llevó a cabo después la electrocoagulación en una celda diseñada para 5 litros de lixiviado (Figura 1).

Se consideró una distribución volumétrica que contempla tres regiones: una región superior para el depósito de los lodos de flotación o lodos menos densos y las espumas (región de flotación), una región media de reacciones electroquímicas (zona de reacción) en donde se encuentran los electrodos y una región inferior (zona de sedimentación), dónde se depositan los lodos más densos. Se utilizaron 10 electrodos monopolares que de hierro y aluminio (ánodo) de 17cm x 15cm dispuestos en paralelo con separación de 2 cm y conectados a una fuente de 30 volts de corriente directa.



**Figura 1** Celda para electrocoagulación de lixiviados

3. Después de la electrocoagulación se obtuvieron los lodos por sedimentación, decantación del lixiviado, filtración y secado al sol.
4. Se estudiaron los lodos mediante un análisis físico químico, un análisis por espectrometría de fluorescencia de rayos X y un mapeo en un microscopio electrónico de barrido.
5. Conocidas las características de los lodos, se determinó la posibilidad de su tratamiento y aprovechamiento en uso agrícola.

## Resultados

Las características fisicoquímicas de los lixiviados se muestran en la Tabla 2.

Se consideran las variables: pH (concentración de protones H<sup>+</sup>), ORP (potencial de óxido reducción), rH (índice redox), C.E. (conductividad eléctrica), TDS (sólidos totales solubles) y SD (sólidos disueltos).

Parámetro	Muestra
	Lixiviado
pH	8.31
(ORP[mV])	-162.90
rH	17.86
EC[μS/cm]	18,210.00
EC Abs.[μS/cm]	16,560.00
TDS [ppt]	9,106.00
SD [ppm]	11,654.40

**Tabla 2** Características fisicoquímicas del lixiviado

La concentración de los elementos principales de los lixiviados se muestra en la Tabla 3.

Elemento	Concentración mg/lit
Carbono (C)	3,802.05
Oxígeno (O)	4,724.69
Sodio (Na)	923.03
Magnesio (Mg)	230.76
Silicio (Si)	20.98
Azufre (S)	59.43
Cloro (Cl)	1,184.09
Potasio (K)	743.94

**Tabla 3** Concentración de elementos en el lixiviado

Los resultados del análisis fisicoquímico, y químico de los lodos se observan en las tablas 4 y 5.

Durante la caracterización del lodo obtenido se realizó un mapeo con el microscopio de barrido en el cual se encontró una molécula formada principalmente de carbón, sodio, silicio, magnesio, aluminio y oxígeno, se puede por tanto considerar que se trata de una arcilla, sin embargo al contener sodio y aluminio no se recomienda para su uso agrícola.

Parámetro	Muestra
	Lodo
pH	8.45
(ORP[mV])	-243.60
rH	15.45
EC[μS/cm]	17,270.00
EC Abs.[μS/cm]	15,450.00
TDS [ppt]	8,638.00
SD [ppm]	11,052.80

**Tabla 4** Valores fisicoquímicos del lodo

Elemento	Concentración mg/Kg
Carbono (C)	178,866.67
Oxígeno (O)	478,866.67
Sodio (Na)	16,624.70
Magnesio (Mg)	35,119.60
Aluminio (Al)	133,707.30
Silicio (Si)	15,958.8
Fósforo (P)	3,783.2
Azufre (S)	5,464.5
Cloro (Cl)	18,404.60
Potasio (K)	14,190.30
Vanadio (V)	50.5
Hierro (Fe)	210,829.70
Cobalto (Co)	90.3
Bromo (Br)	90.2
Zirconio (Zr)	349.80
Bario (Ba)	90.2

**Tabla 5** Concentración de elementos en el lodo

La solución propuesta es la eliminación de sodio por intercambio iónico, utilizando un corrector de salinidad a base de calcio y la adición de micorrizas.

## Conclusiones

Con los resultados obtenidos en la caracterización de los lodos, se observa que éstos cumplen con la NOM-004-SEMARNAT-2002, en su apartado de metales pesados, el lodo presenta concentraciones de Zinc 237 mg/kg, por lo que no excede con los límites máximos establecidos del Zinc 2,800 mg/kg por lo que se clasifica como un lodo excelente y se puede aprovechar en usos agrícolas.

De acuerdo a la bibliografía el contenido de sales en los suelos puede presentar problemas con las plantas o cultivos sensibles a la salinidad se propone el intercambio iónico de iones de sodio por iones de calcio lo cual mejorará la capacidad humectante del suelo.

El contenido de aluminio en los lodos es un efecto del pretratamiento de la electrocoagulación, este elemento provoca toxicidad teniendo como resultado una disminución en el crecimiento de las raíces, se propone adicionar micorrizas para permitir la absorción de fósforo en las plantas.

Estas adiciones a los lodos permitirán que puedan ser aplicados en suelos ácidos y posteriormente su uso en cultivos como tomate, calabacín, rábano y remolacha, entre otros.

## Referencias

- Agromática. (s.f.). Obtenido de <https://www.agromatica.es/como-cambiar-el-ph-del-suelo/>
- Agua, I., Lázaro, P., Saucedo, H. y Namuche, R. (2010). Salinidad del Suelo. Nayarit: Semanart.
- Arango, Á. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Lasallista de Investigación* vol. 2 núm 1, 49-56.
- Cardoso, L. y Ramírez, E. Aplicación en un suelo agrícola de lodos residuales tratados. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Octubre, 2002. Obtenido de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/iii-009.pdf>
- Conant, J, y Fadem, P. (2011). Desechos sólidos: cómo convertir un riesgo para la salud en un recurso. *Guía comunitaria para la salud ambiental*, 412-415.
- General, L. (sf.). Concepto definicion. Obtenido de <http://conceptodefinicion.de/lixiviacion/>
- Giraldo, E. (2001). Tratamiento de lixiviados de rellenos Avances Recientes. *Revista de ingeniería*, 44-55.
- Giraldo, G. F. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Universidad EAFIT Vol 43 No 147*, 56-66.
- Guevara, A., Guanoluisa, L. y De la Torre, E. Diseño de Sistemas de Tratamiento de Lixiviados del Relleno Sanitario El Inga mediante Electrocoagulación y Fitorremediación. *Revista EPN*, Vol. 34, No. 1. Octubre 2014. Obtenido de: <https://www.revistapolitecnica.epn.edu.ec/images/revista/volumen34/tomo1/DisenodeSistemasdeTratamientodeLixiviadosdelRellenoSanitario.pdf>
- Huamán, Y. (2016). Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala de laboratorio para el tratamiento del lixiviado del botadero de la mejorada El Tambo. *Revistas de Investigación. Universidad Alas Peruanas*. Obtenido de: <http://repositorio.uap.edu.pe/handle/uap/5852>
- Macías, J. G. (08 de Julio de 2013 ). Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales ¿problemas o recurso? Jalisco, Guadalajara: [http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc\\_ingreso\\_gualbert\\_o\\_limon\\_trabajo\\_de\\_ingreso.pdf](http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc_ingreso_gualbert_o_limon_trabajo_de_ingreso.pdf).
- Méndez, R., Castillo E., Sauri, M., Quintal C., Giacomán, G. y Jiménez, B. Comparación de cuatro tratamientos fisicoquímicos de lixiviados. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 25 (3) 133-145, 2009. Mérida Yucatán, México. Obtenido de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v25n3/v25n3a2.pdf>
- Mauricio C. M. (2015). Eficiencia de la electrocoagulación para la reducción de los niveles de DBO5 y DQO en los lixiviados generados en el relleno sanitario “El Zapalla” Repositorio Digital Institucional. Universidad César Vallejo. Obtenido de: <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/UCV/17816>
- Sadeghian, S. (2016). La acidez del suelo, una limitante común para la producción de café. *Ciencia, Tecnología e innovación para la caficultura colombiana*. 466-478.
- Zapata, R. (s.f.). Química de la Acidez del Suelo. En Z. H. Raúl. Obtenido de <http://bdigital.unal.edu.co/1735/7/9583367125.7.pdf>